

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Сборник материалов

**X Всероссийской научно-технической конференции,
посвященной 100-летию со дня рождения
Заслуженного деятеля науки и техники
Российской Федерации В.П. Миловзорова
25-28 ноября 2025 г.**

ТОМ 1

Рязань 2025

УДК 004

Актуальные проблемы современной науки и производства [текст]: сборник материалов X Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации В.П. Миловзорова, Рязань, 25-28 ноября 2025 г.: в 2 томах. Том 1 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т им. В.Ф. Уткина, 2025 - 592 с.

ISBN 978-5-7722-0439-9 (т.1)

ISBN 978-5-7722-0440-5 (т.2)

Освещаются вопросы разработки телекоммуникационной аппаратуры и сетей, обработки радиолокационных сигналов, оптических каналов связи, разработки и моделирования радиоэлектронных устройств различного назначения, алгоритмического обеспечения систем обработки изображений и распознавания образов, математического моделирования систем управления, организации работы информационно-вычислительных сетей, разработки информационных и биомедицинских систем и приборов, систем менеджмента качества, управления технологическими процессами, систем автоматизированного проектирования, микро- и нанoeлектроники, разработки алгоритмического и программного обеспечения информационно-вычислительных систем, комплекс вопросов, касающихся экономики, финансов, менеджмента, государственного, муниципального и корпоративного управления.

Авторская позиция и стилистические особенности публикаций полностью сохранены.

ISBN 978-5-7722-0439-9 (т.1)

ISBN 978-5-7722-0440-5 (т.2)

© Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 2025

СЕКЦИЯ "РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА"

УДК 537.86+620.3+621.37+621.396.96; ГРНТИ 47.49.02

О НЕКОТОРЫХ ВЫВОДАХ ИЗ НАШИХ РАБОТ (2025 г.) ПО ФРАКТАЛЬНОЙ ТЕМАТИКЕ В ОБЛАСТИ РАДИОСИСТЕМ, УСТРОЙСТВ, ДАТЧИКОВ, МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ, РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, «УМНОЙ» РАДИОСРЕДЫ И МАТЕМАТИКИ ДРОБНЫХ ОПЕРАТОРОВ **А.А. Потапов**

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН;
Совместная китайско-российская лаборатория информационных
технологий и фрактальной обработки сигналов, Университет Цзинань,
Россия, Москва; Китай, Гуанчжоу, potapov@cplire.ru*

Аннотация. В основе работы лежит авторская статья по истории зарождения и становления фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники в СССР и России в ИРЭ АН СССР / ИРЭ РАН, вышедшая в свет в сентябре 2025 г. к 90-летию академика Ю. В. Гуляева. Цель данной работы - познакомить читателя с рядом нестандартных идей, отражающих новые концепции современной радиофизики, радиотехники, радиолокации, искусственного интеллекта, фотоники и т.д. Изложение ведется с позиций авторской парадигмы «Многопрофильное радио».

Ключевые слова: многопрофильное радио, фракталы, скейлинг, дробные операторы, радиофизика, радиолокация, радиотехника, фотоника, нестационарные процессы.

ABOUT SOME CONCLUSIONS FROM OUR WORKS (2025) ON FRACTAL THEMES IN THE FIELD OF RADIO SYSTEMS, DEVICES, SENSORS, METASURFACES, RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACES, "SMART" RADIO ENVIRONMENT AND MATHEMATICS OF FRACTIONAL OPERATORS **A.A. Potapov**

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS;
JNU-IRE RAS Joint Laboratory of Information Technology and
Fractal Processing of Signals, Jinan University,
Russian Federation, Moscow; People's Republic of China, Guangzhou,
potapov@cplire.ru*

Abstract. The work is based on the author's article on the history of the birth and development of fractal radiophysics and fractal radio

electronics in the USSR and Russia at the Institute of Radioengineering and Electronics of the USSR Academy of Sciences / IRE RAS, which was published in September 2025 on the occasion of the 90th anniversary of Academician Yu. V. Gulyaev. The purpose of this work is to introduce the reader to a number of non-standard ideas that reflect new concepts in modern radiophysics, radio engineering, radar, artificial intelligence, photonics, etc. The presentation is based on the author's paradigm of "Multi-profile Radio".

Keywords: multi-profile radio, fractals, scaling, fractional operators, radio physics, radar, radio engineering, photonics, non-stationary processes.

Введение

Для автора год 2025 оказался плодотворным в смысле научных конференций, докладов и статей при формировании более четкой дорожной карты по парадигме «Многопрофильное радио» и некоторых актуальных вопросов физики и математики фракталов и дробных операторов [1 – 9]. В преддверии своего 75-летия автор решил на основе этих работ, вышедших в течение 2025 года в российских и зарубежных издательствах [1 – 9], а также, на основе результатов недавней научной поездки в Китай (октябрь-ноябрь 2025 г.), кратко рассмотреть некоторые следствия из них и сделать выводы, которые будут достаточно интересны для читателя, интересующегося новыми информационными технологиями, и развиваются далее в спецвыпуске [10].

Основная часть: о трех статьях

Так сложилось во времени, что три статьи, которые автор особенно выделяет, вышли в период август – сентябрь 2025 года [6, 7, 9]. Начнем с математики дробных операторов [7] применительно к нестационарным процессам, а далее по порядку, инициированным названием настоящей работы, и содержанием ее аннотации.

Краевая задача для дифференциального уравнения с дробной производной Римана - Лиувилля переменного порядка и нелокальными граничными условиями

Статья [7] поступила 09.04.2025 и была опубликована 26.09.2025 в ведущем математическом международном журнале «ERA: Electronic Research Archive» (The American Institute of Mathematical Sciences and American Mathematical Society), открытый доступ, квартиль Q1.

В настоящее время для описания различных нелокальных процессов в физике, химии, биологии, экономике и т.п. используют дифференциальные уравнения (ДУ) с производными дробного порядка. Большинство авторов ранее опубликованных работ рассматривали краевые задачи для нелинейного ДУ с дробной производной Римана-Лиувилля с *локальными* граничными условиями, что, на наш взгляд, является ошибочным подходом. Локальные граничные условия на границе не определяют однозначно значения постоянных коэффициентов в решении при построении функции Грина.

Многие динамические системы демонстрируют фрактальное поведение, которое может меняться во времени или пространстве. Это означает, что дробные ДУ *переменного порядка* являются реалистичным вариантом для описания таких процессов. Дробные производные переменного порядка в настоящее время используются для математического моделирования в различных областях. ДУ с дробной производной переменного порядка обеспечивают лучшее описание нелокальных явлений с изменяющейся динамикой, то есть процессов, в которых взаимодействие объектов или систем не ограничивается локальными границами, а распространяется на большие расстояния, при этом динамика может меняться со временем.

В статье [7] исследуется вопрос о существовании по крайней мере двух положительных решений нелинейного ДУ с дробной производной Римана - Лиувилля переменного порядка и нелокальными граничными условиями. В случае дробной производной переменного порядка решения обладают свойством непрерывного перехода между производными целых и дробных порядков. Это может представлять интерес для сред, свойства которых имеют явную зависимость от времени. Физически это может быть обусловлено перестраивающим внешним воздействием (электромагнитным или иным) с возможной последующей деградацией индуцированных свойств. Чтобы преобразовать исходное уравнение в интегральное, строится функция Грина и выводятся условия ограниченности для функции Грина. Доказывается теорема о существовании по крайней мере двух положительных решений задачи. Приводится пример, демонстрирующий существование двух положительных решений. Рассмотренный в работе подход заключается в определении оператора, обеспечивающего плавный непрерывный переход всех порядков дифференцирования между целыми, что имеет большое значение с точки зрения физического моделирования нестационарных процессов в сложных динамических системах.

Имитационное моделирование формирования портретов сложных радиолокационных объектов

Статья [6] поступила 03.01.2024 и была принята к публикации 18.02.2025. Актуальность работ [1, 6, 8] определяется недостаточной полнотой информации о сложных радиолокационных объектах (РЛО) со сниженной радиолокационной заметностью (РЛЗ) для их достоверного обнаружения, распознавания и перехвата в условиях сложной помеховой обстановки. Цель работ [1, 6] – разработка имитационной модели формирования радиолокационных портретов сложных РЛО со сниженной РЛЗ с учетом их пространственной конфигурации, используемых в конструкции радиопоглощающих материалов и покрытий, эффектов зеркально-диффузного рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) и вторичной доплеровской модуляции отраженного сигнала, позволяющая исследовать возможности и устойчивые признаки обнаружения и распознавания сложных РЛО, в том числе и фрактальных, в динамике их применения.

Получены оценки эффективной площади рассеяния, оценки частотных составляющих спектра вторичной модуляции отраженного сигнала, радиолокационные портреты элементарных и сложных радиолокационных объектов, в том числе, выполненных по технологии Stealth, а также радиолокационные данные, необходимые для реализации алгоритма обработки сигнала методом инверсного синтезирования апертуры антенны.

Зарождение и становление фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники в СССР и России

Объемная статья в 29 стр. [9] к 90-летию академика Ю. В. Гуляева поступила 17.03.2025, принята к публикации 12.05.2025, опубликована онлайн 19.06.2025 и опубликована 30.09.2025 в журнале «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», открытый доступ, квартиль Q3, Белый список: 2 уровень. Основанный в 1991 году журнал «Известия вузов. ПНД» - старейшее российское специализированное периодическое издание по нелинейной динамике (синергетике), теории хаоса и их приложениям. Главный редактор журнала - академик РАН, член президиума РАН Ю. В. Гуляев.

Далее, просто цитаты.

Из анонимных рецензий: «... Рассматриваемый материал является профессионально написанным историко-научным обзором по различным аспектам актуальной тематики «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника» - по истории ее зарождения в ИРЭ РАН, развития, научно-прикладной и прогностической значимости. Уникальностью (то есть мощным дополнительным аргументом в пользу опубликования) статьи является то, что она написана основоположником данного научного направления, что и отражает продемонстрированное глубокое погружение в тему. Направление исследований представляет огромную научную ценность для развития теории и практики моделирования (генерирования) и анализа реальных процессов физической и иной природы. Рекомендую статью для безусловного опубликования в журнале «Известия вузов. ПНД»: нетрудно предвидеть, что она станет одной из лучших статей журнала ...».

Из текста опубликованной статьи [9]:

«... я пришел в ИРЭ АН СССР 3 сентября 1979 г. и стремился превратить свои мечты и идеи о фракталах в радиотехнике и радиофизике.» (с. 749);

«... Исследования проводятся в рамках фундаментального научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 г. по настоящее время на основе работ автора с его учениками (первым в СССР и России). ... Без преувеличения можно сказать, что в настоящее время основным институтом в России, который на постоянной основе проводит фундаментальные исследования по фракталам и их применению в науке и технике, является ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.» (с. 750);

«... В августе 1979 г. мне позвонил из отдела кадров ИРЭ АН СССР Василий Сергеевич Козлов и сказал, что в Институте есть свободная ставка инженера. Я немедленно согласился и принялся оформлять документы. Единственная загвоздка была в том, что я тогда был ведущим конструктором Института металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, мой прибор должен был поехать за границу на международную выставку вместе со мной, моя зарплата в несколько раз превышала предлагаемую, у меня уже родился первый сын, и мы с супругой стояли в очереди на кооперативную квартиру. Но была молодость - только 28 лет, и время смелых решений. Сейчас мы с женой вспоминаем то время наших диспутов с улыбкой... Так я и оказался в ИРЭ

АН СССР (о чем мечтал со школы) на должности инженера, а потом младшего научного сотрудника, и с 2002 г. по настоящее время - главного научного сотрудника.» (с. 751);

«... Хочу отметить, что все вопросы, связанные с применениями теории фракталов, скейлинговых соотношений и дробных операторов в радиотехнике и радиофизике, также очень интересовали академика АН СССР, директора Института Владимира Александровича Котельникова. На своих встречах и обсуждении данных вопросов с автором Владимир Александрович отмечал большое значение этих направлений для развития фундаментальных и прикладных наук, а также значительные трудности с осуществлением их на практике и пониманием/восприятием их специалистами, воспитанными на традиционных математических и радиотехнических курсах.» (с. 751);

«... Член-корреспондент АН СССР Л. Д. Бахрах на заседании диссертационного совета в МФТИ (кафедра академика АН СССР Б. В. Бункина) в 1989 г. предложил переквалифицировать мою диссертацию по спецтеме с кандидатской на докторскую. В ответном слове я горячо поблагодарил диссертационный совет и сказал, что хочу защитить открытую докторскую, что и успешно произошло в октябре 1994 г. в ИРЭ РАН. ... Именно Юрий Васильевич Гуляев гораздо ранее при мне позвонил Б. В. Бункину, познакомил меня с ним и подробно рассказал ему обо мне и моей научной деятельности. Так произошла моя встреча с академиком Б. В. Бункиным и со знаменитым ЦКБ «Алмаз», с которым я активно проработал несколько десятков лет.» (с. 751);

«... Дважды по линии МНТЦ (2000 и 2005 гг.) автор выезжал в США в научные командировки (города Хантсвилл, Франклин, Вашингтон, Атланта, Нью-Йорк) с чтением лекций по фрактальным технологиям в радиолокации и радиотехнике. Американскими специалистами (Центр Космической Плазмы и Аэроисследований, г. Хантсвилл, США) в официальном письме к академику РАН Ю. В. Гуляеву от 14.12.2005 г. был отмечен мировой приоритет работ автора по применению теории фракталов в информационных и радиолокационных технологиях. ... В частности, отмечено, что «... Семинары были крайне интересны и подтвердили высокую научную квалификацию доктора А. Потапова. Радиолокационные технологии, представленные доктором А. Потаповым, основаны на теории фракталов и являются новыми. Важность этих исследований для международного сообщества специалистов и ученых неоспорима». ... Тогда же состоялась встреча автора с основателем фрактальной геометрии Б. Мандельбротом у не-

го дома в США, когда он принял и одобрил определение фракталов, введенное А. А. Потаповым, и его работы. ... Монография автора внесена Мандельбротом в его знаменитый международный список лучших книг по фракталам. С тех пор в Москве у автора хранятся 6 томов избранных работ Б. Мандельброта с его воодушевляющими автографами.» (с. 753-754);

«... Тщательный библиографический анализ доказал наш абсолютный приоритет по всем «фрактальным» направлениям (в радиофизике и радиоэлектронике) в СССР и в России, а также в мировой науке. Все просто и с чистого листа: не было до моих работ - стало после.» (с. 759);

«... Замечу, что именно на этом радаре автор впервые исследовал фрактальные свойства кодовых М-последовательностей с периодом до $2^{20} - 1$. Квантование входного сигнала в радаре происходило в стохастической системе счисления. Сигнал, представленный таким кодом, проявляет свои фрактальные свойства. Подобно голограмме, любой фрагмент которой несет информацию о полном объекте, любой фрагмент стохастического кода содержит информацию об амплитуде квантуемого сигнала. Затем на этом модуле был реализован также впервые новый метод радиолокации на основе преобразования Радона. ... Вот это и есть на деле фрактальный инжиниринг с элементами философии инженерии (можно сказать, то время, а именно 80-е годы XX века, было для автора началом зарождения русской философии фрактальной инженерии)! Это был серьезный и передовой проект в великом СССР, а не какие-то элементарные «детские безделушки», которые изогнул и разместил на балконе в 1995 г. американский инженер!» (с. 766);

«... С большой благодарностью хочу сказать еще раз, что без благожелательной поддержки академиков Б. В. Бункина, В. А. Котельникова, Ю. В. Гуляева моя работа в области теории фракталов и их широкого применения в радиофизике, радиотехнике, радиолокации (в общем, всей радиоэлектронике), а также в цифровой обработке информации не была бы столь эффективной, систематической и плодотворной за более чем 45 лет работы в ИРЭ АН СССР (ИРЭ РАН).» (с. 769);

«... В своих работах автор более чем за 45 лет, практически «с нуля», преодолевая трудности идущих первыми, заложил фундаментальные основы того, что будет применено в будущем. ... Фрактальная геометрия - громадная и гениальная заслуга Б. Мандельброта

(1924–2010 гг.). Но ее радиофизическое / радиотехническое и практическое воплощение - это исключительная заслуга известной в мире Российской научной школы фрактальных методов под руководством проф. А. А. Потапова (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН).» (с. 770).

Заканчивая этот раздел статьи, хочу добавить, что за более чем 45 лет работы в ИРЭ РАН, мне было часто просто смешно наблюдать как многие самонадеянные «первооткрыватели» (и их было сверхдостоточно...), кричали и писали о своих «приоритетах» и «открытиях» в области применения текстур, фракталов и мультифракталов..., но им обычно катастрофически не хватает знаний и еще кое-чего, и т.д. и т.п. Для вдумчивых читателей и исследователей еще раз отмечаю – статьи [7, 9] находятся в открытом доступе, читайте и изучайте.

Авторская парадигма «Многопрофильное радио»

Парадигма «Multi-profile radio - Многопрофильного радио» была первоначально предложена автором в 2022 г., окончательно сформирована им в начале мая 2024 г. - рисунок 1. Этому предшествовал цикл наших работ в России и Китае в 2022–2024 годы по возможности и необходимости объединения дорожных карт «Фракталы», «Фотоника» и «Искусственный интеллект» для сквозных технологий (см. например [2 – 5, 7 – 10]).

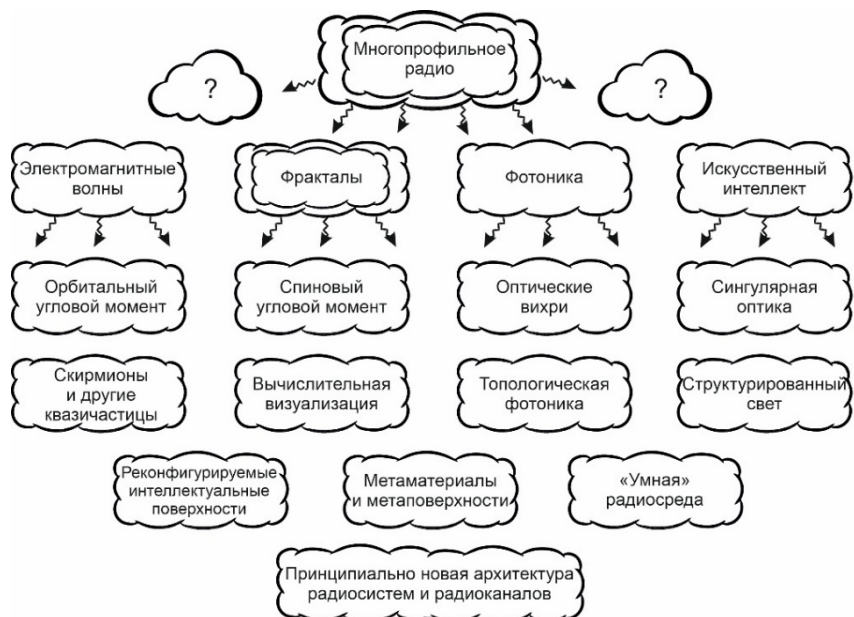


Рис. 1. Авторская парадигма «Многопрофильное радио» как фреймворк новых идей [9]

Авторская парадигма основана на принципиально новом подходе к совместному использованию физических свойств ЭМВ в широком диапазоне частот и универсальности топологии фрактальных множеств. Замысел нашего научного исследования состоял в современном приложении топологии и теории размерности в открытых множествах задач радиофизики и радиоэлектроники, вдохновленных современной физикой и фотоникой.

Статьи [1 - 10] охватывают отдельные составляющие функциональных рядов 3–5 на рисунке 1. Добавление новых сегментов в рисунок 1 не только возможно, но и крайне необходимо, о чем сказано выше во Введении. Отмечу, что ЭМВ, несущие орбитальный угловой момент, представляют большой интерес и открывают возможности для будущих прорывов в области радио. В работах [2, 3, 5, 8, 10] представлена современная картина развития исследований в области топологически нетривиальных спиновых текстур, таких как скирмионы. Оптические скирмионы представляют собой квазичастицы с нетривиальными топологическими фрактальными текстурами, которые обла-

дают значительным потенциалом в оптической обработке, передаче и хранении информации.

В [9, 10] размещен окончательный вариант таблицы физических свойств ЭМВ вкупе с фрактальной топологией и варианты их использования для «Многопрофильного радио», а также приведены НИИ и ВУЗы, с которыми работал и продолжает работать автор.

«Умная» или Интеллектуальная радиосреда и новая архитектура радиосистем и радиоканалов

В [2 – 5, 8 – 10] рассматриваются тенденции развития сквозных технологий на основе новых концепций обработки сигналов и полей в современных радиосистемах и преобразований частей пассивной беспроводной среды с помощью метаповерхностей (МП) и реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS) в настоящую интеллектуальную радиосреду (smart radio environment). Предлагая точный контроль над средой распространения, парадигма RIS жизненно важна для внедрения бесшовных, устойчивых и экономичных беспроводных приложений.

«Умная» или Интеллектуальная радиосреда - беспроводная среда, которая превращается в интеллектуальное реконфигурируемое пространство и играет активную роль в передаче и обработке информации, и делает более надежным обмен данными между передатчиками и приемниками. Концепция «умных» радиосред не ограничивается улучшением беспроводной связи, а направлена на создание по-настоящему распределенной интеллектуальной платформы беспроводной связи, зондирования и вычислений, которая соединяет физический и цифровой миры [2 – 5, 9, 10]. Конечная цель - принципиально новая архитектура радиосистем и радиоканалов. Реконфигурируемые интеллектуальные МП и RIS предлагают совершенно новый способ изменения свойств распространения ЭМВ и, таким образом, производного управления их отражением, преломлением и рассеянием.

Считается, что такие физические свойства оказывают фундаментальное влияние на современные интеллектуальные радиосистемы из-за возможности создания искусственной и управляемой среды распространения радиосигналов, которая больше не зависит от сложных методов кодирования, декодирования и других методов обработки сигналов. Реконфигурируемые интеллектуальные МП коренным образом изменят и упростят архитектуру приемно-передающих устройств радиосистем, преобразователей частоты, заменят антенные решетки с

фазовращателями и усилителями и т.д. Они могут напрямую генерировать модулированные сигналы с динамическими волновыми свойствами, что приводит к смене парадигмы для новых архитектур передачи информации.

Выводы

Применение созданных автором текстурных, фрактальных и мультифрактальных методов в современных радиосистемах / устройствах, информационных технологий на основе фракталов и метаповерхностей, а также моя парадигма «Многопрофильное радио» - неиссякаемый источник новых идей, публикаций и патентов в радиофизике и радиоэлектронике [1 – 10]. За пионерские разработки в области прорывных технологий и реализацию научных проектов по текстурам, фракталам и дробным операторам в радиофизике и радиоэлектронике профессор А. А. Потапов награжден 20-ю ведомственными медалями и несколькими именными премиями от ряда организаций. С октября 2025 г. А. А. Потапов - эксперт Международного Института передовых технологий в рамках «Один пояс, один путь» (Кунышань, Китай).

В 2006 г. А. А. Потапову присвоено звание «Почетный радист РФ».

Нашими работами фрактальные технологии становятся доступными, и это автор считает по праву своим достижением [8 – 10].

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИРЭ РАН, тема «Эфир-3».

Библиографический список

1. Гончаров С. А., Кузнецов В. А., Потапов А. А. Особенности применения имитационной модели формирования портретов сложных радиолокационных объектов // Сб. статей XIII Всерос. конф. “Необратимые процессы в природе и технике” (Москва, 28 - 30 января 2025 г.): в 2 т. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. Т. 1. С. 62–67. <https://press.bmstu.ru/catalog/item/8377/>
2. Потапов А. А. Вихревые электромагнитные волны с орбитальным угловым моментом и оптические скирмионы в контексте авторской парадигмы «Многопрофильное радио» // Сб. тр. VIII Междунар. науч.-техн. форума “Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025” (Рязань, 04 - 06 марта 2025 г.): В 10-и тт. / Под общ. ред. О. В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. Т. 1. С. 6–30.
3. Потапов А. А. Авторская парадигма «Многопрофильное радио»: разнообразие интерпретаций // Сб. тр. XXXI Междунар. НТК “Радиолокация, навигация, связь” (Воронеж, 15 - 17 апреля 2025 г.): В 6 тт. / Воронежский го-

сударственный университет; АО «Концерн “Созвездие”». - Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. Т. 1. С. 12–58. (*Пленарный доклад*).

4. Potapov Alexander A. Author's Conception of Fractal Elements, Detector, Sensors, Fractal Radio Devices (Fractal Metasurfaces, Fractal Reconfigurable Intelligent Surfaces), and Fractal Radio Systems // Program PIERS 2025 in Abu Dhabi “PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium also known as Progress in Electromagnetics Research Symp.” (May 4 – 8, 2025, Abu Dhabi, United Arab Emirates). - Cambridge, MA: Electromagnetics Academy, 2025. - <https://abdb2025.piers.org/preview.html?pid=241126051305>.

5. Potapov Alexander A. Multi-Profile Radio, Fractal Engineering, Artificial Intelligence and Smart Radio Environments: A New Approach Based on the Topology of Fractal Sets and Intelligent Meta surfaces // *Evolutions in Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 5. No. 5. EME.000623. 8 pp.

6. Потапов А. А., Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Имитационная модель формирования портретов сложных радиолокационных объектов со сниженной радиолокационной заметностью // *Радиотехника и электроника*. 2025. Т. 70. № 6. С. 564–582.

7. Potapov Alexander A., Beybalaev Vetlugin D. and Aliverdiev Abutrab A. On a boundary value problem for a nonlinear differential equation with a Riemann-Liouville fractional derivative of variable order and nonlocal boundary conditions // *ERA: Electronic Research Archive*. 2025. Vol. 33. No. 9. P. 5829–5844. DOI: 10.3934/era.2025259. (*The American Institute of Mathematical Sciences and American Mathematical Society*, Q1).

8. Потапов А. А. Парадигма «Многопрофильное радио»: Новый подход к использованию физических свойств электромагнитных волн и универсальности топологии фрактальных множеств // Сб. тез. пленарных докладов V Всероссийского форума с международным участием “Академические Жуковские чтения” (Воронеж, 19 - 21 ноября 2025 г.). - Воронеж: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2025. (*Пленарный доклад*).

9. Потапов А. А. Зарождение и становление фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники в ИРЭ РАН // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2025. Т. 33. № 5. С. 748–776. (*Спецвыпуск к 90-летию академика Ю. В. Гуляева*). DOI: 10.18500/0869-6632-003183.

10. Спецвыпуск к 75-летию д.ф.-м.н. профессора гл.н.с. А. А. Потапова // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2026. Т. 29. № 1. 118 с. (*открытый доступ, Q3, в печати*).

УДК 621.398; ГРНТИ 49.37.33

МЕТОД АДАПТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КАНАЛА

В.Т. Дмитриев, И.А. Ямашкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, yamashkin1998@gmail.com*

Аннотация. В данной работе рассматривается перспективная архитектура системы передачи цифровой телеметрической информации, основанная на тесной интеграции первичного кодера источника и универсального адаптивного помехоустойчивого кодера. Описаны принципы их совместной работы, направленной на обеспечение высокой достоверности и спектральной эффективности в условиях нестационарного канала связи. Особое внимание уделено алгоритму динамического выбора метода кодирования на основе оценки состояния канала.

Ключевые слова: первичное кодирование, адаптивное помехоустойчивое кодирование, LDPC, Turbo-коды.

ADAPTIVE CODING METHOD FOR DIGITAL TELEMETRY SYSTEMS WITH VARIABLE CHANNEL PARAMETERS

V.T. Dmitriev, I.A. Yamashkin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, yamashkin1998@gmail.com*

Abstract. This paper discusses a promising architecture for transmitting digital telemetry information based on the close integration of the primary source encoder and a universal adaptive noise-resistant encoder. The principles of their joint work aimed at ensuring high reliability and spectral efficiency in conditions of an unsteady communication channel are described. Special attention is paid to the algorithm of dynamic selection of the encoding method based on the assessment of the channel condition.

Keywords: primary coding, adaptive interference-resistant coding, LDPC, Turbo codes.

Введение

Эффективная и достоверная передача цифровых телеметрических данных является критически важной задачей для таких областей, как аэрокосмическая отрасль, дистанционное зондирование и мониторинг промышленной инфраструктуры. Потоки информации, включающие видео и данные с массива датчиков, характеризуются скоростями по-

рядка единиц Мбит/с. Основная проблема заключается в обеспечении требуемой достоверности при минимальном расходе энергетических и спектральных ресурсов.

Традиционные системы связи часто используют фиксированные схемы помехоустойчивого кодирования, оптимизированные для наихудшего сценария состояния канала. Подобный подход приводит к нерациональному использованию полосы пропускания в условиях высокого отношения сигнал/шум. Одним из решений данной проблемы является внедрение адаптивных методов, в частности, использование каскадной структуры, состоящей из первичного кодера источника и универсального помехоустойчивого кодера с динамическим выбором режима работы [1,2].

Архитектура системы передачи

Предлагаемая структура системы передачи включает следующие основные этапы:

1. Источник данных, генерирующий цифровой поток.
2. Первичный кодер источника, выполняющий компрессию данных, а также при необходимости их шифрование.
3. Адаптивный помехоустойчивый кодер, применяющий избыточное кодирование, тип и скорость которого определяются текущим состоянием канала.
4. Модулятор, осуществляющий преобразование цифрового потока в аналоговый сигнал.
5. Канал связи с переменными во времени параметрами: отношением сигнал/шум (SNR), глубиной замираний, вероятностью битовой ошибки (BER).
6. Канал обратной связи, по которому приёмное устройство передаёт передатчику индикатор качества.

На приёмной стороне реализованы обратные операции: демодуляция, адаптивное декодирование и восстановление исходных данных.

Функциональность первичного кодера

Первичный кодер выполняет ключевую роль в оптимизации телеметрического потока перед его передачей по каналу связи. Его основная задача заключается в преобразовании исходных данных для повышения эффективности всей системы передачи. На начальном этапе проводится анализ статистических характеристик входного потока. Исследуются энтропийные свойства источника, определяются корре-

ляционные зависимости между параметрами, оценивается потенциал сжатия для различных типов телеметрической информации [3].

Медленно меняющиеся параметры эффективно сжимаются за счет алгоритмов, учитывающих их физическую природу и динамику изменений. Для быстропеременных сигналов используются методы, обеспечивающие баланс между степенью сжатия и точностью восстановления. При работе с видеоданными применяются современные схемы компрессии, сочетающие методы устранения пространственной и временной избыточности. Это позволяет значительно уменьшить объем передаваемой информации при сохранении необходимого качества изображения.

Система защиты информации реализует комплексный подход к обеспечению конфиденциальности и целостности данных. Используются криптографические методы, обеспечивающие стойкое шифрование и аутентификацию источника [4]. Дополнительно применяются механизмы контроля целостности, позволяющие обнаруживать ошибки обработки и несанкционированное изменение данных [5,6].

Результирующий поток после первичного кодирования характеризуется оптимизированной скоростью передачи при сохранении информационной полноты исходных данных. Эффективность работы системы демонстрируется достижением значительных коэффициентов сжатия при обеспечении требуемого уровня защиты и достоверности телеметрической информации.

Алгоритм работы адаптивного помехоустойчивого кодера

Адаптивный кодер функционирует по принципу замкнутого контура управления. Приемник постоянно анализирует состояние канала связи, измеряя отношение сигнал-шум и другие параметры. На основе этих измерений формируется индекс качества канала, который передается по обратному каналу связи на передатчик [7].

При получении индекса адаптивный кодер выбирает оптимальный режим работы из нескольких заранее запрограммированных состояний. При высоком качестве канала применяются коды с высокой скоростью, обеспечивающие максимальную спектральную эффективность. При ухудшении условий переходят к сбалансированным режимам, а в условиях сильных помех активируются низкоскоростные коды с максимальной помехоустойчивостью.

Переключение между режимами происходит с учетом гистерезиса для исключения частых переключений при колебаниях параметров канала. Система управления обеспечивает плавный переход между

режимами с сохранением целостности данных. Для реализации используются современные коды, такие как LDPC и Турбо-коды, обладающие хорошей адаптивностью к изменяющимся условиям канала [8].

Данный подход позволяет поддерживать требуемое качество связи при минимальном расходе спектральных ресурсов, динамически подстраивая параметры кодирования под текущее состояние канала передачи.

Преимущества и недостатки метода

Основным достоинством предложенного метода адаптивного кодирования является его способность обеспечивать оптимальное использование ресурсов канала связи. Универсальность подхода позволяет успешно применять его для различных типов телеметрической информации без необходимости существенной модификации алгоритмов.

Однако эффективность метода в значительной степени зависит от надежности работы обратного канала связи, используемого для передачи служебной информации о состоянии канала. Существенным ограничением является чувствительность системы к быстрым изменениям параметров канала, когда временные характеристики адаптации оказываются недостаточными для отслеживания резких замираний сигнала. Дополнительную сложность представляет необходимость точной первоначальной настройки пороговых значений для переключения между режимами кодирования, требующая проведения тщательных предварительных испытаний и калибровки системы. Эти факторы следует учитывать при проектировании телеметрических систем для конкретных условий эксплуатации.

Заключение

Предложенная схема совместной работы первичного и универсального адаптивного помехоустойчивого кодера представляет собой инструмент для построения эффективных систем передачи информации. Совместная работа кодеров создает синергетический эффект. Первичный кодер, сжимая данные, «освобождает место» в канале для избыточности, вводимой адаптивным кодером. Это позволяет последнему использовать более мощные (низкоскоростные) коды в плохих условиях, не выходя за пределы полосы пропускания канала. В хороших

условиях адаптивный кодер использует высокоскоростные коды, а выигрыш от сжатия преобразуется в общее повышение спектральной эффективности системы.

Библиографический список

1. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Крысаяев Д.Е., Попов С.С. Исследование качества передаваемой речевой информации при различном сочетании алгоритмов кодирования источника и канала связи в условиях действия помех. Вестник РГРТУ 2008 № 1 (Выпуск 23). С. 53-56.
2. В.Т. Дмитриев, Чучин И.С., Поликанова В.А. Адаптивный алгоритм первичного и помехоустойчивого кодирования, обеспечивающий хорошее качества речи.// Акустический журнал. 2024 Т.70 №S5 – С. 73.
3. Дмитриев В.Т., Лантратов С.Ю. Адаптивный алгоритм кодирования на основе кодека CELP и модификации алгоритма Хургина-Яковлева// Вестник РГРТУ. 2024. №88. – С.21 -30
4. Андреев В.Г., Дмитриев В.Т. Алгоритм совместной реализации первичного кодека и маскиратора речевых сигналов с возможностью защиты фонограмм от фальсификаций//Вестник РГРТУ. 2023. №84. – С.66 -76.
5. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Крысаяев Д.Е., Семин Д.С. Перспективные алгоритмы совместного помехоустойчивого кодирования и защиты в радиосистемах передачи информации. //11-я Международная конференция и выставка Цифровая обработка сигналов и ее применение Выпуск XI-2 Москва, 2009. - С. 534-537.
6. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева.//Вестник РГРТУ. – 2022 №82 – С. 27- 37.
7. Дмитриев В. Т., Ямашкин И.А. Критерии анализа помеховой обстановки для выбора оптимального помехоустойчивого кодера// Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT- 2024): Материалы XI Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, 29 ноября 2024 года. – Тольятти: Издательско-полиграфический центр ПВГУС, 2025. – С. 146-151
8. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И., Урядников Ю.Ф., Дергачев Ю.А., Сулиманов А.А. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

УДК 621.396.41; ГРНТИ 89.57.35

БЕЗОПАСНАЯ ПЕРЕДАЧА АУДИОИНФОРМАЦИИ: ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТКРЫТЫХ КЛЮЧЕЙ

Д.М. Меньшиков*, В.Т. Дмитриев**

**Министерство обороны Российской Федерации,
Москва, proDirector14@yandex.ru*

*** Рязанский государственный радиотехнический университет
им.В.Ф.Уткина,
Рязань, vol77@rambler.ru*

Аннотация. Одним из наиболее эффективных и современных подходов к обеспечению безопасности передачи информации является использование инфраструктуры открытых ключей. Использование современных алгоритмов шифрования, наряду с другими методами безопасности, таких как водяные знаки и стеганография, позволяет существенно повысить уровень защиты аудиоинформации.

SECURE TRANSMISSION OF AUDIO INFORMATION: APPLICATION OF PUBLIC KEY INFRASTRUCTURE (PKI)

D.M. Menshikov*, V.T. Dmitriyev**

**Ministry of Defense of the Russian Federation,
Moscow, proDirector14@yandex.ru*

***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, vol77@rambler.ru*

Annotation. One of the most effective and modern approaches to ensuring the security of information transmission is the use of public key infrastructure. The use of modern encryption algorithms, along with other security methods such as watermarking and steganography, can significantly increase the level of protection of audio information.

Введение

В современном мире, где информация становится одним из самых ценных ресурсов, безопасность передачи данных приобретает первостепенное значение [1...6]. Одним из наиболее эффективных способов обеспечения безопасности является инфраструктура открытых ключей (ИОК). ИОК не только защищает текстовые данные, но и предоставляет возможности для безопасной передачи аудиоинформации. Основные компоненты ИОК включают:

1. Открытые и закрытые ключи: каждому пользователю или устройству в системе ИОК присваивается пара ключей. Открытый ключ доступен всем, а закрытый ключ хранится в секрете. Данные, зашифрованные открытым ключом, могут быть расшифрованы только соответствующим закрытым ключом.

2. Центр сертификации (СА): это доверенная третья сторона, которая выдает цифровые сертификаты. Эти сертификаты подтверждают, что открытый ключ принадлежит конкретному субъекту. Центр сертификации обеспечивает доверие между сторонами, использующими ИОК.

3. Управление сертификатами: включает в себя процессы выдачи, обновления и отзыва сертификатов, что является критически важным для поддержания безопасности системы.

Шифрование с использованием открытых ключей позволяет обеспечить конфиденциальность данных. При передаче аудиоинформации процесс выглядит следующим образом: отправитель аудиофайла использует открытый ключ получателя для шифрования данных. Это гарантирует, что только получатель, обладающий соответствующим закрытым ключом, сможет расшифровать аудиосигнал.

Зашифрованный аудиофайл передается по каналу связи. Важно отметить, что даже если данные будут перехвачены, злоумышленник не сможет их расшифровать без закрытого ключа. Получатель использует свой закрытый ключ для расшифровки аудиосигнала. Таким образом, обеспечивается безопасность и конфиденциальность передаваемой информации.

Алгоритм шифрования и дешифрования для безопасной передачи аудиоинформации

Предлагаемый алгоритм шифрования и дешифрования для безопасной передачи аудиоинформации с использованием ИОК представлен на рисунке 1.

Алгоритм начинается с выбора размера случайно сгенерированного простого числа, на основе которого затем вычисляются закрытый и открытый ключи. В общем случае для шифрования любых данных минимальный размер открытого ключа должен быть в диапазоне от 512 до 1024 бит. Когда речь идет о безопасном шифровании аудиоинформации с использованием ИОК, требуется два больших случайных числа, обычно размером 512 бит или больше.

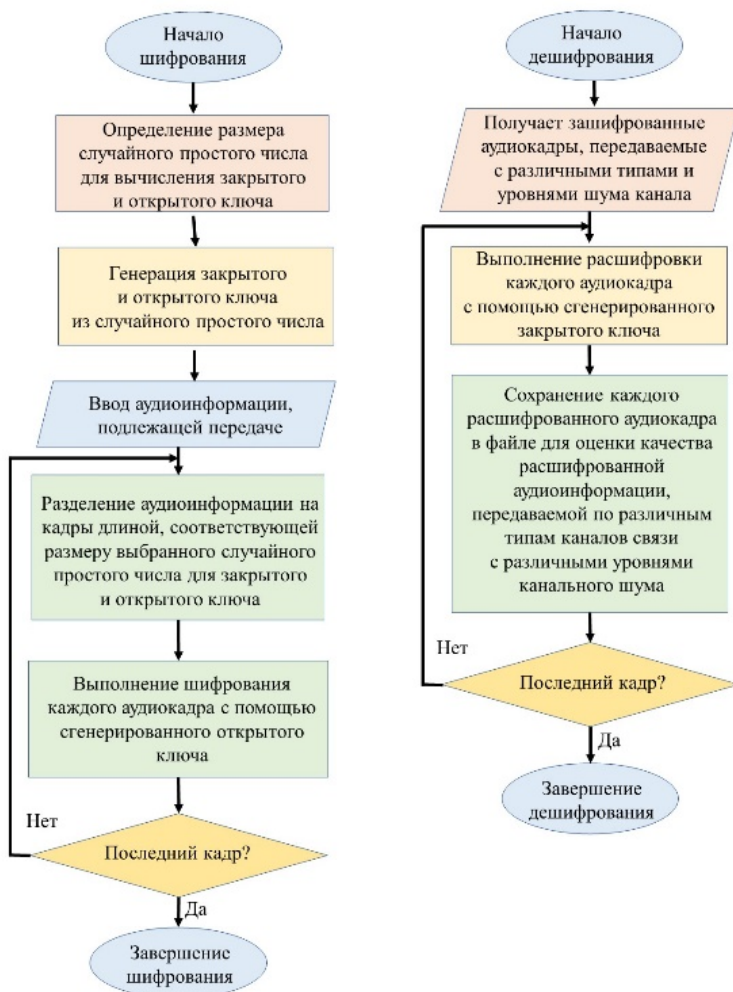


Рис. 1. Предлагаемый алгоритм шифрования и дешифрования для безопасной передачи аудиоинформации с использованием ИОК

На рисунке 2 показана модель, созданная в Matlab Simulink с помощью алгоритма, показанного на рисунке 1.

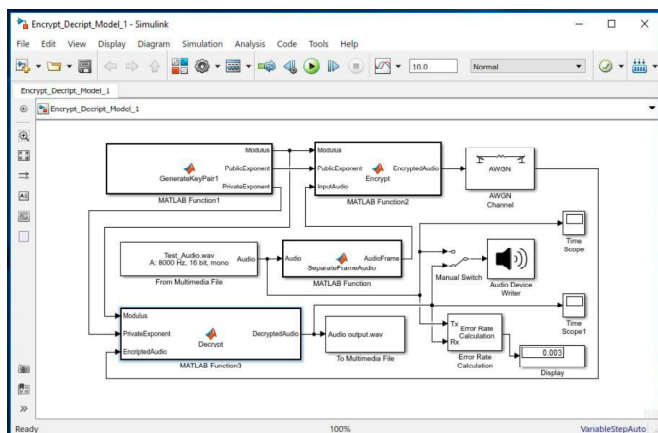


Рис. 2. Модель Simulink предлагаемого алгоритма шифрования/дешифрования для безопасной передачи аудиоинформации с использованием ИОК

В модели Simulink, представленной на рисунке 2, реализованы все ключевые этапы алгоритма шифрования, описанного на рисунке 1.

С помощью описанной выше модели Simulink проводятся испытания с применением различных уровней шума канала, результаты этих экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования с различными уровнями шума канала и сравнительная объективная и субъективная оценка качества декодированного аудиофайла

Уровень шума, дБ	Сегментарное отношение сигнал/шум, дБ	Субъективное качество звучания дешифрованного файла
10	9,6	Неприемлемо
15	14	Приемлемо
20	18,9	Хороший
30	29,5	Очень хорошо
40	36,7	Очень хорошо
50	47,4	Отлично
60	55,6	Отлично

В таблице 1 представлено сравнение качества аудиоинформации, полученной в результате обработки. Оценка качества проводилась как с помощью объективных методов, таких как анализ соотношения сиг-

нал/шум, так и с использованием субъективных методов, основанных на восприятии сходства между звуками, воспроизведенными из расшифрованного файла (в данном случае Audio output.wav), и звуками оригинального аудиофайла (Test_Audio.wav), который был подвергнут шифрованию и расшифровке.

Выводы по использованию шифрования и дешифрования с использованием ИОК

Из результатов, представленных в данной статье, можно выделить несколько ключевых выводов, касающихся применения принципов шифрования и дешифрования с использованием ИОК. Эти принципы находят свое применение в обеспечении безопасной передачи аудиоинформации по шумовым каналам связи. Для достижения этой цели был разработан специальный алгоритм, который был протестирован с использованием модели Matlab Simulink, а также графического интерфейса, что позволило провести более наглядные и удобные тестирования предложенного алгоритма. В таблице 1 собраны и обобщены результаты, которые были получены в ходе экспериментов. Эти данные были тщательно проанализированы для оценки качества расшифрованной аудиоинформации. При этом для сравнительной оценки использовались как объективные методы, такие как сегментное отношение сигнал/шум, так и субъективные методы, которые заключались в оценке слышимости и сходства между воспроизведенными звуками из расшифрованных аудиофайлов и оригинальными звуками, которые были записаны до процесса шифрования и последующего дешифрования. По итогам проведенного анализа как объективных, так и субъективных критериев оценки можно сделать вывод о том, что уровень шума в канале связи оказывает значительное влияние на качество расшифрованной аудиоинформации. Это влияние прямо связано с ошибками, возникающими при расшифровке зашифрованной аудиоинформации. Важно отметить, что чем выше уровень шума, тем больше вероятность возникновения ошибок при получении и расшифровке данных. С учетом вышеизложенного, в будущих исследованиях будет целесообразно интегрировать в алгоритм дополнительные методы коррекции ошибок, которые помогут минимизировать влияние шума на процесс дешифрования. Это позволит значительно повысить качество получаемой аудиоинформации, что, в свою очередь, будет способствовать более надежной и безопасной передаче звуковых дан-

ных по шумовым каналам связи. Таким образом, дальнейшие исследования в этой области могут привести к значительным улучшениям в технологии передачи аудиоинформации, что будет иметь важное значение для различных приложений, требующих высокой степени защиты и качества передаваемых данных.

Возможно увеличение помехоустойчивости и защищенности данного алгоритма за счет применения алгоритма Хургина–Яковлева [6...9].

Библиографический список

1. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Асинхронное маскирование речи на основе алгоритма Хургина–Яковлева. //Новые информационные технологии 2004. №1.
2. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Асинхронное маскирование, обнаружение фальсификаций и реставрация фонограмм речевых сигналов на основе алгоритма Хургина–Яковлева. //Безопасность информационных технологий. 2003. №2. – С. 26-30.
3. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Асинхронное маскирование речи на основе алгоритма Хургина–Яковлева. //Новые информационные технологии 2004. №1.
4. Дмитриев В.Т., Лукьянов Д.И. Алгоритм маскирования на основе представления Хургина–Яковлева с использованием производных второго и третьего порядков. Вестник РГРТУ 2012 №4. –С.13-17.
5. Андреев В.Г., Дмитриев В.Т. Алгоритм совместной реализации первичного кодека и маскиратора речевых сигналов с возможностью защиты фонограмм от фальсификаций //Вестник РГРТУ. 2023. №84. – С.66 -76.
6. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина–Яковлева. //Вестник РГРТУ. 2022. №82 – С. 27-37.
7. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Реализационные возможности и помехоустойчивость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина–Яковлева. //Радиотехника. 2003. №1– С. 73-75.
8. Дмитриев В.Т., Бахурин С.А., Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах. //Вестник РГРТА. 2004. №13 – С. 32-35.
9. Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость кодеков речи на основе алгоритма Хургина–Яковлева. //Вестник РГРТА. 2003. №12 – С. 133-136.

УДК 621.396.41; ГРНТИ 89.57.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ ПРИ КОДИРОВАНИИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА БЕЗ ПОТЕРЬ

М.С. Бунин*, В.Т. Дмитриев**

**Министерство обороны Российской Федерации*

Москва, bunin.maxim@mail.ru

*** Рязанский государственный радиотехнический университет*

им.В.Ф.Уткина,

Рязань, vol77@rambler.ru

Аннотация. Предложен способ уменьшения занимаемой памяти, используемой речевыми данными с применением поддиапазона и алгоритма Хаффмана для речевых сигналов. Выделены значения амплитуды речевого сигнала после предварительной обработки, оконной обработки и применения методов декомпозиции. Полученные данные преобразованы в частотную область с использованием дискретного косинусного преобразования (ДКП). Проведено кодирование методами Хаффмана девятиста основных коэффициентов, содержащих наибольшее количество информации о речевых сигналах. Для восстановления исходной речи закодированный сигнал повторно преобразован в форму во временной области с применением обратного дискретного косинусного преобразования (ОДКП). Проведены экспериментальные исследования с речевыми данными с 16 битами по выборке на частоте 8 кГц. Величина показателя отношение сигнал/шум (ОСШ) показывает эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: декомпозиция, дискретное косинусное преобразование, ДКП, обратное дискретное косинусное преобразование, ОДКП, алгоритм Хаффмана, поддиапазон, квантование, оконное преобразование.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF NOISE REDUCTION IN LOSSLESS SPEECH SIGNAL ENCODING

M.S. Bunin*, V.T. Dmitriev**

**Ministry of Defense of the Russian Federation*

Moscow, bunin.maxim@mail.ru

***Ryazan State Radio Engineering University,*

Ryazan, vol77@rambler.ru

Annotation. A method is proposed to reduce the occupied memory used by speech data using a subrange and the Huffman algorithm for speech signals. The values of the amplitude of the speech signal after

preprocessing, windowing, and the use of decomposition methods are highlighted. The data obtained has been transformed into the frequency domain using the discrete cosine transform (DCT). The Huffman coding of ninety basic coefficients containing the largest amount of information about speech signals was carried out. To restore the original speech, the encoded signal was re-transformed into a time domain form using the inverse discrete cosine transform (ODCP). Experimental studies have been conducted with 16-bit speech data sampled at a frequency of 8 kHz. The value of the signal-to-noise ratio (SNR) indicator shows the effectiveness of the proposed method.

Keywords: decomposition, discrete cosine transform, DCT, inverse discrete cosine transform, IDCT, Huffman algorithm, subband, quantization, windowed transform.

Введение

Кодирование речи - это процесс, позволяющий преобразовать речевые сигналы в более сжатую форму с минимальным повторением речевого сигнала. Речевые данные можно декодировать с максимально возможным качеством. Процесс разделения принятых речевых сигналов на поддиапазоны с использованием полосовых фильтров и последующих кодирований каждого диапазона в отдельности известен как метод кодирования поддиапазонов. Общее количество дискретных отсчетов, подлежащих кодированию, сводится к минимуму, а затем частота дискретизации речевых сигналов в каждом диапазоне минимизируется с помощью процесса децимации. Полосовые фильтры не идеальны из-за нескольких перекрытий между соседними полосами, и в процессе прореживания могут возникать ошибки. Кодирование поддиапазонов играет важную роль, так что каждый отдельный диапазон может быть закодирован по-разному. Это основное преимущество поддиапазонного кодирования, использованного в данной работе. В кодировании Хаффмана речевые сигналы располагаются в порядке убывания частоты (возрастания вероятности появления). Основные компоненты системы кодирования на основе дерева Хаффмана - это листья (узлы) [1]. Листья (узлы) в алгоритме кодирования Хаффмана - это символы, для которых разрабатывается кодировка. На каждом этапе вычисление выполняется для двух листьев, которые имеют наименьшее значение вероятности. После этого они могут быть объединены для создания нового узла. В этом процессе дерево было по-

строено по принципу "снизу-вверх" за $N-1$ шагов. Каждому пути, ведущему налево, присваивается значение 0, а каждому пути, идущему направо, присваивается значение 1.

Метод сжатия речи

Этот метод может отличаться степенью сжатия данных, а также используемой частотой дискретизации. Он обеспечивает различные уровни сложности системы и минимизирует качество речевой информации. Затем сохраненная сжатая форма сигнала будет передана с потерями или без них. Речевые сигналы обрабатываются путем смешивания, выравнивания и фильтрации. Аудиосигнал поступает в кодер, который использует только меньшие биты. В результате, пропускная способность каналов передачи речевого сигнала сведена к минимуму, как и объем памяти, занимаемый речевыми файлами.

В принципе, методы сжатия речи делятся на две различные категории: кодирование без потерь и с использованием кодирующего кода с потерями. Кодирование с потерями действительно легко воспринимается человеком, а коэффициент сжатия без потерь находится в диапазоне от 6 до 1. На рисунке 1 показан исходный речевой сигнал. В этом методе входной речевой сигнал разлагается на восемь уровней сегментации; затем применяется оконное управление, в то время как длинный сигнал был увеличен с помощью функции оконного управления с определенной длиной, обеспечивая очень малую взвешенную длину в виде входных речевых данных без кодирования. Затем он будет восстановлен методом дискретного косинусного преобразования для нахождения малогабаритных кадров и собран в виде матрицы дискретного косинуса.

Процесс преобразования (ДКП) может быть применен к полученной матрице [2]. Элементы расположены в соответствующем матричном формате для идентификации компонентов и значений индексов. При этом было использовано в общей сложности 90 значений речевых данных, которые были введены в четыре блока обработки для получения хорошо слышимого речевого сигнала.

Значения расположены в порядке возрастания и убывания, затем для дальнейшей обработки были взяты самые большие значения, а также пороговые значения. Эти пороговые значения квантуются для преобразования выборочного аналогового сигнала в значение напряжения и последующего преобразования в двоичное число, которое

будет считываться компьютерной системой. Наконец, для получения сжатых речевых сигналов к двоичной форме был применен метод Хаффмана. После этого для получения распакованных речевых сигналов будет применено обратное дискретное косинусное преобразование (ОДКП).

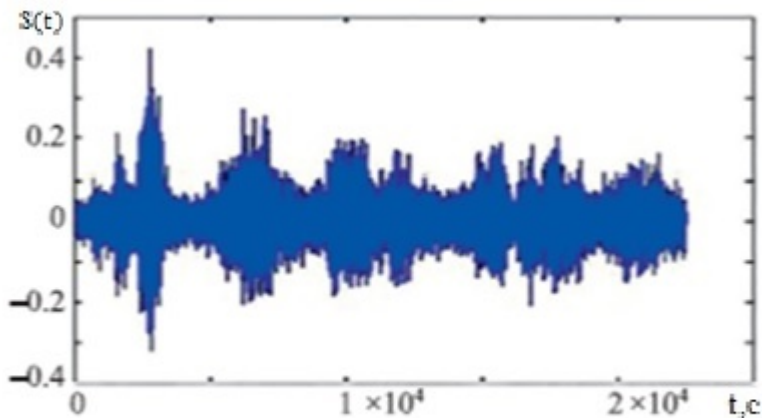


Рис. 1. Исходный речевой сигнал

Вместо кодирования по Хаффману для получения сжатых речевых сигналов используется кодирование по поддиапазону. Проведено сравнение обоих методов, чтобы определить, какой сценарий и какой метод даст лучшие результаты. Метод кодирования по Хаффману при использовании кодов переменной длины является популярным подходом к сжатию данных [3]. Этот подход позволяет создавать набор кодовых слов переменной длины с наименьшей средней длиной и присваивать их символам, образуя набор символов данных (алфавит) с их частотами появления (или, что эквивалентно, с их вероятностями). Процедура Хаффмана строит дерево кода с нуля (и биты каждого кодового слова строятся справа налево). Частота дискретизации сигналов в каждом диапазоне уменьшается, чтобы свести количество кодируемых выборок к минимуму [4].

Основная идея заключается в том, что к набору речевых выборок применяется дискретное унитарное преобразование, а результирующие коэффициенты преобразования квантуются и кодируются для пе-

редачи адресату. Поскольку для восприятия может быть выделено больше битов, при этом могут быть достигнуты существенные коэффициенты, высокая производительность и эффективность. Код Хаффмана является источником для большого количества исследований [5]. Этот метод кодирования создает кодовое дерево с восходящим уровнем, и каждый бит кодового слова определяется справа налево. Чтобы оптимизировать количество кодируемых выборок данных, частота дискретизации сигналов в каждом диапазоне минимизируется с помощью метода децимации. Отличительной особенностью метода является то, что в нем используется меньшее количество фрагментов речи. Выборки будут обработаны с помощью дискретного унитарного преобразования, и в результате коэффициенты преобразования будут квантованы, а затем они могут быть закодированы для дальнейшей передачи получателю.

Речевые сигналы, записанные в разных условиях, таких как автомобиль, выставка, аэропорт, разговор, ресторан, железнодорожный вокзал, улица и железнодорожная станция, воспринимаются как зашумленные. Эти шумы обрабатываются и сжимаются с использованием коэффициентов ДКП, а также методов кодирования в поддиапазонах и кодирования Хаффмана [6]. Речевой сигнал с шумом показан на рисунке 3. Чистый входной сигнал содержит исходные данные речи пользователя в различных местах. На рисунке 4 показан ДКП, применяемый к зашумленному речевому сигналу. При обработке ДКП данные упорядочиваются с помощью матрицы для идентификации компонентов, а также индексов. Когда обработка завершена, будет зафиксировано только пороговое значение. Значение коэффициента, ниже порогового значения, будет отброшено. Для уменьшения размера сигнала будет применена технология сжатия.

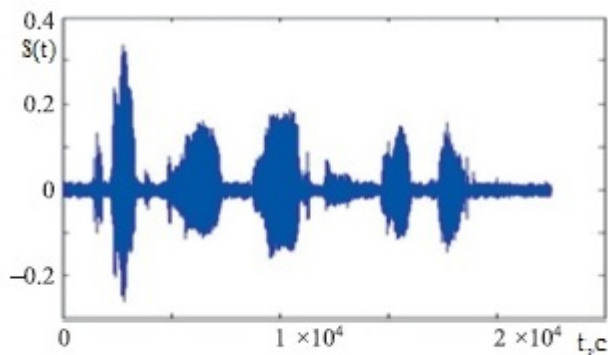


Рис. 3. Речевой сигнал с шумом

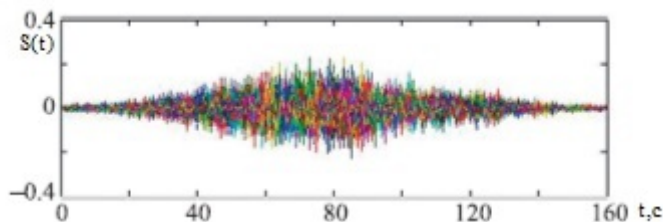


Рис. 4. ДКП, примененный к зашумленному речевому сигналу

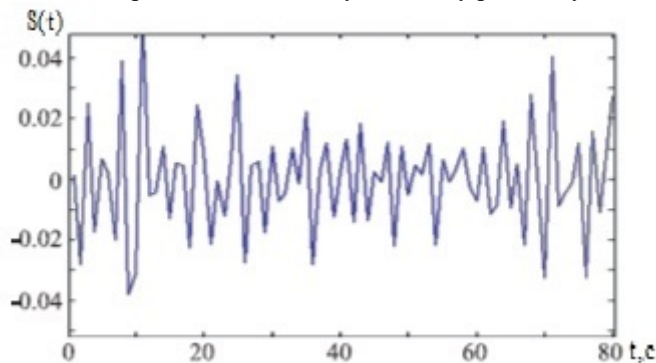


Рис. 5. Восстановленный зашумленный сигнал

С помощью метода восстановления значения будут преобразованы обратно в исходный вид с помощью пороговых значений (рис. 5). Исходная частота практически соответствует принятому входному речевому сигналу с точностью до 85%. Эти процессы применяются к рече-

вому сигналу с зашумленной речью и используемой базой данных является NOIZEUS [7]. Эта база данных может содержать зашумленные сигналы. Эти сигналы принимаются в различных местах, таких как рестораны, вокзалы, аэропорты, болтовня, выставки, улицы, автомобили. Тогда возникает дополнительный шум, который добавляется к входным речевым сигналам, и затем эта смесь обрабатывается. Наконец, используется значение отношения сигнал/шум (SNR), и результат сравнивается с четкой речью.

Заключение

Кодирование речи - это новая область исследований, и сжатие речевого сигнала является стандартным способом создания и уменьшения речевого сигнала в сжатой форме. В этой статье в основном рассматривается разработка эффективной методики кодирования речи с использованием методов Хаффмана и поддиапазона кодирования. Для получения лучших результатов используются методы сжатия речи на основе ДКП/ОДКП.

Входная речь используется в процессе восстановления из закодированных объектов. Поддиапазонное кодирование и метод Хаффмана работали эффективно и обеспечивали лучший результат в таких сложных ситуациях. Для некоторых речевых сигналов было легко идентифицировать каждое слово даже в искаженном произношении. Во время прослушивания сжатый речевой сигнал получается с хорошим качеством слышимости.

При использовании этих двух выбранных методов исходная частота получается почти такой же, как у входного речевого сигнала, с точностью до 85%. Результат улучшения достигается при применении поддиапазонного кодирования речевого сигнала при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Результат улучшения получен при применении кодирования Хаффмана для речевого сигнала по отношению к шуму на 5 дБ. Результат улучшения получен при применении кодирования Хаффмана для речевого сигнала при отношении сигнал/шум 10 дБ. Такая ситуация типична для таких как шумный речевой сигнал в аэропорту, ресторане, на улице, в поезде и автомобиле. Результат улучшения получен при применении Кодирования Хаффмана для речевого сигнала на 15 дБ к шумному речевому сигналу, например, в аэропорту, на журчании, на вокзале и в автомобиле.

Библиографический список

1. Taujuddin N.S.A.M., Ibrahim R., Sari S. Image compression using a new adaptive standard deviation thresholding estimation at the wavelet details subbands. 2015. pp. 109-114
2. Balaji V.R., Subramanian S. A novel speech enhancement approach based on modified DCT and improved pitch synchronous analysis //American Journal of Applied Sciences. 2014. pp. 24–37.
3. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Д.Е. Крысъяев, С.С. Попов Исследование качества передаваемой речевой информации при различном сочетании алгоритмов кодирования источника и канала связи в условиях действия помех. Вестник РГРТУ 2008 № 1 (Выпуск 23). С. 53-56.
4. В.Т. Дмитриев, Д.И. Лукьянов Алгоритм маскирования на основе представления Хургина-Яковлева с использованием производных второго и третьего порядков. Вестник РГРТУ 2012 №4. –С.13-17
5. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Асинхронное маскирование, обнаружение фальсификаций и реставрация фонограмм речевых сигналов на основе алгоритма Хургина-Яковлева./Безопасность информационных технологий. 2003. №2. – С.26-30.
6. В.Т. Дмитриев, Д.С. Константинова Алгоритм комплексной оценки качества речи в канале связи.// Вестник РГРТУ. 2016. №56 – С.42-47
7. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева.//Вестник РГРТУ 2022 №82 – С. 27- 37.

УДК 621.371.391.1; ГРНТИ 49.46.29

ПОДВОДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КАНАЛ СВЯЗИ С ШИРОКИМ СЕКТОРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Л.В. Аронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, LVArronov@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к математическому описанию диаграммы направленности подводного оптического передатчика с широкоугольным излучением на основе полупроводникового лазера. Произведено сравнение трёх моделей амплитудного распределения: равномерной (конусообразной), косинусоидальной и на основе Гауссова пучка. Показано, что модель на основе Гауссова пучка обеспечивает наибольшую физическую точность, но требует учёта дополнительных параметров пучка.

Ключевые слова: оптическая связь, беспроводной оптический канал, подводная связь, лазерная связь.

UNDERWATER WIRELESS LASER COMMUNICATION SYSTEM WITH A FEEDBACK HYDROACOUSTIC CHANNEL

L.V. Aronov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, LVArronov@yandex.ru*

Abstract. This article examines approaches to the radiation pattern mathematical description of an underwater optical transmitter with wide-angle radiation based on a semiconductor laser. Three amplitude distribution models are compared: uniform (cone-shaped), cosine, and Gaussian beam. It is shown that the Gaussian beam model provides the greatest physical accuracy but requires consideration of additional beam parameters.

Keywords: optical wireless communication, free space optic, underwater communication, laser communications.

Введение

В открытых системах оптической на основе технологии оптики свободного пространства (Free-Space Optics, FSO) обычно применяются оптические передающие модули с узкой диаграммой направленности, имеющей угол расходимости в диапазоне $2\text{--}10$ мрад ($0,11^\circ\text{--}0,57^\circ$) [1]. Применительно к водной среде данный подход обеспечивает высокоскоростную передачу данных на дистанции, превышающие 100 м, при излучаемой оптической мощности порядка 100 мВт [2]. Подобные системы способны передавать видеопотоки стандартного качества в реальном времени, что открывает возможности для использования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в задачах видеомониторинга подводных инженерных сооружений и коммуникаций, и обеспечения устойчивого канала телеуправления [3].

Главным недостатком систем связи на основе технологии FSO являются требования к точности наведения: допустимое угловое отклонение луча оптического передатчика должно составлять менее половины ширины его диаграммы направленности. Практическая реализация таких систем предполагает использование прецизионных механических узлов, актуаторов и сервоприводов, и разработку алгоритмов автоматического поиска и сопровождения оптического луча. Кроме того, существует значительный риск разрыва связи вследствие вре-

менного перекрытия оптической трассы посторонними объектами. В подводной среде данная проблема усугубляется наличием морской фауны, турбулентностями и иными случайными факторами [4].

Альтернативным решением является использование оптических передатчиков на основе полупроводникового лазера в сочетании с рассеивающими оптическими элементами — линзами или объективами, формирующими широкоугольную диаграмму направленности. Такой подход снижает требования к точности наведения, однако приводит к уменьшению плотности потока мощности в зоне приёма, что, в свою очередь, уменьшает дальность связи и повышает вероятность битовых ошибок на приёмной стороне.

Целью настоящей работы является формализация математической модели и проведение анализа характеристик подводного беспроводного оптического канала связи с широкоугольной диаграммой направленности, реализованного на основе когерентного источника оптического излучения – полупроводникового лазера.

Математическое описание распределения мощности в луче оптического передатчика

В открытых оптических системах передачи данных, основанных на технологии FSO, в том числе подводных, принято считать угловое распределение плотности потока мощности в луче (диаграмму направленности) равномерным [1,5,6], ограниченным шириной угловой расходимости.

Данное приближение хорошо применимо для случая, когда луч узкий, и описывается выражением

$$\begin{cases} F_{\text{ПрД}}(\theta) = 1; & |\theta| \leq \theta_{\text{div}}; \\ F_{\text{ПрД}}(\theta) = 0; & |\theta| > \theta_{\text{div}}; \end{cases} \quad (1)$$

где θ_{div} – угол расходимости лазерного луча. При этом полная ширина сектора излучения равна $2\theta_{\text{div}}$

Другой подход заключается в аппроксимации диаграммы направленности (ДН) оптического передатчика функцией $F_{\text{ПрД}}(\theta) = \cos(\theta)$ в секторе с углом расходимости θ_{div} . В связи с тем, что оценка диаграммы направленности оптического передатчика происходит путём изме-

рения мощности, принятой фотодетектором, аппроксимирующая функция приобретает вид $F_{\text{прд}}(\theta) = \cos^2(\theta)$

$$\begin{cases} F_{\text{прд}}(\theta) = \cos^2(k\theta); & |\theta| \leq 2\theta_{\text{div}}; \\ F_{\text{прд}}(\theta) = 0; & |\theta| > 2\theta_{\text{div}}. \end{cases} \quad (2)$$

При этом коэффициент $k = 90^\circ / 2\theta_{\text{div}}$ учитывает сужение ДН, так как ширина по уровню -3дБ для ДН выражаемой функцией $F_{\text{прд}}(\theta) = \cos^2(\theta)$ равняется 90° . При этом θ_{div} – ширина луча по уровню половины мощности (-3дБ).

Третьим вариантом аппроксимации ДН широкоугольного оптического излучателя следует из того, что в большинстве случаев луч лазера описывается, как гауссов пучок [1]. В этом случае, интенсивность излучения вычисляется по формуле:

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w(z)^2}\right); \quad (3)$$

где r – радиальное расстояние от оси луча, м;

I_0 – пиковая интенсивность в центре луча;

$w(z)$ – радиус лазерного луча по уровню интенсивности $1/e^2$, определяемый по формуле:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}; \quad (4)$$

где λ – центральная длина волны полупроводникового лазера, м;

z – проекция расстояния от точки перетяжки z' на продольную ось луча, м;

w_0 – радиус перетяжки, равный:

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan(\theta_{\text{div}})}. \quad (5)$$

Графическое пояснение перечисленных параметров гауссова пучка показано на рисунке 1.

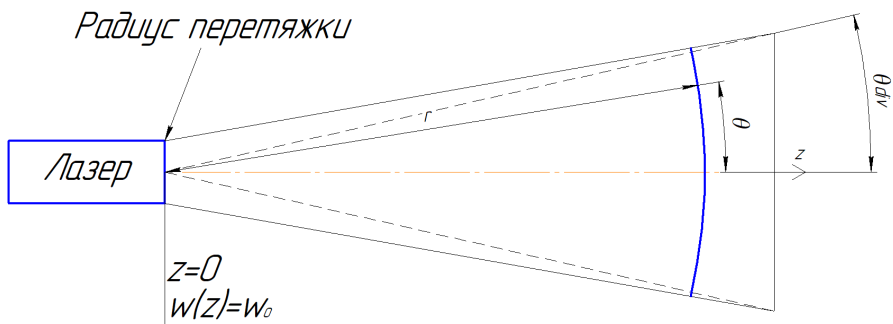


Рис. 1. Представление луча в виде гауссова пучка

Диаграмму направленности в этом случае можно представить, преобразовав формулу (3) к виду:

$$F_{\text{Прд}}(\theta) = \frac{I(r)}{I_0} = \exp\left(\frac{-2r^2}{w(z)^2}\right); \quad (6)$$

При этом, следует учесть, что от текущего угла θ зависят проекции расстояния z' , следовательно необходимо выразить радиальное расстояние от оси луча r и проекция расстояния от точки перетяжки z' на продольную ось луча z от текущего угла θ :

$$\begin{cases} r = z' \sin(\theta); \\ z = z' \cos(\theta). \end{cases}$$

В таком случае окончательное выражение ДН приобретёт вид:

$$F_{\text{Прд}}(\theta) = \frac{I(r)}{I_0} = \exp\left(\frac{-2(z' \sin(\theta))^2}{\left(w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z' \cos(\theta)}{\pi w_0^2}\right)^2}\right)^2}\right). \quad (7)$$

Достоинством такого представления ДН является тот факт, что лазерный луч имеет форму гауссова пучка, который сохраняет профиль интенсивности после прохождения через идеальную тонкую линзу без aberrаций. Таким образом представление (7) является наиболее точным, среди перечисленных. Однако недостатком является необходи-

мость учёта дополнительных переменных, связанных с параметрами лазерного луча.

Результаты моделирования

Для иллюстрации метода рассчитаем ДН тремя способами, с использованием выражений (1), (2) и (7), причём учитывая специфику представления ДН гауссовым пучком, выполним расчёт по выражению (7) для трёх значений расстояния: 50, 100 и 150 м, что является типичными дистанциями для подводной открытой оптической системы передачи данных. За основу возьмём синий (центральная длина волны 445 нм) лазерный диод NDB4116, типичный угол расходимости которого составляет $8,5^\circ$ в перпендикулярной и $23,5^\circ$ в параллельной плоскости, без дополнительной коллимации луча. Рассчитанные ДН для $\theta_{div} = 8,5^\circ$ показаны на рисунке 2.

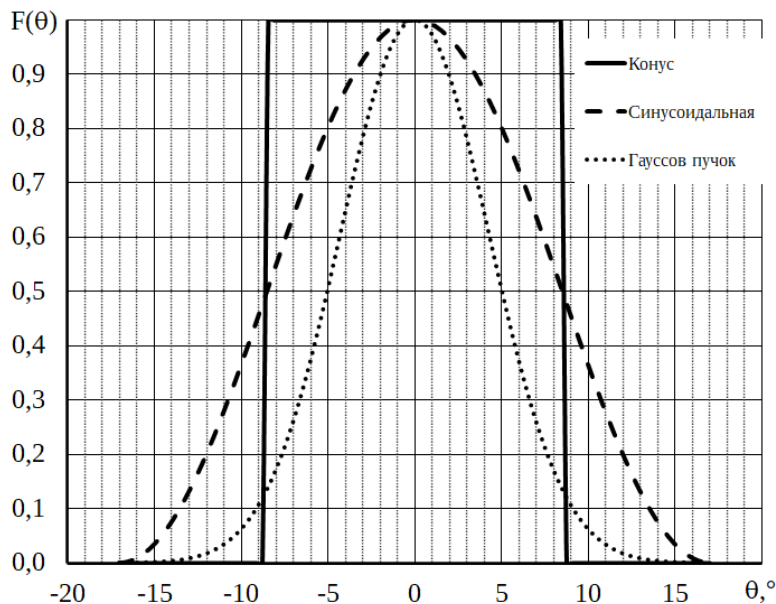


Рис. 2. Аппроксимации ДН оптического излучателя

Следует отметить, что ширина ДН для разных аппроксимаций определяется по разному: для конусной аппроксимации ДН равномерна

во всем секторе излучения, для косинусоидальной – по уровню 0,5, а для гауссова пучка по уровню $1/e^2$.

Выводы

Проведённый анализ показал, что выбор модели диаграммы направленности влияет на точность описания пространственного распределения оптической мощности подводного лазерного передатчика. Равномерная (конусная) модель упрощает расчёты, но не отражает реального распределения интенсивности, что существенно снижает точность для широкоугольных диаграмм направленности. Косинусоидальная аппроксимация лучше соответствует измерениям на уровне половинной мощности, однако также является упрощённой моделью. Физически обоснованной, наиболее соответствующей реальному лучу, является модель Гауссова пучка, дифракционное расширение луча и параметры перетяжки. Эта модель сохраняет профиль интенсивности при прохождении через оптические элементы, в том числе линзы, что позволяет оценивать плотность мощности на приёмной стороне на различных дистанциях. Вместе с тем её применение требует знания дополнительных параметров оптического передатчика. Для задач проектирования подводных оптических каналов связи с широкоугольной диаграммой направленности можно рекомендовать использовать гауссову модель или косинусоидальную модель. Конкретный выбор зависит от технической целесообразности и обосновывается для каждого случая индивидуально.

Библиографический список

1. Bloom S. Understanding the performance of free-space optics [Текст] / S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster, H. Willebrand // Journal of optical networking, vol.2, No. 6, 2003, pp. 178-200
2. Кириллов С.Н. Пропускная способность подводного оптического канала передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Вестник РГРТУ – 2020. – № 4 (74). – с. 3-13. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13
3. Кириллов С. Н. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде для подводных систем передачи информации [Текст] / С. Н. Кириллов, С. А. Балюк, С. Н. Кузнецов, А. С. Есенин // Вестник РГРТУ. – 2012 – №2 – с. 3-8.

4. Кириллов С.Н. Определение характеристик подводного открытого оптического канала передачи информации на больших глубинах [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Вестник РГРТУ – 2018. – № 1 (63). – с. 40-48.
5. Kaushal H. Underwater optical wireless communication [Текст] / Н. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access, volume 4, 2016, pp. 1518-1547.
6. Abd El-Naser A. Mohamed Underwater wireless optical communications for short range typical ocean water types [Текст] / Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Ahmed Nabih Zaki Rashed, Enab Salah El-dien // Canadian journal on electrical and electronics engineering. – 2012. – No. 7, vol. 3 – pp. 344-361.

УДК 621.391.82; ГРНТИ 50.43.31

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ FSO-СВЯЗИ С БПЛА ПРИ ПОМОЩИ LDPC-КОДИРОВАНИЯ

В.В. Киселёв, Л.В. Аронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, vkiselyov@mail.ru*

Аннотация. В данной работе рассматривается задача повышения помехоустойчивости атмосферной оптической линии связи (FSO) между подвижными наземными объектами и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Атмосферная турбулентность и относительное движение абонентов приводят к значительному ухудшению качества канала связи. Применение LDPC-кодирования позволит компенсировать возникающие ошибки.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, оптическая связь, беспроводной оптический канал, LDPC.

UNDERWATER WIRELESS LASER COMMUNICATION SYSTEM WITH A FEEDBACK HYDROACOUSTIC CHANNEL

V.V. Kiselyov, L.V. Aronov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, vkiselyov@mail.ru*

Abstract. This paper addresses the problem of improving the noise immunity of free-space optical (FSO) communication links between mobile ground objects and unmanned aerial vehicles (UAVs). Atmospheric turbulence and the relative motion of subscribers significantly degrade the quality of the communication channel. The use of LDPC coding allows for the compensation of these errors.

Keywords: free-space optical (FSO), optical communication, wireless optical link, LDPC.

Введение

Задача обеспечения высокоскоростной и надежной связи с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) является критически важной для систем мониторинга, картографии и управления в реальном времени. Традиционные радиоканалы (RF) сталкиваются с принципиальными ограничениями по пропускной способности, задержкам и помехоустойчивости. Альтернативой выступают атмосферные оптические линии связи (FSO), использующие инфракрасный диапазон и обладающие потенциалом скорости передачи данных до 10 Гбит/с и выше [1, 2].

Однако практическому применению FSO-систем «Земля-БПЛА» препятствуют два основных фактора: атмосферная турбулентность, вызывающая замирания сигнала, и относительное движение абонентов, приводящее к доплеровскому сдвигу и ошибкам наведения луча [3]. Данные факторы приводят к резкому росту коэффициента битовых ошибок (BER). Для компенсации этих воздействий необходимы эффективные методы помехоустойчивого кодирования [4].

Целью данной работы является исследование возможности повышения устойчивости FSO-канала за счет применения LDPC-кодов (кодов с низкой плотностью проверок на четность) в сочетании с простой амплитудной модуляцией ООК [5].

Методы исследования

Для достижения поставленной цели была разработана модель FSO-канала в среде MATLAB Simulink. Моделирование проводилось для канала «наземный объект – БПЛА» с учетом следующих ключевых аспектов:

Атмосферная турбулентность является критическим фактором, дестабилизирующим FSO-канал. Даже для статичного канала увеличение индекса турбулентности C^2 от 10^{-15} до $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ приводит к экспоненциальному росту коэффициента битовых ошибок (BER) на пять порядков – от $2.34 \cdot 10^{-3}$ до 0.4 [6].

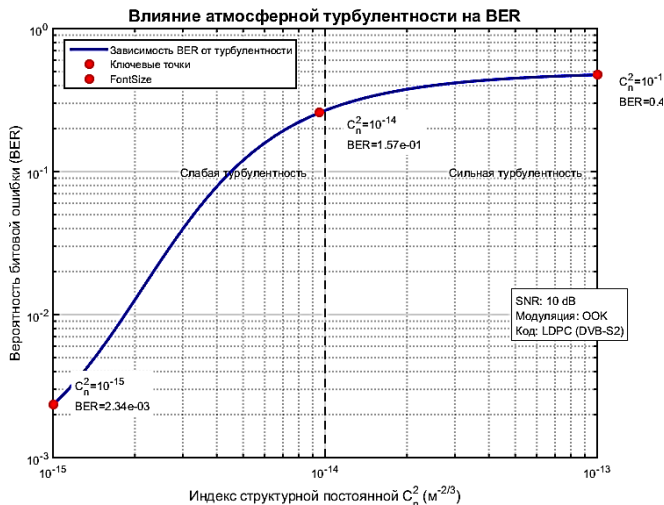


Рис. 1. Влияние атмосферной турбулентности на вероятность битовой ошибки (BER) в статическом FSO-канале

Модель канала Gamma-Gamma будет являться основной моделью описания атмосферной турбулентности [6]. Классическая модель была адаптирована для учета относительной скорости объектов:

$$\alpha_{new} = \alpha \left(1 + k_1 \frac{v \cdot \cos \theta}{\lambda} \right), \beta_{new} = \beta \left(1 + k_2 \frac{v \cdot \sin \theta}{\lambda} \right),$$

где v — относительная скорость, θ — угол визирования, λ — длина волны (1550 нм), k_1, k_2 — эмпирические коэффициенты.

Модуляция осуществляется благодаря ООК (On-Off Keying) за счет простоты реализации, энергоэффективности и устойчивости к доплеровскому сдвигу.

Кодирование реализуется при помощи корректирующего кода LDPC стандарта DVB-S2 со скоростью $R=3/4$, обусловленный высокой эффективностью против пакетных ошибок, характерных для турбулентных замираний [5].

Исследование проводилось для дистанции 5 км в городских условиях (индекс турбулентности $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$). Скорость БПЛА варьировалась от 0 до 50 м/с. Основной оцениваемой метрикой являлся коэффициент битовых ошибок (BER).

Моделирование результатов

Для анализа эффективности LDPC-кодирования было проведено сравнение характеристик канала до и после его применения.

Влияние LDPC на зависимость BER от SNR. Как видно из рисунка 2 (а), применение LDPC-кодирования позволяет значительно снизить требуемое значение SNR для достижения целевого $BER \leq 10^{-6}$. В условиях городской турбулентности энергетический выигрыш составляет 5–7 дБ. Это означает, что система с кодированием может работать с той же надежностью при значительно более низкой мощности передатчика или на большей дистанции.

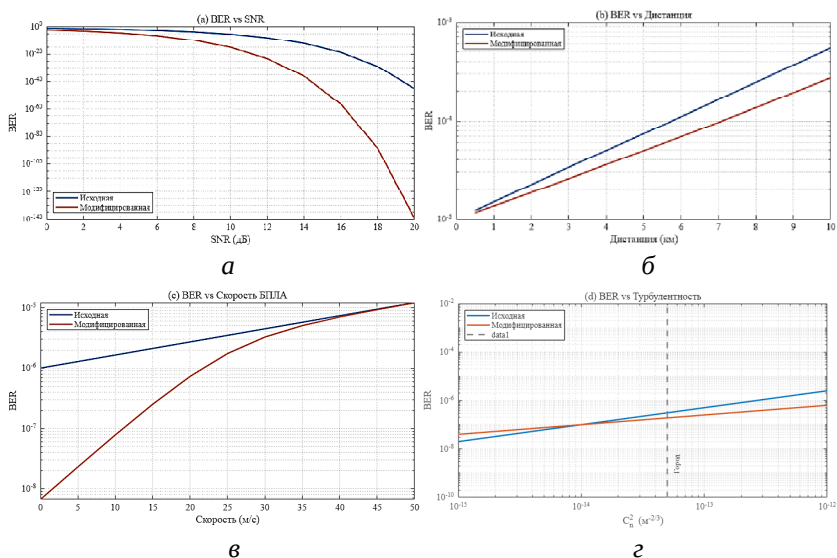


Рис. 2. Зависимость BER от SNR (а); BER от турбулентности (б); BER от дистанции (в); BER от скорости БПЛА (г)

Важным параметром FSO-системы является максимальная дальность устойчивой связи. На рисунке 2 (б) представлена зависимость BER от дистанции между абонентами для немодифицированной системы и системы с LDPC-кодированием. Анализ показывает, что применение LDPC-кода позволяет увеличить максимальную дистанцию связи с 4.2 км до 6.5 км для целевого значения $BER=10^{-6}$ в условиях умеренного тумана (затухание 0.6 дБ/км). Это расширяет потенциальную область применения системы в городской среде.

Относительное движение абонентов является критическим фактором для FSO-связи. На рисунке 2 (в) показано, как скорость БПЛА влияет на качество канала. Без применения LDPC-кодирования увеличение скорости с 15 до 35 м/с на дистанции 5 км приводит к росту BER на три порядка. Использование же LDPC-кода в сочетании с блоковым перемежением глубиной 100 бит позволяет снизить это ухудшение до одного порядка, эффективно компенсируя пакетные ошибки, вызванные доплеровским сдвигом и дрожанием луча.

На рисунке 2 (г) показано влияние турбулентности на качество связи. Применение LDPC-кода позволяет снизить BER на два порядка при высоких уровнях турбулентности ($C_n^2 > 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$), что подтверждает его эффективность для подавления ошибок, вызванных атмосферными неоднородностями.

Проведенное моделирование комплексно демонстрирует эффективность предложенного подхода. Сводные результаты, подтверждающие устойчивость модифицированной системы к ключевым дестабилизирующим факторам (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение устойчивости систем к различным факторам (для $\text{BER}=10^{-6}$)

Дестабилизирующий фактор	Требуемое SNR (турбулентность $C_n^2 = 1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$)	Дистанция (в тумане 0,6 дБ/км) $L_{\text{макс}}$, км	Скорость БПЛА (35 м/с)
Немодифицированная система	>22 дБ	4,2	$\text{BER} > 10^{-3}$
Система с LDPC (R=3/4)	15 дБ	6,5	$\text{BER} \sim 10^{-5}$
Улучшение, раз	~5	~1,55	>100

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения LDPC-кодирования стандарта DVB-S2 (R=3/4) в FSO-канале «Земля-БПЛА» с модуляцией ООК. Основные результаты:

Достигнут энергетический выигрыш 5–7 дБ по SNR для значения $\text{BER}=10^{-6}$ в условиях сильной турбулентности.

Показано, что использование LDPC-кода снижает влияние скорости БПЛА на качество связи, позволяя сохранять устойчивую связь на скоростях до 35 м/с.

Определено, что применение LDPC-кодирования увеличивает максимальную дальность связи на 55% (с 4.2 км до 6.5 км) в условиях тумана и в 3 раза эффективнее компенсирует влияние скорости наземной платформы по сравнению с немодифицированной системой.

Выводы

Полученные результаты являются основой для проектирования практических систем мониторинга и связи на базе БПЛА. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка гибридных FSO/RF-систем и внедрение алгоритмов адаптивного кодирования и модуляции.

Библиографический список

1. Khalighi M.A., Uysal M. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. No. 4. pp. 2231-2258.
2. Fedorov K.L., Petrova I.M. Application of LDPC Codes in Wireless Optical Systems // *Electrosvyaz*. — 2022. — No. 11. — Pp. 28–34.
3. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser Beam Propagation through Random Media. 2nd ed. SPIE Press, 2005.
4. Vapnik V. Statistical Learning Theory. Wiley, New York. 1998.
5. He J. et al. FSO Receiver With Adaptive Alignment Based on Pure Phased Holographic Imaging // *Frontiers in Physics*. — 2021. — Vol. 9. — Art. 661843. — DOI: 10.3389/fphy.2021.661843.
6. Grigoriev V.A. Atmospheric Turbulence in Free-Space Optical Communication Systems: Modeling and Compensation // *Radioengineering and Electronics*. — 2023. — Vol. 68, No. 4. — Pp. 45–52.

УДК 621.396.62; ГРНТИ 47.47.31

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ СВЧ-ПРИЁМНИК ДЛЯ РЛС С АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ

В.И. Протасов

*АО “Научно-исследовательский институт приборостроения имени
В. В. Тухомирова”*

Жуковский, protasov.v@nio9.niip.ru

Аннотация. В данной работе показан состав и описан принцип работы двухканального СВЧ приёмника радиолокационной станции с активной фазированной антенной решёткой. Рассмотрены результаты исследования основных параметров приёмника. Показана карта шумовых и динамических характеристик.

Ключевые слова: РЛС, СВЧ-приёмник, АФАР, динамический диапазон, коэффициент шума.

TWO-CHANNEL MICROWAVE RECEIVER FOR AN ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAY RADAR

V. I. Protasov

*JSC “V. V. Tikhomirov Research Institute of Instrument Engineering” Zhukovsky,
protasov.v@nio9.niip.ru*

Abstract. This paper shows the composition and describes the principle of operation of a two-channel microwave receiver for a radar station with an active phased array antenna. The results of a study of the main parameters of the receiver are considered. A map of the noise and dynamic characteristics is shown.

Keywords: Radar, microwave receiver, APAA, dynamic range, noise figure.

Введение

Приёмный канал играет важную роль в обеспечении потенциала радиолокационной станции. Предельная чувствительность приёмника, наряду с другими характеристиками радиоэлектронной аппаратуры, определяет максимальную дальность действия РЛС. Динамический диапазон приёмного канала определяет возможность эффективной работы РЛС в условия помеховой обстановки [1, 2].

Необходимо отметить, что приемные каналы РЛС с АФАР отличаются от приемных каналов РЛС с пассивными ФАР. Это отличие заключается в том, что входная часть приемного канала – малошумящий усилитель – распределена по апертуре АФАР [3]. Данную особенность необходимо учитывать при проектировании следующего за МШУ устройства сквозного приёмного канала – приёмника СВЧ [4].

В рамках данной работы проведено исследование шумовых и динамических характеристик двухканального приёмника СВЧ для малогабаритной РЛС с АФАР. Технические требования, предъявляемые к приёмнику приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические требования к приёмнику СВЧ.

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
1	Коэффициент шума, дБ, не более	$K_{ш}$	6
2	Коэффициент усиления, дБ, не менее	K_y	45
3	Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу (ВГЛАХ), Вт	P_{1dB}	Не менее $1 \cdot 10^{-7}$
4	Сквозная полоса пропускания, МГц	ΔF	10
5	Уровень ограничения по выходу, дБм	OP_{1dB}	+ 13

Состав приёмника СВЧ и описание принципа его работы

Малощумящий двухканальный приёмник СВЧ представляет собой единый модуль в герметизированном корпусе. Устройства, входящие в приёмник СВЧ, осуществляющие функции преобразования и усиления сигнала f_0 , $f_{ПЧ1}$ и $f_{ПЧ2}$ выполнены на основе микрополосковых плат (СВЧ материал “Rogers”) с применением бескорпусных и корпусированных интегральных микросхем.

СВЧ приёмник подключен к выходам АФАР, один из которых является суммарным каналом, а другой разностным. Каждый из каналов приёмника СВЧ построен по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты.

Функционально приёмник СВЧ состоит из следующих частей: СВЧ, 1-ой ПЧ и 2-ой ПЧ. Структурная схема приёмника СВЧ приведена на рисунке 1.

В канале СВЧ расположены устройство защиты (ЗУ), малощумящий усилитель (МШУ) и фильтр зеркальных частот (ФЗЧ) в микрополосковом исполнении. Устройство защиты ограничивает входную мощность до 10 мВт, а также обеспечивает запирающее действие на канал на 40 дБ при подаче команды управления. Потери в ЗУ не превышают 1 дБ. Для обеспечения требований по коэффициенту шума применён малощумящий усилитель с $K_{ш}$ не более 2,0 дБ и K_y не менее 18 дБ.

Частоты гетеродинов $F_{Г1}/4$ и $F_{Г2}$ поступают из блока задающего генератора на устройство распределения сигналов гетеродина. Здесь происходит умножение частоты $F_{Г1}/4$ до диапазона $F_{Г1}$, усиление до требуемого уровня и разделение частот гетеродинов между каналами.

Преобразование частоты F_0 в частоту $F_{ПЧ1}$ осуществляется в смесителе 1 (СМ1). Для обеспечения требований по динамическому диапа-

зону ВГЛАХ первого смесителя составляет 10^{-1} Вт, при этом мощность первого гетеродина должна составлять не менее 70 мВт.

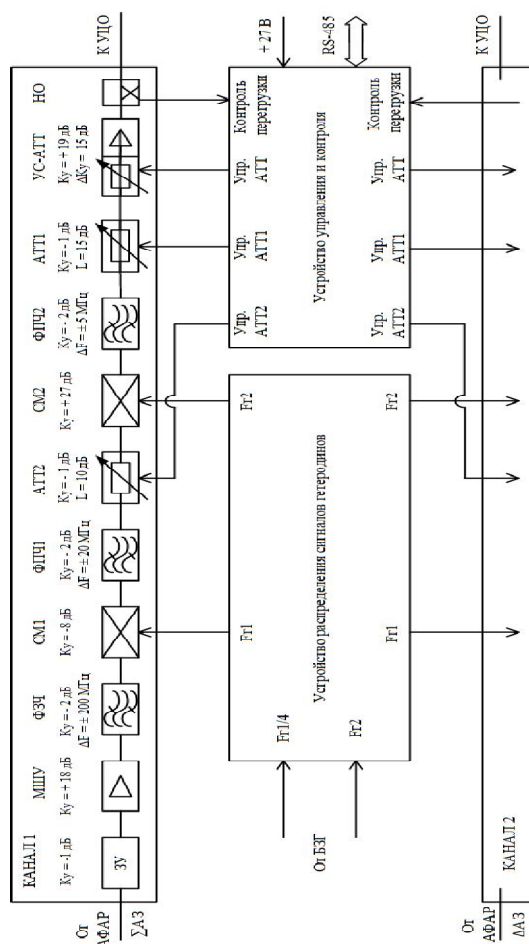


Рис. 1. Структурная схема приёмника СВЧ

В тракте первой ПЧ применена интегральная микросхема второго смесителя (СМ2), которая включает в себя усилители трактов ПЧ1 и ПЧ2, а также усилитель частоты второго гетеродина. Коэффициент усиления данной микросхемы не менее 27 дБ при коэффициенте шума не более 4 дБ. Атеннуатор 2 (АТТ2) на частоте $F_{ПЧ1}$, предназначены

для расширения динамического диапазона на 10 дБ. Для подавления второй зеркальной частоты в тракте ПЧ1 применён фильтр промежуточных частот ФПЧ1.

В тракте второй ПЧ применена интегральная микросхема усилителя-аттенюатора, коэффициент усиления которой не менее 19 дБ при коэффициенте шума не более 5 дБ. На входе микросхемы расположен 5-разрядный дискретный аттенюатор регулировки уровня шума (АРУШ). Глубина регулировки усиления составляет 15 дБ с шагом 1 дБ. Расположение АРУШ на выходе приёмного канала даёт возможность плавно регулировать уровень выходного шума приёмника СВЧ и расширять динамический диапазон без существенного увеличения коэффициента шума. Аттенюатор 1 (АТТ1) на частоте $F_{ПЧ1}$, предназначены для расширения динамического диапазона на 15 дБ. С помощью направленного ответвителя (НО) часть энергии направляется в систему контроля уровня мощности на выходе тракта частоты $F_{ПЧ2}$. Фильтр ФПЧ2 служит для формирования сквозной полосы пропускания. Сигнал с выходов приёмника СВЧ поступает на устройство цифровой обработки (УЦО).

Устройство управления и контроля контролирует перегрузки в приёмном канале по сигналу частоты $F_{ПЧ2}$, поступающего с направленного ответвителя мощности, обеспечивает управление защитным устройством и аттенюаторами, обеспечивает обмен информацией с процессором РЛС по линии связи RS-485, а также выполняет функцию вторичного источника питания.

Результаты исследования характеристик приёмника СВЧ

Основные электрические характеристики приёмника СВЧ, полученные в ходе исследования, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Электрические характеристики приёмника СВЧ.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Норма		
			Не менее	Номинал	Не более
1	Коэффициент усиления, дБ	K_y	45	47	49
2	Коэффициент шума, дБ: при отклю- ченных аттенуато- рах при включенном аттенуаторе АТТ1 при включенных аттенуаторах АТТ1, АТТ2	$K_{ш}$			4,8 5,0 9,0
3	ВГЛАХ, Вт при отклю- ченных аттенуато- рах при включенном аттенуаторе АТТ1 при включенных аттенуаторах АТТ1, АТТ2	P_{1dB}	$4 \cdot 10^{-7}$ $1,2 \cdot 10^{-5}$ $1,2 \cdot 10^{-4}$		

На рисунке 2 представлена карта шумовых и динамических характеристик приёмника СВЧ. Карта показывает уровни принятого сигнала и собственных шумов при прохождении каскадов приёмника, а также точки однодецибельной компрессии по входу усилительных каскадов. Показано, как изменяется верхняя граница линейности амплитудной характеристики в зависимости от включения аттенуаторов АТТ1 и АТТ2.

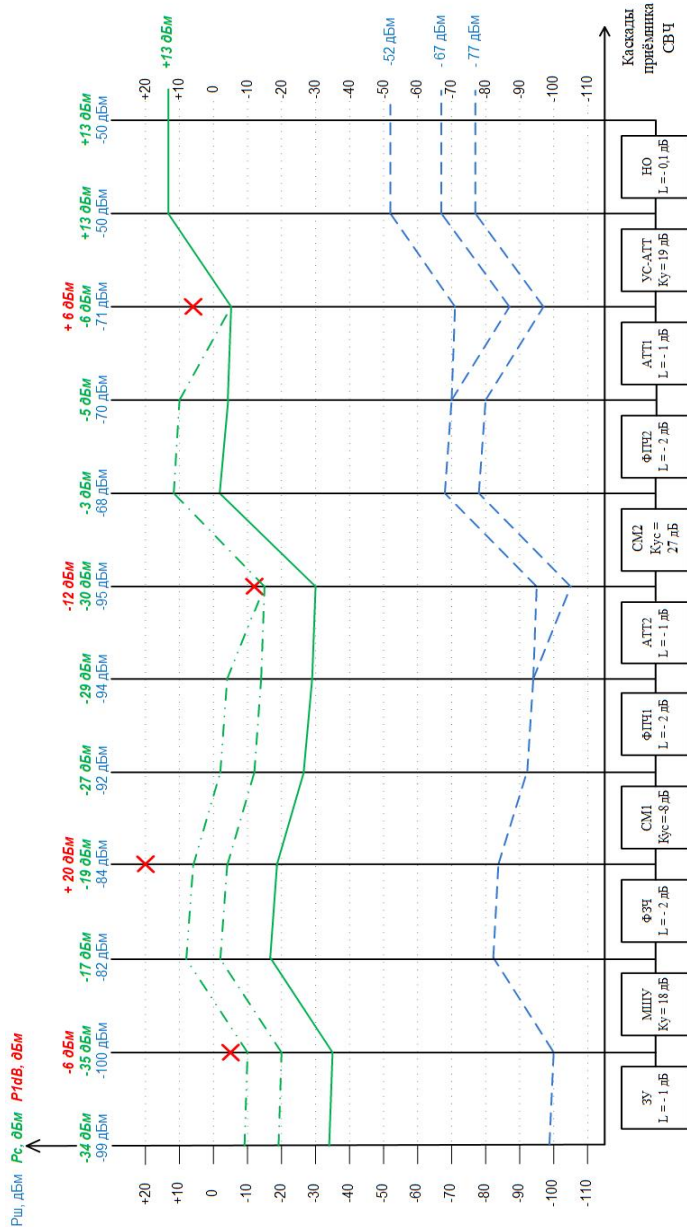


Рис. 2. Карта шумовых и динамических характеристик приёмника СВЧ в сквозной полосе пропускания $\Delta F = 10$ МГц

Выводы

1. Разработанный приёмник СВЧ соответствует заданным требованиям и обладает высокими техническими характеристиками: низкий коэффициент шума, высокий коэффициент усиления, высокий уровень верхней границы линейности амплитудной характеристики по входу.

2. Мгновенный динамический диапазон в полосе пропускания $\Delta F = 10$ МГц составил 65 дБ. При включении аттенюаторов АТТ1 и АТТ2 динамический диапазон расширяется до 90 дБ. Полный динамический диапазон составляет 93 дБ.

3. Структура приёмника СВЧ разработана таким образом, что расширение динамического диапазона на 15 дБ не приводит к существенному увеличению коэффициента шума приёмного канала. Дополнительное расширение динамического диапазона на 10 дБ увеличивает коэффициент шума на 4 дБ.

4. В состав приёмника СВЧ входит защитное устройство, способное обеспечивать защиту от импульсной просачивающейся мощности до 10 Вт, а также обладает возможностью бланкирования приёмного канала на 40 дБ. Совокупность указанных факторов позволяет применить разработанный приёмник СВЧ в РЛС с пассивными фазированными антенными решётками при следующих условиях:

- импульсная мощность передающего устройства не превышает 500 Вт;
- приёмный и передающий тракты развязаны циркулятором с уровнем развязки не менее 20 дБ;
- в устройстве цифровой обработки применён 16-ти разрядный АЦП с максимальным уровнем входного сигнала 1 В.

Библиографический список

1. Вовшин Б. М. Теоретические основы радиолокационного наблюдения целей. Учебник. – М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2022. – 312 с.: ил.
2. Плешивцев В. И. СВЧ-приёмники радиолокационных систем. Монография. – М.: Радиотехника, 2012. – 184 с.: ил.
3. В. А. Хлусов, В. В. Доценко. Доклады ТУСУРа, том 20, № 4, 2017, с. 7-10.
4. В. И. Протасов, М. С. Карасёв, Д. А. Поисов. Влияние амплитудных распределений АФАР на шумовые характеристики сквозного приёмного канала. – Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника, вып. 3(567), 2025.

УДК 621.395; ГРНТИ 89.57.35

МЕТОД СЖАТИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОРОГОВЫМ ОТСЕЧЕНИЕМ

В.Т. Дмитриев, Ву Хоанг Шон*Рязанский государственный радиотехнический университет**им.В.Ф.Уткина,**Рязань, vuhoangson.adaf@gmail.com*

Аннотация. Представлен метод сжатия речевых сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования с применением глобального энергетического порогового отсека вейвлет-коэффициентов. Подход использует единый энергетический критерий для всего вейвлет-спектра фрейма, обеспечивая управляемую разреженность через задание доли сохраняемой энергии α . Проведён комплексный анализ зависимости метрик качества и степени разреженности от параметра α ($80 \div 99$ %). Эксперименты на стандартных речевых записях (8 кГц) показали, что оптимальное соотношение качества и степени сжатия достигается при $\alpha = 90 \div 95$ %: $\text{SegSNR} > 10$ дБ, $\text{ViSQOL} > 3,7$ баллов по шкале MOS, $\text{RMSE} < 0,013$ при степени разреженности $76 \div 85$ %, соответствующей коэффициентам сжатия от 4,2 до 6,7.

Ключевые слова: сжатие речевых сигналов, дискретное вейвлет-преобразование, глобальное энергетическое пороговое отсека, степень разреженности, коэффициент сжатия.

SPEECH SIGNAL COMPRESSION METHOD BASED ON DISCRETE WAVELET TRANSFORM WITH ENERGY-BASED THRESHOLDING

V.T. Dmitriev, Vu Hoang Son*Ryazan State Radio Engineering University,**Ryazan, vuhoangson.adaf@gmail.com*

Abstract. A method for speech signal compression based on the discrete wavelet transform with global energy-based thresholding of wavelet coefficients is presented. The proposed approach employs a unified energy criterion over the entire wavelet spectrum of each frame, enabling controlled sparsity through the specification of the preserved energy ratio α . A comprehensive analysis of the dependence of quality metrics and sparsity on the parameter α (ranging from 80% to 99%) has been performed. Experimental results on standard speech recordings (8 kHz) demonstrate that the optimal trade-off be-

tween reconstruction quality and compression ratio is achieved for $\alpha = 90 \div 95\%$, yielding SegSNR > 10 dB, ViSQOL > 3,7 on the MOS scale, and RMSE < 0,013 at a sparsity level of 76÷85%, corresponding to compression ratios from 4.2 to 6.7.

Keywords: speech signal compression, discrete wavelet transform, global energy-based thresholding, sparsity, compression ratio.

Введение

Современные системы передачи и хранения речевой информации предъявляют строгие требования к эффективности кодирования при сохранении разборчивости и естественности звучания. В последние десятилетия значительное внимание уделяется методам, основанным на разреженных представлениях сигналов в ортогональных или биортогональных базисах. Одним из наиболее перспективных направлений является применение дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), обладающего свойствами мультиразрешающего анализа и локализации как во временной, так и в частотной областях [1, 2].

Ключевым этапом вейвлет-сжатия является отбор значимых коэффициентов, что обычно реализуется с помощью пороговых методов. Наиболее известным является универсальный порог, предложенный Донхо и Джонстоном [3]. Однако данный подход ориентирован в первую очередь на подавление шума, а не на оптимизацию сжатия, и может приводить к избыточному или недостаточному отсечению коэффициентов при фиксированных требованиях к качеству. В отличие от этого, энергетический порог позволяет задавать желаемую долю сохраняемой энергии сигнала, что напрямую соответствует цели сжатия с контролируемым искажением. Такой подход особенно целесообразен для речевых сигналов, где энергетическая структура тесно связана с перцептивными характеристиками.

Целью работы является разработка и валидация метода сжатия речи, основанного на ДВП и энергетическом пороговом отсечении, с количественной оценкой его эффективности по стандартным метрикам качества и разреженности.

Вейвлет-преобразование речевых сигналов

Вейвлет-преобразование является основным инструментом современного сжатия речевых сигналов благодаря способности

эффективно представлять их во временно-частотной области. В отличие от преобразования Фурье, дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) обеспечивает адаптивное разрешение, что особенно важно для нестационарных речевых сигналов. Это позволяет анализировать быстрые переходы и длительные устойчивые фрагменты речи в единой математической модели.

Дискретное вейвлет-преобразование реализуется двоичным фильтровым банком с децимацией. Пусть $x[n]$ — дискретный речевой сигнал длиной N . На уровне j из входной последовательности $a_{j-1}[n]$ формируются аппроксимация $a_j[k]$ и детализация $d_j[k]$ [1–3]:

$$a_j[k] = \sum_n h[n-2k]a_{j-1}[n], \quad d_j[k] = \sum_n g[n-2k]a_{j-1}[n], \quad (1)$$

где $h[n]$ и $g[n]$ — импульсные характеристики фильтров нижних и верхних частот соответственно;

операция $2k$ отражает децимацию на 2;

$a_j[k]$ — аппроксимирующие, $d_j[k]$ — детализирующие коэффициенты уровня j . На нулевом уровне $a_0[n] = x[n]$.

Повторяя процедуру для a_j до глубины J , получаем:

$$x[n] \Rightarrow \{a_J, d_J, d_{J-1}, \dots, d_1\}. \quad (2)$$

где a_J — низкочастотная аппроксимация, а d_j — детализирующие коэффициенты соответствующего уровня.

Таким образом, каждый уровень анализа выделяет отдельный диапазон частот, что позволяет отделить медленные компоненты речи (форманты, гласные) от быстрых переходов и шумоподобных элементов (согласные, шипящие).

На этапе восстановления используется синтезирующий банк фильтров [1, 2]:

$$a_{j-1}[n] = \sum_n (h_r[n-2k]a_j[k] + g_r[n-2k]d_j[k]), \quad j = J, \dots, 1, \quad (3)$$

где $h_r[n]$ и $g_r[n]$ — синтезирующие фильтры. Итоговый сигнал $\hat{x}[n] = a_0[n]$ сохраняет перцептивные характеристики оригинала при меньшем объеме данных.

На основе вейвлет-преобразования разработана обобщённая блок-схема системы сжатия и восстановления речевых сигналов (рис. 1).

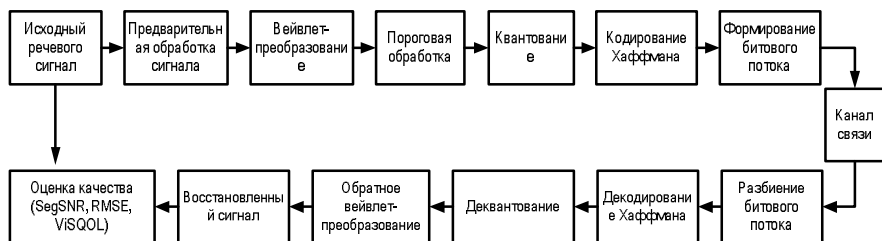


Рис. 1. Общая схема системы сжатия и восстановления речевого сигнала на основе вейвлет-преобразования

Пороговая обработка коэффициентов

После вейвлет-декомпозиции речевого сигнала представлен множеством коэффициентов $\{a_J, d_J, d_{J-1}, \dots, d_1\}$. Пороговая обработка выполняется для коэффициентов каждого уровня вейвлет-декомпозиции с целью удаления малозначимых компонент. В типичной схеме сжатия речи пороговая обработка только к коэффициентам детализации $d_j[k]$, $j = 1, \dots, J$. Аппроксимационные коэффициенты $a_j[k]$ сохраняются без изменения либо подвергаются мягкому квантованию, так как содержат основную энергию и перцептивно значимую информацию.

Формально операция пороговой обработки описывается выражением:

$$\tilde{d}_j[k] = \Phi_{T_j}(d_j[k]),$$

$$\tilde{a}_j[k] = \begin{cases} \Phi_{T_j}(a_j[k]), & \text{если допускается порог в } a_j \\ a_j[k], & \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\Phi_{T_j}(\cdot)$ — выбранная пороговая функция, а T_j — методически определённый порог для уровня j .

На практике применяются две основные формы пороговых функций — жёсткая и мягкая.

Жёсткая функция реализует простое отсечение малых коэффициентов [3]:

$$\Phi_T^{(ж)}(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq T, \\ 0, & |x| < T. \end{cases} \quad (5)$$

а мягкая функция обеспечивает плавное ослабление вблизи порога [3]:

$$\Phi_T^{(M)}(x) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(x)(|x| - T), & |x| \geq T, \\ 0, & |x| < T. \end{cases} \quad (6)$$

Жёсткий порог сохраняет структуру крупных коэффициентов, но может вызывать разрывы при восстановлении. Мягкий порог, напротив, обеспечивает более гладкий сигнал ценой небольшой потери энергии.

Выбор значения T определяет баланс между степенью сжатия и искажениями сигнала. Среди существующих подходов к определению порога особое место занимает энергетический метод. Ключевая идея метода заключается в использовании единого порогового значения T для всех уровней декомпозиции. Это основано на свойстве ДВП концентрировать энергию сигнала в коэффициентах большой амплитуды независимо от уровня разложения.

Общая энергия всех вейвлет-коэффициентов:

$$E_{\Sigma} = \sum_{j=1}^J \sum_k |d_j(k)|^2 + \sum_k |a_j(k)|^2 \quad (7)$$

Для упрощения обозначим все коэффициенты единым вектором:

$$\mathbf{C} = \{c_i, i=1, 2, \dots, M\} \quad (8)$$

где M — общее количество коэффициентов после J -уровневой декомпозиции:

$$M = \frac{N}{2} + \frac{N}{4} + \dots + \frac{N}{2^J} + \frac{N}{2^J} = N \left(1 - \frac{1}{2^J} \right) + \frac{N}{2^J} = N. \quad (9)$$

Тогда общая энергия:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M |c_i|^2 = \sum_{i=1}^M c_i^2. \quad (10)$$

В отличие от поуровневых адаптивных методов, где каждый уровень декомпозиции j имеет собственный порог T_j , глобальный энергетический метод использует единое пороговое значение для всей совокупности вейвлет-коэффициентов.

Пусть $\alpha \in (0, 1)$ — параметр сохранения энергии (обычно $\alpha = 0,95 \div 0,99$, эквивалентно $95 \div 99\%$ общей энергии сигнала). Глобальный порог T определяется из условия:

$$\sum_{i \in W} c_i^2 \geq \alpha \cdot E_{\Sigma}, \quad (11)$$

где $W = \{i : |c_i| \geq T\}$ — множество индексов сохраняемых коэффициентов.

Алгоритм вычисления глобального порога:

1. Вычислить полную энергию всех коэффициентов: $E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M c_i^2$.
2. Вычислить целевую (сохраняемую) энергию: $E_{\eta} = \alpha \cdot E_{\Sigma}$.
3. Отсортировать все коэффициенты по убыванию модуля: $|c_{(1)}| \geq |c_{(2)}| \geq \dots \geq |c_{(M)}|$.
4. Найти минимальный индекс K такой, что выполняется условие: $\sum_{i=1}^K c_{(i)}^2 \geq E_{\eta}$, при этом: $\sum_{i=1}^{K-1} c_{(i)}^2 < E_{\eta}$.
5. Установить глобальное пороговое значение: $T = |c_{(K)}|$.

Таким образом, в рамках глобального энергетического подхода не используется фиксированный порог T , а выбор сохраняемых коэффициентов осуществляется на основе их вклада в общую энергию всего вейвлет-спектра. Сохраняются K наиболее значимых коэффициентов из общего числа M , что обеспечивает степень сжатия порядка M/K и степень разреженности $S = (1 - K/M) \cdot 100\%$.

Экспериментальные исследования

Целью экспериментального исследования являлась количественная оценка эффективности сжатия речевых сигналов при использовании глобального энергетического порогового отсеечения коэффициентов ДВП.

В эксперименте использовались 20 записей речевых фраз, произнесённых дикторами обоих полов и подготовленных в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 50840–95 [4]. Продолжительность каждого фрагмента составляла от 2 до 5 с. Для обеспечения корректности сравнения все сигналы были унифицированы по следующим параметрам: частота дискретизации — 8 кГц, разрядность — 16 бит на отсчёт, амплитуда нормализована к диапазону $[-1, 1]$.

Речевой сигнал разбивался на перекрывающиеся фреймы длиной 256 отсчётов с 50 % перекрытием, после чего к каждому фрейму применялось 4-уровневое ДВП с использованием вейвлета Добеши 4-го порядка (db4). В рамках предложенного подхода осуществлялось глобальное энергетическое пороговое отсеечение: все коэффициенты вейвлет-спектра фрейма сортировались по убыванию абсолютных значений, и сохраня-

лись только те из них, которые обеспечивали заданную долю α общей энергии (от 80 % до 99 %) [5-8].

Этапы обработки сигналов выполняются согласно общей схеме, представленной на рисунке 1. Для анализа эффективности сжатия речевых сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования использовался комплекс объективных и перцептивных метрик, оценивающих качество восстановленного сигнала в зависимости от доли сохраняемой энергии [8]. В исследовании рассмотрены следующие показатели: нормализованная среднеквадратическая ошибка (RMSE), сегментное отношение сигнал/шум (SegSNR), объективная мера восприятия качества речи (ViSQOL), а также степень разреженности S вейвлет-коэффициентов, характеризующая уровень сжатия [7]. Анализ зависимости данных метрик от доли сохраняемой энергии позволил количественно оценить компромисс между качеством восстановления и степенью сжатия.

На рисунке 2 показана монотонно возрастающая зависимость SegSNR от параметра α . При увеличении доли сохраняемой энергии с 80% до 99%, значение SegSNR возрастает с 7,3 дБ до 20,8 дБ. Это свидетельствует о том, что качество восстановленного сигнала по критерию сегментного отношения сигнал/шум улучшается при увеличении числа сохраняемых коэффициентов. Кривая имеет нелинейный характер, особенно резко возрастаая в области $\alpha > 95\%$, что указывает на высокую чувствительность SegSNR к небольшим изменениям энергетического порога в этой зоне.

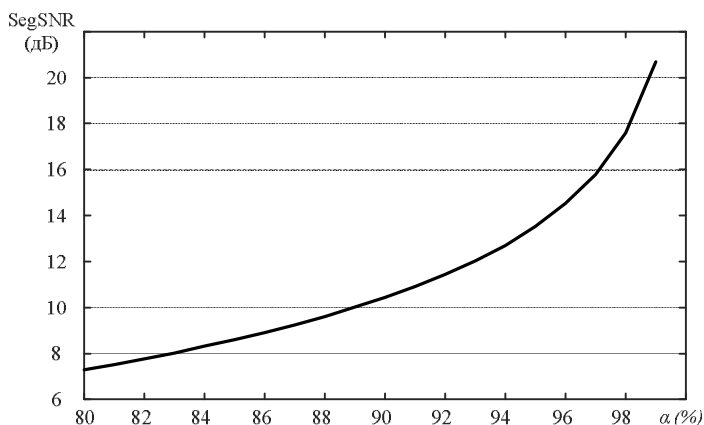


Рис. 2. Зависимость SegSNR от доли сохраняемой энергии

График RMSE на рисунке 3 демонстрирует обратную зависимость: с ростом α значение RMSE монотонно уменьшается от 0,019 до 0,004. Это подтверждает, что при увеличении доли сохраняемой энергии искажение сигнала снижается, что является ожидаемым результатом. Нелинейное падение RMSE также указывает на то, что эффективность сжатия достигает своего оптимума в диапазоне $\alpha = 90\div 95\%$, где снижение ошибки становится менее значительным при дальнейшем увеличении α .

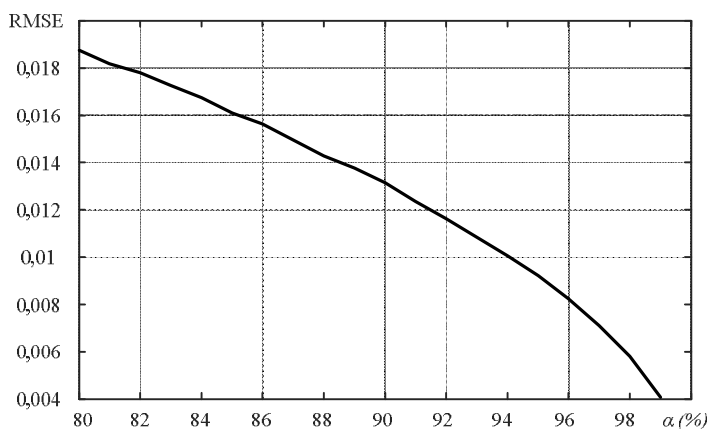


Рис. 3. Зависимость RMSE от доли сохраняемой энергии

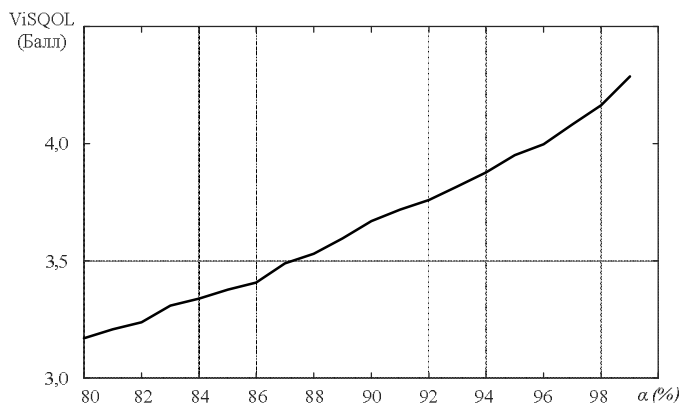


Рис. 4. Зависимость ViSQOL от доли сохраняемой энергии

На рисунке 4 значение ViSQOL, отражающее перцептивное качество восстановленной речи, также монотонно возрастает с 3,2 до

4,4 баллов по шкале MOS при увеличении α от 80% до 99%. Этот факт подтверждает, что предлагаемый метод обеспечивает не только энергетическую, но и перцептивную целостность сигнала. Особенно важным является то, что при $\alpha = 96\%$ значение ViSQOL превышает 4,0 баллов, что соответствует «хорошему» качеству по шкале MOS.

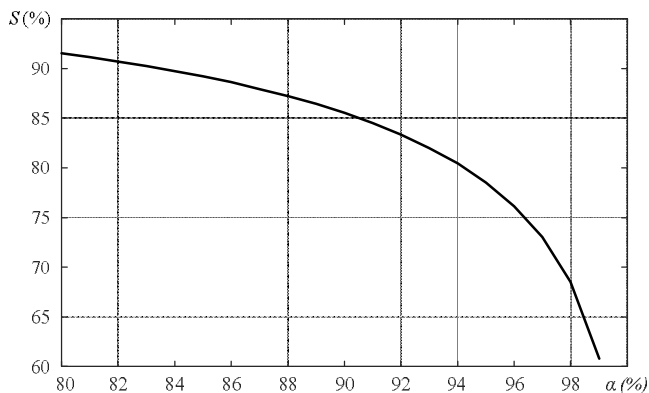


Рис. 5. Зависимость степени разреженности от доли сохраняемой энергии

Из рисунка 5 видно, что при увеличении доли сохраняемой энергии от 80% до 100% степень разреженности монотонно уменьшается с 91,5% до 61%. Это отражает фундаментальный компромисс между степенью сжатия и качеством восстановления: чем больше энергии сохраняется, тем меньше коэффициентов отсекается, и, следовательно, меньше степень сжатия. В диапазоне $\alpha = 90 \div 95\%$ наблюдается наиболее выгодный баланс: степень разреженности составляет $85 \div 76\%$, что соответствует коэффициенту сжатия от 6,7 до 4,2; при этом качество (по всем метрикам) остается высоким.

Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод глобального энергетического порогового отсекажения обеспечивает управляемый компромисс между степенью сжатия и качеством восстановления.
2. Оптимальная область работы метода находится в диапазоне $\alpha = 90 \div 95\%$, где достигается высокое качество ($\text{SegSNR} > 10$ дБ, $\text{ViSQOL} > 3,7$ баллов по шкале MOS, $\text{RMSE} < 0,013$) при значительной степени разреженности ($S > 76\%$).

3. Метод обладает высокой предсказуемостью и стабильностью, так как все метрики изменяются монотонно и предсказуемо в зависимости от одного параметра — доли сохраняемой энергии

Таким образом, предложенный подход представляет собой эффективное решение для задач сжатия речевых сигналов, сочетающее простоту реализации, управляемость и высокое качество восстановления.

Библиографический список

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 464 с.
2. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: Изд-во ВУС, 1999. 204 с.
3. Donoho D.L. De-noising by soft-thresholding// IEEE Trans. on Information Theory. 1995, V. 43. N.3. P. 613–627.
4. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Изд-во стандартов. 1995. 60 с.
5. В.Т. Дмитриев, Д.И. Лукьянов Алгоритм маскирования на основе представления Хургина-Яковлева с использованием производных второго и третьего порядков. Вестник РГРТУ 2012 №4. –С.13-17.
6. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Д.Е. Крысаяев, С.С. Попов Исследование качества передаваемой речевой информации при различном сочетании алгоритмов кодирования источника и канала связи в условиях действия помех. Вестник РГРТУ 2008 № 1 (Выпуск 23) . С. 53-56.
7. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева.//Вестник РГРТУ 2022 №82 – С. 27- 37.
8. Дмитриев В.Т., Харланова Е.А. Алгоритм кодирования речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева и вейвлет-пакетного разложения в системах компьютерной телефонии.// Вестник РГРТУ 2010 № 1 (Выпуск 31) С. 98-101.

УДК 621.396.673; ГРНТИ 49.45.29

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН ПУТЁМ СОПРЯЖЕНИЯ ПРОГРАММ MMANA-GAL И OCTAVE

А.В. Захряпин, Л.В. Аронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, LVArronov@yandex.ru*

Аннотация. Разработана методика автоматизированного проектирования конических спиральных антенн путём интеграции среды GNU Octave и программы MMANA-GAL. Устранена трудность ручного ввода геометрии за счёт генерации файлов проектов в формате *.maa на основе параметрических моделей. Построены уравнения для конической спирали, проведено моделирование и оптимизация. Рассчитана антенна с рабочим диапазоном 500 МГц – 1,5 ГГц ($K_{CB} \leq 3$), имеющая 11 витков, шаг 0,075 м и радиус нижнего витка 0,11 м. Подтверждена стабильность характеристик в диапазоне.

Ключевые слова: коническая спиральная антенна, MMANA-GAL, Octave, широкополосная антенна.

CONICAL HELICAL ANTENNAS STUDY BY CONJUGATION OF MMANA-GAL AND OCTAVE PROGRAMS

A.V. Zahryapin, L.V. Aronov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, LVArronov@yandex.ru*

Abstract. A methodology for the automated design of conical helical antennas has been developed by integrating the GNU Octave environment and the MMANA-GAL program. The labor-intensive nature of manual geometry input has been eliminated by generating project files in *.maa format based on parametric models. Equations for a conical helix have been constructed, and simulation and optimization have been performed. The antenna designed has an operating range of 500 MHz – 1.5 GHz ($SWR \leq 3$), has 11 turns, a pitch of 0.075 m, and a lower turn radius of 0.11 m. Stability of characteristics across the range has been confirmed.

Keywords: conical helix antenna, MMANA-GAL, Octave, broadband antenna.

Введение

В современной антенной технике широкое распространение получили тонкопроволочные излучающие структуры, такие как директорные, спиральные и рамочные антенны, расчёт которых часто выполняется с помощью специализированного программного обеспечения. Одной из наиболее доступных и эффективных программ для моделирования таких антенн является MMANA-GAL, основанная на методе моментов и позволяющая анализировать электродинамические характеристики антенных систем. Однако её использование сопряжено с существенным недостатком – необходимостью ручного ввода геометрии каждого проводника в отдельности. Для сложных конструкций, таких как спиральные излучатели, каждый виток приходится аппроксимировать 16–32 проводниками, этот процесс становится чрезвычайно трудоёмким. Особенно проблема актуальна при необходимости многократного ввода пересчёта конструкции в интересах оптимизации характеристик антенны. В связи с этим возникает потребность в автоматизации формирования геометрической модели антенны перед импортом в MMANA-GAL.

Целью данной работы является разработка методики автоматизированного создания файлов проектов MMANA-GAL (*.maa) путём предварительного расчёта и построения тонкопроволочных структур в свободно распространяемой по лицензии GPL среде GNU Octave, представляющей собой аналог среды Matlab и имеющей сходный синтаксис.

Математическое описание и алгоритм построения конических спиральных антенн

Конические спиральные антенны относятся к классу антенн бегущей волны и обладают рядом важных достоинств, определяющих их широкое применение в современных радиотехнических системах. Основным преимуществом данных антенн является широкая полоса рабочих частот – за счёт переменного шага и изменяющегося радиуса витков коническая спираль сохраняет устойчивые параметры излучения в значительно более широком диапазоне по сравнению с цилиндрическими. Это делает её пригодной для использования в широкополосных системах, таких как радиолокация, спутниковая связь и радиоэлектронная борьба. Коническая спиральная антенна формирует круговую поляризацию излучения в направлении своей оси, что повыша-

ет помехоустойчивость приёма и позволяет эффективно работать с подвижными объектами, положение которых в пространстве нестабильно – например, летательными и космическими аппаратами.

Конические спиральные антенны могут использоваться как самостоятельные излучатели, элементы антенных решёток или облучатели зеркальных антенн. Несмотря на меньший коэффициент направленного действия по сравнению с цилиндрическими спиралями (из-за ограниченного числа витков, удовлетворяющих условию осевого излучения), их эксплуатационные преимущества делают их предпочтительными в задачах, где требуется сочетание широкополосности, круговой поляризации и компактности конструкции.

Уравнение конической спирали в параметрической форме, с учётом поставленной задачи примет вид:

$$\begin{cases} x(\varphi) = \left(R_1 - (R_1 - R_2) \cdot \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right) \cdot \cos(\varphi); \\ y(\varphi) = \left(R_1 - (R_1 - R_2) \cdot \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right) \cdot \sin(\varphi); \\ z(\varphi) = s \cdot \frac{\varphi}{360^\circ}; \end{cases} \quad (1)$$

где R_1 – радиус основания конической спирали;

R_2 – радиус вершины конической спирали;

s – шаг спирали;

φ – азимутальный угол, $\varphi = 0 \dots \varphi_{\max}$;

φ_{\max} – максимальный угол поворота спирали с учитывающий число витков N .

На рисунке 1 показана построенная в Octave, согласно параметрическому уравнению (1), коническая спираль из 11 витков и шагом $s = 0,15\lambda$ с различными радиусами верхнего витка.

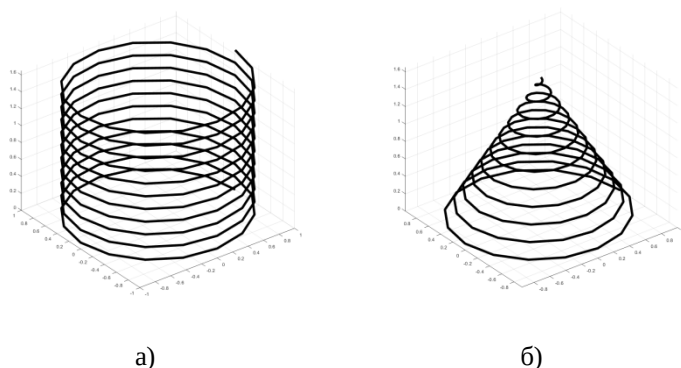


Рис. 1. Коническая спираль: а) – $R_2 = R_1$; б) – $R_2 = 0$

Показанные спиральные антенны обладают разными диапазоными свойствами, так согласно ранее изложенной теории наименьшая полоса частот у спиральной антенны на рисунке 1.а, а наибольшая у антенны на рисунке 1.б.

Результаты моделирования

Рассчитаем спиральную антенну с полосой рабочих частот от 500 МГц до 1,5 ГГц. Полоса частот в этом случае равна 1000 МГц (± 500 МГц относительно центральной частоты 1000 МГц). Отношение верхней частоты к нижней равно $f_B/f_H = 1500/500 = 3$. Используя Octave и САПР MMANA-GAL проведём анализ различных вариантов построения конструкции такой антенны.

Верхняя рабочая длина волны λ_B равна:

$$\lambda_B = c/f_B = 3 \cdot 10^8 / 15 \cdot 10^8 = 0,2 \text{ м}.$$

Нижняя рабочая длина волны λ_H равна:

$$\lambda_H = c/f_H = 3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 10^8 = 0,6 \text{ м}.$$

Длина витка на рабочей частоте конической спиральной антенны соответствует длине волны, следовательно радиус нижнего витка:

$$a_H = \lambda_H / 2\pi = 1 / 2\pi = 0,095 \text{ м} \approx 0,1 \text{ м},$$

а радиус верхнего витка

$$a_B = \lambda_B / 2\pi = 0,2 / 2\pi = 0,032 \text{ м}$$

В результате расчёта с последующей оптимизацией получена антенна, КСВ которой представлен на рисунке 2.

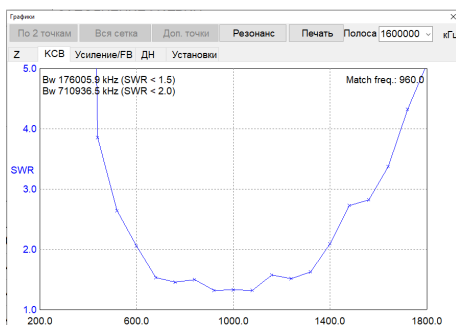
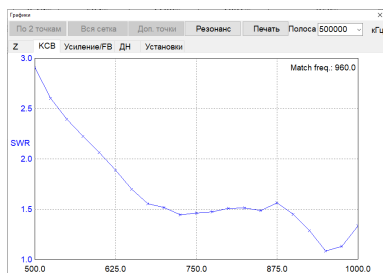
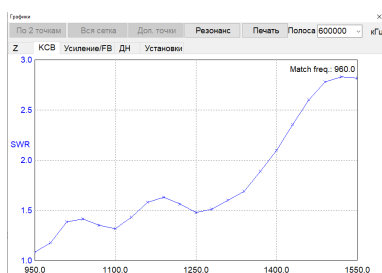


Рис. 2. КСВ рассчитанной конической спиральной антенны

КСВ разработанной антенны вблизи верхней и нижней границ частотного диапазона показан на рисунке 3.



а)



б)

Рис. 3. КСВ разработанной антенны вблизи верхней и нижней границ частотного диапазона: а) – нижняя граница; б – верхняя граница

Из рисунка видно, что антенна посчитана корректно и соответствует требованиям к частотному диапазону. Параметры разработанной антенны в диапазоне частот показаны на рисунке 4.

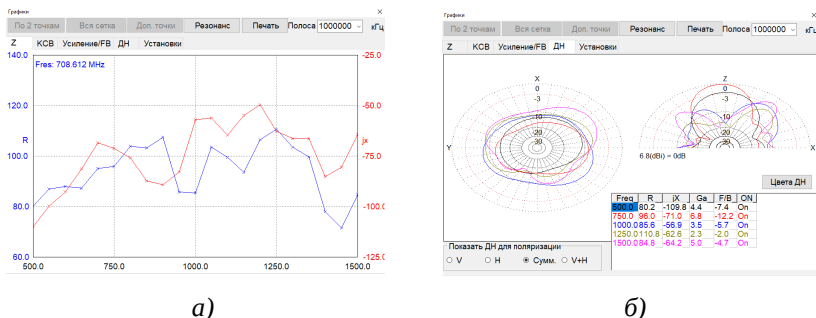


Рис. 4. Параметры разработанной антенны в диапазоне частот: а) – входное сопротивление; б) – диаграмма направленности

Внешний вид разработанной спиральной конической антенны в программе MMANA-GAL показан на рисунке 5.

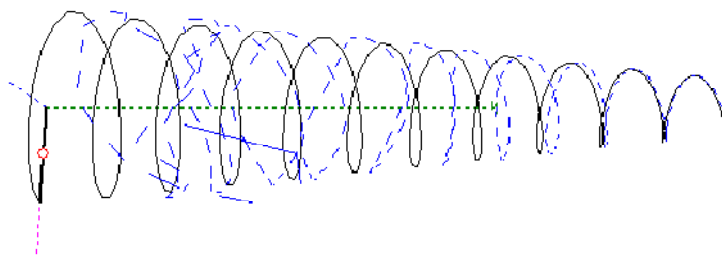


Рис. 5. Внешний вид антенны в программе MMANA-GAL

Таким образом, в результате проделанных расчётов удалось получить коническую спиральную антенну соответствующую заданным в техническом задании параметрам. При этом полученная антенна отличается от исходной, полученной согласно предварительным расчётам, радиусом нижнего витка, который равен $a_H = 0,11 \text{ м}$.

Выводы

Разработанная методика непрямого сопряжения GNU Octave и MMANA-GAL обеспечила эффективную автоматизацию проектирования конических спиральных антенн, устранив трудоёмкость ручного ввода геометрии. Рассчитана коническая спиральная антенна с 11 витками, шагом 0,075 м, радиусом нижнего витка 0,11 м и радиусом провода 0,01 м. Антенна обеспечивает рабочий диапазон 500 МГц – 1,5 ГГц при $K_{CB} \leq 3$, что соответствует полосе согласования 1086 МГц.

Анализ подтвердил стабильность входного сопротивления в заданном диапазоне частот. Методика может быть эффективна для многокритериальной оптимизации и применима к различным тонкопроволочным излучающим структурам.

Библиографический список

1. Баланис, К. А. Теория антенн: анализ и проектирование / К. А. Баланис; пер. с англ. под ред. В. И. Рубана. — 4-е изд. — Москва: Техносфера, 2021. — 1176 с. — Пер. изд.: *Antenna Theory: Analysis and Design* / C. A. Balanis. — Wiley, 2016.
2. Маторин А.В. Автоматизированное проектирование многоэлементных тонкопроволочных антенн. Учеб. Пособие для вузов / А.В. Маторин, Е.В. Жгутов – РГРТА, Рязань, 2004 – С.80
3. Маторин А.В. Проектирование тонкопроволочных антенны с использованием ЭВМ методом интегральных уравнений / А.В. Маторин, В.И. Поповкин – РРТИ, Рязань, 1987 – С.56
4. Лукьянов, Д. А. MMANA-GAL в радиолюбительской практике: Практическое руководство по моделированию антенн / Д. А. Лукьянов. — Москва: РадиоСофт, 2020. — 164 с. — ISBN 978-5-9903139-5-2.
5. Алексеев, Е. Р. Введение в Octave : учебное пособие / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова. — 2-е изд. — Москва : ИНТУИТ, 2016. — 486 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: e.lanbook.com (дата обращения: 10.10.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

УДК 004.94; ГРНТИ 28.17.19

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTESCH ДЛЯ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

А.А. Алексахин, В.А. Волченков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, AleksashinAA2002@yandex.com*

Аннотация. В работе рассмотрены функциональные возможности отечественной среды визуального моделирования SimInTech, применительно к задачам цифровой обработки сигналов. Описаны библиотеки блоков, используемые для математических, логических, матричных и статистических операций, а также для построения моделей фильтрации и анализа сигналов. Отдельное внимание уделено приложению «Проектирование и анализ фильтров», реализующему проектирование цифровых и аналоговых фильтров. Приведено описание возможностей сре-

ды для построения моделей цифровой обработки сигналов и систем связи.

Ключевые слова: математическое моделирование, обработка сигналов, Engee, SimInTech, КИХ-фильтры, цифровые системы.

STUDY OF THE FUNCTIONAL CAPABILITIES OF THE DOMESTIC SIMINTECH SIMULATION ENVIRONMENT FOR DIGITAL SIGNAL PROCESSING TASKS

A.A. Aleksashin, V.A. Volchenkov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, AleksashinAA2002@yandex.com*

Abstract. The paper describes the functional capabilities of the domestic visual modeling environment SimInTech applied to digital signal processing tasks. The block libraries for mathematical, logical, matrix, and statistical operations, as well as tools for signal filtering and analysis, are discussed. Special attention is paid to the “Filter Design and Analysis” application, which enables the synthesis of digital and analog filters. The paper also presents the modeling capabilities of SimInTech for implementing digital signal processing and communication systems.

Keywords: mathematical modeling, signal processing, Engee, SimInTech, FIR filters, digital systems.

Введение

В рамках выполнения научно-исследовательской работы (НИР) одной из задач было провести анализ возможностей отечественной среды математического моделирования SimInTech [1] применительно к решению задач в области моделирования цифровой обработки сигналов. В результате проведённых исследований были определены ключевые преимущества SimInTech, которые демонстрируют её потенциал как эффективного инструмента для инженерного и образовательного моделирования. Настоящая статья посвящена представлению выявленных сильных сторон среды SimInTech и описанию её возможностей при решении задач цифровой обработки сигналов.

Современные задачи цифровой обработки сигналов требуют использования отечественных средств моделирования, обеспечивающих высокую точность вычислений, визуальную наглядность и гибкость построения моделей. В условиях ограничений на использование зарубежного программного обеспечения и сложности приобретения лицензий на такие среды, как MATLAB/Simulink, особую актуальность

приобретает развитие и внедрение отечественных аналогов. Среда SimInTech является одной из наиболее функциональных отечественных платформ визуального моделирования, предназначенной для анализа и проектирования различных динамических систем.

Описание среды SimInTech

SimInTech представляет собой визуальную среду моделирования, основанную на блочном принципе построения схем. Каждая модель создаётся из библиотек стандартных и специализированных блоков, объединённых по функциональному назначению.

В состав SimInTech входят следующие основные библиотеки, применимые в задачах цифровой обработки сигналов:

- Математические операции. Среда обеспечивает широкий набор вычислений благодаря библиотекам «Операторы» и «Функции», которые включают арифметические, тригонометрические и прочие специальные операции.

- Библиотека «Логические». Реализуют булеву логику (И, ИЛИ, НЕ, XOR), сравнение числовых величин, битовые операции (упаковка битов, распаковка битов, побитовое целочисленное НЕ), логическая маршрутизация (один из многих, один из многих по выбору, М из N, М из N поэлементное), дополнительные механизмы выбора и счётчики. На рисунке 1 представлена полная структура библиотеки.

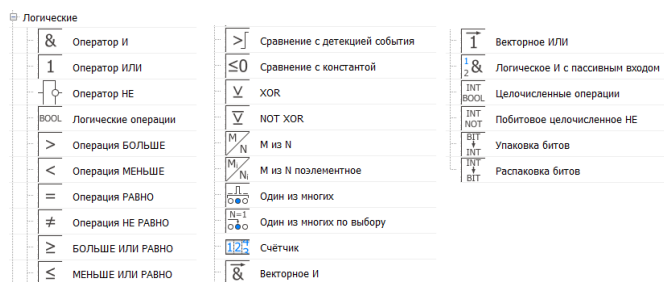


Рис. 1. Блоки библиотеки «Логические»

- Библиотека «Векторные». Предоставляет мощный инструментальный линейной алгебры: решение систем линейных уравнений, вычисление собственных значений, определителей и следа матрицы. Блоки, входящие в состав библиотеки, представлены на рисунке 2.

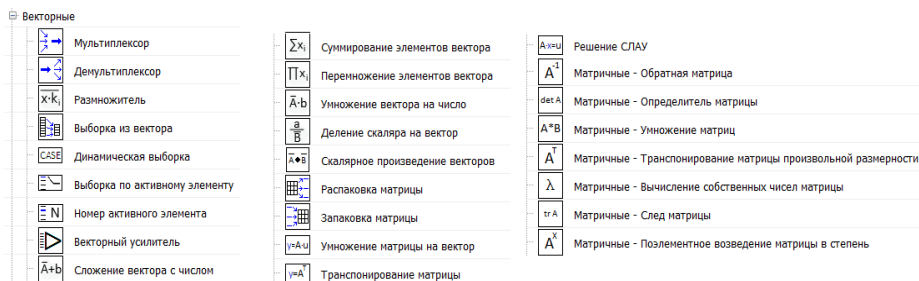


Рис. 2. Блоки библиотеки «Векторные»

• Библиотека «Цифровая обработка сигналов (ЦОС)». Включает блоки буферизации, КИХ-, БИХ-, биквадратный и калмановский фильтры, а также преобразования Фурье (FFT, IFFT), непрерывные и дискретные вейвлет-преобразования. Полный состав библиотеки представлен на рисунке 3.

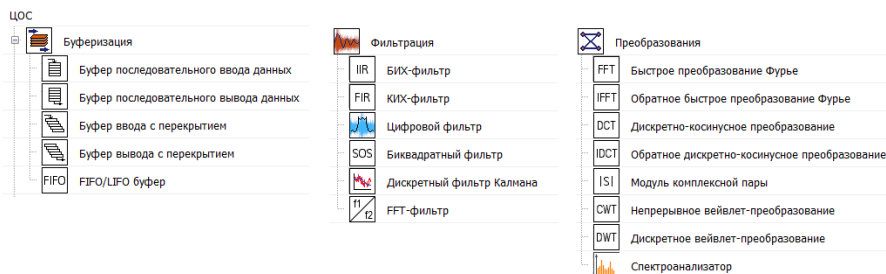


Рис. 3. Блоки библиотеки «ЦОС»

• Библиотека «Источники». Позволяет генерировать сигналы различных форм: синусоида, пилообразный, ступенька, меандр, нормальный и равномерный шум, импульс, парабола, экспонента, гипербола. Кроме того, библиотека содержит блок «Из файла», который обеспечивает загрузку табличных или экспериментальных данных в качестве входного сигнала модели. Это делает возможным использование реальных измеренных сигналов и существенно расширяет прикладные возможности среды SimInTech при исследовании цифровых систем. Полный состав библиотеки «Источники» представлен на рисунке 4.

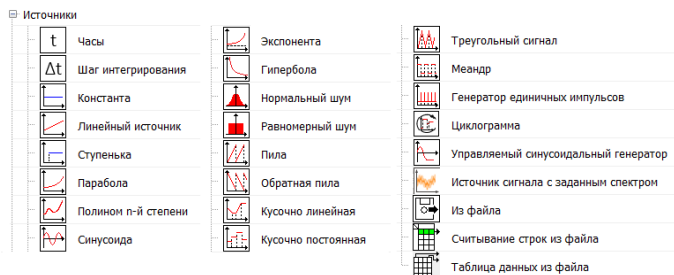


Рис. 4. Блоки библиотеки «Источники»

• Библиотека «Статистика». Содержит блоки для вычисления среднего арифметического, среднеквадратического отклонения, спектральной плотности, функции взаимной корреляции и других характеристик сигналов. Блоки библиотеки «Статистика» представлены на рисунке 5.

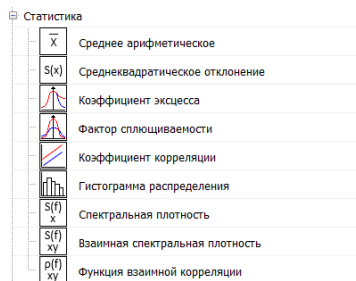


Рис. 5. Блоки библиотеки «Статистика»

Такая структура библиотек обеспечивает широкий спектр возможностей для построения как простых, так и комплексных моделей цифровой обработки сигналов.

Применение SimInTech для задач цифровой обработки сигналов

Одним из ключевых инструментов среды является приложение «Проектирование и анализ фильтров» (ПиАФ), предназначенное для синтеза и исследования цифровых и аналоговых фильтров. Данное приложение разработано ООО «Лаборатория Сфера» при участии сотрудников кафедры ТОР РГРТУ имени В.Ф. Уткина [2-4]. Оно обладает удобным интерфейсом и поддерживает проектирование как цифровых, так и аналоговых фильтров.

Пользователь может выбрать метод проектирования (равноволновый, оконные функции: прямоугольная, треугольная, Хэмминга, Хеннинга, Блэкмана, Чебышёва, Кайзера), задать параметры частоты и амплитуды, визуализировать АЧХ, ФЧХ, переходную и импульсную характеристики, групповое время задержки, карту нулей и полюсов.

На рисунке 6 представлен интерфейс приложения ПиАФ SimInTech.

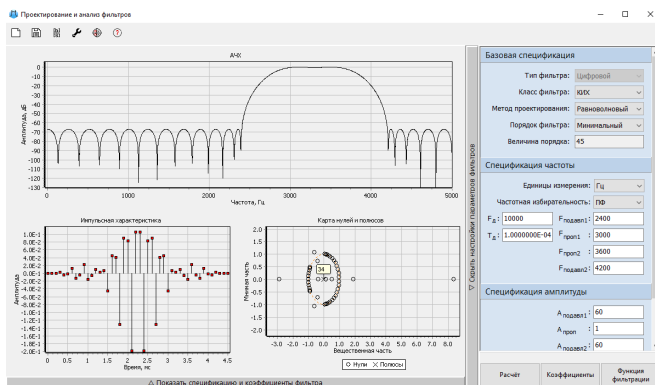


Рис. 6. Интерфейс приложения ПиАФ SimInTech

Приложение обеспечивает удобное взаимодействие с графиками, включая возможность установки нескольких точек измерений и отображение спецификаций характеристик.

SimInTech обеспечивает гибкую визуализацию сигналов на всех этапах обработки, а также поддерживает экспорт данных для последующего анализа. Среда сочетает наглядность графического моделирования с возможностью расширения функционала посредством использования блока “Язык программирования”, который позволяет с помощью встроенного языка программирования SIT реализовать необходимый функционал, что делает её универсальной платформой для проектирования цифровых систем различного уровня сложности.

Заключение

В рамках проведённого анализа был сделан вывод о том, что отечественная среда SimInTech представляет собой мощный инструмент для построения и анализа моделей цифровой обработки сигналов. Наличие специализированных библиотек, развитых средств визуализации и встроенного приложения для проектирования фильтров делает её удобным решением для инженерных и исследовательских задач.

Среда моделирования обладает стабильным и мощным вычислительным ядром, обеспечивающим высокую эффективность работы.

SimInTech может успешно использоваться как в научных исследованиях, так и в образовательном процессе при изучении дисциплин, связанных с цифровой обработкой сигналов, системами связи и автоматизированным управлением.

Библиографический список

1. SimInTech: [сайт]. – URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 07.11.2025).
2. Волченков В.А. Цифровая обработка сигналов. Учебное пособие для вузов / В.В. Витязев, В.А. Волченков, А.А. Овинников и др. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 188 с.: ил.
3. Волченков В.А. Введение в проектирование и анализ цифровых фильтров в среде SimInTech / В.В. Витязев, В.А. Волченков, А.А. Овинников, Е.А. Лихобабин // Цифровая обработка сигналов. 2023. №4. С. 79-84.
4. Волченков В.А. О проектировании и анализе цифровых фильтров в среде SimInTech / В.А. Волченков, В.В. Витязев, А.А. Овинников, Е.А. Лихобабин // 26-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2024», Москва, Россия, доклады. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение. Выпуск: XXVI / Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2024. С. 175 – 178.

УДК 621.396; ГРНТИ 49.03.05

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ МІМО-СИСТЕМЫ

А.Ю. Паршин, В.Х. Нгуен

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, khanhkhankpr@gmail.com*

Аннотация. В работе представлены результаты практической реализации и экспериментального исследования пространственно-временных алгоритмов для МІМО-системы с использованием программно-определяемой радиоплатформы. Описан процесс оценки матрицы канальных коэффициентов на основе пилотных сигналов, сформированных с применением ортогональных последовательностей Адамара. Приведены экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для конфигураций 2×1 и 2×2 при модуляциях BPSK и QPSK.

Ключевые слова: MIMO, GNU Radio, пространственно-временное кодирование, пилотный сигнал, кодирование Аламоути, относительное кодирование.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF SPACE-TIME CODING IN MIMO SYSTEM

A.Yu. Parshin, N.V. Khanh

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, kxanhkxanhkpr@gmail.com*

Abstract. The paper presents the results of practical implementation and experimental analysis of space-time algorithms for MIMO system using a software-defined radio platform. The process of estimating the channel coefficient matrix based on pilot signals formed using orthogonal Hadamard sequences is described. Experimental dependencies of the bit error rate on the signal-to-noise ratio for 2×1 and 2×2 configurations with BPSK and QPSK modulations are given.

Keywords: MIMO, GNU Radio, space-time coding, pilot-signal, Alamouti coding, differential coding.

Введение

Современные беспроводные системы связи требуют высокой надежности, спектральной эффективности и помехоустойчивости. Технология MIMO с пространственно-временным кодированием повышает пропускную способность, однако ее практическая реализация зависит от точной оценки канала [1]. В работе представлены результаты экспериментов на GNU Radio и USRP X300 для схемы Аламоути и относительного кодирования. Особое внимание уделено оценке матрицы канальных коэффициентов с использованием ортогональных последовательностей Адамара. Приведены зависимости BER от отношения сигнал/шум (ОСШ) для конфигураций 2×1 и 2×2 при BPSK и QPSK.

Оценка матрицы канальных коэффициентов для системы MIMO на платформе GNU Radio с использованием USRP X300

Для практического применения пространственно-временного блочного кодирования необходима точная оценка канала, без которой декодер не сможет корректно восстановить принятые сигналы. По-

этому важно исследовать методы оценки канальной матрицы и проверить их работу экспериментально, особенно в условиях аппаратной реализации на SDR-платформах [2, 3]. Такие системы позволяют не только моделировать работу беспроводных каналов в лабораторных условиях, но и проводить полноценные эксперименты с использованием аппаратных средств передачи и приема [4-6]. В данном исследовании использовался высокопроизводительный радиотрансивер USRP X300 и программная платформа GNU Radio. На рисунке 1 показана экспериментальная установка, построенная на основе USRP X300 и GNU Radio.

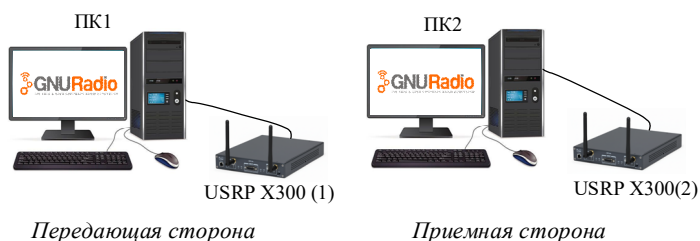


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Для эффективной передачи данных в беспроводных системах необходимо знание параметров канала, который изменяется во времени и по частоте из-за многолучевости, доплеровских сдвигов и шумов. Наиболее распространенный способ его оценки - использование пилотных последовательностей, передаваемых в течение нескольких временных интервалов [7]. В рассматриваемой системе пилотные символы размещены в начале кадра, что обеспечивает устойчивую оценку канала в условиях малоподвижных антенн. На рисунке 2 показана структура передачи пилот-символов для системы с двумя передающими антеннами.



Рис. 2. Структура передачи пилот-символов

В данной работе применяется матрица Адамара, которая хорошо зарекомендовала себя благодаря простоте построения и удобству практического использования. Для системы с числом передающих антенн $N_{TX} = 2$ используется матрица порядка 2×2 [8]:

$$\underline{A}_2 = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

На рисунке 3 представлена структурная схема процесса передачи пилотных символов и оценки канала, реализованного в среде GNU Radio с использованием программно-определяемого радиомодуля USRP X300.

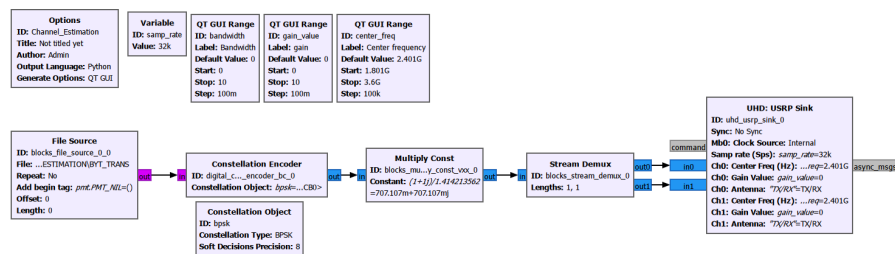


Рис. 3. Схема формирования и передачи пилотных сигналов

Передача начинается с формирования пилотной последовательности, загружаемой из файла источника, содержащего 100 пилотных байт и 900 информационных байт. Полученные данные проходят BPSK-модуляцию в блоке «Constellation Encoder». Далее с помощью блока «Stream Demux» потоки разделяются на два независимых канала, соответствующих передающими антеннами TX1 и TX2, и передаются через блок «UHD: USRP Sink» на радиointерфейс передатчика. На приемной стороне аналогичная конфигурация (с использованием блока «UHD: USRP Source») обеспечивает регистрацию отклика канала на переданные ортогональные пилотные последовательности, как показано на рисунке 4. Обработка сигнала начинается с процедуры синхронизации по времени, выполняемой блоком «Polyphase Clock Sync». После временной синхронизации выполняется восстановление несущей частоты и компенсация фазовых рассогласований с помощью блока «Costas Loop». Далее потоки с разных приемных антенн объединяются с помощью блока «Stream Mux» и поступают на вход блока «Constellation Decoder», где осуществляется обратное преобразование символов в биты. Одновременно данные сохраняются блоками «File Sink» в бинарные файлы формата *complex64*, содержащие последовательности комплексных отсчетов принятого сигнала. Эти данные

используются в среде MATLAB для проведения последующей оценки канала.

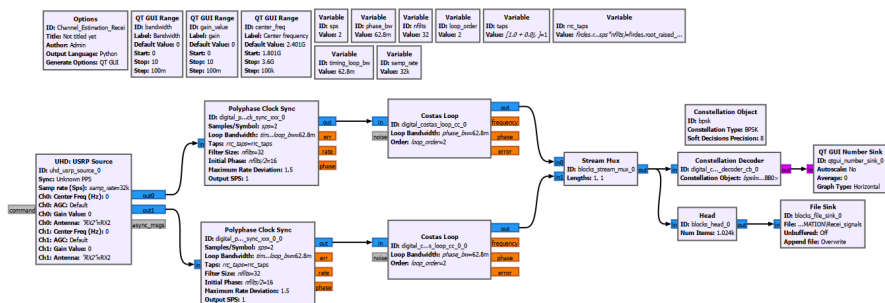


Рис. 4. Схема приемной части для оценки матрицы канальных коэффициентов

Для оценки канала на приемной стороне существует несколько методов, различающихся по точности и вычислительной сложности [9]. По методу максимального правдоподобия оценка матрицы канальных коэффициентов определяется выражением:

$$\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{\text{MPI}} = \arg \min_{\underline{\mathbf{H}}} \left\| \underline{\mathbf{Y}} - \sqrt{\frac{p}{N_{\text{TX}}}} \underline{\mathbf{H}} \underline{\mathbf{S}} \right\|^2 = \sqrt{\frac{N_{\text{TX}}}{p}} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{S}}^{\text{H}} (\underline{\mathbf{S}} \underline{\mathbf{S}}^{\text{H}})^{-1}.$$

При оценке канала по методу наименьших квадратов исходят из минимизации квадратичной ошибки между принятыми сигналами и их оценкой, полученной на основе известных пилотных символов. Этот метод определяется выражением:

$$\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{\text{MHK}} = \sqrt{\frac{N_{\text{TX}}}{p}} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{S}}^{\text{H}} \left(\frac{p}{N_{\text{TX}}} \underline{\mathbf{S}} \underline{\mathbf{S}}^{\text{H}} + \mathbf{I} \right)^{-1} \underline{\mathbf{S}}^{\text{H}})^{-1}.$$

Результаты анализа показывают, что при высоком отношении сигнал/шум методы МНК и МП обеспечивают сопоставимую точность оценки канала, различаясь главным образом вычислительной сложностью. Моделирование в MATLAB R2021b показало, что время выполнения МНК-оценки составляет около 3,1 мс, тогда как метод МП требует примерно 5,26 мс. Это подтверждает более высокую трудоемкость МП при аналогичной точности восстановления канала. Полученные оценки канальной матрицы $\hat{\mathbf{H}}$ далее использовались для моделирования работы пространственно-временных алгоритмов в GNU Radio.

Исследование эффективности пространственно-временных алгоритмов MIMO-системы на платформе GNU Radio

Эксперимент на платформе GNU Radio по исследованию пространственно-временных алгоритмов включает несколько последовательно выполняемых этапов. На рисунке 5 показана блок-схема модели MISO 2×1 с BPSK-модуляцией, построенной из стандартных функциональных блоков GNU Radio. Биты генерируются блоком «Random Source», затем через «Throttle» поступают в «Constellation Modulator», где преобразуются в модулированные символы. Пространственно-временное кодирование по схеме Аламути реализовано с использованием пользовательского блока «Embedded Python Block», после чего сформированные сигналы передаются в модель канала «MISO Channel».

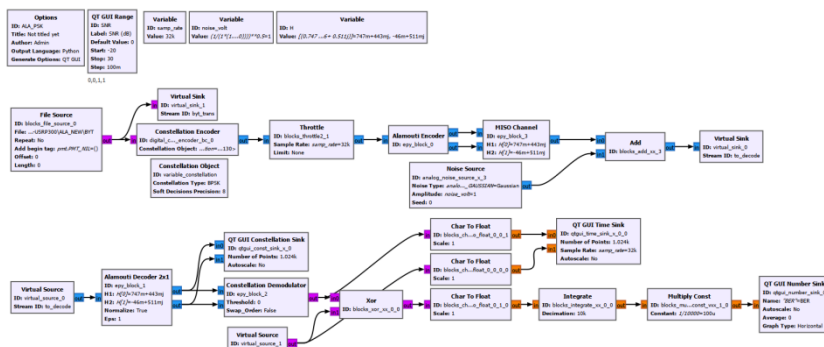


Рис. 5. Блок-схема кодирования Аламути 2x1 с BPSK модуляцией в GNU Radio

В среде GNU Radio для моделирования влияния аддитивного белого гауссовского шума использовался блок «Noise Voltage», который позволяет добавлять шум с регулируемым уровнем. Для реализации процедуры пространственно-временного декодирования в среде GNU Radio был разработан пользовательский блок «Alamouti Decoder» на основе механизма «Embedded Python Block». Данный блок предназначен для обратного преобразования сигналов, закодированных по схеме Аламути, и восстановления исходной последовательности символов.

$$\underline{\mathbf{Z}}_m = \begin{bmatrix} z_{m1} \\ z_{m2} \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{H}}_m^H \tilde{\mathbf{Y}} = \sqrt{\frac{p}{2}} \underline{\mathbf{H}}_m^H \underline{\mathbf{H}}_m \times \underline{\mathbf{X}}_2 + \underline{\mathbf{H}}_m^H \tilde{\mathbf{V}}_m.$$

После пространственно-временного декодирования восстановленные символы поступают в блок «Constellation Demodulator», где выполняется демодуляция. Для вычисления BER исходная последовательность сохраняется с помощью «Virtual Sink», а на приемной стороне восстанавливается через «Virtual Source». Далее оба потока сравниваются блоком «XOR», после чего количество ошибок интегрируется и нормируется для получения BER. Результаты отображаются в реальном времени с помощью «QT GUI Number Sink», «QT GUI Time Sink» и «QT GUI Constellation Sink», что позволяет визуально оценить качество приема и сравнить его с теоретическими зависимостями. Полученные в ходе экспериментов значения вероятности битовой ошибки, рассчитанные в среде GNU Radio, были использованы в MATLAB для построения сравнительных графиков зависимости BER от отношения сигнал/шум.

На рисунке 6 представлены зависимости полученных значений вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум для схем пространственно-временного кодирования Аламоути 2×1 и 2×2 при использовании модуляций BPSK и QPSK.

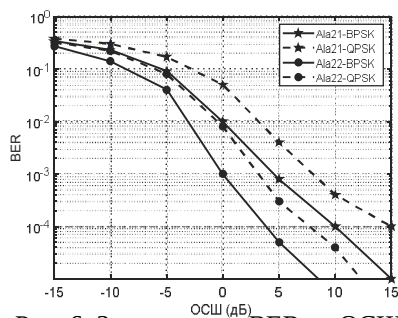


Рис. 6. Зависимости BER от ОСШ для систем с кодированием Аламоути при различных модуляциях

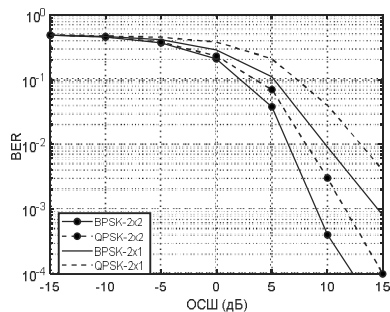


Рис. 7. Зависимости BER от ОСШ для систем с относительным кодированием

Видно, что увеличение числа приемных антенн улучшает устойчивость системы к шумам и снижает вероятность ошибки. Модуляция BPSK обеспечивает более высокую надежность передачи по сравнению с QPSK, что подтверждает теоретические ожидания для систем с низким ОСШ. Для сравнения эффективности с кодированием Аламоути в работе также реализована схема пространственно-временного относительного кодирования, предназначенная для передачи данных без явной оценки канала. Рассчитанные в GNU Radio значения BER

для системы с относительным пространственно-временным кодированием экспортированы в MATLAB, где построены графики зависимости BER от отношения сигнал/шум с целью анализа эффективности кодирования. На рисунке 7 представлены зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум для схем дифференциального кодирования 2×1 и 2×2 при использовании модуляций BPSK и QPSK.

Выводы

Сравнение результатов моделирования показало, что схема Аламути обеспечивает более низкий BER по сравнению с относительным кодированием благодаря использованию точной информации о канале. Относительное кодирование демонстрирует более высокие значения BER, однако его преимущество заключается в отсутствии необходимости оценки канала и упрощенной реализации. Эксперименты подтвердили, что GNU Radio позволяет не только моделировать алгоритмы пространственно-временного кодирования, но и обеспечивает возможность их практического испытания на SDR-оборудовании, что гарантирует универсальность и гибкость подхода.

Библиографический список

1. Шеремет, Н. В. Экспериментальная апробация технологии MIMO стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио / Н. В. Шеремет, Г. А. Фокин // Вестник СПбГУТ. – 2024. – № 3. – С. 4-24.
2. Кувшинов, О. А. Применение программно-определяемого радио в системах связи / О. А. Кувшинов, О. В. Плохих // Ural Radio Engineering Journal. – 2022. – № 6(2). – С. 140-159.
3. Randy, V. P. MIMO Channel Estimation in an SDR Platform for Evaluation of D&F Relay Nodes / V. P. Randy, I. A. Jose // Electronics. – 2020. – № 9. – P. 1-19.
4. Gaurav, S. Implementation & BER Analysis of 2×2 MIMO Using USRP 2920- Universal Software Radio Peripheral / S. Gaurav, G. Kaur, V. K. Banga // International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology. – 2016. – P. 523-527.
5. Компания Gipercom. Особенности, сходства и различия моделей USRP, цены и технические характеристики // Каталог USRP. – С. 1-19.
6. Полевода, Ю. А. Разработка каналов связи с цифровой модуляцией в GNU Radio / Ю. А. Полевода, А. Е. Троицкая, Г. А. Бурень, Э. А. Рядинская, Г. В. Коняшкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2022. – № 4. – С. 41-48.

7. Липатников, В. С. Отладка алгоритмов обработки радиолокационных сигналов в системе GNU Radio / В. С. Липатников, Д. А. Чиненов // Цифровая обработка сигналов. – 2015. – № 4. – С. 61-68.

8. Паршин, Ю. Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех / Ю. Н. Паршин. – М.: КУРС, 2021. – 200 с.

9. Якушенко, С. А. Алгоритм выбора схемы ММО системы в радиолиниях с несколькими пространственными каналами / С. А. Якушенко, С. В. Дворников // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 41-48.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАДИОФОТОННОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

О.А. Воронин, А.Ю. Паршин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, voronin@o-a-direct.ru*

Аннотация. В работе рассматривается применение оптических систем приема сигналов атмосферной оптической линии связи с использованием оптического концентратора в виде параболического отражателя и фотодиода. Выполнен расчет оптимального расположения фотодиода в фокусе параболы, проведена оценка эффективности сбора мощности оптического сигнала с поверхности отражателя. Расчетным путем показана эффективность выбранной оптической системы. Выполнена оценка влияния параметров параболоида на энергетическую эффективность системы.

Ключевые слова: атмосферная оптическая линия связи, оптический концентратор, мощность оптического сигнала, параболический отражатель, параболоид вращения, геометрический фокус, геометрическая оптика.

CALCULATION OF OPTICAL SYSTEM CHARACTERISTIC FOR A RADIOPHOTONIC COMMUNICATION LINE

O.A. Voronin, A.Yu. Parshin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, voronin@o-a-direct.ru*

Abstract. The paper considers application of optical systems for receiving signals from an atmospheric optical communication line using an optical full paraboloid reflector and a photodiode. We deter-

mine the optimal photodiode position in the focus of the parabola and evaluate the efficiency of optical signal power collecting from the reflector surface. The efficiency of the selected optical system is shown by calculation. The influence of the paraboloid parameters on the energy efficiency of the system is estimated.

Keywords: atmospheric optical communication line, optical concentrator, optical signal power, parabolic reflector, paraboloid of revolution, geometric focus, geometric optics.

Введение

Разработка атмосферных оптических систем является актуальной задачей в условиях значительной загруженности радиотехнических линий связи. Хорошо известны лазерные атмосферные оптические системы связи, использующие устройства наведения для поддержания устойчивого приема, а также оптоволоконные системы связи с использованием проводного соединения источника и потребителя информации с применением оптоволокна. Перспективной является разработка оптической системы с широкой диаграммой направленности оптических излучателей и приемников, что позволит обеспечить свободу перемещения источника и приемника информации друг относительно друга с сохранением преимуществ оптической связи. В работах [5, 6] рассматриваются методы построения атмосферных оптических линий связи для передачи рассеянного оптического сигнала.

Прием оптического сигнала в широком секторе пространства осложняется необходимостью фокусировки на малой активной площади фотодиода. При этом мощность оптического излучения, собираемая из атмосферы, пропорциональна размерам приемной оптической системы. Таким образом, основной проблемой является проектирование оптической системы с большой площадью поверхности сбора излучения и проецированием на малую площадь активной области фотодиода. В работах [1, 2] представлены способы конструирования отражателей, применение которых также возможно в условиях поставленной задачи. В качестве основы для геометрического расчета взяты работы [3, 4].

В рамках исследования проведена оценка эффективности работы оптической приемной системы с использованием параболического отражателя оптического сигнала и фотодиода, размещенного в фокусе параболы. Полученная оптическая система имеет схожий принцип

работы с параболическими антеннами для приема спутниковых сигналов.

Формирование облика отражателя

Определим основные параметры параболического отражателя и мощностные характеристики принимаемого сигнала. Источником сигнала является оптическая система, рассеивающая излучение лазерного или светодиода в широком секторе. Для расчета мощности светового потока, падающего на оптическую систему, воспользуемся лучевой моделью распространения. Тогда энергия сигнала распределяется по площади сферы, радиус которой определяется расстоянием между источником и приемником оптического сигнала. Площадь сегмента сферы вблизи отражателя определяется выражением

$$S_{\text{сфера}} = \pi(h^2 + a^2), \quad (1)$$

где a – радиус основания светового конуса,

h – разность радиуса сферы и высоты светового конуса.

При расстоянии между источником излучения и приемником значительно превышающем размеры отражателя можно считать, что лучи оптического сигнала параллельны при падении на поверхность отражателя. Рассмотрим параболический отражатель, преобразующий параллельный пучок в сходящийся в точке фокуса. Рассмотрим осевое сечение параболоида, расположенное в декартовых координатах с вершиной в начале координат и осью симметрии вдоль оси y , ветви параболы направлены вверх [3]. Тогда справедливо $4FH = R^2$, где R – радиус отражателя на плоскости обода. Коэффициент концентрации C определяет долю света, отражаемого тарелкой от источника света в фокусе. Произведем его оценку через угол раскрытия, полученный из основных геометрических параметров параболоида

$$C = 1 - \frac{\arctan\left(\frac{R}{H-F}\right)}{\pi}. \quad (2)$$

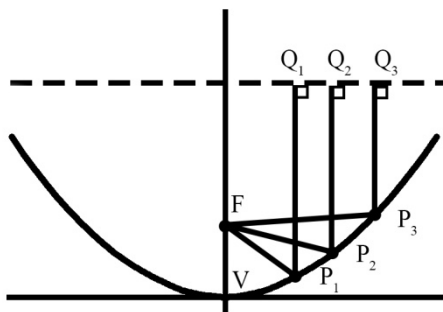


Рис. 1. Фокусировка лучей в параболическом отражателе

Рассмотрим случай, когда размеры отражателя значительно меньше расстояния между источником и приемником оптического сигнала. В исследуемой ситуации рабочую площадь можно оценить как:

$$S_{\text{рабочая}} = 2\pi \int_0^H \sqrt{4Fy} + \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{Fy}}{y} \right)^2} dy, \quad (3)$$

где F – фокусное расстояние, H – высота отражателя (измеряется вдоль оси симметрии от вершины до плоскости обода). Тогда мощность светового потока, попадающего на рабочую область фотодиода, определяется отношением площади рабочей зоны к площади сегмента сферы, по которому распределено излучение источника:

$$P_{\text{рабочая}} = P_{\text{излучатель}} \frac{S_{\text{рабочая}}}{S_{\text{сфера}}}. \quad (4)$$

Оценка слепой зоны излучателя

При проектировании приемной оптической системы на основе параболического отражателя критически важным является точное позиционирование фотоприемника в фокусе. Однако физические размеры корпуса фотодиода, как правило, превышают размер его активной области. Вследствие этого корпус фотодиода экранирует часть падающего на отражатель светового потока, создавая так называемую «слепую» зону. Пусть вершина отражателя находится в начале координат. Рассмотрим сечение системы в плоскости XU . Уравнение параболы в сечении XU имеет вид:

$$y = \frac{x^2}{4F}. \quad (5)$$

Предположим, что фотодиод имеет цилиндрический корпус радиуса $r_{\text{диод}}$. Активная область фотодиода расположена в центре торца корпуса и имеет радиус $r_{\text{активная}}$, причем $r_{\text{диод}} > r_{\text{активная}}$. Фотодиод расположен в фокусе $F = (0, F, 0)$ таким образом, что его торец с активной областью обращен к вершине отражателя, а ось корпуса совпадает с оптической осью Y . Лучи, идущие от удаленного источника, примем параллельными оптической оси Y . Часть лучей, которые после отражения должны были попасть в фокус, будут перехвачены корпусом фотодиода, если они падают на отражатель в определенной кольцевой области. Эта область определяется тем, что отраженный луч попадает не на торец, а на боковую поверхность корпуса радиуса $r_{\text{диод}}$. Граница слепой зоны определяется лучами, которые после отражения касаются края корпуса фотодиода

Пусть луч падает на параболоид в точке $P(x_p, y_p)$. Согласно уравнению параболы,

$$y_p = \frac{x_p^2}{4F}. \quad (6)$$

В точке P проведем касательную к параболе. Выполняя построение отраженного луча в точке касания, получим точку пересечения отраженного луча и оси симметрии параболы. Определим, пересекает ли этот луч окружность радиуса r_d с центром в фокусе $(0, F)$. Уравнение этой окружности в плоскости XY :

$$(x-0)^2 + (y-F)^2 = r_{\text{диод}}^2. \quad (7)$$

Отраженный луч должен касаться этой окружности. Подставим точку $A(r_{\text{диод}}, F)$ в уравнение отраженного луча:

$$(F - y_p) = \tan(2\theta_{\text{нормаль}})(r_{\text{диод}} - x_p). \quad (8)$$

Подставим (6) в (8) и выполним некоторые преобразования, после чего получим:

$$\left(F - \frac{x_p^2}{4F}\right) = \frac{x_p/F}{1 - (x_p^2/4F^2)}(r_{\text{диод}} - x_p). \quad (9)$$

Если считать, что точка P находится достаточно далеко от вершины $x_p \gg r_{\text{диод}}$, то угол θ_n мал, тогда, в результате приближения, уравнение упрощается до:

$$\left(F - \frac{x_p^2}{4F}\right) = \frac{x_p}{F}(r_{\text{диод}} - x_p). \quad (10)$$

Умножая обе части на F и пренебрегая членом $x_p^3/4F^2$ как малым высшего порядка, получаем:

$$F^2 \approx x_p r_{\text{диод}}. \quad (11)$$

Отсюда, радиус слепой зоны на апертуре отражателя $R_{\text{сз}}$ приближенно равен:

$$x_p = R_{\text{сз}} \approx \frac{F^2}{r_{\text{диод}}}. \quad (12)$$

Слепая зона представляет собой круг радиуса $R_{\text{сз}}$ в плоскости апертуры (входного отверстия) отражателя. Если радиус обода отражателя равен R , то площадь апертуры отражателя $S_{\text{апертура}} = \pi R^2$. Площадь слепой зоны:

$$S_{\text{сз}} = \pi R_{\text{сз}}^2 \approx \pi \left(\frac{F^4}{r_{\text{диод}}^2} \right). \quad (13)$$

Для минимизации слепой зоны необходимо стремиться к использованию фотодиодов с минимально возможным радиусом корпуса $r_{\text{диод}}$ относительно их активной области, а также к оптимизации соотношения F/R параболоида.

Также следует учесть, что область, расположенная над границей слепой зоны фотодиода игнорируется. В данном случае, для расчета эффективности отражателя, следует также учесть потери за счет данной «нерабочей» зоны. Получим полную формулу для оценки мощности излучения на фотодиоде, в которой также учтем отражательную способность поверхности, обозначив ее через $\eta_{\text{отражение}}$:

$$P_{\text{рабочая}} = P_{\text{излучатель}} \frac{S_{\text{рабочая}} - S_{\text{сз}} - S_{\text{нерабочая}}}{S_{\text{сфера}}} * C * \eta_{\text{отражение}}. \quad (14)$$

Влияние смещения приемного элемента вверх по оси фокусного расстояния

Ранее в работе рассматривалось влияние параметров отражателя на мощность принимаемого сигнала, однако, следует учесть также влияние смещения фотодиода относительно фокусного расстояния вверх по оси Свет, в таком случае, будет равномерно рассеиваться, пересекая точку фокусного расстояния, формируя излучение в форме полусферы радиусом, равным высоте смещения фотодиода. Произведем оценку мощности при смещении фотодиода на высоту $h_{\text{смещение}}$.

Полученная ранее мощность $P_{\text{рабочая}}$ является мощностью сигнала в фокусе параболоида. В случае смещения принимающего элемента относительно фокусного расстояния данная мощность будет распределяться по полусфере излучения $S_{\text{смещение}} = 2\pi h_{\text{смещение}}^2$. Если учесть, что ранее все излучение должно было собираться на фотодиоде, то для оценки воспользуемся площадью приемной части $S_{\text{диод}} = 2\pi r_{\text{диод}}^2$.

Отношение площадей запишем как отношение радиусов полусфер

$$\frac{S_{\text{диод}}}{S_{\text{смещение}}} = \frac{r_{\text{диод}}^2}{h_{\text{смещение}}^2}. \quad (15)$$

Следует отметить, что при смещении вверх относительно фокуса наблюдается также рост размера слепой зоны, радиус которой теперь будет оцениваться по формуле:

$$R_{\text{сз}} \approx \frac{(F + h_{\text{смещение}})^2}{r_{\text{диод}}}. \quad (16)$$

Также, в результате смещения фотодиода, происходит уменьшение «нерабочей» зоны отражателя, что ведет к увеличению рабочей площади отражателя $S_{\text{нерабочая}} = S_{\text{нерабочая}} + \Delta S$, где ΔS – изменение площади нерабочей зоны. В результате, получим полную формулу оценки мощности излучения отражателя:

$$P_{\text{рабочая}} = P_{\text{излучатель}} \frac{S_{\text{рабочая}} - S_{\text{сз}} - S_{\text{нерабочая}} + \Delta S}{S_{\text{сфера}}} * C * \eta_{\text{отражение}} * \frac{r_{\text{диод}}^2}{h_{\text{смещение}}^2}. \quad (17)$$

Расчет параболического отражателя

Произведем расчет параболического отражателя, опираясь на основы геометрической оптики. Параболический отражатель, как уже неоднократно упоминалось, представляет собой параболоид вращения. Исходя из уравнения параболы, получим положение фокуса параболоида: $F = R^2/4H$. Для расчета длины образующей параболы, введем геометрический коэффициент Q: $Q = \sqrt{(2F)^2 + R^2}$.

Расчет длины образующей параболы произведем по формуле:

$$d = \frac{RQ}{2F} + P \ln \left(\frac{R+Q}{2F} \right). \quad (19)$$

На основе полученных выражений, можно записать уравнение профиля отражателя, а также произвести мощностную оценку отражателя по выведенной ранее формуле. На основе описанных ранее формул, выполним оценку параболоида по трем параметрам: влияние смещения диода на мощность системы, влияние глубины параболоида на мощность системы, влияние диаметра внешнего кольца параболоида на мощность системы. В результате данной оценки были получены следующие графики:

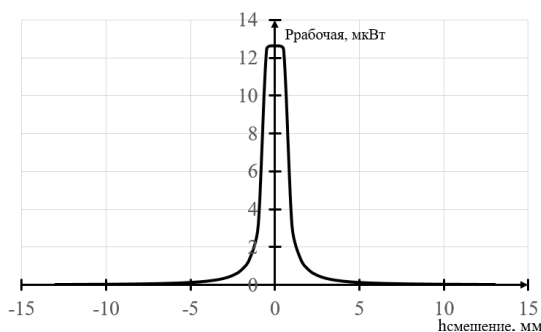


Рис. 2. Влияние вертикального смещения фотодиода на мощность системы

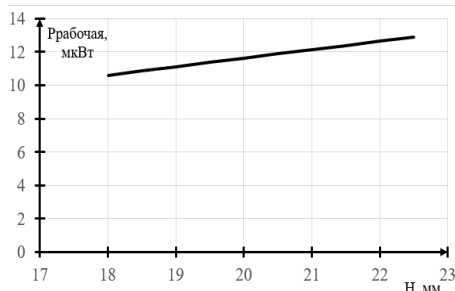


Рис. 3. Влияние глубины отражателя на мощность системы

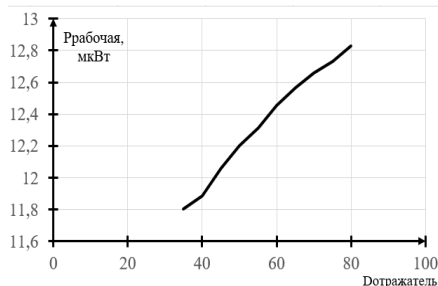


Рис. 4. Влияние диаметра внешнего кольца отражателя на мощность системы

Выводы

Наиболее эффективная конфигурация достигается при балансном расположении фокуса параболоида чуть ниже его главного диаметра. Это позволяет фотоприемнику регистрировать поток, отраженный от преобладающей части рабочей поверхности рефлектора.

Выбор отражателя следует производить, опираясь на максимально возможную высоту фокусного расстояния, относительно вершины

параболы, образующей отражатель. Данный выбор также минимизирует потери «слепой зоны» и всего отражателя, что находится за ней.

Если конструкция характеризуется крайне малым фокусным расстоянием, наблюдается падение эффективности системы. Значительная доля отраженного излучения попадает на нечувствительные элементы корпуса фотодиода, не достигая фотоэлемента, и не регистрируется.

Результаты получены при реализации проекта «Нить» при поддержке фонда НТИ в рамках ФП «Перспективные технологии для БАС».

Библиографический список

1. Васильев В.П. Оптический рефлектор (варианты) : пат. 2556744 С2 Рос. Федерация : МПК G02B 5/122 № 2013157072/28 ; заявл. 24.12.2013 ; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20 // Патентообладатель: ОАО "НПК "СПП". – 14 с.
2. Перлов Д.И. Оптический рефлектор : пат. 2101737 С1 Рос. Федерация : МПК G02B 5/10, 5/12 № 96120316/28 ; заявл. 21.10.1996 ; опубл. 10.01.1998, Бюл. № 1 // Патентообладатель: Джелстаури Корпорейшн Н.В. (NL). – 7 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика : учеб. пособие : для вузов. — 6-е изд., стер. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 848 с. — ISBN 5-9221-0314-8.
4. Слюсарь Г.Г. Методы расчета оптических систем. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1969. — 672 с.
5. Познахарев Е.С., Крючков А.В., Федосов А.В., Гришин А.И., Белов В.В. Система беспроводной оптической связи вне прямой видимости в инфракрасном диапазоне длин волн : пат. 2828476 С1 Рос. Федерация : МПК H04B 10/00 № 2023132334 ; заявл. 08.12.2023 ; опубл. 14.10.2024, Бюл. № 29 // Патентообладатель: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. – 2 с.
6. Тарасенков М.В., Пешков С.А., Познахарев Е.С. Атмосферный канал оптической связи на основе рассеянного излучения в УФ-диапазоне длин волн в дневное и ночное время // Фотоника России. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 46-56. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.46.56
7. Berry M.V. Waves and Thom's Theorem // Advances in Physics. — 1976. — Vol. 25, No. 1. — P. 1-26. — DOI: 10.1080/00018737600101342. — ISSN 0001-8732.

УДК 621.396.96; ГРНТИ 47.49.29

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА ОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В БОРТОВОЙ РЛС

О.А. Криминецкий

АО «РКБ «Глобус» Рязань, krimolegg@yandex.ru

Аннотация. В данной работе предложена имитационная модель, предназначенная для получения спектра отражений от подстилающей поверхности в бортовой РЛС. Модель основана на физических принципах распространения и отражения радиоволн.

Ключевые слова: пассивная помеха, спектральная плотность мощности, подстилающая поверхность, бортовая РЛС, радиолокация.

MATHEMATICAL MODELLING OF SPECTRUM OF REFLECTION FROM UNDERLYING SURFACE IN THE AIRBORNE RADAR

O.A.Kriminetsky

АО «RDB «Globus»

Ryazan, krimolegg@yandex.ru

Abstract. In this paper, the simulation model for calculation of spectrum of reflection from underlying surface in the airborne radar was offered. The model based on physical principles of radiowave propagation and reflection.

Keywords: clutter, power spectrum density, underlying surface, airborne radar, radiolocation.

Введение

При изучении многих технических дисциплин большое значение имеют разнообразные наглядные пособия, в том числе действующие модели. Какой-либо вопрос, появившийся у студента в ходе словесного объяснения преподавателя, может отпасть сам собой при наблюдении явления или наглядного проявления принципа на примере модели, будь то физическая модель, или же модель имитационная. Особенно важно подкреплять наглядными пособиями объяснения предметов, являющихся трудными для восприятия и мысленного представления. Одним из таких трудных предметов является процесс взаимодействия зондирующих импульсов бортовой БРЛС с подстилающей поверхностью. Причины, по которым спектр отражённого сигнала имеет свойственную ему форму, могут оставаться не вполне ясными. Так,

может оказаться трудным понять и запомнить разницу между спектрами отражённого сигнала при работе РЛС в режимах низкой, средней и высокой частоты повторения импульсов (НЧП, СЧП и ВЧП, соответственно). Провести же какой-либо опыт, в ходе которого можно было бы наблюдать спектр отражений от подстилающей поверхности, в аудиторных условиях практически невозможно. Выходом из сложившейся ситуации могло бы стать создание компьютерной программы, которая позволяла бы формировать спектральную диаграмму сигнала в ходе интерактивного взаимодействия: уменьшения или увеличения частоты повторения импульсов, несущей частоты, скорости полёта носителя, ширины диаграммы направленности антенны, направления её главного лепестка и т.д. Однако для написания такой программы требуется достаточно точная математическая модель, адекватно описывающая форму спектра. Такая модель была бы очень полезной также при анализе вновь проектируемых алгоритмов обнаружения и обработки радиолокационного сигнала. Тем не менее, отыскать математическую модель, позволяющую построить физически точный спектр, в литературе не удалось. Автор настоящей статьи надеется, что предлагаемая им модель может удовлетворить требованиям физической правильности получаемых результатов.

Составление математической модели

Идея модели состоит в следующем. Пусть есть некоторый вектор s , начало которого совмещено с фазовым центром (ФЦ) диаграммы направленности антенны (ДНА) (т. О на рисунке 1), а конец указывает в произвольном направлении. Для определённости положим, что, если продолжить данный вектор, его конец коснётся плоскости земной поверхности τ под СН БРЛС в точке М.

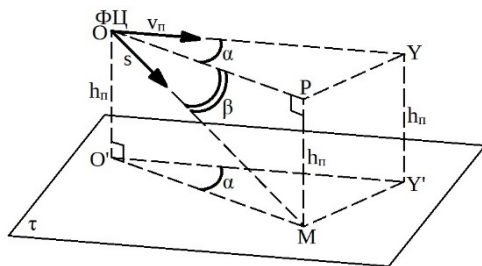


Рис. 1. К понятию сканирующего вектора

Если для данного вектора известны азимут α относительно оси ОУ, проводимой через вектор путевой скорости \mathbf{v}_Π , и угол места β относительно горизонтальной плоскости ОУР, а также известна высота полёта СН h_Π , то возможно определить наклонную дальность R_M до указанной точки М, а также её кажущуюся радиальную скорость относительно СН БРЛС V_{rM} :

$$\sin\beta = \frac{PM}{OM} = \frac{h_\Pi}{R_M}, \text{ откуда } R_M = \frac{h_\Pi}{\sin\beta}; \quad (1)$$

$$V_{rM} = v_\Pi \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta. \quad (2)$$

Общеизвестно, что энергетическая дальность обнаружения цели в РЛС при отсутствии помех определяется по формуле [1]:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_{пер} D_1 D_2 \eta_1 \eta_2 \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 P_{пор}}},$$

где $P_{пер}$ – мощность передатчика РЛС; D_1 и D_2 – КНД антенны на передачу и на приём, соответственно; η_1 и η_2 – КПД антенно-фидерного тракта на передачу и на приём, соответственно; $\lambda = c/f_0$ – длина излучаемой волны (f_0 – частота используемой несущей; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость электромагнитной волны); $\sigma_{ц}$ – ЭПР цели; $P_{пор}$ – пороговая мощность обнаружения приёмного тракта РЛС.

Для случая произвольной дальности до цели (наклонной дальности) R и использования одного и того же антенно-фидерного тракта на передачу и на приём мощность, поступающая в приёмник, равна:

$$P_{прм} = \frac{P_{пер} D^2 \eta^2 c^2}{(4\pi)^3 f_0^2} \cdot \frac{\sigma_{ц}}{R^4};$$

если же обнаружение цели производится не по главному лепестку ДНА, то формула принимает вид:

$$P_{прм} = K \cdot \frac{F(\alpha, \beta) \cdot \sigma_{ц}}{R^4}, \quad (3)$$

где $F(\alpha, \beta)$ – функция ДНА по мощности; $K = \frac{P_{пер} D^2 \eta^2 c^2}{(4\pi)^3 f_0^2}$ – некоторая величина, постоянная для данного режима работы РЛС.

Если предположить ЭПР точки М известной величиной, то мощность элементарного сигнала, отражённого от т.М, на которую указывает s , может быть найдена по формулам (1) и (3):

$$P_M = K \cdot \frac{F^2(\alpha, \beta) \cdot \sigma_M}{R_M^4} = K \cdot \frac{F^2(\alpha, \beta) \cdot \sigma_M}{h_n^4} \cdot \sin^4 \beta. \quad (4)$$

Итак, получена формула мощности элементарного отражения. Теперь необходимо получить выражение для расчёта частоты указанного элементарного отражения. Доплеровское смещение частоты, нормированное к частоте повторения импульсов F_{Π} :

$$F'_D = \frac{F_D}{F_{\Pi}} = \frac{2f_0}{cF_{\Pi}} \cdot V_{rM} \quad (5)$$

- теоретически может принимать любое значение от $-\infty$ до $+\infty$; привести его к практическому интервалу $-0,5$ до $0,5$ возможно по формулам:

$$F''_D = \begin{cases} \text{frac}(F'_D) + 1, & \text{при } F'_D < -0,5; \\ \text{frac}(F'_D), & \text{при } -0,5 \leq F'_D \leq 0,5; \\ \text{frac}(F'_D) - 1, & \text{при } F'_D > 0,5; \end{cases} \quad (6)$$

где $\text{frac}(\cdot)$ – функция отбрасывания целой части числа.

Разобьём полученный интервал на N частотных каналов с номерами от 0 до $N-1$. Тогда номер частотного канала n , в который попадает частота F''_D :

$$n = \text{round}[(0,5 + F''_D) \cdot (N-1)], \quad (7)$$

где $\text{round}[\cdot]$ – функция округления до ближайшего целого.

Формула (4) содержит множитель $K = \frac{P_{\text{неп}} D^2 \eta^2 c^2}{(4\pi)^3 f_0^2}$. Ранее же говорилось, что при оценке мощности гармоники с определённым номером частотного канала имеет место нормировка, которая заключается в делении накопленной суммы мощностей элементов P_{Mij} на их количество. Очевидно, что после нормировки СПМ по максимуму указанный множитель теряет смысл, и его можно положить равным единице. Также следует разделить накопленные суммы на величину σ_M , введенную ранее; для учёта же зависимости ЭПР подстилающей поверхности от угла падения электромагнитной волны в выражение для мощности элементарного отражения следует ввести множитель $k=f(\beta)$, принимающий значения в пределах $0...1$. Тогда формула (4) примет вид:

$$P_M = \frac{F^2(\alpha, \beta) \cdot k(\beta)}{h_n^4} \cdot \sin^4 \beta, \quad (8)$$

Функцию $k=f(\beta)$ необходимо задать аналитически. Для этого необходимо найти связь ЭПР плоской поверхности и угла падения на неё радиоволны. На Интернет-странице [2] размещена следующая форму-

ла для ЭПР прямоугольной пластины размерами $2a$ на $2b$ (считается, что $a, b \gg \lambda$):

$$\sigma(\theta, \varphi) = \sigma_m \left(\cos\theta \frac{\sin(2ka \sin\theta \cos\varphi)}{2ka \sin\theta \cos\varphi} \cdot \frac{\sin(2kb \sin\theta \sin\varphi)}{2kb \sin\theta \sin\varphi} \right)^2, \quad (9)$$

где $\sigma_m = 64\pi a^2 b^2 / \lambda^2$; θ – угол между нормалью к пластине и направлением на РЛС; φ – некоторый угол, характеризующий расположение пластины в пространстве относительно направления прихода волны.

Из пособия [3] также была взята формула для ЭПР прямоугольной пластины:

$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2} \cdot \cos^2 \gamma \cdot \left(\frac{\sin \frac{2\pi a \sin \gamma}{\lambda}}{\frac{2\pi a \sin \gamma}{\lambda}} \right), \quad (10)$$

где γ – угол между направлением на РЛС и нормалью к пластине (θ из формулы (9)); a и b – размеры пластины.

Искомая функция $k=f(\beta)$ может быть получена из приведённых формул путём следующих рассуждений: функция является приведённой (область значений от 0 до 1), так что размерный множитель $\sigma_m = 64\pi a^2 b^2 / \lambda^2$ (формула (9)) или $\frac{4\pi S^2}{\lambda^2}$ (формула (10)) неявно полагается равным единице; кроме этого, размеры подстилающей поверхности как плоскости (τ на рисунке 1) много больше длины волны, так что $2ka$ (из (9)) или $2\pi a / \lambda$ (из (10)) $\gg 1$. Также следует отметить, что $\gamma = |\beta - 90^\circ|$ для $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. Тогда искомая функция зеркальности подстилающей поверхности может быть задана как:

$$k(\beta) = \sin^2 \beta \cdot \left| \frac{\sin(\rho \cdot \cos \beta)}{\rho \cdot \cos \beta} \right|, \quad (11)$$

где $\rho \gg 1$.

Последнее недостающее звено предлагаемой модели – правдоподобная аппроксимация ДНА. Для упрощения аппроксимируем боковые и задние лепестки поверхностью равного уровня (сферой), а главный лепесток – телом вращения отрезка гармонической функции (см. рисунок 2).

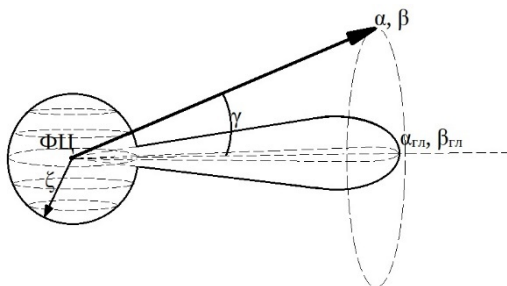


Рис. 2. Графическое представление аппроксимируемой ДНА

Геометрически можно получить, что:

$$\begin{aligned}\alpha'_{\text{пр}} &= \alpha - \alpha_{\text{гл}} + 180^\circ; \beta'_{\text{пр}} = \beta - \beta_{\text{гл}} + 180^\circ; \\ \alpha''_{\text{пр}} &= \begin{cases} \alpha'_{\text{пр}} + 360^\circ, & \text{при } \alpha'_{\text{пр}} < 0, \\ \alpha'_{\text{пр}} - 360^\circ, & \text{при } \alpha'_{\text{пр}} > 360^\circ; \end{cases} \\ \beta''_{\text{пр}} &= \begin{cases} \beta'_{\text{пр}} + 360^\circ, & \text{при } \beta'_{\text{пр}} < 0, \\ \beta'_{\text{пр}} - 360^\circ, & \text{при } \beta'_{\text{пр}} > 360^\circ; \end{cases} \\ \alpha_{\text{пр}} &= \alpha''_{\text{пр}} - 180^\circ, \beta_{\text{пр}} = \beta''_{\text{пр}} - 180^\circ;\end{aligned}$$

$\gamma_{\text{пр}} = \arccos(\cos\alpha_{\text{пр}} \cdot \cos\beta_{\text{пр}})$ (по теореме Пифагора из геометрии на сфере),

$$F(\gamma_{\text{пр}}) = \begin{cases} \max \left[\cos \left(\frac{\gamma_{\text{пр}}}{0,75 \cdot \Phi_{0,5}} \cdot 90^\circ \right), \zeta \right], & \text{при } |\gamma_{\text{пр}}| < 0,75 \cdot \Phi_{0,5}, \\ \zeta, & \text{при } |\gamma_{\text{пр}}| \geq 0,75 \cdot \Phi_{0,5}, \\ \zeta, & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \text{ при } \cos\alpha_{\text{пр}} > 0 \wedge \cos\beta_{\text{пр}} > 0,$$

где α и β – азимут и угол места конкретного направления ДНА; $\alpha_{\text{гл}}, \beta_{\text{гл}}$ – направление главного максимума ДН; $\Phi_{0,5}$ – ширина ГЛ по уровню 0,5 по мощности; ζ – уровень боковых лепестков.

Приведённая аппроксимация, как ожидается, работает удовлетворительно при $\Phi_{0,5} < 120^\circ$ ($\Phi_0 < 180^\circ$). При больших значениях ширины ГЛ результат может быть некорректным по причине введённого условия $\cos\alpha_{\text{пр}} > 0 \wedge \cos\beta_{\text{пр}} > 0$.

Таким образом, для любых α и β при заданных h_n, f_0, F_n, v_n и других параметрах могут быть однозначно найдены мощность элементарного отражения R_m и номер частотного канала n , на который это отражение воздействует. Если теперь из области возможных значений α $[0...360^\circ]$ взять A значений азимута α_i , ($i = 1...A$) таких, чтобы были бы равномерно распределены по числовой оси, и затем для каждого значения α_i аналогично выбрать B значений угла места β_j ($j = 1...B$) из диапазона

$[0...180^\circ]$, то для каждой пары значений $\alpha_i \beta_j$ возможно рассчитать пару значений: мощности элементарного отражения $P_{Mi,j}$ и номера частотных каналов $p_{i,j}$. Если из полученного множества пар значений выбрать имеющие равные номера каналов (например, все значения для $p_{i,j} = 11$), сложить их мощности $P_{Mi,j}$ и разделить на количество слагаемых, то получим оценку мощности гармоники, попадающей в частотный канал с номером n . Произведя такую операцию для всех имеющихся пар значений, получим порядка $N-1$ оценок гармоник с мощностями P_n . Если нормировать полученный ряд значений к единице (по максимальному значению ряда), получим оценку СПМ сигнала, отражённого от подстилающей поверхности.

Недостатками разработанной модели следует считать большую вычислительную сложность (расчёт сотен тысяч и миллионов элементарных оценок P_M для построения одного графика СПМ).

Программная реализация модели

Для получения графиков СПМ была написана программа на языке программирования PascalABC. Несколько графиков, полученных в программе, показаны на рисунках 3-5.

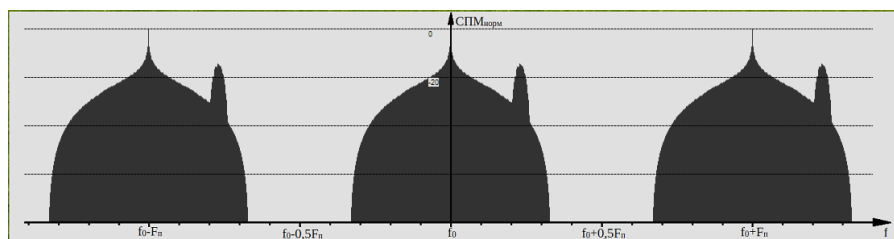


Рис. 3. График СПМ при $V_n = 100$ м/с, $\Phi_{0,5} = 10^\circ$, $\zeta = 0,03$; $\alpha_{гл} = 0^\circ$, $\beta_{гл} = 45^\circ$, $f_0 = 1,25$ ГГц, $F_n = 2,5$ КГц

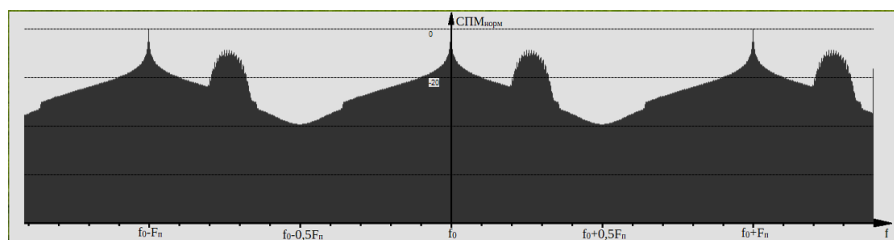


Рис. 4. График СПМ при $V_n = 100$ м/с, $\Phi_{0,5} = 10^\circ$, $\zeta = 0,03$; $\alpha_{гл} = 0^\circ$, $\beta_{гл} = 65^\circ$, $f_0 = 1,25$ ГГц, $F_n = 1,3$ КГц

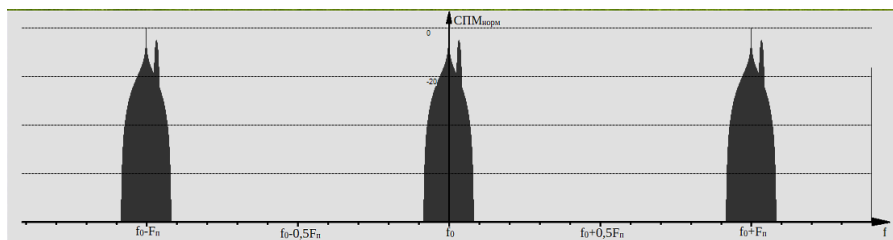


Рис. 5. График СПМ при $V_n = 100$ м/с, $\Phi_{0,5} = 10^\circ$, $\zeta = 0,03$; $\alpha_{гл} = 0^\circ$, $\beta_{гл} = 65^\circ$, $f_0 = 1,25$ ГГц, $F_n = 10$ КГц

Выводы

Получить спектр отражений от подстилающей поверхности в БРЛС возможно с помощью имитационной модели, основанной на разбиении фронта электромагнитной волны на множество элементарных участков, взаимодействующих с пренебрежимо малыми участками земной поверхности. Визуально получаемые спектры кажутся правдоподобными, однако правильность получаемых результатов требует проверки.

Библиографический список

1. Исследование дальности действия радиолокационных систем в условиях радиоэлектронной борьбы: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: В. И. Кошелев, И. С. Холопов. Рязань, 2010. 16с. №4277.
2. Интернет- ресурс. Дата обращения: 26.12.24; URL: https://studref.com/695377/tehnika/pryamougolnoy_plastiny?ysclid=m55if0awth939730721
3. Незлин Д. В. Радиотехнические системы: Уч. пособие – М.: МИЭТ, 2008. - 204 с.

УДК 621.391.1; ГРНТИ 49.03.05

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОДИРОВАНИЯ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ АНТЕНН ДЛЯ МІМО СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ

Ю.Н. Паршин, В.Д. Фам*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, parshin.y.n@rsreu.ru, phamducvn95@gmail.com*

Аннотация. В данной работе рассматривается пространственно-временное кодирование с большим числом передающих антенн для МІМО систем в условиях действия помех. Проведён анализ влияния числа антенн и коэффициента корреляции сигнала передачи на вероятность битовой ошибки МІМО системы. Показано, что использование пространственного кодирования с большим числом антенн позволяет повысить устойчивость передачи и эффективность использования канала связи в условиях воздействия пространственно сосредоточенных помех.

Ключевые слова: МІМО система, пространственно коррелированные помехи, пространственно-временная матрица, вероятность битовой ошибки.

EFFICIENCY OF SPATIAL CODING WITH A LARGE NUMBER OF ANTENNAS FOR MIMO SYSTEMS UNDER INTERFERENCE CONDITIONS

Yu.N. Parshin, V.D. Pham*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, parshin.y.n@rsreu.ru, phamducvn95@gmail.com*

Abstract. This paper investigates the application of Space-Time Block Coding (STBC) with a large number of transmit antennas for MIMO systems operating in the presence of interference. An analysis of the impact of the number of antennas and the transmit signal correlation coefficient on the bit error rate of the MIMO system is performed. It is shown that application of space-time coding with a large number of antennas enhances transmission robustness and improves channel efficiency, particularly under conditions of spatially concentrated interference.

Keywords: MIMO system, spatially correlated interference, space-time matrix, bit error rate.

Введение

Современные системы беспроводной связи предъявляют высокие требования к пропускной способности и помехоустойчивости. Обеспечение надёжного и устойчивого функционирования таких систем является одной из приоритетных научных задач. Для её решения особое значение приобретают методы пространственно-временного кодирования, позволяющие эффективно использовать избыточность многоантенных систем [1, 2]. Одним из наиболее известных и практически реализованных решений является схема Алмаути, предложенная в 1998 году. Она обладает уникальным свойством ортогональности для двух передающих антенн, что обеспечивает простую линейную процедуру декодирования и полный порядок разнесения [3]. Однако в реальных условиях эффективность системы передачи информации снижается под совместном воздействием многолучевости и пространственно коррелированных помех [4, 5]. При увеличении числа антенн на передающей и приёмной сторонах возникает необходимость обобщения данного подхода и применения более общих ортогональных или квазиортогональных пространственно-временных кодов [6–8]. Основной задачей является построение математической, а затем и компьютерной модели функционирования ММО системы с применением пространственно-временного кодирования с большими числом антенн для оценки её эффективности и помехоустойчивости в условиях действия помех.

Целью работы является компьютерное моделирование ММО систем с применением пространственного кодирования для большого числа антенн при наличии пространственно коррелированных помех и исследование способов повышения их эффективности.

Постановка задачи пространственного декодирования

Рассмотрим ММО систему, состоящую из N_{TX} передающих антенн, N_{RX} приёмных антенн и M источников помех.

Матрица коэффициентов канала, учитывающая как прямой луч, так и диффузное рассеяние радиоволн для сигнала, определяется как сумма матриц размером $N_{\text{TX}} \times N_{\text{RX}}$, соответствующих этим составляющим $\underline{\mathbf{H}}_{\text{LS}}$ и $\underline{\mathbf{H}}_{\text{DF}}$, и имеет следующий вид [9]:

$$\underline{\mathbf{H}} = \sqrt{\frac{K_{RS}}{K_{RS} + 1}} \underline{\mathbf{H}}_{LS} + \sqrt{\frac{1}{K_{RS} + 1}} \underline{\mathbf{H}}_{DF},$$

где K_{RS} – фактор Райса для сигнала; $\underline{\mathbf{H}}_{LS}$ – канальная матрица для прямого луча между передатчиком и приемником; коэффициенты диффузной канальной матрицы имеют вид:

$$\underline{\mathbf{H}}_{DF} = \{h_{DFnm}, m=1, \dots, N_{TX}; n=1, \dots, N_{RX}\}.$$

Аналогично матрица коэффициентов передачи помех от передатчика к приемнику имеет вид [9]:

$$\underline{\mathbf{H}}_{Vm} = \sqrt{\frac{K_{RVm}}{K_{RVm} + 1}} \underline{\mathbf{H}}_{LSm} + \sqrt{\frac{1}{K_{RVm} + 1}} \underline{\mathbf{H}}_{DFm}, \text{ где } K_{RVm} - \text{фактор Райса}$$

для помехи; $\underline{\mathbf{H}}_{LSm}$ – канальный вектор размера $N_{RX} \times N_{TXm}$ прямого луча между источником помех и приемником; $\underline{\mathbf{H}}_{DFm} = \{h_{DFvm}, v=1, \dots, N_{TXm}; n=1, \dots, N_{RX}\}$ – диффузная канальная матрица помехи размером $N_{RX} \times N_{TXm}$, N_{TXm} – число передающих антенн источника помехи, $m=1, \dots, M$ – номер помехи.

Метод блочного пространственно-временного кодирования заключается в отображении K информационных символов в кодовую матрицу $\underline{\mathbf{S}}$ размерности $N_{TX} \times P$, где P – число временных интервалов, необходимых для передачи блока символов. Эффективность пространственно-временного кодирования характеризуется скоростью кодирования $R = \frac{K}{P}$. Кодовая матрица для классической схемы Аламути имеет максимальную скорость кодирования $R=1$ и предназначена для системы ММО с двумя передающими антеннами

$$\underline{\mathbf{S}}_2 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1^* \end{bmatrix}.$$

Существуют и другие ортогональные пространственно-временные матрицы, обеспечивающие максимальный возможный порядок разнесения для передачи с передающими антеннами в системах ММО, однако их скорость кодирования $R < 1$. Для случаев трёх и четырёх передающих антенн пространственно-временные блочные коды, построенные на основе таких обобщённых комплексных ортогональных

конструкций со скоростью кодирования $R = \frac{3}{4}$, приведены в работе [6] и имеют вид:

$$\underline{\mathbf{S}}_3 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1^* & 0 \\ -\underline{s}_3^* & 0 & \underline{s}_1^* \\ 0 & -\underline{s}_3^* & \underline{s}_2^* \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{S}}_4 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & 0 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1^* & 0 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_3^* & 0 & \underline{s}_1^* & -\underline{s}_2 \\ 0 & -\underline{s}_3^* & \underline{s}_2^* & \underline{s}_1 \end{bmatrix}.$$

В работах [7, 8] предложена обобщённая структура кодовой матрицы с половинной скоростью кодирования $R = \frac{1}{2}$, предназначенная для систем с тремя и четырьмя передающими антеннами, следующего вида:

$$\underline{\mathbf{S}}_3 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 \\ -s_3 & s_4 & s_1 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{S}}_4 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* & s_4^* \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* & -s_2^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* & s_1^* \end{bmatrix}.$$

На стороне приёмника сигналы каждой из приемных антенн фиксируются в течение P последовательных временных интервалов и представляется в виде $1 \times P$ вектора-строки:

$$\underline{\mathbf{Y}}_m = \sqrt{\frac{q_s}{N_{\text{TX}}}} \underline{\mathbf{H}}_m \underline{\mathbf{S}}^T + \underline{\mathbf{V}}_m,$$

где $m = 1, \dots, N_{\text{RX}}$ – номер приемных антенн; $\underline{\mathbf{H}}_m$ – m -ая строка матрицы $\underline{\mathbf{H}}$; $\underline{\mathbf{V}}_m$ – m -ая строка матрицы помехи $\underline{\mathbf{V}}$, q_s – отношение сигнал-шум.

Для каждой символьной группы выполняется переход к эквивалентной линейной модели с учетом свойств кодовой матрицы. Для пространственного декодирования представим формирование сигнальных символов в виде матричного преобразования

$$\underline{\mathbf{Y}}_m = \underline{\mathbf{A}}_m \underline{\mathbf{S}}_x + \underline{\mathbf{V}}_m,$$

где $\underline{\mathbf{A}}_m$ – $2K \times P$ матрица системы для m -ой приемной антенны, построенная на основе структуры кодовой матрицы и оценок пространственно-временного канала; $\underline{\mathbf{S}}_x = [\underline{s}_1, \underline{s}_2, \dots, \underline{s}_K, \underline{s}_1^*, \underline{s}_2^*, \dots, \underline{s}_K^*]^T$ – расширенный вектор неизвестных символов. Например, матрица $\underline{\mathbf{A}}_m$, полученная для кодовой матрицы $\underline{\mathbf{S}}_3, \underline{\mathbf{S}}_4$ со скоростью кодирования

$R = \frac{3}{4}$ для $N_{\text{TX}} = 3, 4$, имеет вид:

$$\underline{\mathbf{S}}_3 : \underline{\mathbf{A}}_m = \begin{bmatrix} \underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & \underline{h}_{m3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m3} & 0 & -\underline{h}_{m1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{S}}_4 : \underline{\mathbf{A}}_m = \begin{bmatrix} \underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & \underline{h}_{m3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{h}_{m4} & \underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & 0 \\ 0 & -\underline{h}_{m4} & 0 & \underline{h}_{m3} & 0 & -\underline{h}_{m1} \\ \underline{h}_{m4} & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m2} \end{bmatrix}.$$

Аналогично, для кодовой матрицы $\underline{\mathbf{S}}_3, \underline{\mathbf{S}}_4$ со скоростью кодирования $R = \frac{1}{2}$ для $N_{\text{TX}} = 3, 4$, имеет вид:

$$\underline{\mathbf{S}}_3 : \underline{\mathbf{A}}_m = \begin{bmatrix} \underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & \underline{h}_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & 0 & -\underline{h}_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_{m3} & 0 & -\underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & \underline{h}_{m3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & 0 & -\underline{h}_{m3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m3} & 0 & -\underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} \end{bmatrix}.$$

$$\underline{S}_4 : \underline{A}_m = \begin{pmatrix} \underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & \underline{h}_{m3} & \underline{h}_{m4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m4} & -\underline{h}_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m4} & -\underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_{m4} & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} & \underline{h}_{m3} & \underline{h}_{m4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m4} & -\underline{h}_{m3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m4} & -\underline{h}_{m1} & \underline{h}_{m2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_{m4} & \underline{h}_{m3} & -\underline{h}_{m2} & -\underline{h}_{m1} \end{pmatrix}.$$

Отсюда обратная задача оценивания по критерию минимума среднего квадрата ошибки сигнального вектора получается псевдобращением матрицы $\underline{A}_m^+ = (\underline{A}_m^H \underline{A}_m)^{-1} \underline{A}_m^H$

$$\hat{\underline{S}}_{xm} = \underline{A}_m^+ \underline{Y}_m.$$

Результат обработки сигналов от нескольких приемных антенн получается суммирование результатов обработки от каждой антенны

$\hat{\underline{S}}_x = \sum_{m=1}^{N_{RX}} \hat{\underline{S}}_{xm}$. Для более точного оценивания сигнальных символов

используются оценки непосредственно сигнальных символов и их со-

пряженных копий: $\hat{\underline{S}}(1:K) = \frac{1}{2} \left[\hat{\underline{S}}_x(1:K) + \hat{\underline{S}}_x^*(K+1:2K) \right]$.

Эффективность системы ММО в условиях действия помех задается вероятностью битовой ошибки и факторами, которые на нее влияют. Вероятность битовой ошибки $P_{\text{ош}}$ равна отношению числа ошибочных бит к общему числу переданных бит, определённого на основе сопоставления принятой и исходной последовательностей:

$$P_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ош}}}{N_{\text{бит}}},$$

где $N_{\text{ош}}$ – число бит, полученных с ошибкой;

$N_{\text{бит}}$ – общее число полученных бит.

Анализ эффективности ММО системы с пространственно-временным кодированием производится методом статистического

моделирования, исследуя зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум $q_s = \frac{P_S}{P_N}$, отношения помеха-шум $q_V = \frac{P_V}{P_N}$, а также факторов Райса для сигнала и помехи, где P_S – мощность сигналов, излучаемых всеми передающими антеннами, P_N – мощность шума в приемных антеннах, P_V – мощность помехи.

Результаты экспериментального исследования

В данной работе эффективность ММО системы исследуется с помощью статистического моделирования. Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $M=1$, $N_{TX}=3$, $N_m=1$, $K_{RS}=1$, $K_{RV}=1$. Координаты антенн, выраженные в длинах волн, равны: $x_{TX0}=x_{TX1}=0$, $y_{TX0}=0$, $y_{TX1}=0,5\lambda$, $x_{RX0}=\dots=x_{N_{RX}-1}=500\lambda$, $y_{RX0}=70\lambda$, $y_{v0}=-20\lambda$, $y_{v1}=-19,5\lambda$, $y_{RXm}=y_{RX0}+(m-1)d$, $m=1,\dots,N_{RX}$, $x_{v0}=x_{v1}=300\lambda$, $d=0,5\lambda$ – расстояние между соседними элементами антенн.

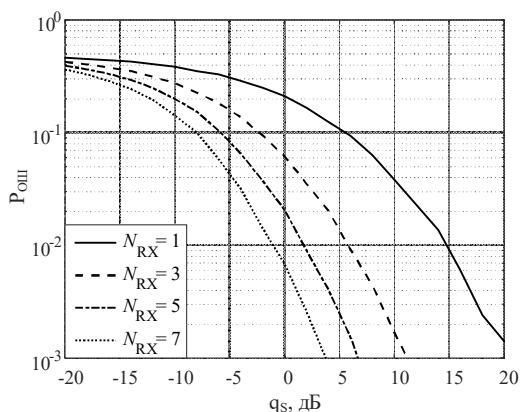


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для различных числа приёмных антенн

На рисунке 1 представлены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для различного числа приёмных антенн. В результате моделирования установлено, что увеличение числа приемных антенн N_{RX} обеспечивает существенное уменьшение

вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ особенно при увеличении числа источников помех.

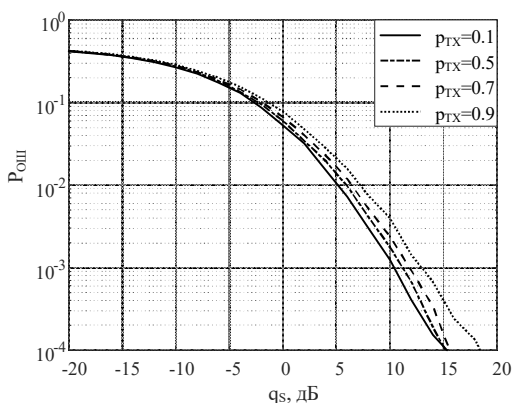


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для различных значений коэффициента корреляции сигнала передачи

Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум при различных значениях коэффициента корреляции сигнала передачи $\rho_{\text{ТХ}}$ показана на рисунке 2. Отметим, что рост значения $\rho_{\text{ТХ}}$ обуславливает увеличение вероятности битовой ошибки, что указывает на ухудшение помехоустойчивости системы при возрастании данного параметра.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что применение пространственно-временного кодирования для большого числа антенн позволяет реализовать эффективную систему ММО в условиях действия помех. Представленные результаты подтверждают перспективность использования многоантенных схем с пространственно-временным кодированием в качестве основы для дальнейшей оптимизации систем ММО в сложных помеховых условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 24-29-00850, <https://rscf.ru/en/project/2429-00850/> в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Telatar I.E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. // European Transactions on Telecommunication. 1999. Vol. 10, No 6. – Pp. 585-595.
2. V. Kuhn. Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. John Wiley & Sons, 2006.
3. S. Alamouti. “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”, IEEE J.Select. Areas Commun. 1998. Vol. 16, No. 8, pp. 1451–1458.
4. Паршин Ю. Н., Фам В. Д. Анализ пропускной способности ММО системы при действии пространственно коррелированных многолучевых помех. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: сб. тр. VIII междунар. науч.–техн. форума: в 10 т. Т. 1 / под общ. ред. О. В. Миловзорова. – Рязань : Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2021. – С. 1–6.
5. Паршин Ю. Н., Фам В. Д. Влияние корреляции канальных матриц на эффективность ММО системы при действии многолучевых помех. // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXXI международной научно-технической конференции. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. Vol. 2. – С. 399-405.
6. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с.
7. V. Tarokh, H. Jafarkhani and A.R. Calderbank. “Space-time Block Codes from Orthogonal Designs”, IEEE Trans. Inform. Theory. 1999. Vol. 45, No. 5, pp. 1456 – 1467.
8. Swapnil T. Patil, Pratap N. Shinde, A Review of Space-Time Block Codes from Real and Complex Orthogonal Designs, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Vol. 100, No.11, 2014, pp. 16-19.
9. Паршин Ю.Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех. М.: КУРС, 2021. – 200 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.3

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА С ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ НА ПОДНЕСУЩИХ НА БАЗЕ ПЛИС

Е.Д. Пчелинцева, Е.С. Штрунова

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, pcelincevaekaterina38@gmail.com, shtrunova.e.s@rsreu.ru*

Аннотация. В работе рассмотрен принцип формирования модулирующей функции для генерирования сигнала с двойной меандровой фазовой манипуляцией на поднесущих. Приведены результаты расчета в среде Mathcad модулирующей функции для разновидности DuoBOC(4,1,1) и моделирования работы программы ее формирования на языке программирования VHDL в среде Quartus II.

Ключевые слова: фазовая манипуляция, цифровая поднесущая, генерация.

SIGNAL FORMATION WITH BINARY OFFSET CARRIER BASED ON FPGA

E.D. Pchelintseva, E.S. Shtrunova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazan, pcelincevaekaterina38@gmail.com, shtrunova.e.s@rsreu.ru*

Abstract. The paper considers the principle of forming a modulating function for generating a signal with double meander phase manipulation on subcarriers. The results of calculating the modulating function for the DuoBOC(4,1,1) variety in the Mathcad environment and simulating the program for its formation in the VHDL programming language in the Quartus II environment are presented.

Keywords: phase manipulation, digital subcarrier, generation.

Введение

Реализация генераторов шумоподобных сигналов с заданными спектральными и временными характеристиками на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) обладает рядом преимуществ по сравнению с другими подходами: высокая скорость за счет возможности параллельной обработки; высокая производительность, гибкость [1–4].

Формирование шумоподобных сигналов часто реализуют с использованием метода прямого цифрового синтеза [5]. Одним из вариантов генерации фазоманипулированного сигнала на ПЛИС заключается в формировании двух гармонических колебаний в противофазе с при-

менением таблицы преобразования LUT (Look-Up Table), при этом закон изменения фазы для определенного элементарного импульса задается с помощью схемы формирования кодовой последовательности управляющей работой мультиплексора [6].

В зависимости от кодовой последовательности (модулирующей функции) и принципа формирования существует различные модификации сигналов с фазовой манипуляцией на поднесущих частотах, обладающих преимуществами при использовании в спутниковых радионавигационных системах (СРНС) [7-9]. При этом разработка разновидностей сигналов является одним из направлений для повышения эффективности первичной обработки в СРНС [10].

Описание сигнала с двойной фазовой манипуляцией на поднесущих и результаты расчета в среде Mathcad

В работе реализована схема формирования кодовой последовательности (модулирующей функции) для разновидности сигналов с двойной фазовой манипуляцией на поднесущих частотах DuoBOC. Сигнал с бинарной фазовой манипуляцией на поднесущих (BOC-сигнал) получается в результате изменения фазы несущего колебания в соответствии с модулирующей функцией. Для формирования DuoBOC-сигнала используется дополнительная модуляция sinBOC-сигнала второй поднесущей [11]:

$$S_{\text{DuoBOC}}(t) = A(t)G_{\text{Duo}}(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $G_{\text{Duo}i}(t)$ – модулирующая функция для DuoBOC-сигнала, $G_{\text{Duo}}(t) = G_{\text{SC1}}G_{\text{SC2}}(t)G_{\text{ДК}}(t)$;

$G_{\text{SC}i}(t)$ – i -я цифровая поднесущая частота, $i = 1, 2$, $G_{\text{SC}i}(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_{si}t))$.

Модулирующая функция DuoBOC сигнала состоит из трех составляющих, поэтому обычно этот сигнал обозначают (m_2, m_1, n) – коэффициенты кратности поднесущих f_{s2} , f_{s1} частот и частоты следования дальномерного кода к базовой частоте f_c [11].

В работе принцип формирования генератора модулирующей функции для DuoBOC(4,1,1) включал следующие этапы:

- формирование грубого дальномерного кода, в качестве которого использовался код Голда, полученный суммированием по модулю 2 двух M -последовательностей, порождающие полиномы для ко-

торых $P_1(x)=1+x^7+x^{10}$ и $P_2(x)=1+x^3+x^7+x^9+x^{10}$, отношение частоты дальномерного кода к базовой частоте равно $f_{\text{дк}}/f_c = 1$;

- формирование двух цифровых поднесущих, в качестве которых использовался меандр, соответствующий функции $\text{sign}(\sin(2\pi f_{si}t))$; $f_{s1}/f_c=4$, $f_{s2}/f_c=1$;
- объединение дальномерного кода и цифровых поднесущих.

На рисунке 1 представлен принцип формирования модулирующей функции для DuoBOS-сигнала.

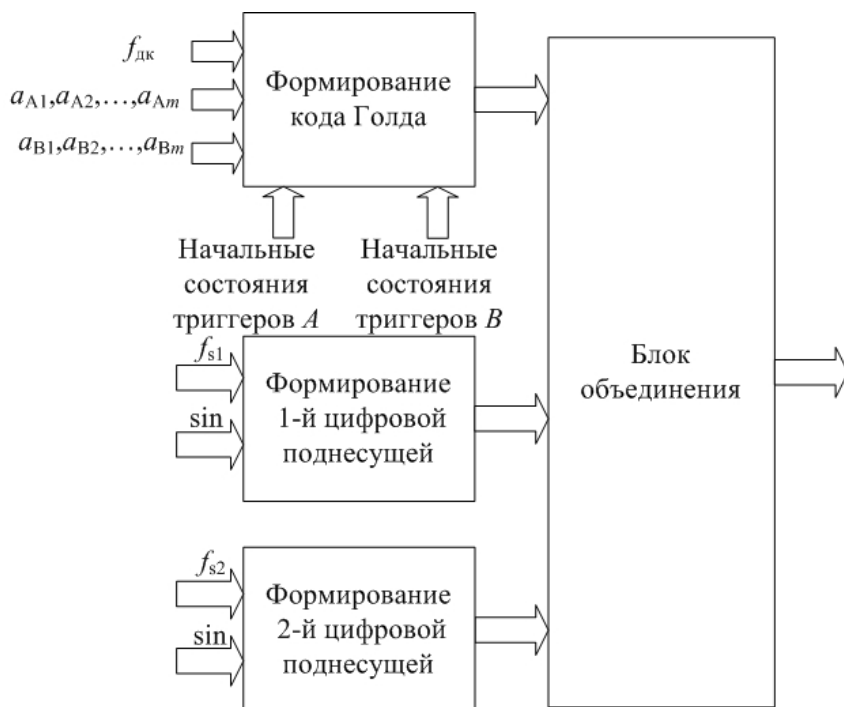


Рис. 1. Схема формирования модулирующей функции для сигнала с DuoBOS модуляцией

На рисунке 2 представлен фрагмент дальномерного кода (сигнатура ансамбля Голда, полученная в результате суммирования по модулю 2 исходных кодовых последовательностей) в среде Mathcad.

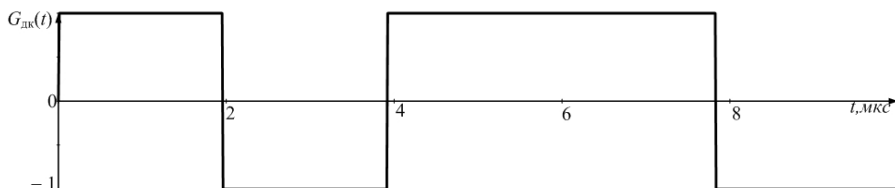


Рис. 2. Фрагмент сигнатуры из кода Голда

На рисунке 3 изображены цифровые поднесущие: 1 – для $f_{s1} = 4f_c$, $2 - f_{s2} = f_c$, полученные в среде Mathcad.

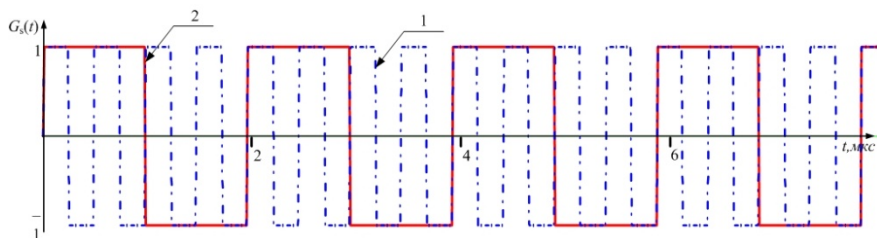


Рис. 3. Фрагменты цифровых поднесущих

На рисунке 4 представлена модулирующая функция для сигнала с модуляцией DuoBOC(4, 1, 1), рассчитанная в среде Mathcad. Произведение дальномерного кода и двух цифровых поднесущих обозначены $G_{duo}(t)$.

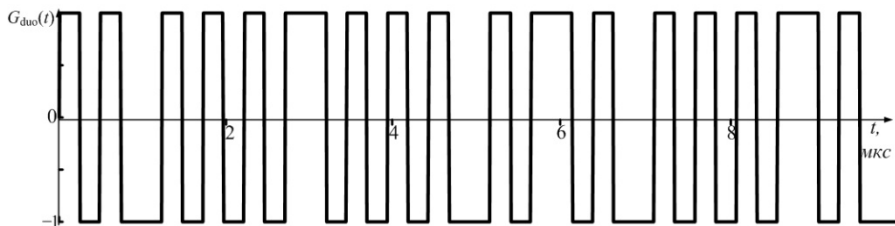


Рис. 4. Фрагмент модулирующей функции для DuoBOC(4,1,1)

На рисунке 5 представлены результаты моделирования в программе Quartus II 9.0: clock – тактовый вход с частотой 50 МГц; load – вход принудительной загрузки стартовых комбинаций для формирования кода Голда, CLK1 – первая цифровая поднесущая, CLK4 – вторая цифровая поднесущая, Gold – грубый дальномерный код, DUOBOC_out – кодовая последовательность, определяющая модули-

рующую функцию для формирования сигнала с двойной модуляцией на поднесущих DuoBOC(4,1,1).

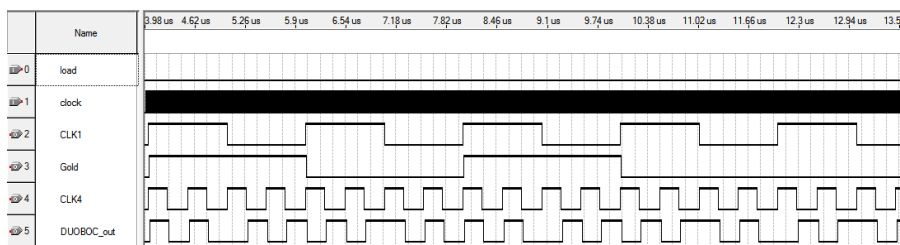


Рис. 5. Результаты моделирования в программе Quartus II 9.0.

Итоговая кодовая последовательность для DuoBOC(4,1,1) (рис. 6) соответствует теоретическому расчету, проведенному в среде Mathcad (рис. 3). Благодаря гибкости реализации на ПЛИС, данный подход реализации можно адаптировать под другие частотные соотношения и разновидности сигналов с фазовой манипуляцией на поднесущих.

Библиографический список

1. Mohammad S. Sharawi, Daniel N. Aloii. A Programmable FPGA Implementation of a Multi-Coded BOC(m,n) Signal Generator for Navigation Systems: Midwest Symposium on Circuits and Systems. 2008. pp. 886 - 889.
2. Тарасов И.Е., Люлява Д.В., Дуксин Н.А. Проектирование конвейерных вычислительных устройств с учетом топологического представления // Вестник РГРТУ. 2023. №86. С. 86-95.
3. Сухачёв К.И., Григорьев Д.П., Шестаков Д.А., Артюшин А.А., Родина А.В. Разработка кольцевой полудуплексной сети для обмена данными между устройствами в научной космической аппаратуре // Вестник РГРТУ. 2023. № 84. С. 34-45.
4. Мартышкин А.И. Реализация узлов на программируемых логических интегральных схемах реконфигурируемой вычислительной системы // Вестник РГРТУ. 2023. № 85. С. 36-43.
5. Брэндан Кронин. Простое и эффективное формирование сигналов при помощи синтезаторов прямого цифрового синтеза частот // Беспроводные технологии. 2012. №1. С. 59-64.
6. FPGA Based Implementation of BPSK and QPSK Modulators using Address Reverse Accumulators // The 7th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference. 2016. pp. 1-6
7. Ярлыков М.С., Ярлыкова С.М. Статистические характеристики косинусных обобщенных ВОС-сигналов (cosGBOC-сигналов) перспективных

спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника и электроника. 2019. Том 64, № 7. С. 694–710.

8. Ярлыков М.С., Ярлыкова С.М. Полные СВОС-сигналы и их энергетические спектры в спутниковых радионавигационных системах нового поколения // Новости навигации. 2014. №4. С. 14-25.

9. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с

10. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Модернизация алгоритма обнаружения ВОС-сигналов в интересах уменьшения уровня боковых лепестков // Вестник РГРТУ. 2013. №3. С. 32–38.

11. Вейцель А. В. Новый класс меандровых шумоподобных радиосигналов для радионавигационных систем // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т.16. №7. С. 43-48 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.3

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЦИМАЦИИ В ЗАДАЧЕ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ПОБОЧНЫХ ПИКОВ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ МЕАНДРОВОГО ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА

Е.С. Штрунова

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, shtrunova.e.s@rsreu.ru*

Аннотация. В работе рассмотрено применение разделения кодовой последовательности фазоманипулированного сигнала на поднесущих с целью уменьшения побочных пиков автокорреляционной функции. Показано, что данный подход позволяет устранить неоднозначность измерения времени задержки.

Ключевые слова: индекс децимации, взаимнокорреляционная функция, автокорреляционная функция.

APPLICATION OF DECIMATION IN THE PROBLEM OF REDUCING THE LEVEL OF SIDE PEAKS OF THE AUTOCORRELATION FUNCTION OF A BINARY CARRIER OFFSET MODULATED SIGNAL

E.S. Shtrunova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazan, shtrunova.e.s@rsreu.ru*

Abstract. This paper examines the use of dividing the code sequence of a phase-shift keyed signal into subcarriers to reduce spurious

peaks in the autocorrelation function. It is shown that this approach eliminates ambiguity in delay measurement.

Keywords: decimation index, cross-correlation function, correlation function.

Введение

Шумоподобные сигналы нашли широкое применение радиотехнических системах различного назначения [1–3]. Использование в спутниковых радионавигационных системах (СРНС) сигналов с фазовой манипуляцией на поднесущих частотах ВОС (от англ. «binary offset carrier»), излучаемых с навигационных спутников, способствует достижению предъявляемых требований по точности навигационно-временных определений [4]. К преимуществам данного вида модуляции относятся робастность к многолучевому распространению сигнала; узкий основной лепесток автокорреляционной функции (АКФ), что позволяет снизить погрешность измерения навигационного параметра [5, 6]. Несмотря на достоинства, ВОС-сигнал имеет недостаток, связанный с наличием побочных пиков АКФ, что приводит к неоднозначности измерения времени задержки, соответственно к неоднозначности определения дальности. Учитывая то, что АКФ во многом определяет структуру временных дискриминаторов в системе слежения за задержкой: количество переходных значений дискриминационной характеристики равно числу пиков АКФ, что при наличии многих пиков приводит к увеличению вероятности ложного захвата [7, 8]. Таким образом, побочные пики АКФ сигнала с фазовой манипуляцией на поднесущих частотах будут влиять не только на однозначность измерения времени задержки, но и на эффективность системы слежения. Поэтому задача уменьшения побочных пиков АКФ сигналов с ВОС модуляцией является актуальной в области обработки радионавигационных сигналов.

Методы обработки сигналов с фазовой манипуляцией на поднесущих во временной области

Методы обработки сигналов с ВОС модуляцией во временной области называются методами подавления боковых пиков, которые решают проблему неоднозначности, используя геометрические свойства АКФ. Основная идея этих методов заключается в использовании синтезированной АКФ при захвате и слеживании.

Одним из вариантов ее построения является вычисление взаимной корреляционной функции между принятым ВОС-сигналом и опорны-

ми вспомогательными сигналами, форма чипа которых может отличаться от принятого [8, 9]. Они комбинируются линейно или нелинейно для формирования синтезированной АКФ без боковых пиков. Ключевым моментом построения синтезированной АКФ в этом случае является выбор формы вспомогательного сигнала. Из-за различных форм вспомогательных сигналов и режимов комбинирования методы подавления боковых пиков существенно отличаются друг от друга.

Некоторые методы имеет ограничения, связанные с возможностью применения только к сигналам $\sin\text{BOC}(m,n)$ [10], или к $\cos\text{BOC}(m,n)$.

В работе рассматривается задача снижения влияния ложных пиков АКФ на измерение времени задержки сигнала (неоднозначного измерения времени сигнала с модуляцией BOC), за счет разделения на две последовательности с помощью децимации меандровой кодовой последовательности для фазоманипулированных сигнала на поднесущих частотах $\sin\text{BOC}(m,n)$ и $\cos\text{BOC}(m,n)$.

При этом индекс децимации зависит от разновидности сигнала и частотных соотношений m и n – соответственно отношение частот f_{sub}/f_c и f_{chip}/f_c , где f_{sub} – частота отстройки поднесущих, f_{chip} – частота следования символов грубого дальномерного код, f_c – базовая частота [4].

Данный алгоритм учитывает геометрические особенности АКФ состоит из следующих этапов. На первом этапе необходимо разделить меандровую кодовую последовательность, являющуюся произведением грубого дальномерного кода $G_{\text{chip}i}$ и цифровой поднесущей $G_{\text{sc}i}$ [4]:

$$G_i = G_{\text{chip}i} G_{\text{sc}i},$$

на две составляющие G_0 , G_1 .

При этом принцип разделения зависит от вида модуляции. Для $\cos\text{BOC}(m,n)$ и $\sin\text{BOC}(m,n)$ элементы составляющей G_0 определяются следующим образом:

$$G_{0i} = \begin{cases} G_i, & \text{если } i \bmod v = 0, \\ 0, & \text{если } i \bmod v \neq 0, \end{cases}$$

где v – индекс децимации, $v = pm$, зависящий от количества чипов p в элементарном импульсе и соотношения частот. Как видно, из рисунка 1, на котором изображены цифровые поднесущие для $\sin\text{BOC}(1,1)$ и $\cos\text{BOC}(1,1)$, полученные с использованием функций $\text{sign}(\cos(2\pi f_{\text{sub}}t))$ или $\text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sub}}t))$, где функция $\text{sign}(z)$ равна [4, 6]:

$$\text{sign}(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z > 0, \\ 0 & \text{при } z = 0, \\ -1 & \text{при } z < 0. \end{cases}$$

Для sinBOC (1, 1) в одном элементарном импульсе содержится 2 чипа, а для cosBOC(1, 1) – 4 чипа.

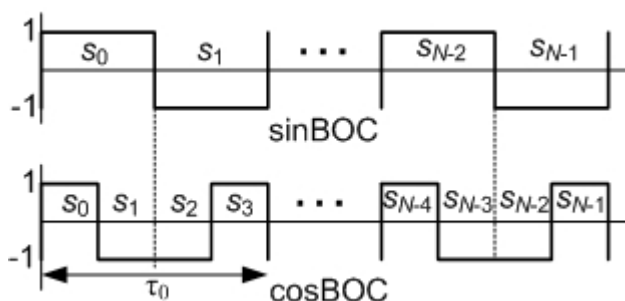


Рис. 1. Цифровые поднесущие для sinBOC и cosBOC для $f_{\text{sub}} = f_c$

Принципы определения элементов составляющей G_1 для cosBOC(m, n) и sinBOC(m, n) различаются и зависят от соотношения $m = f_{\text{sub}}/f_c$. Таким образом, для cosBOC(m, n) при четном m

$$G_{1_i} = \begin{cases} G_i, & \text{если } i \bmod v = v - 1, \\ 0, & \text{если } i \bmod v \neq v - 1, \end{cases}$$

при нечетном m –

$$G_{1_i} = \begin{cases} G_i, & \text{если } i \bmod v = m + 2, \\ 0, & \text{если } i \bmod v \neq m + 2. \end{cases}$$

Для sinBOC(m, n) элементы составляющей G_1 при четном m

$$G_{1_i} = \begin{cases} G_i, & \text{если } i \bmod v = m + 1, \\ 0, & \text{если } i \bmod v \neq m + 1, \end{cases}$$

при нечетном m –

$$G_{1_i} = \begin{cases} G_i, & \text{если } i \bmod v \neq m - 1, \\ 0, & \text{если } i \bmod v = m - 1. \end{cases}$$

На втором этапе необходимо вычислить взаимнокорреляционные корреляционные функции $V_0(\tau)$ и $V_1(\tau)$ кодовых последовательностей G и G_0 ; G и G_1 соответственно.

На третьем этапе определяется АКФ с учетом геометрических особенностей как [11]

$$R(\tau) = |V0(\tau) + V1(\tau)| - |V0(\tau) - V1(\tau)|.$$

На рисунке 2 представлены результаты вычисления АКФ $\cos\text{BOC}(1, 1)$ и $\cos\text{BOC}(2, 1)$ 1 – с применения и 2 – без применения децимации. В качестве грубого дальномерного кода применялся код Голда $f_{\text{chip}}/f_c = 1$.

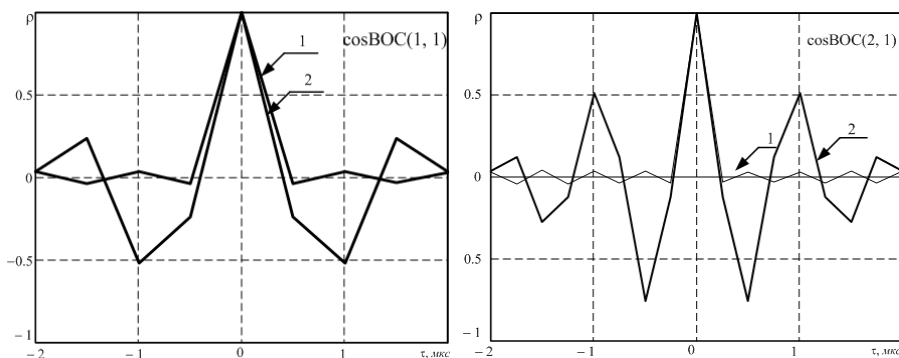


Рис. 2. АКФ $\cos\text{BOC}$: 1 – с децимацией, 2 – без децимации

Результаты расчетов в среде Mathcad (рис. 2) показали, что применение децимации с последующим вычислением взаимнокорреляционных функций позволяет значительно снизить уровень побочных пиков $\cos\text{BOC}(1,1)$ и $\cos\text{BOC}(2,1)$, при этом происходит расширение основного лепестка АКФ по сравнению с АКФ $\cos\text{BOC}(1,1)$.

Библиографический список

1. Гурин Е.И., Тумасова С.В. Метод синхронизации и обработки информации в вычислительных сетях на шумоподобных сигналах // Вестник РГРТУ. 2023. № 84. С. 46-57.
2. Лисничук А.А., Мещанинов П.С. Алгоритм многокритериального выбора вида модуляции для адаптации радиосистем передачи информации к действию структурной помехи // Вестник РГРТУ. 2025. № 91. С. 13-23.
3. Нгуен Чонг Нхан, Подстригаев А.С. Экспериментальная проверка алгоритма распознавания типа сигнала в автокорреляционном приемнике // Вестник РГРТУ. 2022. № 80. С. 46-52.
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с
5. Ярлыков М.С., Ярлыкова С.М. Корреляционные функции навигационных $\cos\text{GBOC}$ -сигналов как обратное преобразование Фурье энергетических спектров // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 1. С. 75-89.

6. Ярлыков М. С. Меандровые радиосигналы (ВОС-сигналы) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения // *Новости навигации*. 2017. 10-23 с.

7. Мальцев Г.Н., Евтеев А.В. Устойчивость слежения за задержкой фазоманипулированных сигналов с расширением спектра в системах синхронизации радиотехнических систем // *Информатика и автоматизация*. 2021. Том 20, № 1. С. 16–42.

8. Feng Shen, Guanghui Xu, Joon Wayn Cheong, Haiyu Feng. Unambiguous Acquisition and Tracking Technique for General BOC Signals // *Radioengineering*. 2015. Vol. 24, No. 3. pp. 840-849.

9. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Модернизация алгоритма обнаружения ВОС-сигналов в интересах уменьшения уровня боковых лепестков // *Вестник РГРТУ*. 2013. №3. С. 32–38.

10. Julien O., Macabiau C., Cannon E., Lachapelle G. ASPeCT: Unambiguous Sine-BOC(n,n) Acquisition/Tracking Technique for Navigation Applications // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2007. Vol. 43, No. 1. pp. 150-162.

11. Youngpo Lee, Dahae Chong, Iickho Song, Sun Yong Kim, Gyu-In Jee, Seokho Yoon. Cancellation of Correlation Side-Peaks for Unambiguous BOC Signal Tracking // *IEEE Communications Letters*. 2012. Vol. 16, No. 5. pp. 569-572.

УДК 621.383; ГРНТИ 47.09.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Ю.Д. Гудков, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, gudlov4000@mail.ru*

Аннотация. Проведено моделирование переходных процессов в полупроводниковых структурах при одновременном воздействии монохроматического оптического излучения и внешнего электрического поля. В качестве объектов исследования выбраны барьерные структуры на основе кристаллических и неупорядоченных полупроводников.

Ключевые слова: полупроводниковые барьерные структуры; переходные процессы, монохроматическое излучение, электрические поля.

SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURES

Yu.D. Gudkov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, gudlov4000@mail.ru*

Abstract. The modeling of transient processes in semiconductor structures under the simultaneous action of monochromatic optical radiation and an external electric field is carried out. Barrier structures based on crystalline and disordered semiconductors are chosen as objects of research.

Keywords: semiconductor barrier structures; transient processes, monochromatic radiation, and electric fields.

Введение

Физические процессы, происходящие в полупроводниковых структурах, определяют электрофизические характеристики как отдельных электронных компонентов, так и технико-эксплуатационные свойства состоящих из них электронных схем, приборов и устройств в целом. Эти процессы во многом зависят от пространственного распределения объемного заряда в барьерных структурах, поэтому данная информация критически важна для конструкторов и технологов при проектировании и изготовлении приборных структур [1]. Одним из перспективных методов для изучения пространственного заряда в барьерных структурах является разновидность времяпролетного метода – метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ). МКТНФ позволяет непосредственно измерять распределение напряженности внутреннего электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ) барьерной структуры, а далее по этим данным рассчитать пространственное распределение электростатического потенциала и плотности объемного заряда в ОПЗ. МКТНФ применим для исследования материалов с относительно низкой подвижностью носителей заряда, таких как неупорядоченные полупроводники и структуры на их основе [2].

Принцип работы МКТНФ

Суть МКТНФ заключается в следующем: на исследуемую структуру одновременно воздействуют импульсом монохроматического света и внешним электрическим полем. Свет в полупроводнике возбуждает свободные носители заряда, которые движутся под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей. Отличие

МКТНФ от других видов времяпролетных методов заключается в том, что внешнее поле приложено навстречу внутреннему, так что носители заряда двигаются под действием результирующего поля в точку с наименьшим значением электростатического потенциала. Если суммарный заряд, протекающий во внешней цепи в результате переходных процессов равен нулю, то можно говорить о полной компенсации внутреннего электрического поля внешним внутри полупроводниковой барьерной структуры. Зная толщину образца и амплитуду внешнего напряжения, можно определить напряженность внутреннего электрического поля. Координата, в которой измерена напряженность внутреннего электрического поля, определяется через значения оптического коэффициента поглощения на данной длине волны и толщину экспериментальной структуры. Проводя измерения при освещении светом с разными длинами волн, получают распределение внутреннего электрического поля по ширине ОПЗ барьерной структуры [3].

Практическая реализация МКТНФ имеет некоторые особенности, которые необходимо учитывать при планировании исследований и обработке полученных экспериментальных данных. Во-первых, в случае многослойных структур при поглощении света необходимо учитывать отражение и переотражение на границах раздела различных слоев. От этого зависит пространственное распределение фотогенерированных носителей заряда, которые участвуют в переходных процессах. Во-вторых, переходные процессы не должны превышать максвелловского времени релаксации. В противном случае внешнее электрическое поле успеет перераспределиться из-за разницы удельного сопротивления по толщине структуры, в результате чего измерения будут неточными.

Для того, чтобы учесть эти особенности МКТНФ, было проведено математическое моделирование процессов оптического поглощения и пространственного распределения суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей.

Результаты моделирования

В качестве образцов для моделирования были выбраны аморфный гидрогенизированный кремний (α -Si:H), кристаллический кремний (c-Si) и двухслойная структура α -Si:H/c-Si. Выбор данных материалов связан с тем, что они получили широкое распространение при производстве фотоэлектрических преобразователей на основе гетероструктуры α -Si:H/c-Si, которые обладают улучшенными техническими ха-

рактическими по сравнению с традиционными солнечными элементами на основе кристаллического кремния [4].

Для α -Si:H, c-Si и α -Si:H/c-Si получены следующие результаты:

- зависимость коэффициента пропускания света через структуру от координаты при различных длинах волн падающего монохроматического излучения;
- распределение объемного заряда по толщине структуры.

На рисунке 1 представлена смоделированная зависимость интенсивности проходящего света от координаты при разных длинах волн в двухслойной структуре α -Si:H/c-Si [5].

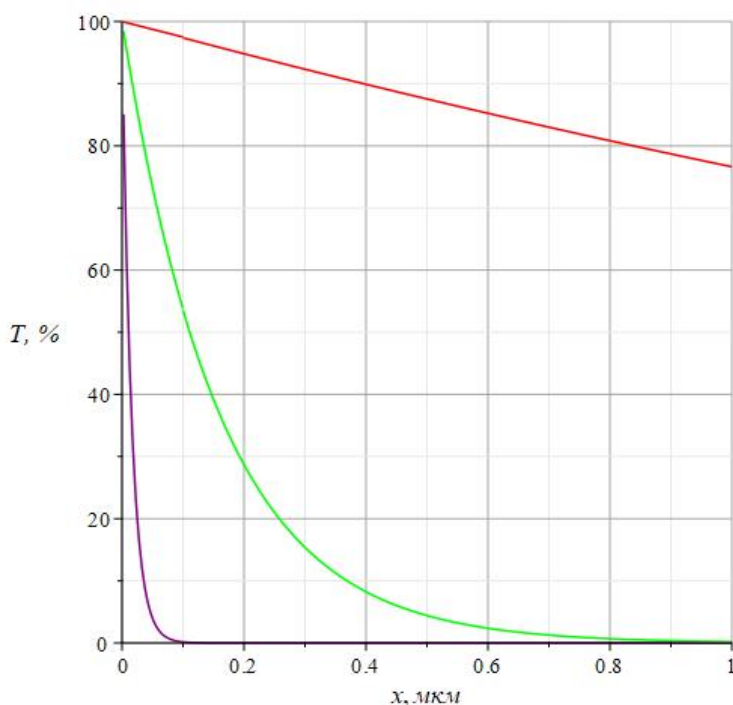


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания света от длины волны в двухслойной структуре α -Si:H/c-Si: фиолетовая линия – 320 нм; зеленая линия – 520 нм; красная линия – 670 нм

Оптическое поглощение во всем видимом диапазоне приблизительно в 20 раз интенсивнее в α -Si:H по сравнению с c-Si [6]. Тем не менее, из-за малых толщин пленок α -Si:H (10 – 30 нм), используемых в солнечных элементах типа HIT [4], оптическое поглощение проис-

ходит преимущественно в слое монокристаллического кремния, что подтверждается результатами моделирования [5]. Соответственно время релаксации переходных процессов в структурах α -Si:H/c-Si определяются в основном оптическими и электрофизическими характеристиками c-Si. Это следует учитывать при планировании экспериментальных измерений для тестовых образцов на основе солнечных элементах типа НІТ и обработке экспериментальных данных.

Таким образом, моделирование оптического поглощения и вызванных этим переходных процессов позволяет спрогнозировать результаты экспериментальных МКТНФ измерений в зависимости от материалов и структуры исследуемых образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников: учебное пособие – 2-е изд. – Саратов: Вузовское образование, 2019. – 75 с.
2. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Маслов А.А. и др. Анализ и уточнение математического аппарата для модифицированного времяпролетного метода // Физика и техника полупроводников, 2002. Т. 36. Вып. 4. С. 433 – 436.
3. Вишняков Н.В, Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Моделирование оптического поглощения в многослойных полупроводниковых структурах // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024. Сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2024. С. 110 – 113.
4. С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев и др. Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа НІТ // Физика и техника полупроводников, 2018, том 52, вып. 7, С. 787 – 791.
5. Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Развитие методики исследования многослойных барьерных наноструктур при оптическом и электрическом возбуждении структур // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023. Сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Том 2. Рязань, 2023. С. 76 – 81.
6. Айвазов А.А., Будагян Б.Г., Вихров С.П. и др. Неупорядоченные полупроводники М.: Издательство МЭИ.1995. – 352 с.

УДК 53.086; 53.072.13; ГРНТИ 29.03

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЗОНДОВЫМ ДАТЧИКОМ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

В.В. Куклев, Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kuklewadim@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена система управления зондовым датчиком атомно-силового микроскопа (АСМ). Приводятся основные сведения об атомно-силовом микроскопе, принципе его работы. Рассмотрена блок-схема системы управления зондовым датчиком АСМ. Было проведено моделирование схемы системы управления зондовым датчиком АСМ и сравнение результатов моделирования с параметрами существующих систем управления.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ).

ATOMIC FORCE MICROSCOPE PROBE CONTROL SYSTEM

V.V. Kuklev, N.V. Vishnyakov, V.V. Gudzev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, kuklewadim@yandex.ru*

The summary. The paper considers the control system of the probe sensor of an atomic force microscope (AFM). The basic information about the atomic force microscope and the principle of its operation is given. The block diagram of the AFM probe sensor control system is considered. The AFM probe control system circuit was modeled and the simulation results were compared with the parameters of existing control systems.

Keywords: scanning probe microscopy (SPM), atomic force microscopy (AFM).

Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) это один из измерительных методов, входящий в группу методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), позволяющих исследовать топологию, трибологические, электрические и магнитные свойства поверхности твердых веществ, а также свойства поверхности и материала в микро и наноразмерных структурах, включая биологические микрообъекты такие как, ткани, бактерии и клетки. Кроме этого с помощью АСМ возможна

модификация поверхности образца, вплоть до создания структур с нанометровым разрешением.

На сегодняшний день АСМ широко применяется для контроля качества, анализа дефектов и шероховатости, измерения электрофизических, оптических и тепловых свойств полупроводниковых материалов и не только их. Для осуществления всего этого требуется высокий контроль и точность, измеряющего устройства [1].

В данной статье содержится анализ и обзор системы управления зондовым датчиком АСМ.

Физические принципы методов АСМ

Методы изучения топологии и электрофизических характеристик поверхности можно разбить на две большие группы – контактные квазистатические и бесконтактные колебательные. В контактных квазистатических методах при соприкосновении зонда с поверхностью образца в начале на него действуют силы притяжения, называемые силами Ван-дер-Ваальса. Однако, при достаточно малом расстоянии, а именно, когда оно будет меньше среднего межатомного расстояния, будут преобладать отталкивающие кулоновские силы. Кантилевер зондового датчика под воздействием этих сил будет изгибаться, что регистрируется четырех-секционным фотодетектором (фотодиодом) с помощью отраженного от поверхности кантилевера луча лазера.

В квазистатическом режиме АСМ изображение рельефа исследуемой поверхности формируется либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью (силе Ван-дер-Ваальса), либо при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью образца. При сканировании в режиме постоянной силы ($F_z = \text{const}$) система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера (рис. 1). При этом напряжение, подаваемое на z-секцию сканера, будет пропорционально высоте рельефа в точке сканирования.

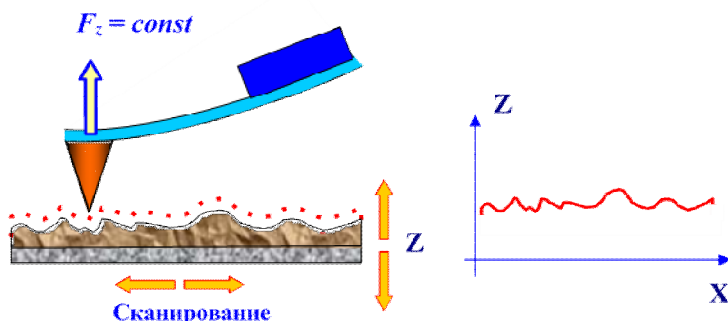


Рис. 1. Формирование АСМ изображения при постоянной силе взаимодействия зонда с образцом [2]

При исследовании образцов с малыми (порядка единиц ангстрем) перепадами высот рельефа часто применяется режим сканирования при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью ($Z = \text{const}$). В данном случае информацию о рельефе будет нести изменение величины изгиба сканера ΔZ (рис. 2).

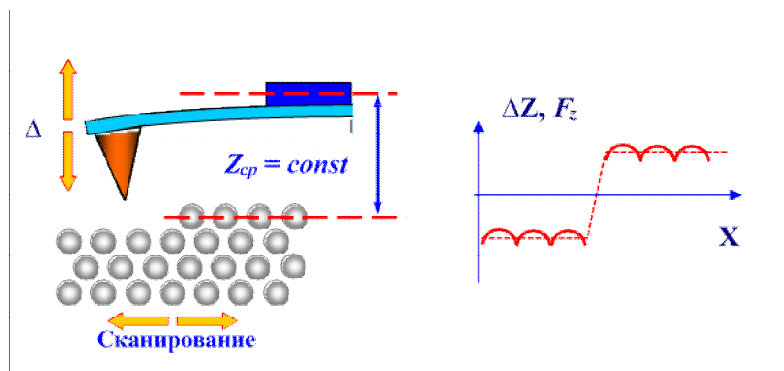


Рис. 2. Формирование АСМ изображения при постоянном расстоянии между зондовым датчиком и образцом [2].

В настоящее время наиболее широко используемым видом сканера является трубчатый сканер. Он состоит из четырех электродов, находящихся по бокам трубки, с помощью которых осуществляется управление сканером по осям OX и OY . За вертикальное смещение сканера отвечает электрод, расположенный внутри или снизу трубки. Таким образом, обеспечивается растр сканирования с достаточно высокой точностью. Для управления таким видом сканера необходимо прило-

жить к электродам потенциал до 200 В, для чего потребуются ряд высоковольтных усилителей.

Структурная схема системы управления зондовым датчиком АСМ

Данная схема выполняет функцию сбора и обработки данных с фотодатчиков для управления сканером зонда. АЦП передают на микроконтроллер сигналы LF и DFL, которые, в свою очередь, несут информацию об изучаемой поверхности образца в определенной точке. Сигнал DFL заводится на дифференциальный усилитель (ДУ) для вычитания из него значения высоты зонда над поверхностью, установленной оператором. Таким образом, сформированная обратная связь служит для корректировки высоты зонда над поверхностью.

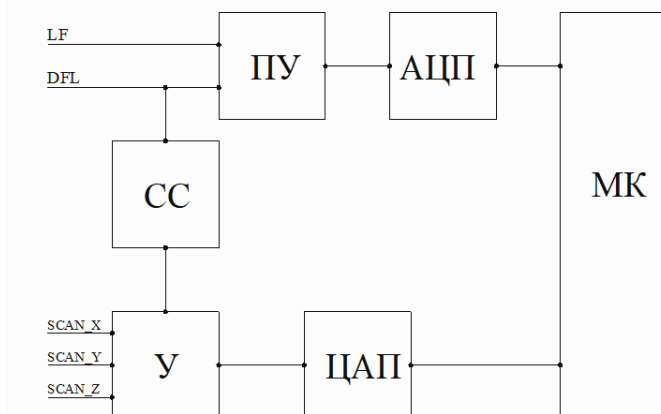


Рис. 3. Структурная схема системы управления зондом АСМ

Моделирование системы управления зондовым датчиком АСМ

Моделирование схемы блока управления проводилось в SPICE приложении программы схемотехнического моделирования MicroCap 12. Модель представлена на рисунке 4. Данная схема выполняет функцию сбора и обработки данных с фотодатчиков для управления сканером зонда. АЦП передают на микроконтроллер сигналы LF и DFL, которые в свою очередь несут информацию об изучаемой поверхности образца в определенной точке. DFL заводится на дифференциальный усилитель (ДУ) для вычитания из него значения высоты зонда над поверхностью, установленной оператором. Таким образом,

сформированная обратная связь служит для корректировки высоты зонда над поверхностью.

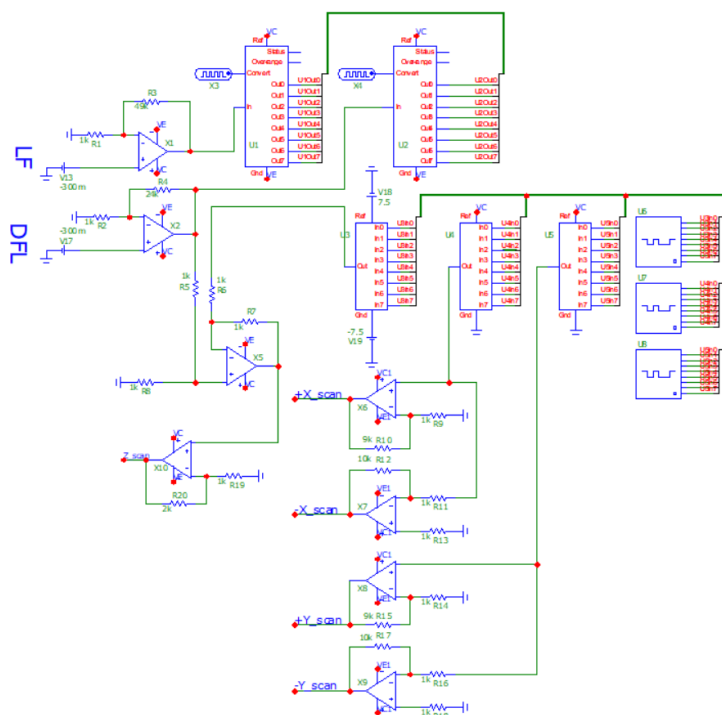


Рис. 4. Модель системы управления зондовым датчиком АСМ в MicroCap12

На рисунках 5 и 6 изображены значения потенциалов при построочном сканировании образца, в качестве номера строки, в данном случае, выступает потенциал на электроде Y, а в качестве элемента строки, потенциал на электроде X.

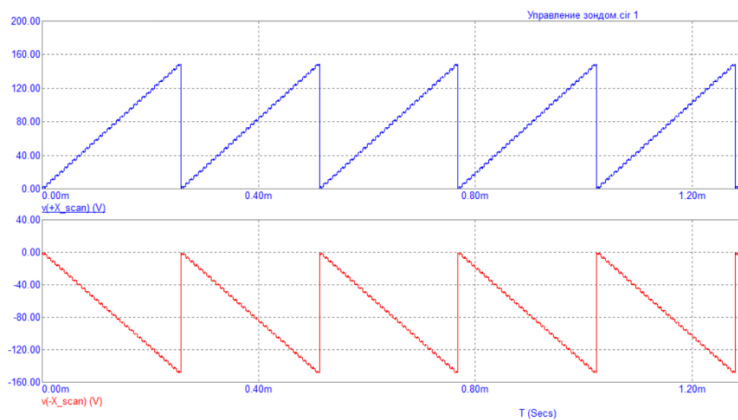


Рис. 5. Потенциалы на +X и -X электродах сканера

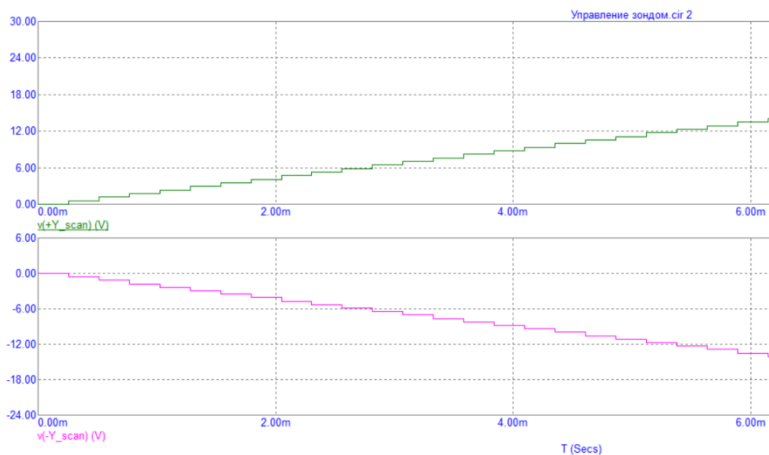


Рис. 6. Потенциалы на +Y и -Y электродах сканера

На рисунке 7 изображен потенциал обратной связи зонда со сканером, обеспечивающий сканирование в режиме постоянной силы изгиба кантилевера.

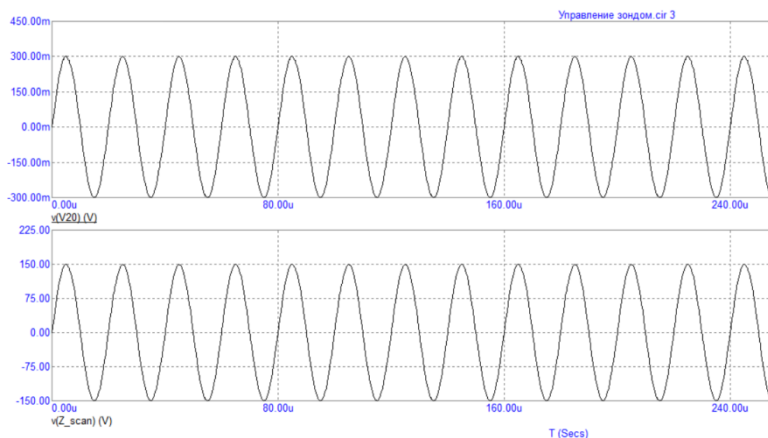


Рис. 7. Потенциал на Z электроде сканера

Выводы

По полученным результатам моделирования определены диапазоны управляющих сигналов на X, Y, Z пьезодвигатели, позволяющие обеспечить работоспособность сканера с минимальными искажениями нелинейности в режиме постоянной силы изгиба кантилевера при построчном сканировании.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Быков В. А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей: дисс. д.т.н.: 05.27.01, 01.04.01. Москва, 2000. 402 с.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие. Нижний Новгород: РАН ИФМ, 2004. 114 с.
3. Дедкова Е.Г., Чуприк А.А, Бобринецкий И.И., Неволин В. К. Приборы и методы зондовой микроскопии. Учебное пособие. – М: МФТИ, 2011. 160 с.

УДК 681.586.732; ГРНТИ 44.41.35

**МОДЕЛИРОВАНИЕ P-I-N СТРУКТУРЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ AFORS-HET**

Н.В. Лобанов, Н.В. Вишняков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Российская Федерация, Рязань, nik22122002@gmail.com*

Аннотация. В данной работе рассматриваются возможности для численного моделирования полупроводниковых структур фотоприемников в программной среде AFORS-HET. Проведен расчет электрофизических характеристик p-i-n структуры. *Ключевые слова:* p-i-n структуры, фотоприемники, моделирование.

**SIMULATION OF THE P-I-N STRUCTURE
OF A SEMICONDUCTOR PHOTOVOLTAIC
IN THE AFORS-HET SOFTWARE ENVIRONMENT**

N.V. Lobanov, N.V. Vishnyakov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russian Federation, nik22122002@gmail.com*

Abstract. This paper examines the capabilities of numerical modeling of semiconductor photodetector structures in the AFORS-HET software environment. The electrophysical characteristics of the p-i-n structure are calculated.

Keywords: p-i-n structures, photodetectors, simulation.

Введение

Для изучения характеристик полупроводниковых структур, которые подразумевают применение их для солнечных элементов и других устройств, помимо экспериментальных методов используют методы компьютерного моделирования с помощью специализированного программного обеспечения (ПО). Такое ПО экономит время при проектировании различных устройств без затрат на проведение эмпирических проб. Задавая параметры материала каждого слоя в структуре, можно рассчитать основные электрофизические и электрооптические характеристики разрабатываемых структур. Адекватность математического описания физических процессов, в частности, в полупроводниковых структурах на основе кристаллических и неупорядоченных полупроводников обеспечивает исследователя достоверными прогнозными данными.

В данной работе используется специализированное ПО Automation For Simulation of Heterostructures (AFORS-HET). Оно разрабатывалось исключительно для моделирования характеристик солнечных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) всех возможных типов, включая гетероструктуры на основе аморфного гидрированного ($a\text{-Si:H}$) и кристаллического кремния ($c\text{-Si}$), поэтому в ней удобно задавать параметры структуры ФЭП и анализировать результаты [1].

Возможности ПО AFORS-HET

ПО позволяет моделировать многослойные солнечные элементы с гомо- или гетеропереходами, а также типичные методы характеристики в одномерном пространстве. Программа учитывает рекомбинацию через дефекты в полупроводниковых слоях, генерационные, квантовые (туннелирование) процессы. Также предусмотрено изменение концентрации легирующей примеси, положения энергетических зон относительно уровня вакуума.

Программная среда AFORS-HET позволяет получать основные характеристики и параметры, такие как: зонные диаграммы и энергетические характеристики; вольт-амперные характеристики (ВАХ); вольт-фарадные характеристики (ВФХ); температурные, частотные и световые зависимости ВАХ и ВФХ; ток короткого замыкания; напряжение холостого хода; коэффициент заполнения ВАХ; квантовая эффективность фотоприемника и др. На рисунке 1 представлен интерфейс лицевой панели программы AFORS-HET.

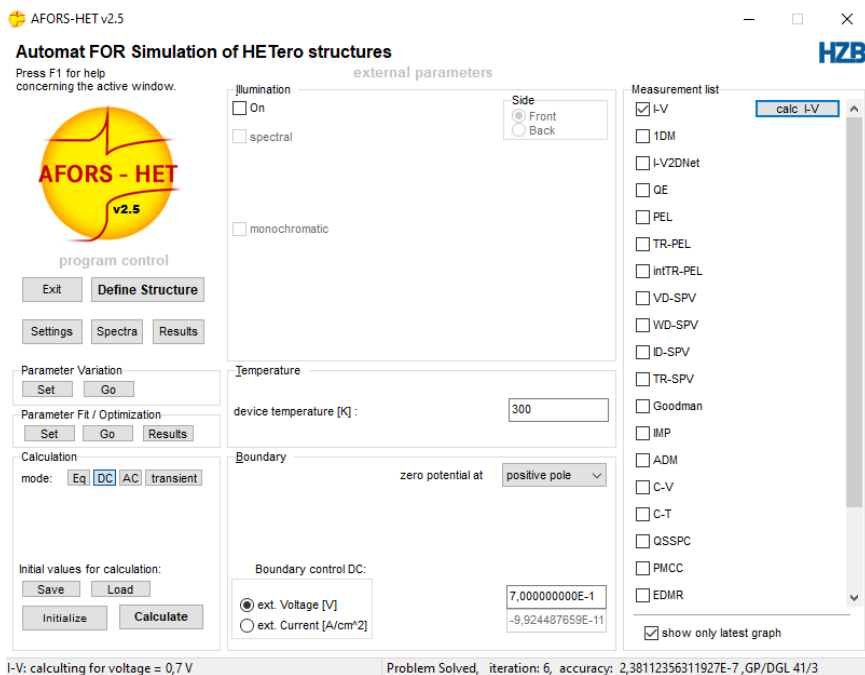


Рис. 1. Интерфейс лицевой панели программы AFORS-HET
(справа представлен перечень моделируемых зависимостей)

В качестве примера создания структуры для моделирования в программной среде AFORS-HET, была взята р-і-п структура, окно для задания слоев структуры представлено на рисунке 2 и 3. Параметры материала каждого слоя представлены в таблице 1.

Layer 2

name:

bulk model: thickness [cm]:

electrical properties

functional dependence:

dk [-]:	11.9
chi [eV]:	4.05
Eg [eV]:	1.124
Eg opt. [eV]:	1.124
Nc [cm ⁻³]:	2.846E19
Nv [cm ⁻³]:	2.685E19
un [cm ² /Vs]:	1107
up [cm ² /Vs]:	424.6
Na [cm ⁻³]:	0
Nd [cm ⁻³]:	0
ve [cm/s]:	1E07
vh [cm/s]:	1E07
rho [g*cm ⁻³]:	2.328
rae [cm ⁶ /s]:	0
rah [cm ⁶ /s]:	0
rbb [cm ³ /s]:	0

FTM on ☐ F0 [V/cm]

optical properties

☒ nk-File cSink

☐ constant nk:

$\alpha = 4 * \pi * k / \lambda$

☐ incoherent

defect properties

no defects

layer properties

Taun s Lp cm

Taup s Ln cm

Рис.2. Окно для создания слоев полупроводниковой структуры.

Defect 1

name: Defect 1

Type
☒ Single
☐ Continous
☐ Gauss
☐ CorGauss
☐ ValenceTail
☐ CondcTail
☐ RadioButton1
☒ Distribution
☐ const
☐ linear
☐ exp

Charge
☒ Acceptor
☐ Donor
☐ Neutral
☐ DanglingBond
Hurkx rec. model
☒ off
☐ Hurkx homo
☐ Hurkx hetero
☐ Hurkx hetero num.
m*: 0,25

electronic capture
cn: 1E-14 cm²
cp: 1E-14 cm²
optic capture
cno: 0 cm²
cpo: 0 cm²

Ntr (total): 1,0000000E+14 cm⁻³
Ntr(specific): 1,0000000E+14 cm⁻³/eV
 = Ntr(total)
E: 0,561247 eV
Sigma: 1E-15 eV

secondary parameters
Tau n [s]: 1E-7
Tau p [s]: 1E-7
L n [cm]: 0,001691691277
L p [cm]: 0,001047700845
implied Voc @ G=41mA [V]:
 implVoc

Settings for computational accuracy
☒ Defect distributions: integration over full band gap
 0,01 Hurkx model: accuracy of numerical integration
 1 Hurkx model: min E. field

OK Cancel

Рис. 3. Окно для добавление деффектов в слой.

Таблица 1. Параметры материалов исследуемой полупроводниковой структуры

Параметры материала	Si-n	Si-p	Si-i
Ширина зоны Eg, эВ	1,124	1,124	1,124
Концентрация донорной примеси ND, см ⁻³	1·10 ¹⁹	-	-
Концентрация акцепторной примеси NA, см ⁻³	-	1·10 ¹⁹	-
Сродство к электрону χ, эВ	4,05	4,05	4,05
Толщина слоя d, см	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻³

В окне (рис. 3) предусмотрена возможность вводить дефекты в выбранных слоях, можно моделировать заряд, сечение захвата фотогенерированных носителей заряда и время жизни носителей заряда, которые позволяют управлять процессами рекомбинации и генерации, благодаря изменению плотности рекомбинационных ловушек.

Используя параметры слоев р-і-п- структуры (таблица 1), была рассчитана вольт-амперная характеристика (рис. 4), квантовая эффективность и спектральный отклик (рис. 5) данной структуры.

При построении ВАХ можно задать диапазон напряжения и количество шагов с возможностью автоматического определения шага изменения параметра.

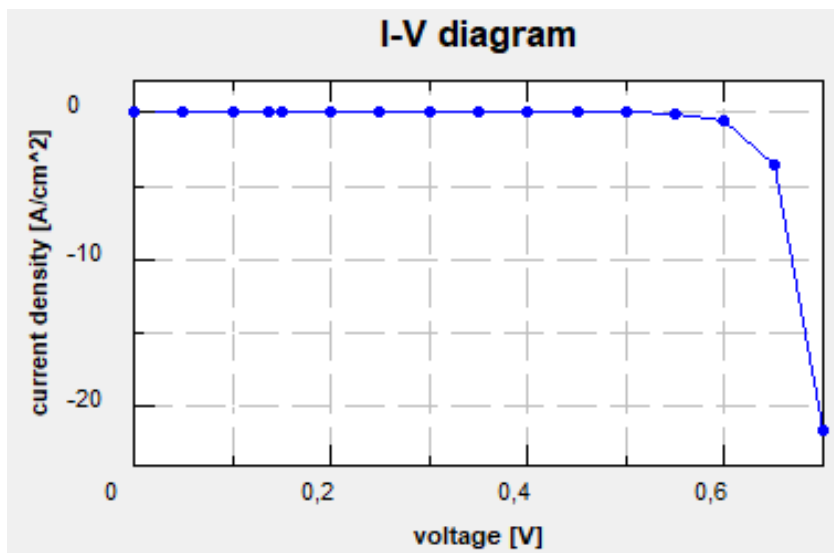


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика р-і-п структуры.

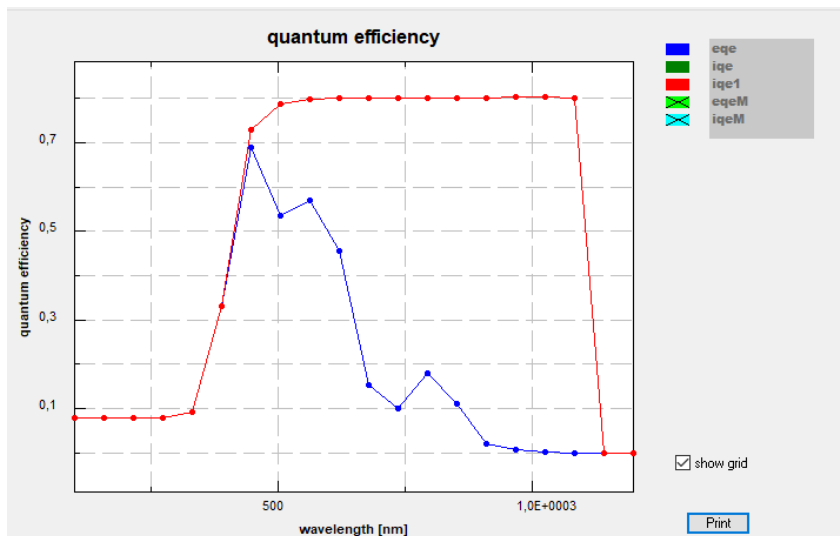


Рис. 5. Квантовая эффективность (красный цвет) и спектральный отклик (синий цвет).

Выводы

В результате анализа возможностей моделирования многослойных полупроводниковых структур для фотоэлектрических преобразователей в программной среде AFORS-HET удалось провести моделирование характеристик кремниевой р-і-п- структуры, в которую были введены рекомбинационные дефекты. Эти результаты позволят в дальнейшем проводить моделирование структур кремниевых гетероструктурных ФЭП с радиационными дефектами, создающими центры рекомбинации и снижающими эффективность и срок эксплуатации ФЭП в условиях радиационной нагрузки на низкой околоземной орбите.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

1. Wilfried G. J. H. M. van Sark, Lars Korte, Francesco Roca. Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 602 pp.

УДК 621.391; ГРНТИ 47.39.29

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ ГИБРИДНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ЛУЧА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CDL-МОДЕЛЕЙ

В.С. Чернов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, Chernov.v.713@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается моделирование гибридных формирователей луча для систем беспроводной связи 5G с использованием стандартизированных каналов типа CDL (Clustered Delay Line). Представлена полная модель передачи сигнала, включающая гибридное формирование луча, а также оценку качества приёма на основе метрики EVM. Проведено сравнение трёх конфигураций гибридных архитектур — стандартной, оптимизированной и максимальной — различающихся числом радиочастотных трактов и типом модели канала.

Ключевые слова: MIMO, гибридное формирование луча, линия задержки по кластерам, вектор ошибки.

INVESTIGATION OF HYBRID-BEAMFORMER CONFIGURATIONS USING CDL-MODELS

V.S. Chernov

*Ryazan State Radio Engineering University,
named after V. F. Utkin
Ryazan, Chernov.v.713@yandex.ru*

Abstract. The following paper examines the modeling of hybrid beamformers for 5G wireless communication systems using standardized Clustered Delay Line (CDL) channel models. A transmission model is presented, incorporating hybrid beamforming, as well as reception quality evaluation based on the EVM metric. A comparison is carried out for three hybrid beamforming configurations—standard, optimized, and maximal—which differ in the number of RF chains and the selected channel model.

Keywords: MIMO, beamforming, cluster delay line, error vector.

Введение

Современные беспроводные системы связи пятого поколения (5G) предъявляют повышенные требования к пропускной способности, устойчивости соединения и эффективности использования спектра. Для достижения высоких скоростей передачи данных и обеспечения на-

дёжного приёма в условиях многолучевого распространения особую роль играют методы пространственной обработки сигналов, основанные на использовании многоантенных систем (MIMO) и формировании направленных лучей (beamforming) [1, 2].

Гибридное формирование луча

Формирование луча — это метод пространственной обработки сигналов, который позволяет направить максимальное усиление антенны в сторону целевого источника сигнала [1]. Полностью цифровые методы формирования луча предусматривают наличие одной радиочастотной (RF) цепи для каждого антенного элемента. Такая архитектура создаёт проблемы с точки зрения энергопотребления, стоимости и аппаратной сложности, особенно на миллиметровых частотах. Гибридное формирование луча объединяет аналоговую и цифровую обработку, чтобы оптимизировать характеристики системы при одновременном сокращении числа RF-цепей, потребляемой мощности и аппаратных требований [3]. Такой подход обеспечивает гибкое управление лучами и пространственное мультиплексирование, при котором несколько потоков данных передаются одновременно. В данном примере показано, как сочетать цифровые и аналоговые методы формирования луча при передаче PDSCH в стандарте 5G NR.

Существует два широко рассматриваемых варианта архитектуры: полностью соединённая и частично соединённая. В полностью соединённой архитектуре каждая RF-цепь подключена ко всем элементам антенной решётки. В частично соединённой архитектуре каждая RF-цепь подключена только к подмножеству антенных элементов [3 – 5]. В данном примере демонстрируется частично соединённая архитектура с использованием фиксированных прямоугольных подрешёток одинакового размера.

Экспериментальные исследования

Рассмотрим модель гибридного формирования луча. Она включает в себя полную цепочку обработки сигнала: генерацию случайных данных, QAM-модуляцию, разделение потоков через цифровой прекодер и их преобразование для излучения массивом антенн через аналоговый формирователь луча. Для моделирования реалистичных условий распространения сигнала используется стандартизированная 3GPP модель канала CDL, которая генерирует многолучевое затухание с заданными углами прихода, задержками и эффектом Доплера.

На приёмной стороне сигнал проходит обратную обработку: аналоговое и цифровое комбинирование с последующей демодуляцией. Основной количественной метрикой для оценки эффективности всей системы является EVM (Error Vector Magnitude — величина вектора ошибки), которая вычисляется путём сравнения переданных и принятых символов.

Полезный сигнал x :

$$x = [x_1 x_2 \dots x_n \dots x_N], \quad x_n = A_n e^{i\Phi_n}, \quad n = 1 \dots N$$

где:

A — амплитуда сигнала;

Φ — фаза сигнала;

N — количество временных выборок.

Этот сигнал поступает на несколько элементов антенной решётки, и вектор направления для целевого сигнала θ :

$$v(\theta) = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i2\pi d \sin(\theta)} \\ e^{i4\pi d \sin(\theta)} \\ \vdots \\ e^{i4\pi d \sin(\theta)} \end{pmatrix},$$

где:

M — количество элементов в антенной решётке;

d — расстояние между элементами решётки;

θ — угол прихода сигнала (помехи).

На сигнал и помеху воздействует аддитивный белый гауссовский шум. Таким образом итоговый принимаемый сигнал:

$$S = xv + n.$$

Вектор ошибки:

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N |S_k - \hat{S}_k|^2}{\sum_{k=1}^N |\hat{S}_k|^2}},$$

где сигнал прошедший MMSE эквализацию [6]:

$$\hat{S}_k = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1} H^H.$$

Рассмотрим несколько конфигураций данной модели.

1. Стандартная конфигурация:

- Количество передающих антенн: 64;
- Количество приемных антенн: 4;
- Количество радиочастотных цепей: 8;
- Модель канала CDL-D;
- 2. Оптимизированная конфигурация:
 - Количество передающих антенн: 64;
 - Количество приемных антенн: 4;
 - Количество радиочастотных цепей: 16;
 - Модель канала CDL-C;
- 3. Максимальная конфигурация:
 - Количество передающих антенн: 64;
 - Количество приемных антенн: 4;
 - Количество радиочастотных цепей: 64;
 - Модель канала CDL-C;

Радиочастотные цепи, из которых составлены антенные решётки конфигураций проиллюстрированы на рис.1. Решётка разделена на подгруппы антенн по несколько штук для каждой поляризации. Для каждой группы выделен один радиочастотный тракт.

Для стандартной конфигурации применяется модель канала связи CDL-D. Часто используется в больших городских макросотах с сильным многолучевым распространением. Для оптимизированной и максимальной выбрана модель CDL-C, подходящая для закрытой городской среды и малых ячеек. Обе модели являются моделями не прямой видимости (NLOS)

На рис.2 изображен результат обработки сигнала в виде созвездия. Среднее EVM данной конфигурации 5.58 %.

Антенная решётка и созвездие оптимизированной конфигурации изображены на рисунке 3. Среднее EVM этой конфигурации 3.07 %.

Антенная решётка и созвездие максимальной конфигурации изображены на рисунке 4. Среднее EVM такой конфигурации 2.31 %. Оно лучше, чем в оптимизированной, но затраты на аппаратную часть возрастают в 4 раза.

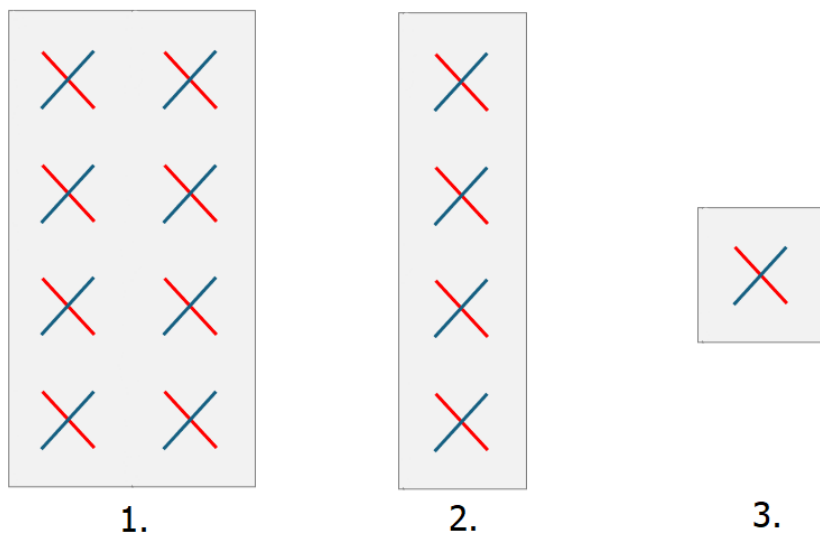


Рис. 1. Радиочастотные цепи конфигураций

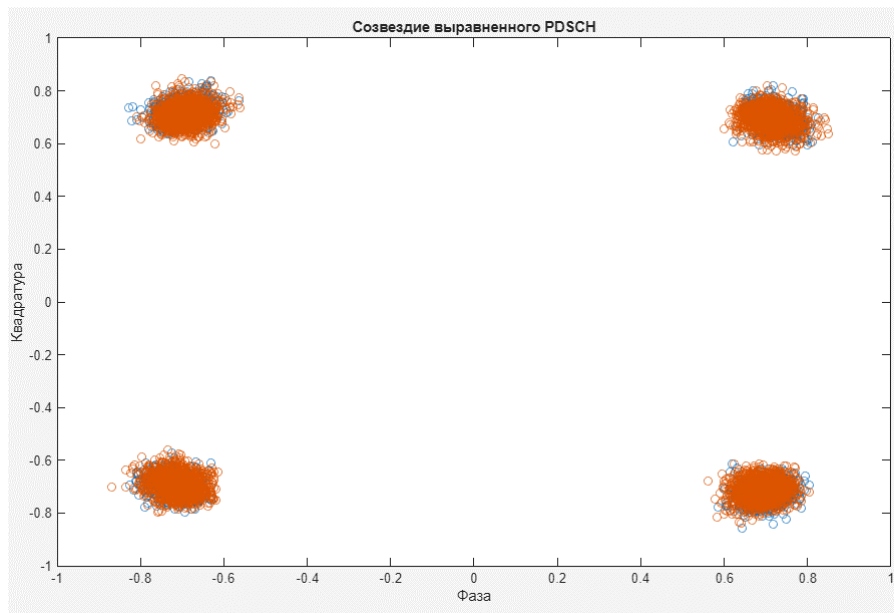


Рис. 2. Созвездие стандартной конфигурации

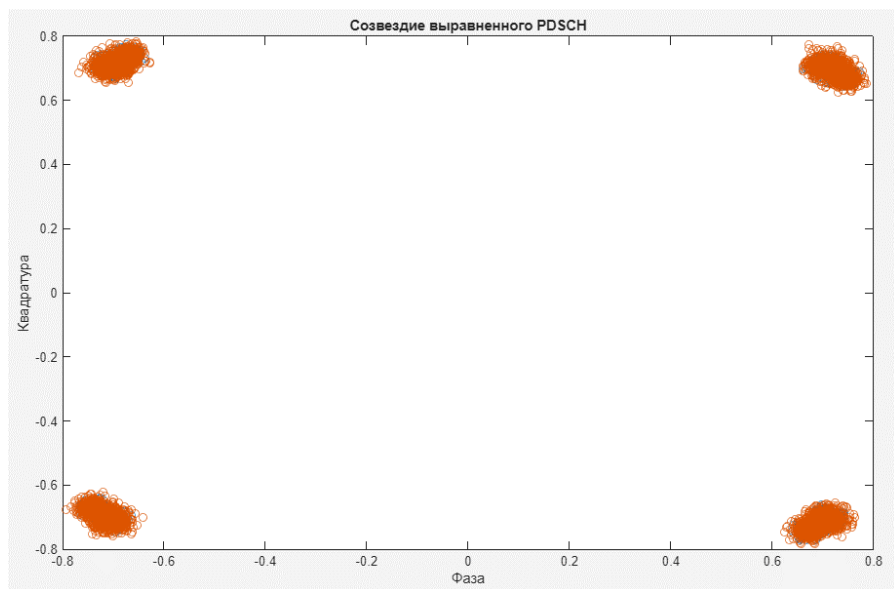


Рис. 3. Созвездие оптимизированной конфигурации

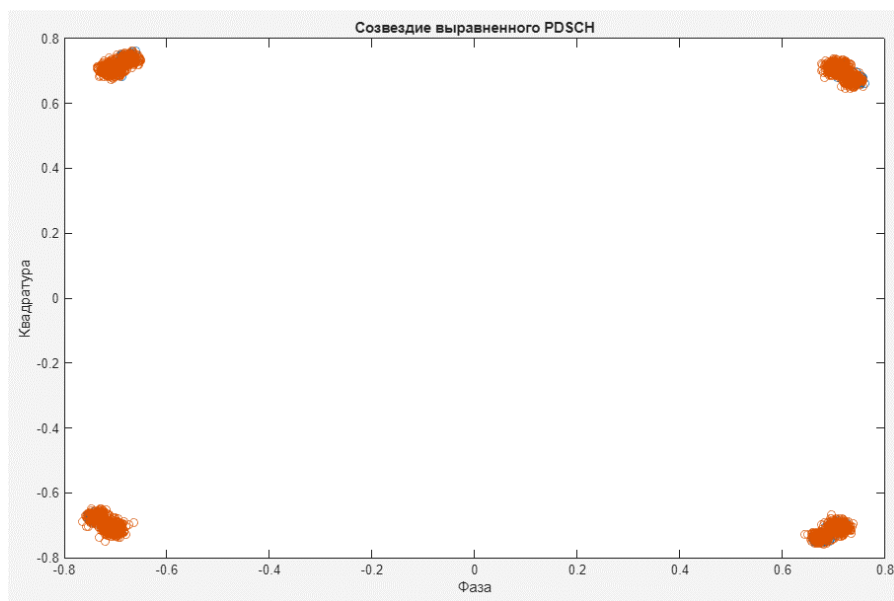


Рис. 4. Созвездие максимальной конфигурации

Выводы

В работе проведено исследование различных конфигураций гибридных формирователей луча на основе стандартизированных CDL-моделей канала для систем 5G.

Сравнение трёх конфигураций показало, что переход от стандартной архитектуры к оптимизированной приводит к заметному снижению величины EVM, что связано с увеличением числа RF-цепей и использованием более благоприятного канального профиля. Однако дальнейшее усложнение системы обеспечивает лишь незначительное улучшение EVM по сравнению с оптимизированной, при этом требуя многократного увеличения аппаратных ресурсов.

Таким образом, наиболее рациональным с точки зрения баланса между качеством передачи и аппаратной сложностью является использование оптимизированной конфигурации. Она обеспечивает существенное повышение качества приёма по сравнению со стандартной схемой, при этом не требует тех значительных ресурсных затрат, которые характерны для максимального варианта. Полученные результаты подтверждают практическую целесообразность применения оптимальной гибридной архитектуры.

Библиографический список

1. Gerhard Wunder, "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice" – IEEE IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 35, NO. 6, JUNE 2017.
2. Bakulin M. G., Varukina L. A., Kreindelin V. B. "MIMO technology: principles and algorithms" – М.: Goryachaya Liniya – Telecom, 2014. – 244 p., ill.
3. F. Sofrabi and W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays," IEEE J. Sel. Topics Signal Process. , vol. 10, no. 3, pp. 501-513, Apr. 2016.
4. J. Lee and Y. Lee, "AF relaying for millimeter wave communication systems with hybrid RF/baseband MIMO processing," in Proc. IEEE ICC'2014, Sydney, NSW, Australia, pp. 5838-5842, Jun. 2014.
5. S. Han, C.-L. I, Z. Xu, and C. Rowell, "Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 1, pp. 186–194, Jan. 2015.
6. D. H. N. Nguyen, L. B. Le, T. Le-Ngoc, and R. W. Heath, "Hybrid MMSE precoding and combining designs for mmWave multiuser systems," IEEE Access, vol. 5, pp. 19167-19181, Sept. 2017.

УДК 621.396.96; ГРНТИ 27.47.19

ПОДГОТОВКА РАДАРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕЛЕЙ

Ж.Ж. Асан*Казахский Национальный университет им. аль-Фараби
Казахстан, Алматы, zh.assanova98@gmail.com*

Аннотация. В данной исследовательской работе рассматривается процесс выделения образов целей из буфера первичных радиолокационных данных, необходимых для обучения нейронной сети обнаружению воздушных целей. В качестве исходных данных были использованы двумерные буферы амплитуд радиолокационных отражений в формате азимут-дальность, а также текстовой файл в котором указаны координаты азимута и дальности обнаружения целей радиолокатором. Предложен алгоритм который по азимуту и расстоянию находит и выделяет образы целей размером 63×3 , а также создана программа для поиска этих же целей в начальном буфере. Описана утилита для автоматизации процесса поиска. Как показали экспериментальные результаты, предложенный метод позволяет находить совпадения с коэффициентом корреляции выше 0,7. Полученные образы целей можно использовать при обучении искусственных нейронных сетей для обнаружения воздушных объектов.

Ключевые слова: корреляционный анализ, радарные системы, библиотека целей, нейронные сети.

PREPARATION OF RADAR DATA FOR TRAINING AND OPTIMIZATION OF NEURAL NETWORKS IN TARGET LOCALIZATION AND IDENTIFICATION TASKS

Zh.ZH. Assan*Al Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan, zh.assanova98@gmail.com*

Abstract. In this research work, the process of extracting target images from a buffer of primary radar data is examined. These images are required for training a neural network to detect aerial targets. The initial data consisted of two-dimensional buffers of radar reflection amplitudes in the azimuth-range format, as well as a text file containing the azimuth and range coordinates of targets detected by the radar. An algorithm is proposed that, based on azimuth and distance, identifies and extracts target images of size 63×3 , and a program was created to search for these same targets in the original buffer. A utili-

ty for automating the search process is also described. As the experimental results have shown, the proposed method makes it possible to find matches with a correlation coefficient above 0.7. The extracted target images can be used to train artificial neural networks for the detection of aerial objects.

Keywords: correlation analysis, radar systems, target library, neural networks.

Введение

В настоящее время радарные системы широко применяются в самых разных областях: гражданской авиации, транспортной логистике, космических исследованиях, медицине и метеорологии. При этом изначально они использовались преимущественно в военных целях — для обнаружения самолётов и ракет [1, 2]. Появление беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) потребовала адаптации имеющихся радиолокационных станций (РЛС) для их обнаружения или разработки специализированных радаров.

Главным преимуществом радиолокационных установок является их независимость от погодных условий и освещённости, а также способность обнаруживать объекты на значительном расстоянии. Современные радары способны не только определять местоположение цели по азимуту и дальности, но и вычислять её скорость, траекторию движения и некоторые внешние параметры устройства [3]. Для эффективного использования получаемых данных требуются высокоточные методы обработки сигналов, что, в свою очередь, предполагает проведение комплексного анализа радиолокационной информации.

К числу традиционных методов обработки радарных сигналов относятся спектральный анализ, автокорреляция и кросс-корреляция [4, 5]. Эти подходы позволяют оценивать степень сходства сигналов, что особенно важно при идентификации объектов. Метод кросс-корреляции проявляет наибольшую эффективность при использовании библиотек целей, поскольку он сопоставляет текущий сигнал с ранее сохранёнными эталонными образцами [6]. Не менее значимыми являются методы фильтрации, снижения шумов, а также временного и частотного анализа [7], которые повышают точность системы за счёт устранения фоновых искажений.

Для достижения заданных вероятностей правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги в обнаружителях современных локаторов требуется соотношение сигнал/шум около 10 дБ, в то время, как

человек мог обнаруживать цели при соотношении сигнал/шум около 1 дБ [8].

Развитие методов машинного обучения и искусственного интеллекта дало мощный импульс совершенствованию радарных технологий. Особенно эффективными оказались нейронные сети, способные распознавать сложные сигналы [9]. Так, в работе [10] показано, что для повышения точности определения координат (локализации) радиолокационных целей после адаптивного обнаружения, можно использовать свёрточную нейронную сеть, обученную на данных, сгенерированных с помощью инструмента моделирования RFView. В исследовании [11] был представлен метод на основе глубинного обучения для обнаружения и классификации двух типов объектов — БПЛА и птиц. Авторы отмечают, что основная сложность заключается в высокой степени схожести физических и поведенческих характеристик этих объектов. Предложенный ими подход позволил достичь вероятности правильного обнаружения 83%, что превосходит результаты существующих систем. В перспективе подобные методы могут играть ключевую роль в обеспечении безопасности воздушного пространства.

Для повышения эффективности анализа радарных данных требуется формирование библиотеки целей, представляющей собой набор радиолокационных данных с образами целей. Наличие такой библиотеки позволяет осуществлять поиск схожих целей в других, ранее не размеченных данных. Это значительно упрощает этап обучения нейронных сетей и их последующего самообучения.

В рамках настоящего исследования из радарных данных, представляющий двумерный массив амплитуд сигналов (азимут, дальность) были собраны образы целей, после чего с использованием корреляционного анализа выполнялся поиск тех же целей в исходных буферах. Основная задача работы заключалась в оптимизации процесса выделения образов целей, и подготовки библиотеки радиолокационных образцов для обучения искусственных нейронных сетей.

Методология

1. Предварительная обработка и подготовка радарных данных

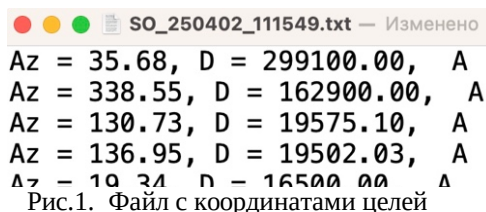
Решение задачи обнаружения объектов можно разделить на следующие этапы:

1. генерация признаков – выбор тех признаков, которые описывают объект;
2. отбор признаков – отбор наиболее информативных признаков для классификации;
3. разработка классификатора – выбор решающего правила, по которому на основании вектора признаков осуществляется отнесение объекта к тому или иному классу;
4. оценка качества классификации.

В ходе исследования использовались радиолокационные буферы в формате «*.dat», которые хранят такую информацию как: амплитуды отраженных сигналов, для каждого элемента разрешения по азимуту и дальности. Таким образом, файлы «*.dat» - это внутренняя карта радиолокатора. Каждый буфер имеет дополнительный файл в формате «*.txt», в котором хранятся координаты обнаруженных целей. Параметры записанные в текстовом файле содержат:

- азимутальные углы целей;
- расстояния до целей.

На рисунке 1 приведён пример текстового файла, в котором азимут записан в градусах, а расстояние в метрах.



SO_250402_111549.txt — Изменено

```
Az = 35.68, D = 299100.00, A  
Az = 338.55, D = 162900.00, A  
Az = 130.73, D = 19575.10, A  
Az = 136.95, D = 19502.03, A  
Az = 10.31, D = 16500.00, A
```

Рис.1. Файл с координатами целей

На рисунке 2 приведена блок-схема процесса выделения образов целей из буфера. Исходный буфер в формате «*.dat» преобразуется с помощью информации, приведённой в файле формата «*.txt». Далее, используя координаты целей, находятся места объектов в первичном буфере. Вырезается окно размером 63х3. Размер 63 определён шириной диаграммы направленности антенны по азимуту, а размер 3 – зависит от длительности зондирующего импульса. Все образы целей и их графики записываются в папку /aims.

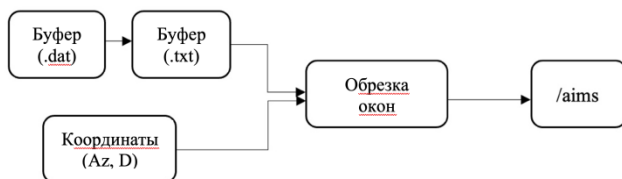


Рис. 2. Процесс выделения образов целей

2. Алгоритм выделения образов целей

Входные данные:

- .dat – радиолокационный буфер (2D матрица). Размер буфера - 2048×1200 : 2048 строк (азимут), 1200 столбцов (дистанция);
- .txt – координаты целей относящиеся к соответствующему буферу.

Параметры окон:

- Шаг по дальности:

$$\Delta R = \frac{R_{max}}{rows} \quad (1)$$

$$R_{max} = 360000 \text{ m};$$

$$\Delta R = \frac{360000}{1200} = 300 \text{ m};$$

$$\Delta R = 300 \text{ m};$$

- Шаг по азимуту:

$$\Delta Az = \frac{360^\circ}{2048} = 0,176^\circ;$$

- Соответствие «индекс–физика»:

$$i^0 = \text{round}\left(\frac{D}{\Delta R}\right); \quad (2)$$

$$j^0 = \text{round}\left(\frac{Az}{\Delta Az}\right), \quad (3)$$

где i^0 - строка, j^0 - столбец.

Пример преобразования координат в индексы представлен ниже:

Координаты: $Az = 35.68^\circ$, $D = 299100 \text{ м}$,

$$j^0 = \text{round}\left(\frac{35.68}{0.176}\right) = 203; \quad i^0 = \text{round}\left(\frac{299100}{300}\right) = 997.$$

3. Локальный поиск и нахождение максимума

Во время поиска цели, её координаты могут не соответствовать координатам максимального сигнала (пика), поэтому сначала произво-

дится предварительный поиск максимума сигнала, что дает возможность нахождения самой большой амплитуды:

Окно поиска: по строкам ± 2 шага (то есть $i \in [i^0 - 2, i^0 + 2]$), по столбцам ± 32 шага (то есть $j \in [j^0 - 32, j^0 + 32]$); Критерий поиска: амплитудный $\arg\max$ — берётся точка, где внутри окна наблюдается максимальное значение.

После нахождения пика, вырезается образ необходимого размера. Размер окна составляет 63×3 . Если пик находится близко к границе окна, индексы «поджимаются» (clamp) в пределах буфера. Таким образом для каждой координаты вырезается окно целей. Каждое окно целей сохраняется в текстовом формате как 3 строки и 64 столбца в папке «results/aims/...txt». Для диагностических целей в той же папке сохраняются графики вырезанных целей. Это дает возможность увидеть амплитуду и пики сигнала образов.

4. Корреляционный поиск целей

Для проверки правильности выделенных образов была реализована специальная утилита. Основная цель этой программы - поиск целей сохраненных в библиотеке целей из эталонного буфера. Данный этап необходим для дополнительной проверки корректности собранных образов и для проверки эффективности методов при поиске похожих, но не идентичных целей. Метод поиска основан расчете коэффициента нормированной кросс-корреляции. Для каждого возможного совпадения записывались данные как:

- координаты;
- максимальное значение корреляции;
- оценка совпадения ($\rho = 1.000$ идеальное совпадение, $\rho > 0.7$ примерное совпадение).

Экспериментальные исследования

В данном разделе представлены графики выделенных образов целей из основного буфера, а также сравнительные результаты эталонных целей с найденными целями.

На рисунке 3 показан пример образа, выделенного из радиолокационного буфера. Данный рисунок демонстрирует лишь одну цель. В дальнейшем для обучения искусственных нейронных сетей потребуется собрать большое количество данных целей.

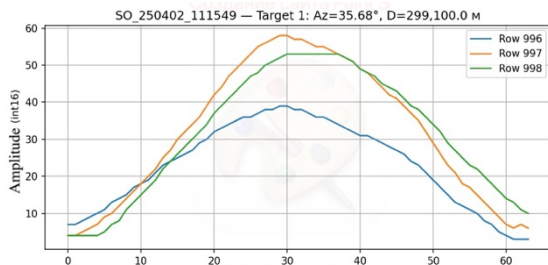


Рис. 3. Образ цели (2D-график)

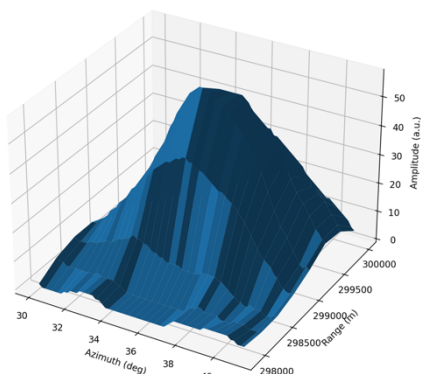


Рис. 4. Образ цели (3D-график)

На рисунке 4 приведён полный образ цели для представления полного радиолокационного изображения, не ограниченного окном 63×3 .

В таблице 1 приведены координаты, заданные вручную (по файлу оператора), и координаты, найденные в результате автоматического поиска. Различия не превышают погрешность измерений.

Таблица 1 – Сравнение исходных и найденных координат

№ цели	Az (заданный), °	D (заданная), м	Az (найденный), °	D (найденная), м
1	35.68	299100	35.70	299100
2	338.55	162900	338.55	162900
3	130.73	19575.10	130.74	19575.00
4	136.95	19502.03	136.96	19502.00
5	19.34	16500.00	19.34	16500.00

Выводы

В данной исследовательской работе был представлен алгоритм извлечения образцов целей из радиолокационных данных для их последующей повторной идентификации. Полученные результаты показывают, что координаты обнаруженных целей практически не отличаются от измерений радиолокационного оборудования. Это демонстрирует эффективность предложенного метода и подтверждает его способность точно выявлять аналогичные цели при повторных поисках.

Библиографический список

1. Zhou Y. et al. Review on millimeter-wave radar and camera fusion technology //Sustainability. 2022. Vol.14. No 9. pp. 5114.
2. Xiaolong C. et al. Radar intelligent processing technology and application for weak target. 2024. Vol.13. No 3. pp. 501-524.
3. Gharamohammadi A., Khajepour A., Shaker G. In-vehicle monitoring by radar: A review //IEEE Sensors Journal. 2023. Vol.23. No 21. pp. 25650-25672.
4. Galati G., Pavan G., Wasserzier C. Signal design and processing for noise radar //EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2022. No 1. pp. 52.
5. Gottinger M. et al. Coherent automotive radar networks: The next generation of radar-based imaging and mapping //IEEE Journal of Microwaves. 2021. Vol.1. No 1. pp. 149-163.
6. Bourdoux A., Bauduin M. PMCW waveform cross-correlation characterization and interference mitigation //2020 17th European Radar Conference (EuRAD). 2021. pp. 164-167.
7. Montlouis W. Deep Learning and the Modern Radar //Sensors & Transducers. 2024. Vol. 264. No 1. pp. 1-10.
8. Проценко В.А., Шкуро С.В., Чайко Е.В., Васильев И.В. Оптимизация градаций яркости при отображении радиолокационной информации // Радиотехнические и инфокоммуникационные технологии: актуальные проблемы и перспективы развития: Материалы Международной научно-практической конференции. - Алматы: Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, 2024. С. 27–33.
9. Galati G., Pavan G., Wasserzier C. Signal design and processing for noise radar //EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2022. No 1. pp. 52.
10. Venkatasubramanian S. et al. Data-driven target localization using adaptive radar processing and convolutional neural networks //IET Radar, Sonar & Navigation. 2024. Vol. 18. No 10. pp. 1638-1651.
11. Samadzadegan F. et al. Detection and recognition of drones based on a deep convolutional neural network using visible imagery //Aerospace. 2022. Vol. 9. No 1. pp. 31.

УДК 621.311.6; ГРНТИ 47.41.99

СВОЙСТВА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**А.Н. Крюков***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, kryukov.a.n@rsreu.ru*

Аннотация. Транзисторные выпрямители обладают большим током и меньшими искажениями за счёт формирователя управляющих импульсов. Получены временные диаграммы для ТЗ отечественного.

Ключевые слова: преобразователь напряжения, управляемый выпрямитель, временные диаграммы.

PROPERTIES OF CONTROLLED DIRECTORS**A.N. Kryukov***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, kryukov.a.n@rsreu.ru*

Abstract. Transistor rectifiers have a greater current and less distortion due to the control pulse shaper. Time diagrams for the domestic TZ are obtained.

Keywords: voltage converter, controlled rectifier, time diagrams.

Введение

Применение для выпрямления преобразованного напряжения диодов ограничивает выходной ток и вносит в него искажения переходных процессов, частота которых определяется ёмкостью диода, индуктивностями рассеяния и соединительных проводников [1]. Транзисторные выпрямители освобождаются от этих недостатков добавлением формирователя управляющих импульсов.

Из-за наличия паразитных емкостей затвор-исток и затвор-сток включение и выключение транзисторов ключа и выпрямителя происходит с задержкой, поэтому управляющие сигналы должны вырабатываться формирователем с опережением, и величина опережения не зависит от уровней входного напряжения и выходного тока [2]. Формирователь в момент переключения подает на затвор ток в несколько ампер и не должен допустить сквозных токов.

Измерение характеристик управляемого выпрямителя производилось на интегральной схеме (ИС) МР2307 [2], типовая схема включения которой приведена на рис. 1. Исток основного ключа выведен на вывод 3, сток — на вывод 1, исток выпрямителя на вывод 4, сток — на вывод 3. Входное напряжение изменялось от 5,9 до 15 В, нагрузкой

служила лампа накаливания 24 В 5 Вт, выходное напряжение менялось от 5,14 до 9,25 В.

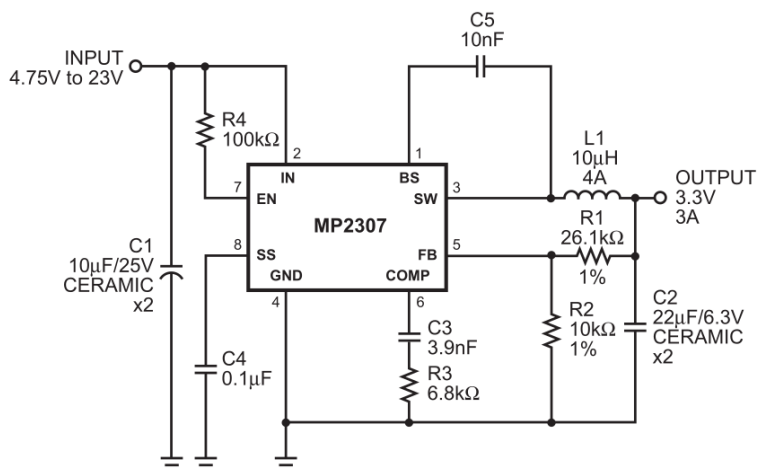


Рис. 1. Типовая схема включения понижающего преобразователя напряжения с управляемым транзисторным выпрямителем MP2307 [2].

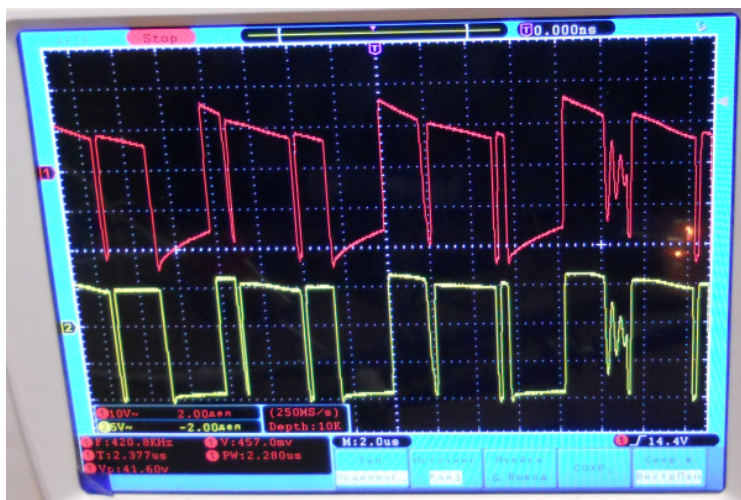


Рис. 2. Временные диаграммы работы понижающего преобразователя напряжения на ИС MP2307. Показано напряжение выпрямителя (вывода 1 BS, верхний график) и приложенное к дросселю (вывода 3 SW, нижний график)

При измерении регулятор выходного напряжения (на рис. 1 — R1, R2) был установлен в промежуточное положение. По мере заряда кон-

денсатора С5 напряжение на нём падает, ШИМ-контроллер пытается поддерживать выходное напряжение увеличением длительности открытого ключа. Если выпрямитель закрывается раньше, чем основной ключ, наблюдается переходный процесс, частота которого определяется индуктивностями рассеяния и емкостями ключей.

Выбросов напряжения («шпикелек») на нагрузке преобразователя не наблюдалось. Присутствовало близкое к синусоидальному напряжение менее 2 В с частотой преобразования - 460 кГц, для подавления достаточно увеличить ёмкость конденсатора С2.

Исследование характеристик модели управляемого выпрямителя производилось в программе Micro-CAP v.8 [3]. В модель S_BUCK_SIN.cir [4] с идеальными ШИМ-контроллером (X3) и формирователем управляющих импульсов (Dead Time For Synchro Rectification) для упрощения получения временных диаграмм были добавлены резисторы R5 - R7 0,01 Ом и конденсатор C3=1500 мкФ, изменена величина резистора обратной связи Rupper = 2 кОм. В качестве ключа X4 использован МТВ1306, номиналы остальных элементов подписаны на рисунке 3.

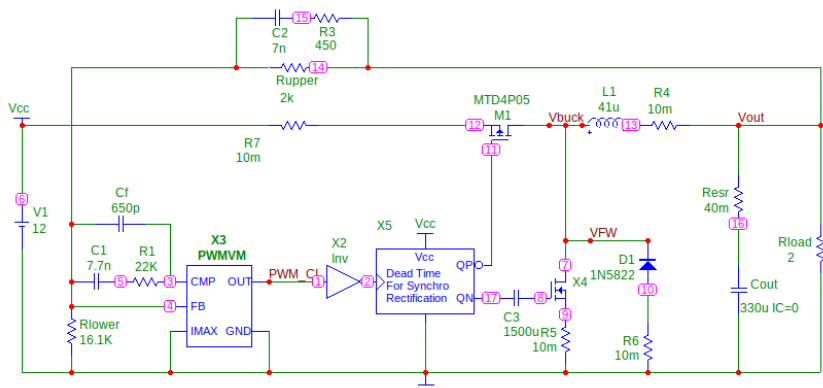


Рис. 3. Схема модели понижающего преобразователя напряжения с управляемым выпрямителем.

Формирователь (Dead Time For Synchro Rectification), получив сигнал от ШИМ-контроллера (см. рис. 4), сразу вырабатывает сигнал на закрытие ключа X4 выпрямителя, после чего с задержкой, чтобы выпрямитель успел закрыться, инвертированный сигнал на открытие ключа M1. Протекает ток от источника V1 через дроссель L1 и нагрузку Rload, дроссель L1 запасает энергию в форме магнитного поля. Импульс ШИМ-контроллера заканчивается, с задержкой от формиро-

вателя закрывается ключ M1 и с задержкой от формирователя на время закрытия ключа M1 открывается ключ X4 выпрямителя. Задержка должна быть небольшой, с тем, чтобы открытый ключ выпрямителя подавил колебательный процесс в индуктивности рассеяния и ёмкости ключа., что заметно на жёлтом графике. Через резистор R5 начинает протекать ток синхронного выпрямителя, источником которого служит энергия, запасенная дросселем L1 в форме магнитного поля.

По мере заряда конденсатора Cout уменьшается ширина импульсов ШИМ-контроллера и ток, протекающий через выпрямитель X4 I(R5). Также уменьшается и ток, потребляемый от источника питания I(R7).

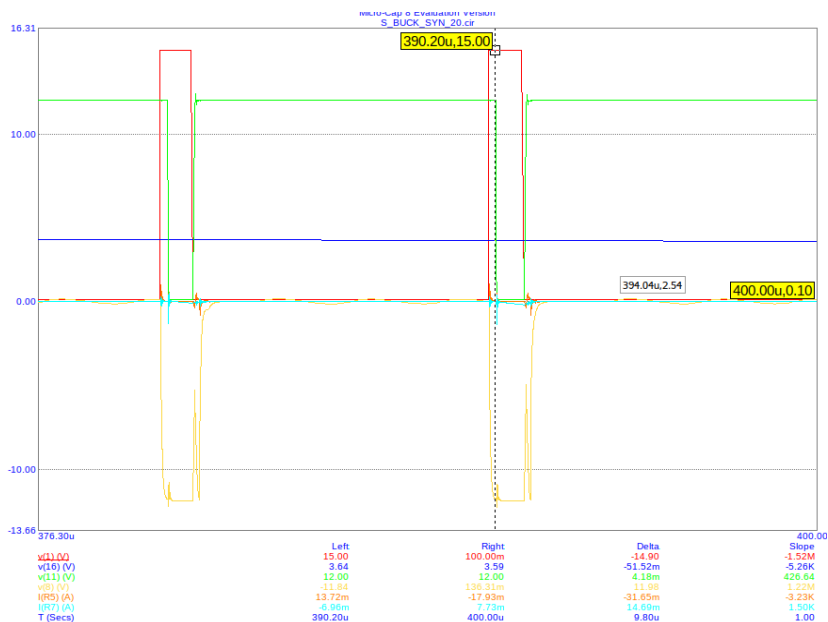


Рис. 4. Временные диаграммы работы модели понижающего преобразователя напряжения с управляемым выпрямителем. Здесь:

- v(1), В — импульсы ШИМ-контроллера (красный график),
- v(16), В — выходное напряжение (синий график),
- v(11), В — инверсное напряжение открытия ключа M1 (зелёный график),
- v(8), В — напряжение открытия выпрямителя X4 (жёлтый график),
- I(R5), А - ток синхронного выпрямителя (коричневый график),
- I(R7), А — потребляемый ток (голубой график)

Выводы

Подборкой задержек включения и выключения ключа синхронного выпрямителя можно ограничить величину напряжения, генерируемого индуктивностями рассеяния, минимизировать время проводимости внутреннего диода MOSFET выпрямителя и обеспечить оптимальный КПД преобразователя напряжения.

Корректно выбранная величина задержки позволяет избежать одновременного включения транзисторов M1 и X4 [5].

Увеличение сопротивления обратной связи Rupper, сопротивления нагрузки Rload ускоряет процесс заряда конденсатора Cout и достижение равновесного состояния схемой модели понижающего преобразователя напряжения и не оказывает влияния на временные соотношения сигналов. Ёмкость Cout=330 мкФ полностью подавляет синусоидальное напряжение с частотой преобразования.

Библиографический список

1. Сажнев, А. М. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств : учебник для вузов / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 204 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-11859-9. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/562948> (дата обращения 06.08.2025)
2. MP2307 3A, 23V 340 kHz Synchronous Rectified Step-Down Converter. www.MonolithicPower.com. MPS Proprietary Information. Unauthorized Photocopy and Duplication Prohibited. © 2008 MPS. All Rights Reserved.
3. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. - 617 с., ил.
4. Christophe P.Basso. Switch-Mode Power Supply Spice Cookbook. Copyright © 2001 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All right reserved. P/N 137510-4 part of ISBN 0-07-137509-0, 264 s.
5. В. Любимов. Синхронные выпрямители. «Электронные компоненты» 2018, № 9, с. 37-41.

УДК 332.132; ГРНТИ 49.39

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ПЕРВИЧНОГО КОДЕКА ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

К.Э. Лебедев, В.Т. Дмитриев

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, mr.kirill-lebedev@yandex.ru, vol77@rambler.ru*

Аннотация. В статье рассматривается разработка адаптивного первичного кодека для систем спутниковой связи, ориентированного на минимизацию задержки и эффективное использование канала связи. Особое внимание уделено анализу стандартов CELP, MELP и Codec2, их характеристикам, применению и возможным адаптациям для условий спутниковых систем связи.

Ключевые слова: адаптивный кодек, спутниковая связь, стандарты CELP, MELP, Codec2, задержка, эффективное использование канала, помехоустойчивость.

CHOICE OF PRIMARY CODING ALGORITHM FOR CELLULAR SYSTEMS

K.E Lebedev, V.T. Dmitriev

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, mr.kirill-lebedev@yandex.ru, vol77@rambler.ru*

Abstract. This article discusses the development of an adaptive primary codec for satellite communication systems, focused on minimizing delay and efficiently utilizing the communication channel. Special attention is given to the analysis of the CELP, MELP, and Codec2 standards, their characteristics, applications, and potential adaptations for satellite communication conditions. The advantages and disadvantages of each standard are examined, as well as their potential to ensure high resilience to interference, packet loss, and achieving the required speech quality characteristics at low bitrates.

Keywords: adaptive codec, satellite communication, standards CELP, MELP, Codec2, delay, efficient channel utilization, noise immunity.

Введение

Системы спутниковой связи играют важную роль в обеспечении глобальной связи, однако они сталкиваются с вызовами, такими как высокая задержка и ограниченная пропускная способность канала, что существенно влияет на качество передачи речи [1...4]. Для эффективной передачи речи через спутниковые каналы необходимы специали-

зированные кодеки, которые могут обеспечивать хороший компромисс между качеством речи и скоростью передачи данных [1, 2].

В современных системах первичного кодирования речевых сигналов широко применяются модификации алгоритма Хургина-Яковлева, в том числе с использованием трехканальной структуры, что позволяет улучшить качество передачи речи и снизить влияние акустических помех [2...6].

Одной из ключевых задач является обеспечение минимальной задержки, что критически важно для реального времени общения [4]. Также важно учитывать устойчивость к помехам и потере пакетов, что является обычным явлением в условиях спутниковых систем [3, 5, 7].

В данной работе рассматриваются три стандарта кодирования речи с низким битрейтом — CELP (Code Excited Linear Prediction), MELP (Mixed Excitation Linear Prediction) и Codec2. Важно отметить, что, несмотря на сходные цели, эти стандарты имеют различные подходы к кодированию речи, что влияет на их эффективность в различных условиях связи [6, 8, 9].

Обзор стандартов CELP, MELP и Codec2

Стандарт CELP (Code Excited Linear Prediction) представляет собой метод сжатия речевых сигналов, использующий технику линейного предсказания (LPC, Linear Predictive Coding) для моделирования спектральных характеристик речи. Основная идея метода заключается в том, что речь можно представить как линейную комбинацию предсказанных значений и случайных возбуждений, которые моделируют шумовую составляющую сигнала. В процессе кодирования речевого сигнала в CELP используется модель LPC для оценки коэффициентов предсказания, а также коды для возбуждения, которые минимизируют ошибку предсказания [2, 9, 10].

Стандарт CELP активно используется в сотовых и IP телефонии (например, в кодеке G.729) для кодирования речи с низким битрейтом. Также он применяется в различных спутниковых и военных системах связи, где требуется эффективная передача голосовой информации при ограниченной пропускной способности канала.

Преимущества стандарта CELP:

1) Высокая степень сжатия: CELP позволяет достичь эффективно-го сжатия при скорости передачи от 2400 до 4800 бит/с, обеспечивая достаточно высокое качество речи при низкой пропускной способности канала.

2) Комплексная устойчивость к потерям пакетов: В силу своей структуры, CELP демонстрирует высокую устойчивость к потерям пакетов, что делает его применимым для использования в системах с высокими требованиями к надежности.

Недостатки стандарта CELP:

1) Вычислительная сложность: для использования стандарта CELP требуется наличие достаточно мощных вычислительных ресурсов.

2) Искажения при низких битрейте.

MELP (Mixed Excitation Linear Prediction) представляет собой стандарт кодирования речи с низким битрейтом, разработанный в качестве усовершенствованной версии линейного предсказания речи (LPC). Основной принцип MELP заключается в использовании смешанного возбуждения, что позволяет значительно улучшить качество синтезированной речи по сравнению с традиционными LPC и CELP кодеками.

Кодирование в MELP осуществляется путем анализа речевого сигнала и разбиения его на кадры (размером 22,5 мс).

В процессе декодирования восстанавливается речевой сигнал с учетом полученных параметров, что позволяет синтезировать голос с высокой степенью разборчивости даже при низком битрейте.

Преимущества стандарта MELP:

1) Высокая устойчивость к шуму и помехам – благодаря использованию многополосного смешанного возбуждения, кодек сохраняет разборчивость речи даже в условиях значительных помех.

2) Эффективность при низких битрейте – MELP позволяет передавать речь со скоростью 1200–2400 бит/с при приемлемом качестве звука.

3) Адаптивность к изменяющимся условиям канала – алгоритмы спектрального усиления позволяют компенсировать искажения в канале связи.

Недостатки стандарта MELP:

1) Высокая вычислительная сложность – в отличие от CELP, MELP требует больше вычислительных ресурсов, особенно на этапе декодирования.

2) Задержки при обработке речи – из-за сложных алгоритмов кодирования задержка передачи речи может быть выше, чем у традиционных LPC кодеков.

Codec2 — это стандарт низкоскоростного кодирования речи, разработанный для приложений, требующих минимальной скорости передачи данных при приемлемом качестве речи.

Основу Codec2 составляет гармоническое синусоидальное кодирование речи, которое позволяет эффективно сжимать речевой сигнал за счет представления его в виде набора гармонических составляющих. В этом методе модель сигнала строится на основе параметров, таких как частота основного тона (F_0), амплитуды гармоник и фаза, что позволяет передавать речь в очень узком частотном диапазоне. Кодирование речи в Codec2 выполняется в несколько этапов [5...9]:

- 1) Фреймирование – исходный речевой сигнал разбивается на кадры длиной от 10 до 30 мс.

- 2) Анализ спектра – выделяются гармонические составляющие, включая частоту основного тона и амплитуды.

- 3) Квантование параметров – параметры спектра кодируются и сжимаются для минимизации объема передаваемых данных.

- 4) Формирование битового потока – сжатые параметры объединяются в поток данных для передачи через канал связи.

На приемной стороне осуществляется обратный процесс декодирования, включающий реконструкцию речевого сигнала из полученных спектральных параметров. Поскольку информация о спектре передается с высокой точностью, качество синтезированной речи остается достаточно высоким даже при низком битрейте.

Преимущества стандарта Codec2:

- 1) Сверхнизкий битрейт – поддерживает скорости от 700 до 3200 бит/с, что делает его одним из самых эффективных кодеков по сжатию речи.

- 2) Минимальная вычислительная сложность – требует значительно меньше вычислительных ресурсов по сравнению с CELP и MELP.

Недостатки стандарта Codec2:

- 1) Ограниченное качество речи – при битрейте ниже 1200 бит/с качество синтезированной речи заметно ухудшается, что может быть критичным для некоторых приложений.

- 2) Меньшая естественность голоса – в отличие от CELP и MELP.

Выводы

Разработка адаптивного первичного кодека для спутниковых систем связи требует комплексного подхода, включающего оптимизацию временной задержки, эффективное использование канала связи и обеспечение высокой помехоустойчивости. В условиях спутниковых каналов, характеризующихся высокой задержкой распространения сигнала, ограниченной пропускной способностью и возможностью потерь пакетов, важно выбрать кодек, который способен динамически адаптироваться к изменяющимся условиям связи.

Анализ стандартов CELP, MELP и Codec2 показал, что каждый из них имеет свои преимущества и ограничения:

1) CELP обеспечивает высокое качество речи при умеренном битрейте, но требует значительных вычислительных ресурсов.

2) MELP демонстрирует лучшие характеристики устойчивости к шуму и потерям пакетов, но его сложные алгоритмы увеличивают задержку.

3) Codec2 является наиболее легковесным кодеком, оптимизированным для работы в каналах с ограниченной пропускной способностью, но его качество речи при экстремально низком битрейте ниже.

Библиографический список

1. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Д.Е. Крысяев, С.С. Попов Исследование качества передаваемой речевой информации при различном сочетании алгоритмов кодирования источника и канала связи в условиях действия помех. Вестник РГРТУ 2008 № 1 (Выпуск 23). С. 53-56.

2. В.Т. Дмитриев, Е.А. Харланова Алгоритм кодирования речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева и вейвлет-пакетного разложения в системах компьютерной телефонии. Вестник РГРТУ 2010 № 1 (Выпуск 31) С. 98-101.

3. В.Т. Дмитриев, Д.И. Лукьянов Алгоритм маскирования на основе представления Хургина-Яковлева с использованием производных второго и третьего порядков. Вестник РГРТУ 2012 №4. –С.13-17.

4. Качество передачи речи и его оценка: Учебное пособие / М. В. Илюшин, В. Т. Дмитриев, О. О. Басов, В. А. Тарусов; под общ. ред. С. Н. Кириллова. – Орел: Академия ФСО России, 2015. – 104 с.

5. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Асинхронное маскирование, обнаружение фальсификаций и реставрация фонограмм речевых сигналов на основе алгоритма Хургина-Яковлева. / Безопасность информационных технологий. 2003. №2. – С.26-30.

6. Дмитриев В.Т., Ву Хоанг Шон Применение трехканальной модификации алгоритма Хургина-Яковлева в алгоритмах первичного кодирования речевых сигналов. // Вестник РГРТУ. 2024. №88. – С.3 -14.

7. Андреев В.Г., Дмитриев В.Т. Алгоритм совместной реализации первичного кодера и маскиатора речевых сигналов с возможностью защиты фонограмм от фальсификаций// Вестник РГРТУ. 2023. №84. – С.66 -76.

8. В.Т. Дмитриев, Д.С. Константинова Алгоритм комплексной оценки качества речи в канале связи. // Вестник РГРТУ. 2016. №56 – С.42-47

9. Дмитриев В.Т., Лантратов С.Ю. Адаптивный алгоритм кодирования на основе кодера CELP и модификации алгоритма Хургина-Яковлева// Вестник РГРТУ. 2024. №88. – С.21 -30

10. Дмитриев В.Т. Адаптация кодера CELP к воздействию акустических помех//Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 76, - С.25-34.

УДК 004.725; ГРНТИ 49.33.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАБОТЫ ПРОТОКОЛА OSPF

Д.Ш. Юмаев, С.В. Зорин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, damiryumaev@mail.ru,*

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения программно-лабораторного стенда для изучения работы протокола динамической маршрутизации OSPF, включая моделирование сетевой топологии, настройку маршрутизаторов и анализ механизмов установления соседства. Изучены процессы обмена маршрутной информацией, формирование базы состояний каналов и применение алгоритма SPF для выбора оптимальных маршрутов. Исследование подчеркивает важность виртуального моделирования для понимания работы протоколов маршрутизации и отработки сетевых сценариев без использования физического оборудования. Также рассмотрены программные платформы, обеспечивающие эффективную реализацию таких стендов.

Ключевые слова: OSPF, динамическая маршрутизация, моделирование, лабораторный стенд, SPF-алгоритм, LSA.

MODELING A STAND FOR STUDYING THE OPERATION OF THE OSPF PROTOCOL

D.S.Yumaev, S.V. Zorin

Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, damiryumaev@mail.ru

Annotation. The article examines the fundamental principles of building a software-based laboratory stand for studying the operation of the OSPF dynamic routing protocol, including network topology modeling, router configuration, and analysis of neighbor establishment mechanisms. The processes of routing information exchange, link-state database formation, and the application of the SPF algorithm for selecting optimal routes are explored. The study emphasizes the importance of virtual modeling for understanding routing protocol behavior and testing network scenarios without the use of physical equipment. Software platforms that enable effective implementation of such laboratory environments are also considered.

Keywords: OSPF, dynamic routing, modeling, laboratory stand, SPF algorithm, LSA.

Введение

Сетевые технологии стремительно развиваются, обеспечивая надёжный обмен данными, гибкость инфраструктуры и устойчивость современных информационных систем. В этих условиях возрастает роль динамических протоколов маршрутизации, которые позволяют автоматически адаптировать сетевые маршруты к изменениям топологии и нагрузок. Протокол **OSPF** является одним из наиболее эффективных и широко применяемых решений для маршрутизации в корпоративных и операторских сетях благодаря высокой скорости сходимости и детальному учёту состояния каналов.

В данной работе моделирование лабораторного стенда позволяет более глубоко исследовать ключевые механизмы протокола OSPF, оценить его поведение в виртуальной среде и отработать практические навыки настройки маршрутизации.

Теоретические основы протокола OSPF

Протокол OSPF (Open Shortest Path First) относится к семейству протоколов внутренней динамической маршрутизации IGP (Interior Gateway Protocol) и использует модель с распространением информации о состоянии каналов — Link-State Routing. В отличие от протоко-

лов дистанционно-векторного типа, OSPF формирует полное представление о топологии сети в пределах одной области и обеспечивает быстрое вычисление кратчайших маршрутов [1, 2].

Основными преимуществами OSPF являются:

1. Высокая скорость сходимости при изменении топологии;
2. Масштабируемость за счёт поддержки многообластной структуры;
3. Детализированная модель обмена сведениями о сети;
4. Применение алгоритма SPF для построения оптимальных маршрутов.

Принципы работы протоколов Link-State

Протоколы с состоянием канала работают по следующей общей схеме (рис. 1).

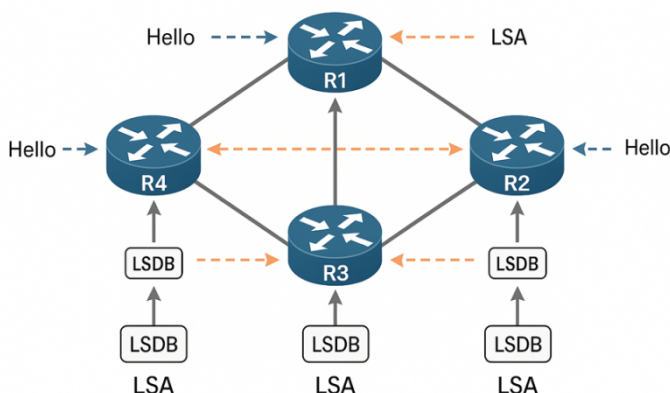


Рис. 1. Схема работы протокола OSPF

1. Каждый маршрутизатор обнаруживает своих соседей. Для этого используются периодические Hello-пакеты, содержащие идентификаторы маршрутизаторов, параметры обмена и сведения о поддерживаемых возможностях.

2. Маршрутизатор формирует LSA (Link-State Advertisement) — объявления о состоянии собственных интерфейсов и связей.

3. LSA распространяются по всей области методом «затопления» (flooding), что обеспечивает единый набор данных у всех маршрутизаторов.

4. На основе полученной информации формируется LSDB (Link-State Database) — база состояний каналов.

5. Маршрутизатор выполняет алгоритм SPF (Дейкстры) и формирует таблицу маршрутизации.

Таким образом, все узлы в области имеют одинаковое представление о структуре сети, но выбирают маршруты независимо [3].

Процесс установления соседства

После отправки Hello-пакетов маршрутизаторы проходят последовательно 7 состояний:

1. Down — отсутствие каких-либо данных о соседе;
2. Init — устройство получило Hello, но не видит себя в списке соседей;
3. 2-Way — установлена двусторонняя видимость (сосед видит нас);
4. ExStart — определение ролей Master/Slave для обмена DBD;
5. Exchange — маршрутизаторы обмениваются описаниями баз данных (DBD);
6. Loading — отправляются запросы LSR и получаются LSA;
7. Full — полная синхронизация LSDB.

Достижение состояния Full означает полную синхронизацию LSDB [2,3].

Вычисление маршрутов и определение стоимости

После синхронизации LSDB маршрутизатор использует алгоритм SPF (Shortest Path First) для построения дерева кратчайших путей. На основе результатов алгоритма формируется таблица маршрутизации. Перестроение таблицы маршрутизации осуществляется при получении новых LSA, изменениях сети или обновлении характеристик интерфейсов.

Стоимость определяется формулой:

$$\text{стоимость} = \frac{\text{reference bandwidth}}{\text{interface bandwidth}}, \quad (1)$$

где reference bandwidth обычно составляет 100 Мбит/с или 1 Гбит/с.

Выбор программной платформы для моделирования

Для моделирования поведения OSPF применяются программные среды, позволяющие создавать сложные сетевые топологии и обеспечивающие точную эмуляцию сетевых протоколов.

GNS3 (Graphical Network Simulator 3)

GNS3 — популярный сетевой симулятор, применяемый как в образовательных, так и в профессиональных целях. Он сочетает эмуляцию (через Dynamips, QEMU, Docker) и симуляцию, что делает его универсальным инструментом для настройки и анализа протоколов маршрутизации.

Преимущества GNS3:

- высокая гибкость конфигурирования;
- бесплатность и открытость платформы;
- возможность использования Linux-контейнеров с

FRRouting;

- интеграция с VirtualBox, VMware Workstation, QEMU;
- удобный графический интерфейс с визуальной отрисовкой топологии.

Ограничения:

- сложность первоначальной настройки среды;
- высокая загрузка ресурсов при использовании Cisco

IOS через Dynamips.

GNS3 хорошо подходит для моделирования топологий средней сложности и изучения внутренней логики работы OSPF.

Cisco Packet Tracer

Cisco Packet Tracer — учебный инструмент, разработанный компанией Cisco для студентов и участников программы Cisco Networking Academy. Он реализует симуляцию поведения сетевого оборудования, без использования реальных образов ОС [4].

Преимущества Packet Tracer:

- простота освоения;
- низкие требования к оборудованию;
- удобная визуализация сетевых процессов;
- встроенные обучающие сценарии.

Недостатки:

- ограничения функциональности OSPF (не все команды и состояния доступны);
- невозможность моделирования мультивендорных сред;

Packet Tracer подходит для базового изучения OSPF, но не обеспечивает необходимой глубины для научных исследований.

Результаты моделирования

В ходе моделирования в программной среде GNS3 была построена тестовая топология, включающая несколько маршрутизаторов Cisco с активированным протоколом OSPF в области Area 0. После настройки интерфейсов, метрик и параметров обмена Hello-пакетами маршрутизаторы успешно сформировали соседские отношения и синхронизировали базу LSDB.

Изменение стоимости интерфейсов и отключение каналов привело к перерасчёту SPF-дерева, что подтверждает корректность работы алгоритма Дейкстры в виртуальной среде. Наблюдаемое время сходимости составило менее одной секунды, что соответствует ожидаемым характеристикам для компактных лабораторных топологий.

Выводы

Проведённое моделирование показало, что виртуальный лабораторный стенд на базе GNS3 является эффективным инструментом для изучения протокола OSPF. Среда позволяет воспроизводить реальные процессы установления соседства, обмена топологической информацией и выбора маршрутов по алгоритму SPF. Результаты подтверждают корректность функционирования OSPF, его устойчивость к отказам и способность быстро адаптироваться к изменениям топологии. Модель может использоваться как в учебных, так и в исследовательских целях.

Библиографический список

1. Дибров М.В. Сети и телекоммуникации. Маршрутизация в IP-сетях: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2024. 423 с.
2. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — 6-е изд. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
3. RFC 2328. OSPF Version 2 / J. Moy. — IETF, 1998. — 244 p. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2328>
4. Cisco Systems. OSPF Configuration Guide. — Cisco Press, 2020. — 112 p. URL: <https://www.cisco.com>

УДК 621.396.67; ГРНТИ 49.01.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В СОВРЕМЕННЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А.С. Головкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, agolovkin09@gmail.com*

Аннотация. В представленной работе рассматриваются эксплуатационные возможности микрополосковых антенн бегущей волны, применяемых в телекоммуникационных комплексах. Особое внимание уделяется механизму пространственного перераспределения диаграммы направленности при варьировании рабочей частоты. Выполнены расчеты конструктивных параметров излучателя, функционирующего в диапазоне 9,5–10,5 ГГц. На основании аналитических методов подтверждена реализуемость изменения направления основного излучения в диапазоне $\pm 5^\circ$ от нормали к плоскости антенны. Обоснована целесообразность применения рассматриваемой антенной технологии в аппаратуре связи миллиметрового диапазона волн.

Ключевые слова: антенна бегущей волны, частотная перестройка луча, микрополосковый излучатель.

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF USING MICROSTRIP TRAVELING-WAVE ANTENNAS IN MODERN COMMUNICATION SYSTEMS

A.S. Golovkin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, agolovkin09@gmail.com*

Abstract. This paper examines the operational capabilities of microstrip traveling-wave antennas used in telecommunication systems. Particular attention is paid to the mechanism of spatial redistribution of the radiation pattern when varying the operating frequency. Calculations of the structural parameters of the radiator operating in the 9.5–10.5 GHz range have been performed. Based on analytical methods, the feasibility of changing the main radiation direction within $\pm 5^\circ$ from the normal to the antenna plane has been confirmed. The expediency of using the considered antenna technology in millimeter-wave communication equipment is substantiated.

Keywords: traveling-wave antenna, frequency beam steering, microstrip radiator.

Введение

Современный этап развития телекоммуникационных инфраструктур характеризуется устойчивой тенденцией к увеличению плотности размещения абонентских устройств и росту требований к пропускной способности каналов передачи данных. В сложившейся ситуации существенно возрастает значимость аппаратуры, обеспечивающей пространственную селекцию сигналов, что позволяет повысить эффективность использования частотного спектра и энергетических ресурсов систем связи.

Традиционные подходы к управлению диаграммой направленности, основанные на применении фазированных антенных решеток (ФАР) с цифровыми или аналоговыми фазовращателями, сопряжены со значительными аппаратными затратами, сложностью конструкции и высоким энергопотреблением. В этой связи актуальной представляется задача поиска и исследования альтернативных решений, лишенных указанных недостатков.

Одним из таких перспективных направлений является использование антенн бегущей волны, в которых управление направленностью излучения осуществляется за счет вариации рабочей частоты питающего сигнала. Данный принцип, известный как частотное сканирование, позволяет реализовать функцию электронного качания луча без применения дорогостоящих и сложных систем формирования диаграммы направленности.

Среди разнообразия конструкций антенн бегущей волны микрополосковые реализации занимают особое положение благодаря ряду неоспоримых эксплуатационных преимуществ. К их числу относятся компактность геометрических размеров, технологичность изготовления, обеспечивающая низкую себестоимость массового производства, а также возможность интеграции с активными и пассивными компонентами приема-передающих трактов на общей подложке.

Целью настоящего исследования является проведение комплексного аналитического обоснования рабочих характеристик и потенциальных возможностей применения микрополосковых антенн бегущей волны, обладающих свойством частотного сканирования, в перспективных системах беспроводной связи.

Принцип действия и теория частотной перестройки луча

Микрополосковая антенна бегущей волны представляет собой протяженную полосковую линию передачи, возбуждаемую на одном из

торцов и нагруженную на согласованную нагрузку на противоположном конце. В отличие от резонансных микрополосковых излучателей, электрическая длина рассматриваемой структуры существенно превышает рабочую длину волны, что обуславливает формирование режима бегущей волны с непрерывным оттоком электромагнитной энергии вдоль линии в окружающее пространство.

Физический механизм излучения в таких структурах обусловлен наличием непрерывной утечки энергии вследствие дисперсионных свойств микрополосковой линии. Распространяющаяся основная мода (квази-ТЕМ) является «медленной» ($v < c$), а направленное излучение формируется за счет взаимодействия поля края полоски с окружающим пространством. [1]

Ключевой особенностью антенн бегущей волны является зависимость направления максимального излучения от частоты питающего сигнала. Данное явление, известное как частотное сканирование, имеет строгое математическое обоснование. Угол места θ , отсчитываемый от нормали к плоскости антенны до направления на главный максимум диаграммы направленности, для первого пространственного порядка определяется выражением:

$$\sin(\theta) \approx (\beta / k_0) - (2\pi / (k_0 \times p)), \quad (1)$$

где:

$\beta = 2\pi / \lambda_g$ – постоянная распространения волны в микрополосковой линии;

$k_0 = 2\pi / \lambda_0$ – волновое число в свободном пространстве;

λ_g – длина волны в линии;

λ_0 – длина волны в свободном пространстве;

p – период структуры (для равномерной линии принимается $p \rightarrow \infty$).

Поскольку диэлектрическая проницаемость подложки является частотно-зависимым параметром, эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ и, как следствие, фазовая скорость волны $v = c / \sqrt{\epsilon}$ также изменяются с частотой. Это приводит к изменению постоянной распространения β при варьировании частоты сигнала f . Таким образом, из соотношения (1) непосредственно следует, что каждому значению частоты f соответствует уникальное значение угла θ , что и составляет физическую основу метода частотного управления лучом.

Конструктивно для реализации описанного эффекта применяется прямолинейная микрополосковая линия с постоянной шириной проводника, что обеспечивает простоту изготовления и предсказуемость

характеристик. Геометрические параметры линии – ширина проводника W и длина антенны L – являются определяющими для таких эксплуатационных показателей, как волновое сопротивление, рабочая полоса частот и ширина диаграммы направленности.

Расчет геометрических параметров антенны

Для верификации теоретических положений был выполнен расчет основных конструктивных параметров микрополосковой антенны бегущей волны, предназначенной для функционирования в частотном диапазоне 9.5–10.5 ГГц. В качестве диэлектрической основы была выбрана подложка Rogers, электрофизические свойства которой обеспечивают стабильность характеристик в микроволновом диапазоне: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 3.55$, тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 0.0027$ при толщине $h = 0.813$ мм.

Первоочередной задачей проектирования является определение ширины проводника W , обеспечивающей заданное волновое сопротивление линии, которое было принято равным 50 Ом для обеспечения согласования со стандартной коаксиальной линией питания.

Для соотношения $W/h > 1$ волновое сопротивление рассчитывается по формуле [2]:

$$Z_0 = (120\pi / \sqrt{\epsilon}) / [W/h + 1,393 + (2/3)\ln(W/h + 1,444)]. \quad (2)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} , учитывающая неоднородность диэлектрической среды, определяется как:

$$\epsilon = (\epsilon_r + 1)/2 + (\epsilon_r - 1)/2 \times (1 + 12h/W)^{-1/2}. \quad (3)$$

Итерационное решение системы уравнений (2) и (3) для $Z_0 = 50$ Ом и заданных параметров подложки дает значение ширины проводника $W \approx 1,85$ мм.

Длина волны в микрополосковой линии λ_g , определяющая фазовые соотношения в антенне, рассчитывается через эффективную диэлектрическую проницаемость:

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon}, \quad (4)$$

где $\lambda_0 = c/f$ - длина волны в свободном пространстве. На центральной частоте 10 ГГц ($\lambda_0 = 30$ мм) и рассчитанной $\epsilon \approx 2,78$, длина волны в линии составляет $\lambda_g \approx 18,0$ мм.

Электрическая длина антенны L определяет ширину главного лепестка диаграммы направленности и коэффициент направленного действия. Для обеспечения узкой диаграммы направленности выбрана длина, равная пяти длинам волн в линии:

$$L = 5 \times \lambda_g \approx 90,0 \text{ мм.}$$

Данное значение является компромиссом между достижением высокой направленности и допустимыми габаритами устройства.

Анализ эксплуатационных характеристик антенны

На основании вычисленных геометрических параметров проведена оценка ключевых эксплуатационных характеристик, определяющих функциональную пригодность антенны в системах связи.

Для микрополосковой линии, поддерживающей волну с фазовой скоростью, меньшей скорости света, направление максимального излучения приближенно описывается модифицированной формулой, учитывающей порядок пространственной гармоники [2]:

$$\sin(\theta) \approx (\beta / k_0) - (2\pi / (k_0 \times p)), \quad (5)$$

где:

$\beta = 2\pi/\lambda_g$ - постоянная распространения;

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$ - волновое число в свободном пространстве;

p - период структуры (для равномерной линии принимается $p \rightarrow \infty$).

Для качественной оценки сектора сканирования воспользуемся данными теоретических и экспериментальных исследований для аналогичных структур, согласно которым в диапазоне частот 9,5-10,5 ГГц для рассчитанной антенны можно ожидать следующих углов отклонения луча от нормали:

на частоте 9,5 ГГц: $\theta_1 \approx 15^\circ$;

на частоте 10,0 ГГц: $\theta_2 \approx 20^\circ$;

на частоте 10,5 ГГц: $\theta_3 \approx 25^\circ$.

Таким образом, теоретический сектор сканирования составляет $\approx 10^\circ$ (от 15° до 25°).

Ожидаемая ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности (уровень -3 дБ) в плоскости сканирования оценивается по формуле, справедливой для линейной решетки с равномерным возбуждением:

$$\theta_{-3\text{дБ}} \approx 0,886 \times (\lambda_0 / L) \times (180/\pi). \quad (6)$$

На центральной частоте 10 ГГц при $\lambda_0 = 30$ мм и $L = 90$ мм:

$$\theta_{-3\text{дБ}} \approx 0,886 \times (30 / 90) \times 57,3^\circ \approx 17^\circ.$$

Упрощенная оценка коэффициента направленного действия может быть получена из соотношения:

$$D \approx (4\pi \times L) / \lambda_0. \quad (7)$$

Для центральной частоты:

$$D \approx (4 \times 3,14 \times 90) / 30 \approx 37,7 \text{ (линейных единиц)}, \text{ или } \approx 15,8 \text{ дБ}.$$

Таблица 1. Сводные расчетные параметры

Параметр	Значение
Сектор сканирования, °	15 - 25
Ширина ДН на уровне -3 дБ, °	≈ 17
Коэффициент направленного действия, дБ	$\approx 15,8$
Волновое сопротивление, Ом	50
Центральная частота, ГГц	10,0

Полученные значения свидетельствуют о том, что рассчитанная антенна обладает удовлетворительными направленными свойствами и выраженным эффектом частотного управления лучом.

Заключение и перспективы применения

Проведенное аналитическое исследование позволяет констатировать, что микрополосковые антенны бегущей волны представляют собой технически обоснованное и перспективное решение для построения подсистем пространственной обработки сигналов в современных телекоммуникационных комплексах.

Основные выводы работы

На основании строгого электродинамического подхода раскрыт физический механизм частотной перестройки луча в микрополосковых антенных структурах, описываемый аналитическим соотношением (1).

Выполнен расчет конструктивных параметров антенны для диапазона 9,5–10,5 ГГц. Установлено, что для обеспечения волнового сопротивления 50 Ом на подложке Rogers требуется ширина проводника

1,85 мм, а для формирования узкой диаграммы направленности целесообразна электрическая длина антенны 90,0 мм.

На основе аналитических оценок установлены ключевые эксплуатационные характеристики проектируемого излучателя: сектор частотного сканирования 10° , ширина диаграммы направленности $\approx 17^\circ$ и коэффициент направленного действия $\approx 15,8$ дБ. Данные показатели соответствуют требованиям, предъявляемым к антеннам систем связи.

Перспективные направления внедрения

Рассмотренный класс антенн обладает значительным потенциалом для применения в следующих областях:

Абонентский доступ миллиметрового диапазона: использование в качестве облучателей секторных антенн или в компактных устройствах с функцией пространственной селекции сигнала.

Релейная связь: организация каналов связи «точка-точка» с возможностью оперативной перенастройки направления луча при изменении топологии сети.

Специализированные мобильные системы: размещение на подвижных объектах благодаря сочетанию малой массы, низкого аэродинамического сопротивления и возможности электронного сканирования.

Интегрированные радиомодули: встраивание в планарную топологию монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона для создания компактных приемо-передающих модулей.

Таким образом, результаты проведенного анализа подтверждают целесообразность дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Часть 1 / И.В. Гончаренко. — М. : Радио и связь, 2003. — 192 с.
2. Нефедов Е.И. Микрополосковые линии / Е.И. Нефедов. — М. : Радио и связь, 1980. — 216 с.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ КВАЗИ-ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ФАЗОПЕРЕМЕННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Е.П. Трусов, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Ю.В. Воробьев, Н.Я. Ильин
*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, eptrusov@yandex.ru*

Аннотация. Дрейф электрического сопротивления в аморфных фазопеременных материалах – один из факторов, ограничивающий надёжность многоуровневых ячеек памяти. Для его изучения разработана методика квази-изотермического измерения дифференциальных параметров из выражения для удельного электрического сопротивления, основанная на циклической модуляции температуры с небольшой амплитудой.

Ключевые слова: фазопеременная память, дрейф сопротивления, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, квази-изотермическая выдержка.

**AUTOMATED COMPLEX FOR QUASI-ISOTHERMAL
STUDY OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF PHASE-SHIFTING MATERIALS**

E.P. Trusov, A.V. Ermachikhin, V.G. Litvinov, Yu.V. Vorobyov, N.Ya. Ilin
*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, eptrusov@yandex.ru*

Abstract. The drift of electrical resistance in amorphous phase – shifting materials is one of the factors limiting the reliability of multilevel memory cells. To study it, a technique has been developed for quasi-isothermal measurement of differential parameters from the expression for electrical resistivity, based on cyclic temperature modulation with a small amplitude.

Keywords: PCM, resistance drift, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, quasi-isothermal exposure.

Введение

Запоминающие устройства (ЗУ) выполняют одну из ключевых функций в развитии современных технологий, определяя производительность и надёжность вычислительных систем. ЗУ на основе фазопеременных материалов может удовлетворить все более жесткие требования информационных технологий. Однако для массового внедрения необходимо оценить стабильность хранения информации – в ча-

стности, изучить дрейф сопротивления, приводящий к ошибкам в многоуровневых ячейках.

Дрейф сопротивления проявляется в постепенном уменьшении электрической проводимости материала с течением времени. Для его изучения материал выдерживают при постоянной температуре – в том числе повышенной, что способствует ускорению старению.

Проводимость σ является параметром, зависящим как от концентрации, так и от подвижности носителей заряда, что позволяет дать более полную физическую интерпретацию полученных результатов и определяется как [1]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(-\frac{E_A(t)}{k_B T} \right). \quad (1)$$

Выражение (1) демонстрирует, что электропроводность определяется двумя параметрами уравнения Аррениуса: энергией активации проводимости E_A и предэкспоненциальным множителем σ_0 .

Методика исследования

Для определения E_A и σ_0 проводят измерения температурной зависимости электропроводности, а затем строят зависимость в координатах Аррениуса ($\ln \sigma$ от $1/k_B T$). В этом представлении наклон прямой соответствует $-E_A$, а отрезок на оси ординат $-\ln \sigma_0$, что позволяет вычислить оба параметра.

Для корректной интерпретации их изменений в контексте дрейфа сопротивления необходимо, чтобы измерения проводились в процессе выдержки при той же температуре, при которой наблюдается дрейф.

С целью решения этой задачи используется методика, основанная на циклическом модулированном нагреве в узкой окрестности базовой температуры выдержки T_B . Такой подход обеспечивает высокое временное разрешение и позволяет определять значения $E_A(t)$ и $\sigma_0(t)$ в процессе дрейфа сопротивления, не нарушая условий квази-изотермического старения (Рис.1) [2].

Такая методика позволяет определять дифференциальные параметры уравнения Аррениуса (E_A и σ_0) непосредственно в ходе дрейфа сопротивления в полупроводниковых фазопеременных материалах, сохраняя условия, близкие к изотермическим. Временное разрешение метода определяется отношением амплитуды температурной модуляции ΔT к скорости её изменения :

$$\Delta t = \frac{2\Delta T}{\beta}, \quad (2)$$

где ΔT – амплитуда температурных колебаний, $\beta = \left| \frac{dT}{dt} \right|$ – скорость нагрева (при линейной модуляции), а множитель 2 учитывает, что для определения параметров уравнения Аррениуса используется только одна фаза температурного цикла.

Такой подход обусловлен двумя факторами: во-первых, термически активированные процессы в фазопеременных материалах могут демонстрировать различную кинетику при нагреве и охлаждении; во-вторых, измерительная система не обеспечивает достаточной точности контроля температуры образца в режиме охлаждения, что снижает надёжность данных на этом участке цикла.

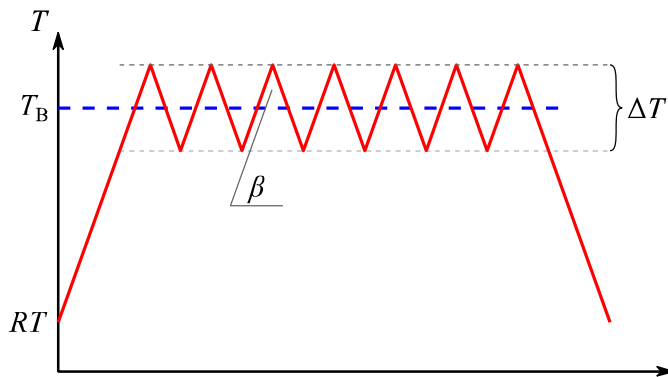


Рис. 8. Профиль квази-изотермической выдержки для измерения параметров уравнения Аррениуса [2]

Важной особенностью методики является непрерывный характер температурного сканирования. В таких условиях определение энергии активации проводимости по данным температурной зависимости становится чувствительным не только к абсолютной температуре образца, но и к скорости её изменения, поскольку динамика термически активированных процессов может отставать от внешнего температурного воздействия. Это налагает повышенные требования к точности и временной синхронизации измерений – в частности, к разрешению и стабильности температуры.

Автоматизированный комплекс

Для исследования электрофизических свойств тонких пленок полупроводниковых фазоперенных составов разработан измерительно-аналитический комплекс, предназначенный для регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ), структурная схема которого приведена на рис. 2.

Измерительная ячейка представляет собой экранированный, светонепроницаемый корпус, что исключает фотоиндуцированные эффекты. Нагрев и охлаждение образца осуществляются за счёт термоэлектрического модуля (ТЭМ), что обеспечивает высокую скорость нагрева и охлаждения. ТЭМ управляется термоконтроллером TEC-1091-NTC-SCREW с ПИД-регуляцией (точность поддержания температуры 0,01 °C). Измерения тока и подача напряжения осуществляются с помощью пикоамперметра со встроенным источником напряжения Keithley 6487.

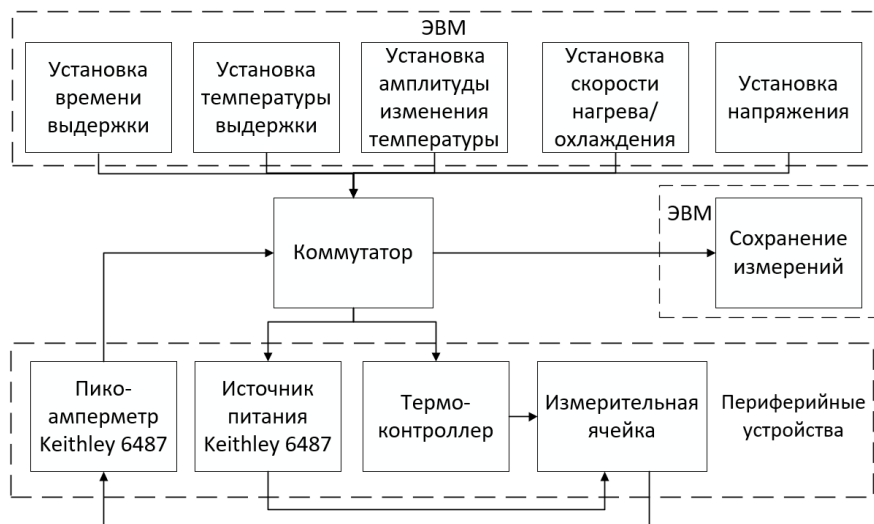


Рис. 9. Структурная схема комплекса по измерению дифференциальных параметров в выражении для электропроводности

Процесс измерения реализуется пошагово: на первом этапе задаются начальные параметры: базовая температура (T_B), амплитуда ступени (ΔT), длительность квази-изотермической выдержки (t), скорость нагрева/охлаждения (β), а также напряжение (U). Далее запускается циклический алгоритм (рис.3):

1. Нагрев образца до $T_B + \frac{\Delta T}{2}$ с заданной скоростью β ;
2. При достижении верхней границы температурного диапазона ($T_B + \frac{\Delta T}{2}$) осуществляется охлаждение до ($T_B - \frac{\Delta T}{2}$), после чего цикл повторяется.
3. Процесс измерения продолжается в течение заданного суммарного времени эксперимента, формируя набор зависимостей $I(t, T)$, расчета дифференциальных параметров по уравнению Аррениуса из выражения электропроводности.

Апробация измерительного комплекса

Для апробации разработанного измерительного комплекса для реализации методики квази-изотермического исследования был выбран фазопеременный материал $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, находящийся в аморфном состоянии. Образец имел толщину 130 нм и сформирован магнетронным распылением на кремневой подложке. Выбор материала обусловлен хорошо изученными свойствами данного состава.

В ходе эксперимента при температуре выдержки 100 °С на образец подавалось постоянное напряжение смещения 100 мВ. При этом ток находился в наноамперном диапазоне, что позволяет пренебречь эффектом Джоулеа самонагрева, сохраняя при этом достаточное соотношение сигнал/шум для надёжной регистрации проводимости.

Для оптимизации параметров температурного профиля была проведена серия тестовых измерений с последующим расчётом энергии активации E_A по данным температурной зависимости электрической проводимости

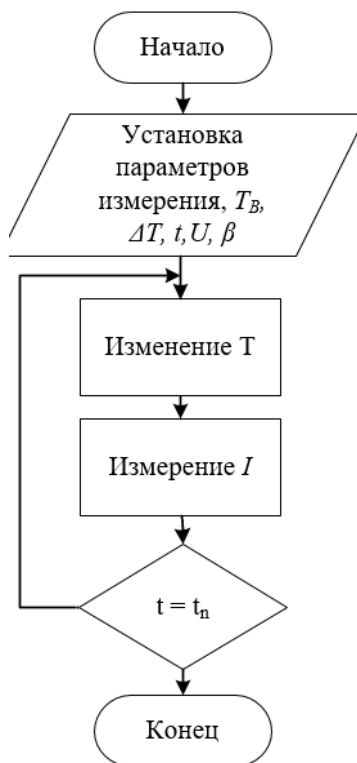


Рис. 3. Алгоритм работы автоматизированного комплекса для квази-изотермического исследования электропроводности

сти. Анализ зависимости E_A от параметров модуляции (рис. 4) показал, что минимальная погрешность оценки достигается при амплитуде температурных колебаний $\Delta T = 10$ К и скорости нагрева $\beta = 5$ К/мин.

Данный режим позволяет изолировать процесс дрейфа сопротивления (а также низкочастотные факторы, связанные с температурной стабильностью и контактным сопротивлением) от измерения локальной температурной зависимости электрической проводимости, и уменьшить погрешность измерения.

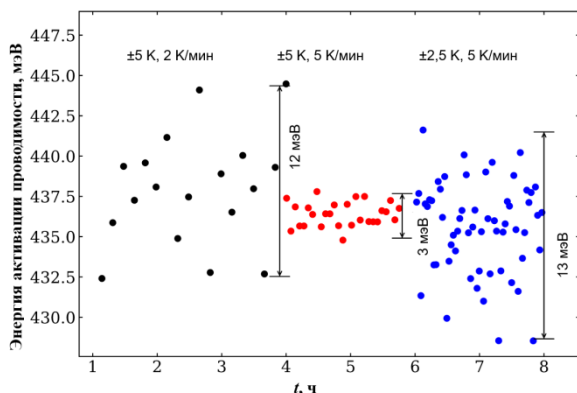


Рис. 10. Временная зависимость энергии активации проводимости $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для различных параметров температурного режима

Заключение

Разработанный комплекс позволяет реализовывать квази-изотермическую методику для измерения энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя в условиях близких к изотермическим. Для аморфного материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 нм подобрана амплитуда ± 5 К в отсчете от базовой температуры и скорость нагрева 5 К/мин в качестве оптимальных параметров проведения исследований.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10137. Подготовка образцов проводилась на оборудовании НИЛ “Материалы и устройства активной фотоники” МИЭТ. Измерения электропроводности и ее температурной зависимости проводились с

использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

Библиографический список

1. Pirovano A. et al. Low-field amorphous state resistance and threshold voltage drift in chalcogenide materials // IEEE Trans. Electron Devices. 2004. Vol. 51, № 5. P. 714–719.
2. Трусов Е.П. и др. Изменение параметров температурной зависимости удельного сопротивления $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в процессе изотермического отжига // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2021 [текст]: сб. тр. IV междунар. Науч.-техн. Форума в 10 т. Т2/под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань, 2021. С. 84–90.

УДК 621.396., ГРНТИ 47.05.15

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭМС В ПЛОТНЫХ ИОТ-СЕТЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А.А. Полферов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, polferov01@gmail.com*

Аннотация. В статье проведён обзор проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) в плотных IoT-сетях. Рассмотрены источники взаимных, внутренние помеховые каналы в устройствах и требования к мониторингу спектра. Проанализированы подходы на базе когнитивного радио и ИИ: обнаружение и классификация помех, адаптивное управление частотой и мощностью, нейросетевые фильтры и прогнозирование спектра. Учтены отечественные нормативы (ГОСТ, регламенты) и их связь с интеллектуальными алгоритмами. Предложена структурная модель интеллектуальной системы управления ЭМС с распределённым мониторингом и централизованной аналитикой. Выделены перспективы исследований и рекомендации для инженерной практики.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, IoT, когнитивное радио, машинное обучение, мониторинг спектра, ГОСТ.

INTELLIGENT EMC MANAGEMENT IN DENSE IOT NETWORKS USING AI

A.A. Polferov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, polferov01@gmail.com*

Abstract. This paper reviews electromagnetic compatibility (EMC) challenges in dense IoT networks. Key sources of interference, internal coupling in devices, and spectrum monitoring requirements are analyzed. Cognitive radio and AI-based approaches are considered, including interference detection and classification, adaptive frequency and power control, neural filtering, and spectrum prediction. Russian standards (GOST, regulations) and their alignment with intelligent algorithms are discussed. A structural model of an intelligent EMC-management system with distributed monitoring and centralized analytics is proposed. Research directions and practical recommendations are outlined.

Keywords: electromagnetic compatibility, IoT, cognitive radio, machine learning, spectrum monitoring, Russian standards.

Введение

Развитие технологий Интернета вещей (IoT) привело к значительному увеличению плотности радиоустройств в городских, коммерческих и промышленных средах. Одновременно в компактных IoT-модулях интегрируются несколько радиоинтерфейсов (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, NB-IoT и др.), что повышает сложность обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) как внутри устройств, так и между ними при совместной эксплуатации каналов радиосвязи [1, 2]. Традиционные аппаратные методы экранирования и фильтрации в условиях миниатюризации и ограниченных ресурсов часто оказываются недостаточными. В этих условиях интеллектуальные программно-аппаратные методы - когнитивное радио, адаптивное управление параметрами передачи и алгоритмы машинного обучения (;) - представляют собой перспективное направление для обеспечения надёжной работы сетей IoT и минимизации взаимных помех [1, 2, 10].

Цель статьи - провести обзор существующих проблем ЭМС в плотных IoT-средах, проанализировать интеллектуальные подходы управления спектром и предложить структурную модель системы, учитывающую российские нормативные требования и практические ограничения. Задачи включают обзор отечественных нормативов и публика-

ций, анализ методов на базе ИИ, описание архитектурных решений и формулирование практических рекомендаций для их внедрения.

В Российской Федерации регулирование вопросов ЭМС базируется на совокупности национальных стандартов (ГОСТ), технических регламентов и методических документов. Важнейшие нормативы, применимые к радиоаппаратуре и испытаниям на устойчивость и излучение, включают ГОСТ Р 51317.4.3-2006 [3], ГОСТ Р 51522-99 [4], ГОСТ 34594.2.1-2019 [5], ГОСТ 34594.2.2-2019 [6], ГОСТ Р 51317.4.2-2006 [7], а также ТР ТС 020/2011 [8]. Эти документы задают методологию проведения испытаний и критерии соответствия, которые необходимо учитывать при разработке как аппаратных, так и программных средств обеспечения ЭМС.

Академические исследования российских авторов подчёркивают значимость когнитивных подходов и алгоритмов ИИ для управления спектром и смежными параметрами в плотных радиосредах [1, 2, 10]. Работы профильных организаций и конференций (например, Всероссийский научно-технический форум «ЭМС – 2022» [9]) анализируют особенности построения распределённого мониторинга спектра, прикладные сценарии для «умных городов» и промышленных IoT, а также вопросы совместимости при наличии мультисервисных инфраструктур. В отечественной литературе особо отмечается практическая необходимость согласования интеллектуальных решений с предписанными методиками испытаний и с ограничениями регуляторов по использованию частотных ресурсов [3–8].

Основные проблемы ЭМС в плотных IoT-сетях

В общеупотребительных диапазонах (2,4 ГГц, 868/915 МГц и др.) одновременно функционируют множество стандартов, что приводит к перекрытиям каналов, коллизиям и деградации качества связи. Особая сложность возникает при динамическом изменении плотности устройств и при появлении сильных источников помех, не учтённых при первичном планировании сети [1, 2].

Интеграция нескольких радиомодулей и высокоскоростных цифровых блоков в компактном корпусе повышает вероятность внутренней взаимной интерференции через питание, корпус и близко расположенные антенны. Гармоники, паразитные излучения тактовых генераторов и переходные процессы в цепях питания становятся значимыми источниками ухудшения характеристик радиоданных каналов [2, 10].

Ограниченное пространство и стоимость влияют на выбор экранирования, фильтрации и качественных антенн. В результате проекти-

ровщики вынуждены искать соотношение между эффективностью аппаратных средств и возможностью применять компенсирующие программные методы [3, 6].

Для адаптивного управления требуется широкий спектр данных о состоянии эфира: спектральный анализ, обнаружение и классификация источников помех, динамическая оценка загруженности. Организация распределённой системы мониторинга - одно из ключевых требований для реализации интеллектуальной стратегии управления ЭМС [2, 9].

Интеллектуальные подходы к обеспечению ЭМС

В ответ на эти проблемы развиваются методы интеллектуального управления спектром и параметрами связи. Важнейшим подходом является когнитивное радио - система с автоматическим анализом окружения и динамическим выбором частот. В таких системах устройства на этапе восприятия («sensing») сканируют спектр, затем на этапе обработки принимают решение о переключении каналов или изменении мощности. Применение CRN позволяет IoT-устройствам использовать «пустые» частоты без лицензирования, увеличивая эффективность использования спектра. Ключевыми задачами остаются управление интерференцией между лицензированными и нелицензированными пользователями, а также обеспечение безопасности каналов (защита от DoS-атак и прослушивания).

Кроме того, внедряются алгоритмы машинного обучения и нейросети. Самообучающиеся алгоритмы позволяют динамически настраивать параметры связи с учётом текущей загрузки радиозфира. Например, ИИ-решения анализируют метрики каналов и предсказывают оптимальные частоты и уровни мощности передатчиков, минимизируя уровень помех. Применение ИИ для построения интеллектуальных фильтров («нейросетевые фильтры») помогает отфильтровывать помехи и выделять полезный сигнал. Такой подход считается критически важным для плотных IoT-сред, где условия интерференции постоянно меняются.

Архитектура интеллектуальной системы управления ЭМС

Существуют различные архитектурные решения для интеллектуального управления ЭМС. Один из примеров - когнитивная сеть, построенная по принципу распределённых датчиков спектра и центрального контроллера. Каждый узел сети (IoT-шлюз или базовая станция) включает модуль сканирования спектра, ML-блок анализа и блок

управления радиочастотными ресурсами. На верхнем уровне предусмотрена подсистема обработки, координирующая выбор каналов между соседними узлами по принципам самоорганизации. Такая архитектура может быть представлена многоуровневой моделью когнитивного радио, где уровни восприятия и обработки лежат в основе адаптивного управления, а уровень взаимодействия обеспечивает передачу данных по оптимальным каналам.

Другой подход - гибридная распределённая система. В ней городское или промышленное пространство оснащается сетью мониторинговых сенсоров (спектроанализаторов), которые в реальном времени передают информацию о радиочастотной обстановке в центральный вычислительный узел. На центральном уровне применяются ML-алгоритмы для построения карты спектра и выдачи рекомендаций по перенастройке радиоканалов. Параллельно сами IoT-устройства могут иметь встроенные адаптивные алгоритмы частотной и мощностной коррекции. Например, для динамического поиска оптимальных каналов применяются методы машинного обучения в шлюзах IoT.

Важными примерами являются системы мониторинга электромагнитной обстановки, интегрированные с сетями связи. Так, ряд разработок предусматривает мобильные комплексы (дроны, автомобили) с датчиками ЭМИ, которые генерируют «радиокарту» города. Затем интеллектуальный контроллер на базе данных мониторинга меняет настройки сетей IoT и сотовых базовых станций. Дипломная работа по БПЛА подчёркивает роль регулярного мониторинга: «Регулярный мониторинг радиочастотного спектра и динамическая адаптация систем... позволяют оперативно реагировать на помехи и оптимизировать параметры связи».

Таким образом, архитектурные решения часто основаны на обратной связи: непрерывный сбор данных об ЭМИ становится входом для алгоритмов управления спектром.

Другой пример - гибридные сети 5G/IoT, где в качестве базовых станций используются и традиционные вышки, и средства NTN (спутники, БПЛА). В таких сетях используется централизованное планирование ресурсами с учётом результатов когнитивного анализа: 5G-инфраструктура может перенаправлять трафик IoT-устройств на наименее загруженные частоты в условиях помех.

Заключение

Интеллектуальные методы управления ЭМС (сочетание когнитивного радио, ML-алгоритмов и распределённого мониторинга) являются эффективным инструментом для плотных IoT-сетей. Их внедрение должно сопровождаться соблюдением нормативов (ГОСТ, ТР ТС), обеспечением безопасности управляющих функций и адаптацией моделей к локальным условиям. Гибридный подход объединяет аппаратные и программные меры, повышая надёжность и устойчивость сетей [1–10].

Библиографический список

1. Михалев О.А., Сорокин К.Н., Аванесов М.Ю. Управление радиочастотным спектром в когнитивной сети радиосвязи // Информационные технологии и космос. - 2015. - № 1. - С. 5–11.
2. Серебряков Д.А., Зуев В.А., и др. Интеллектуальное управление спектром в плотных беспроводных IoT-сетях // Сборник трудов конференции «Радиоэлектроника – 2021». – М.: РОСС, 2021. – С. 112–119.
3. ГОСТ Р 51317.4.3-2006 (МЭК 61000-4-3:2006) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний».
4. ГОСТ Р 51522-99 (МЭК 61326-1:1997) «Совместимость технических средств электромагнитная. Электрическое оборудование для измерения, управления и лабораторного применения. Общие требования».
5. ГОСТ 34594.2.1-2019 «Электромагнитная совместимость. “Умный город”. Требования к электромагнитной эмиссии».
6. ГОСТ 34594.2.2-2019 «Электромагнитная совместимость. “Умный город”. Требования к электромагнитной устойчивости».
7. ГОСТ Р 51317.4.2-2006 (МЭК 61000-4-2:1995) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическому разряду. Требования и методы испытаний».
8. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».
9. Материалы Всероссийского научно-технического форума «Электромагнитная совместимость – 2022» (Воронеж, 2022) (отд. аналоговые и когнитивные системы управления спектром).
10. Тихвинский В.О. Международные региональные проблемы электромагнитной совместимости: итоги симпозиума «EMC Europe-24» // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. - 2024. - Т. 18, № 9. - С. 36–40.

УДК 621.396.2; ГРНТИ 49.43.29

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОКОЛА LORAWAN ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЕЙ СВЯЗИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.А. Полферов*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, polferov01@gmail.com*

Аннотация. В статье проанализировано применение LoRaWAN для организации IoT-сетей в плотной городской застройке на основе национальной спецификации LoRaWAN RU и отечественных исследований. Рассмотрены архитектура протокола и ключевые факторы, влияющие на радиус действия и качество связи - высота установки шлюзов, прямая видимость, плотность/тип застройки и помеховая обстановка в разрешенном спектре. Обобщены результаты экспериментальных данных о дальности и устойчивости связи, рассмотрены ёмкостные ограничения одной базовой станции и влияние коллизий при массовом подключении, приведены рекомендации по размещению шлюзов, выбору параметров и управлению трафиком, сделан вывод о целесообразности применения LoRaWAN для ряда «умных» городских сервисов при учёте выявленных ограничений и соблюдении нормативов.

Ключевые слова: LoRaWAN, сети связи Интернета вещей, IoT-сети, LPWAN, городская застройка, помехоустойчивость, ёмкость сети.

APPLICATION OF THE LORAWAN PROTOCOL FOR INTERNET OF THINGS NETWORKS IN URBAN ENVIRONMENTS

A. A. Polferov*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, polferov01@gmail.com*

Abstract. The article analyzes the use of LoRaWAN for deploying IoT networks in dense urban environments, drawing on the national LoRaWAN RU specification and recent domestic research. It examines the protocol architecture and key factors influencing coverage range and link quality, including gateway height, line-of-sight conditions, building density and type, and interference levels in the unlicensed spectrum. The study summarizes experimental results on communication range and robustness, discusses capacity limitations of a single base station, and evaluates the impact of collisions under large-scale device access. Recommendations are provided for gate-

way placement, radio-parameter selection, and traffic management. The paper concludes with an assessment of the feasibility of using LoRaWAN for various smart-city services, given the identified constraints and compliance requirements.

Keywords: LoRaWAN, Internet of Things communication networks, IoT networks, LPWAN, urban environment, interference immunity, network capacity.

Введение

Развитие концепции Интернета вещей (Internet of Things, IoT) сопровождается ростом числа распределённых измерительных и управляющих устройств, требующих энергоэффективных и масштабируемых каналов связи. Для решений данного класса существенную роль играют низкоскоростные сети с малым энергопотреблением (Low-Power Wide-Area Networks, LPWAN), ориентированные на передачу небольших объёмов данных на большие расстояния при многолетней автономной работе конечных устройств.

В отечественной практике LPWAN-технологии рассматриваются как один из ключевых инструментов цифровизации промышленности и городского хозяйства. Среди них особое место занимает протокол LoRaWAN, для которого в Российской Федерации принята национальная спецификация ГОСТ Р 71168–2023 «Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU» [1]. Наличие национального стандарта формализует требования к протоколу, параметрам радиointерфейса и взаимодействию элементов сети, что обеспечивает единообразие подходов при проектировании и внедрении LoRaWAN-сетей на территории РФ.

Особую актуальность представляет применение LoRaWAN при построении городских IoT-сетей связи - для дистанционного сбора показаний приборов учёта, мониторинга энергетической и коммунальной инфраструктуры, управления наружным освещением, экологического мониторинга и других задач «умного города» [2, 4]. В отличие от открытой местности, городская среда характеризуется сложной структурой радиоканала, большим количеством отражающих и экранирующих объектов, высокой плотностью застройки и насыщенностью разрешенных диапазонов внешними источниками радиоизлучения. Это приводит к снижению дальности связи, увеличению вариативности уровней сигнала и риску коллизий в общем эфире.

В таких условиях особое значение приобретают вопросы корректного проектирования сетей LoRaWAN с учётом отечественной нормативной базы [1, 5, 6], результатов российских экспериментальных исследований [2, 3] и накопленного практического опыта эксплуатации в городских инфраструктурных системах [4].

Актуальность исследования обусловлена следующими факторами:

1. Официальным закреплением технологии LoRaWAN в национальном стандарте [1], что стимулирует её широкое внедрение в системах Интернета вещей;

2. Потребностью органов власти и операторов инфраструктуры в энергоэффективных и экономичных средствах связи для массового подключения датчиков и исполнительных устройств в городах [4, 7];

3. Необходимостью учёта специфики городской застройки и отечественной регуляторной среды при проектировании LoRaWAN-сетей, чтобы обеспечить требуемое качество сервиса и долговременную надёжность [2, 5, 6].

Таким образом, требуется комплексное исследование применимости LoRaWAN в условиях городской застройки с опорой на отечественные нормативные документы и результаты российских научно-технических работ.

Вопросы стандартизации Интернета вещей на международном и национальном уровнях подробно анализировались в работах российских исследователей [5, 6]. Особенности применения LPWAN-технологий, включая LoRaWAN, в IoT-сетях и их место среди альтернативных решений рассматриваются в обзоре [7]. Отдельные аспекты применения LoRa-модуляции и протокола LoRaWAN в российских условиях, в частности в энергетических сетях, представлены в публикациях [2, 4].

В [2] приведены результаты испытаний систем передачи данных на основе LoRaWAN и сформулированы выводы о применимости технологий LoRa/LoRaWAN для построения территориально распределённых автоматизированных систем. В работе [3] выполнено экспериментальное исследование дальности и устойчивости LoRa-связи в условиях помех, что позволяет оценить помехоустойчивость технологии в типичных отечественных сценариях. Практический опыт использования LoRaWAN в городских электрических сетях описан в [4], где показаны технические и эксплуатационные особенности реального внедрения.

При этом востребованным остаётся комплексный анализ архитектурных и радиотехнических аспектов развёртывания LoRaWAN-сетей в городской среде, с акцентом на практические рекомендации по проектированию и эксплуатации, ориентированные на российские условия.

Целью исследования является обоснование принципов проектирования и эксплуатации городских сетей связи Интернета вещей на базе протокола LoRaWAN, обеспечивающих требуемое качество связи и надёжность передачи данных при соблюдении отечественных нормативных требований [1].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнить обзор архитектуры и ключевых характеристик протокола LoRaWAN по национальной спецификации [1] и отечественным публикациям [2, 4, 7].
2. Проанализировать особенности распространения радиосигнала и влияния помех в условиях городской застройки по результатам отечественных экспериментальных исследований [2, 3].
3. Оценить ёмкость LoRaWAN-сети и пропускную способность отдельного шлюза при массовом подключении IoT-устройств.
4. Систематизировать практические ограничения и проблемы, отмеченные при внедрении LoRaWAN в отечественных городских инфраструктурных проектах [4].
5. Сформулировать рекомендации по размещению шлюзов, выбору параметров радиоинтерфейса и управлению трафиком в городских LoRaWAN-сетях с учётом требований стандартов и опыта эксплуатации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выполнена интеграция требований национальной спецификации LoRaWAN RU [1] и подходов к стандартизации IoT [5, 6] с результатами отечественных экспериментальных и прикладных исследований [2–4] применительно к задачам проектирования городских LoRaWAN-сетей;
2. Предложена структурированная модель факторов, влияющих на качество связи и ёмкость LoRaWAN-сети в условиях городской застройки, с выделением радиотехнических, архитектурных и регуляторных аспектов;
3. Сформулирован набор практико-ориентированных рекомендаций по проектированию городских LoRaWAN-сетей, учитывающий

отечественную экспериментальную базу и особенности национальной нормативной среды.

Обзор технологии LoRaWAN

Согласно ГОСТ Р 71168–2023 [1], сеть LoRaWAN включает конечные устройства, шлюзы, сетевой сервер и сервер приложений. Протокол реализует звездообразную топологию, а физический уровень использует модуляцию LoRa в субгигагерцевом диапазоне. В отечественных публикациях [2, 4, 7] отмечается, что ключевыми особенностями LoRaWAN являются:

1. Большая дальность связи при малой мощности передатчика за счёт высокого энергетического выигрыша и использования коэффициента расширения спектра;
2. Возможность массового подключения устройств при небольшой полосе частот;
3. Малое энергопотребление конечных устройств, обеспечивающее многолетнюю автономную работу при редком обмене данными;
4. Поддержка разных режимов работы устройств (классы A, B, C), что позволяет адаптировать сеть под конкретные требования приложения [1, 2].

В работах [2, 7] LoRaWAN рассматривается как одна из основных технологий класса LPWAN наряду с альтернативными решениями (Sigfox, NB-IoT и др.). Подчёркивается, что использование частного диапазона частот позволяет организовывать частные сети связи Интернета вещей без участия операторов сотовой связи, что снижает совокупную стоимость владения сетью для предприятий и муниципалитетов.

Одновременно указывается на чувствительность LoRaWAN к внешним помехам и ограничениям по времени использования радиоканала, установленным нормативными документами [1, 7]. Эти ограничения особенно критичны в условиях городской застройки, где спектр загружен большим числом беспроводных систем.

Результаты анализа

В работе [2] показано, что дальность уверенной связи по каналу LoRaWAN существенно зависит от частоты, коэффициента расширения спектра и условий распространения. При использовании типовых параметров (диапазон 868 МГц, мощность передатчика до 14–20 дБм,

высокие значения SF) в открытой местности дальность связи достигает нескольких километров, тогда как в городской застройке этот показатель существенно снижается. В практических испытаниях [2, 4] при размещении шлюзов на крышах зданий дальность устойчивой связи в городской среде составляла, как правило, 1–3 км, что согласуется с общими оценками для LoRaWAN.

Экспериментальные исследования линий связи с модуляцией LoRa в условиях помех, описанные в [3], показали, что даже при наличии внешних узкополосных помех система сохраняет работоспособность при определённом запасе по уровню сигнала. В то же время при повышении фоновой помехи и неблагоприятных условиях распространения (отсутствие прямой видимости, экранирование зданиями) уровень сигнала на входе приёмника может опускаться ниже порога чувствительности, что приводит к росту доли потерь пакетов.

Особенности распространения в городской среде приводят к тому, что связь внутри зданий и подземных сооружений (подвалы, шахты, колодцы) обеспечивается, как правило, на существенно меньших расстояниях по сравнению с открытым пространством. Практический опыт, приведённый в [4], подтверждает необходимость более плотного размещения шлюзов и применения специальных решений (внутридомовые антенны, локальные концентраторы), если требуется обеспечить уверенную связь для глубоко размещённых устройств.

В обзоре [7] и практической статье [4] отмечается, что технологии LPWAN, включая LoRaWAN, обладают ограниченной ёмкостью, обусловленной как физическими характеристиками радиоканала, так и регуляторными требованиями по ограничению времени занятия эфира. Для LoRaWAN в диапазоне 868 МГц значительную роль играют ограничения скважности, а также особенности схемы доступа к каналу (несинхронизированный доступ).

С увеличением числа одновременно работающих устройств и частоты передачи сообщений возрастает вероятность коллизий пакетов. В реальных городских сетях, описанных в [4], показано, что при подключении сотен устройств к одному шлюзу и периодичности передачи порядка десятков минут возникают ограничения по пропускной способности, требующие либо снижения частоты опроса отдельных устройств, либо установки дополнительных базовых станций.

Дополнительная сложность возникает в случае, когда в одном городе функционируют несколько независимых LoRaWAN-сетей (от разных операторов или ведомств), использующих общие частотные

ресурсы. В [7] указывается, что отсутствие координации частотных планов и параметров работы может приводить к взаимному влиянию сетей и деградации качества связи для всех участников.

Сопоставление данных отечественных исследований [2, 3] и практических внедрений [4] с требованиями национальной спецификации [1] позволяет сформулировать ряд принципиальных положений для проектирования городских LoRaWAN-сетей.

Во-первых, в условиях городской застройки необходимо исходить из уменьшенного (по сравнению с открытой местностью) эффективного радиуса действия одной базовой станции. Практические данные [2, 4] показывают, что для обеспечения устойчивой связи на расстояниях до нескольких километров шлюзы следует размещать на высотных доминантах и обеспечивать максимально возможную зону прямой видимости. При этом для глубоко расположенных объектов (внутри зданий, в подземных сооружениях) целесообразно использовать локальные решения или увеличивать плотность установки шлюзов.

Во-вторых, особое внимание должно уделяться помеховой обстановке. При проектировании городских LoRaWAN-сетей рекомендуется проводить предварительный анализ загруженности спектра и, по возможности, согласовывать частотные планы и режимы работы между различными сетями [7]. Использование адаптивной регулировки скорости и мощности передачи (ADR) в соответствии с [1, 2] позволяет частично разгрузить эфир за счёт перевода близко расположенных устройств на более высокие скорости и меньшую мощность.

В-третьих, при планировании масштаба сети необходимо учитывать ёмкостные ограничения. Как показывают данные [4, 7], увеличение числа конечных устройств требует пропорционального роста числа шлюзов или сокращения частоты передачи сообщений. В противном случае вероятность коллизий и потерь пакетов может превысить допустимые значения для целевого приложения.

Заключение

В статье рассмотрены особенности применения протокола LoRaWAN для организации сетей связи Интернета вещей в условиях городской застройки на основе отечественных нормативных и научно-технических источников. Показано, что наличие национальной спецификации LoRaWAN RU [1] и развитие работ по стандартизации Интернета вещей [5, 6] создают предпосылки для широкого внедрения

LoRaWAN-сетей в России, в том числе в составе городских инфраструктурных проектов.

Обобщение результатов экспериментальных исследований [2, 3] и практических внедрений [4] позволяет сделать следующие выводы:

1. Реальная дальность и качество связи в городских LoRaWAN-сетях существенно зависят от высоты и места установки шлюзов, а также от характера городской застройки; для обеспечения устойчивого покрытия требуется более плотное размещение базовых станций по сравнению с сельской местностью.

2. Помеховая обстановка в частном диапазоне, характерная для крупных городов, оказывает значимое влияние на надёжность доставки сообщений и требует учёта при выборе частотного плана и параметров сети.

3. Ёмкостные ограничения, связанные с механизмом доступа к среде и нормативными ограничениями по времени использования эфира, накладывают требования на управление трафиком и масштабирование сети; при массовом подключении устройств необходимы меры по разгрузке отдельных шлюзов и расширению инфраструктуры.

4. При соблюдении отечественных стандартов [1] и рекомендаций, основанных на результатах исследований [2–4, 7], LoRaWAN является перспективной технологией для реализации широкого спектра городских IoT-сервисов, не предъявляющих экстремально жёстких требований к пропускной способности и задержке передачи данных.

Полученные результаты могут служить основой для разработки отраслевых методических рекомендаций и практических руководств по проектированию и эксплуатации городских LoRaWAN-сетей связи Интернета вещей в Российской Федерации.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 71168–2023. Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU. - М.: Стандартинформ, 2023. - 58 с.
2. Носов А. Ф. Применимость систем передачи данных с использованием технологии LoRaWAN // Доклады ТУСУР. - 2023. - Т. 26, № 3. - С. 83–88. - DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-83-88.
3. Бобровский В. И., Сусликов Н. В., Кукунин Д. С., Журавель Е. П. Исследование дальности связи линии передачи цифровых сигналов на основе приёмопередатчиков с модуляцией LoRa в условиях помех // Техника средств связи. - 2025. - № 3. - С. 15–25. - DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-15-25.
4. Опыт применения технологии LoRaWAN в городских электрических сетях [Электронный ресурс] // Блог АСУЭ «ЯЭнергетик». — 2024. - Режим

доступа: <https://yaenergetik.ru/blog/lorawan-v-gorodskih-elektricheskikh-setyah/>
(дата обращения: 23.11.2025).

5. Самсонов М. Ю., Гребешков А. Ю., Росляков А. В., Ваяшин С. В. Стандартизация Интернета вещей // Электросвязь. - 2013. - № 8. - С. 10–13.

6. Тихвинский В. О., Коваль В. И., Бочечка Г. А. Перспективы стандартизации интернета вещей в международных организациях связи // Первая миля. - 2017. - № 2 (63). - С. 26–32. - DOI: 10.22184/2070-8963.2017.63.2.26.32.

7. Барсков А. Сети для IoT: LPWAN [Электронный ресурс] // Журнал сетевых решений / LAN. — 2016. — № 11. — Режим доступа: <https://www.osp.ru/lan/2016/11/13050722> (дата обращения: 23.11.2025).

УДК 004.94; ГРНТИ 28.17.19

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ

Н.Д. Сивов, В.А. Волченков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, sivovnik@gmail.com*

Аннотация. В работе проведено исследование функциональных возможностей отечественной среды визуального моделирования SimInTech применительно к задачам проектирования цифровых систем связи. Выполнено сравнительное анализирование доступных инструментов моделирования по сравнению с MATLAB Simulink. В качестве тестовой модели во всех средах была построена идентичная схема на основе модуляции QAM-64 с каналом AWGN и неизвестным фазовым сдвигом. Проведён анализ формируемых сигнально-кодовых созвездий и вероятностей битовой ошибки с коррекцией фазового сдвига и без неё.

Ключевые слова: SimInTech, Simulink, QAM-64, AWGN, фазовая коррекция, системы связи.

STUDY OF THE CAPABILITIES OF THE DOMESTIC SIMINTECH MODELING ENVIRONMENT FOR DIGITAL NETWORK DESIGN

N.D. Sivov, V.A. Volchenkov

Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, sivovnik@gmail.com

Abstract. The study investigates the functional capabilities of the domestic visual modeling environment SimInTech for designing digital communication systems. A comparative analysis of the available modeling tools is performed in relation to MATLAB Simulink. As a test model, an identical scheme based on 64-QAM modulation with an AWGN channel and an unknown phase offset was constructed in all environments. An analysis of the resulting signal constellations and bit-error probabilities, both with and without phase-shift correction, is presented.

Keywords: SimInTech, Simulink, QAM-64, AWGN, phase correction, communication systems.

Введение

В рамках выполнения научно-исследовательской работы (НИР) основной задачей было провести анализ и сравнение функциональных возможностей отечественной среды математического моделирования SimInTech [1] в сравнении с MATLAB Simulink [2] в возможностях моделирования и анализа цифровых систем связи. Сравнивалось количество имеющихся блоков для моделирования и их функционал и настройки. В качестве тестового образца в каждой среде собиралась одинаковая схема цифровой системы связи на основе QAM-64 с AWGN-каналом связи и неизвестным смещением фазы. Основной задачей было собрать на приемной стороне блок оценки смещения и исправления фазового сдвига.

Блоки в средах моделирования

В обеих средах имеется своя библиотека "Системы связи". Все блоки разбиты по группам внутри библиотек. Ключевое отличие - в наличии или отсутствии различных блоков. На рисунке 1 представлены все подразделы каждой среды. Для сравнения на рисунках 2-3 представлены блоки из подразделов "Источники" и "Каналы". Как видно, SimInTech предоставляет базовый набор из генератора случайных чисел Бернулли и АБГШ-канала. В случае с Simulink библиотека каналов дополняется SISO и MIMO каналом, а также большим числом

различных генераторов последовательностей. На рисунках 4-7 представлены блоки других разделов библиотеки “Системы связи” в среде SimInTech. К ним относятся различные кодеры, модуляторы и демодуляторы, измерительные приборы и скремблер.

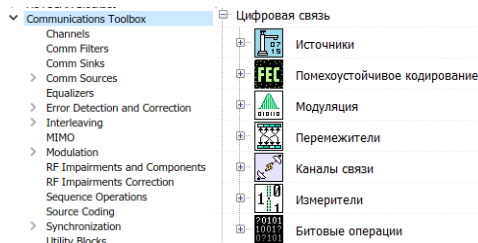


Рис. 1. Библиотеки блоков “Системы связи”

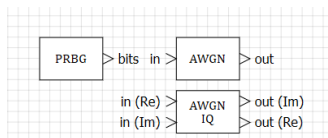


Рис. 2. Блок ГСЧ Бернули и канала АБГШ в среде SimInTech

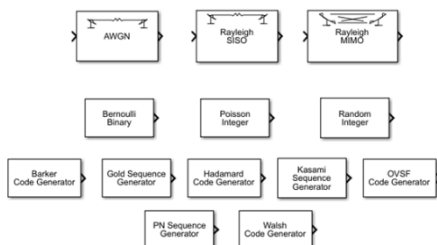


Рис. 3. Набор блоков источников и каналов в среде Simulink

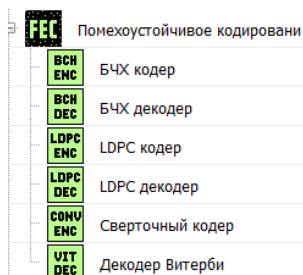


Рис. 4. Набор блоков раздела "Помехоустойчивое кодирование" библиотеки "Цифровая связь" в среде SimInTech

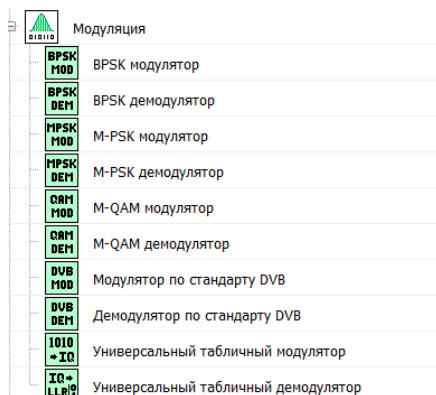


Рис. 5. Набор блоков раздела "Модуляция" библиотеки "Цифровая связь" в среде SimInTech

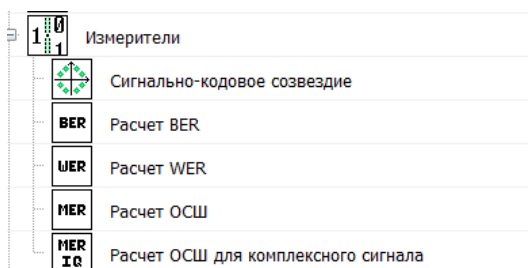


Рис. 6. Набор блоков раздела "Измерители" библиотеки "Цифровая связь" в среде SimInTech

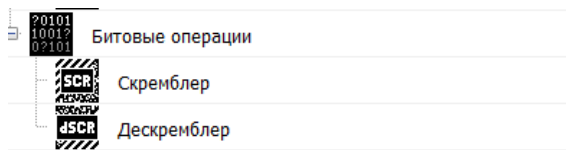


Рис. 7. Набор блоков раздела "Битовые операции" библиотеки "Цифровая связь" в среде SimInTech

QAM-64

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ, QAM, Quadrature Amplitude Modulation) – это метод модуляции, при котором передаваемый сигнал формируется путем изменения как амплитуды, так и фазы несущей волны. В отличие от чисто амплитудной или фазовой модуляции QAM использует две ортогональные (в квадратуре) несущие, обычно синус и косинус, и кодирует информацию в их амплиту-

дах. Большое число точек созвездия обеспечивает большее число переносимых бит в одном символе, то есть большую скорость, но вместе с тем меньшее расстояние между точками в созвездии, что повышает требования к качеству канала связи, компенсации помех, рассогласований и другим параметрам передачи. Например, QAM-64 - 64 точки в созвездии, каждой точке соответствует своя комбинация из 6 бит, т.е. один IQ-символ в канале связи способен перенести 6 бит информации. Однако ввиду того, что расстояние между самими точками мало, может добавляться избыточность, из-за чего уже не все 6 бит будут информационными.

Проектирование модели канала связи в среде Simulink

В качестве эталона для сравнения выступила среда Simulink. На рисунке 8 представлена схема QAM-64-модуляции с фазовым смещением и анализом BER. Передающая сторона состоит из блока генератора битовой последовательности "Bernoulli Binary Generator", буфера, накапливающего 6 бит, и QAM-модулятора, преобразующего эти 6 бит в один IQ-символ. Канал передачи состоит из блоков "AWGN", добавляющего белый гауссовский шум, и "Phase/Frequency Offset". Данный блок может вносить фазовые и частотные искажения, однако в данной схеме используются только фазовые - для поворота созвездия. Приемная сторона состоит из блока оценки смещения фазы (его структура изображена на рисунке 9), демодулятора и блока вычисления битовой ошибки. На рисунке 10 изображено сигнально-кодовое созвездие QAM-64 на выходе модулятора, после канала связи на приемнике и после коррекции фазы. Из значений на рисунке 8 видно, что при отсутствии блока коррекции фазы вероятность ошибки составляет 0.15, в то время как с коррекцией - примерно 10^{-5} .

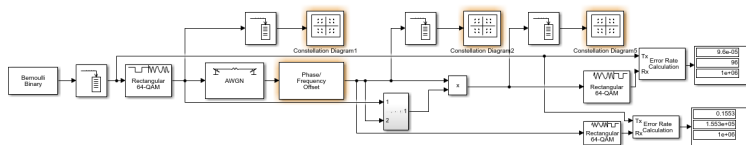


Рис. 8. Модель канала в среде Simulink

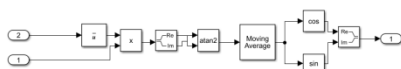


Рис. 9. Модель подсистемы оценки фазы

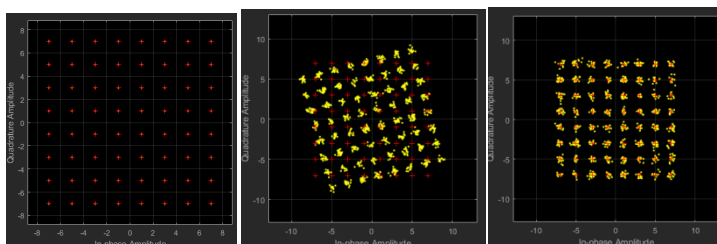


Рис. 10. СКК QAM-64

Проектирование модели канала связи в среде SimInTech

SimInTech - среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев. В SimInTech отсутствует часть блоков, необходимых для построения модели, в частности аналога "Phase/Frequency Offset" и блоков, необходимые для построения модуля коррекции фазы. Однако, поворот фазы можно задать в самом QAM-модуляторе, что будет имитировать её поворот в канале, так как на приеме можно выставить нулевой угол поворота. Для решения второй проблемы SimInTech предоставляет возможность использовать программируемый блок, функционала которого на данном этапе достаточно. На рисунке 11 представлена схема в среде SimInTech. Блоки "atan2", "Moving Average" и умножение комплексных чисел заменены программируемыми блоками; пример такого блока для функции "atan2" изображен на рисунке 12. Аналогично другим средам, на рисунке 13 представлены сигнально-кодовые созвездия QAM-64 в различные моменты времени. Из рисунка 11 видно, что при отсутствии коррекции фазы вероятность битовой ошибки равна примерно 0.14, что практически равно значению в Simulink. Небольшое отклонение, связано с тем, что угол поворота созвездия в SimInTech задается в радианах, а в Simulink в градусах.

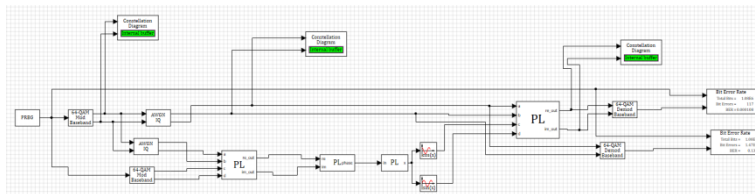


Рис. 11. Модель канала в среде SimInTech

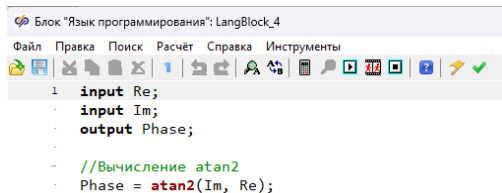


Рис. 12. Программируемый блок для функции "atan2"

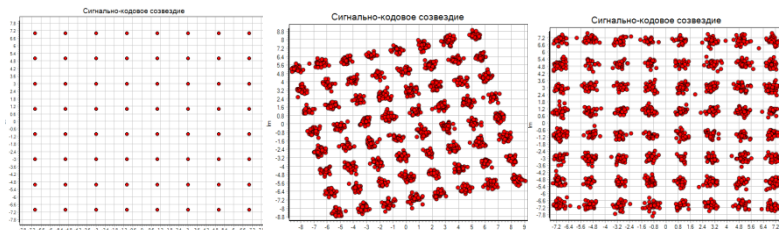


Рис. 13. СКС QAM-64

Заключение

По результатам проведённого исследования, был сделан вывод, что отечественная среда SimInTech на данном этапе предоставляет весь необходимый функционал как для реализации помех, в виде AWGN канала и фазового смещения, так и для их исправления. Наличие программируемого блока позволяет реализовать необходимый функционал в случае, если понадобятся дополнительные блоки.

Библиографический список

1. SimInTech: [сайт]. – URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 16.11.2025).
2. MATLAB: [сайт]. – URL: <https://www.mathworks.com> (дата обращения: 16.11.2025).

УДК 621.317; ГРНТИ 47.14.17

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

В.Г. Мишустин, А.Г. Романов, В.В. Савелов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, vgmish@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрена задача детектирования быстропротекающих переходных процессов в полупроводниковых структурах. Разработан высокоскоростной прецизионный усилитель на базе операционного усилителя AD8066AR. Приведены результаты схемотехнического моделирования, подтверждающие характеристики схемы. Разработана печатная плата усилителя.

Ключевые слова: полупроводниковые структуры; переходные процессы, прецизионный усилитель, схемотехническое моделирование.

DEVELOPMENT OF A HIGH-SPEED PRECISION AMPLIFIER FOR DETECTING TRANSIENT PROCESSES IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES

V.G. Mishustin, A.G. Romanov, V.V. Savolov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, vgmish@yandex.ru*

Abstract. The problem of detecting fast transient processes in semiconductor structures is considered. A high-speed precision amplifier based on the AD8066AR operational amplifier is developed. Circuit simulation results are presented, confirming the circuit's characteristics. A printed circuit board for the amplifier is designed.

Keywords: semiconductor structures; transient processes, precision amplifier, circuit simulation.

Введение

Современная полупроводниковая электроника характеризуется постоянной тенденцией к миниатюризации, увеличению быстродействия и повышению энергоэффективности устройств. В этих условиях критически важным становится точный и оперативный анализ переходных процессов, которые протекают в полупроводниковых приборах при переключении, изменении режимов работы или воздействии внешних факторов, таких как оптическое излучение. Эти процессы

несут ключевую информацию о динамических характеристиках, быстрой реакции и надежности устройств.

Однако детектирование переходных процессов сопряжено со значительными техническими трудностями. К ним относятся малая длительность процессов (нано- и пикосекунды), слабая амплитуда сигналов, высокий импеданс исследуемых структур, а также влияние шумов и помех [1]. Для преодоления этих проблем требуются специализированные усилители, обладающие такими свойствами как широкая полоса пропускания, высокий коэффициент усиления, низкий уровень собственных шумов, а также высокое входное сопротивление.

Целью данной работы является разработка высокоскоростного прецизионного усилителя, оптимизированного для исследований быстропротекающих переходных процессов в полупроводниковых барьерных структурах, в том числе и на основе неупорядоченных полупроводников.

Разработка усилителя для детектирования быстропротекающих переходных процессов

Разработка требований к усилителю. Разрабатываемый усилитель предназначен для работы в измерительной ячейке исследовательской установки, реализующий одну из разновидностей времяпролетного метода – метода компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) [2]. Усилитель подключается к тестовому образцу через прецизионный резистор и выполняет две ключевые функции:

1. Передача слабого тока нестационарной фотопроводимости, возникающего в исследуемом образце при оптическом возбуждении, с минимальными искажениями.
2. Преобразование и усиление сигнала с фотодиода, фиксирующего световой поток.

Исходя из этого, к усилителю предъявляются следующие требования [3]:

- Высокое быстродействие – полоса пропускания должна охватывать диапазон частот, соответствующий длительностям переходных процессов в полупроводниках (до единиц наносекунд).
- Низкий уровень собственных шумов – для детектирования слабых сигналов необходимо минимизировать собственный шум усилителя.
- Высокий входной импеданс – для минимизации искажений измеряемого сигнала необходимо, чтобы входное сопротивление усилите-

ля минимум на порядок превосходило собственное сопротивление исследуемого образца.

- Стабильность параметров – характеристики усилителя должны оставаться неизменными в широком диапазоне температур.

Разработка принципиальной схемы и моделирование. В качестве ключевого элемента усилительной схемы был выбран операционный усилитель (ОУ) AD8066AR. Данный ОУ обладает рядом преимуществ, делающих его идеальным для решения поставленной задачи:

- Широкая полоса пропускания: 145 МГц (при коэффициенте усиления –3 дБ).
- Высокая скорость нарастания: 180 В/мкс.
- Низкое напряжение входного смещения: до 1 мВ.
- Низкий уровень собственных шумов.
- Широкий диапазон рабочих температур: от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.
- Широкий диапазон напряжений питания: от 4 В до 24 В [4].

Принципиальная схема усилителя была разработана в среде Altium Designer [5]. Резисторы в электрической схеме выполняют функцию нагрузочных и задают режим работы операционного усилителя. Их номиналы подобраны таким образом, чтобы обеспечить коэффициент усиления сигнала, равный 3,5. К конденсаторам и резисторам предъявлялось требование минимального температурного коэффициента для обеспечения стабильности работы схемы.

Для верификации работы схемы было проведено схемотехническое моделирование в программе MicroCAP 12 [6]. Анализ амплитудно-частотной характеристики подтверждает, что разработанный усилитель обладает широкой полосой пропускания, удовлетворяющей требованиям по быстродействию (рисунок 1). Анализ переходных процессов демонстрирует четкую реакцию усилителя на входной сигнал, отсутствие выбросов и искажений, что свидетельствует о корректной работе схемы.

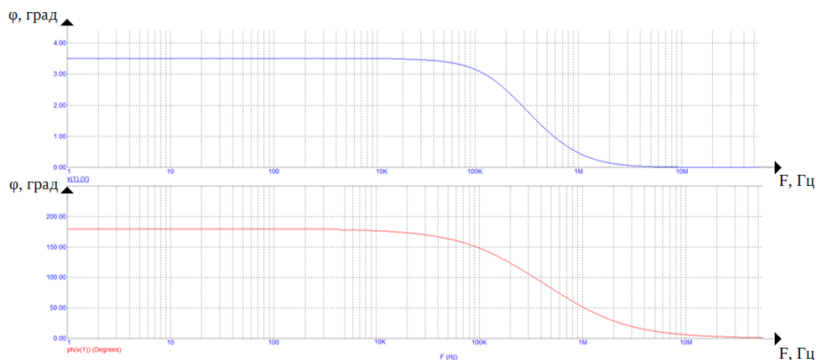


Рис. 11. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Проектирование печатной платы. На этапе разработки печатной платы усилителя были поставлены следующие цели:

- Минимизация паразитных емкостей между соединительными дорожками, которые ограничивают быстродействие схемы.
- Обеспечение качественных электрических контактов.
- Соблюдение габаритных размеров 50×50 мм.

Разработка проводилась в САПР Altium Designer [5] и EasyEDA [7]. Были созданы локальные библиотеки посадочных мест для всех используемых компонентов (резисторы, конденсаторы, ОУ). На этапе компоновки было выбрано оптимальное расположение компонентов, соответствующее минимально возможным значениям длины высокочастотных трактов.

После трассировки верхнего и нижнего слоев была проведена проверка проекта на соответствие технологическим нормам, которая не выявила критических ошибок (коротких замыканий, недостаточных зазоров и т.д.). На рисунках 2 и 3 представлены результаты трассировки и 3D-модель разработанной печатной платы усилителя.

В качестве материала для печатной платы был выбран фольгированный стеклотекстолит, обладающий хорошими изоляционными свойствами, термостойкостью, низким влагопоглощением и простотой механической обработки. Для подключения исследуемых образцов предусмотрено использование специальных разъемов, что исключает необходимость пайки и снижает риск повреждения как исследуемых образцов, так и измерительной схемы.

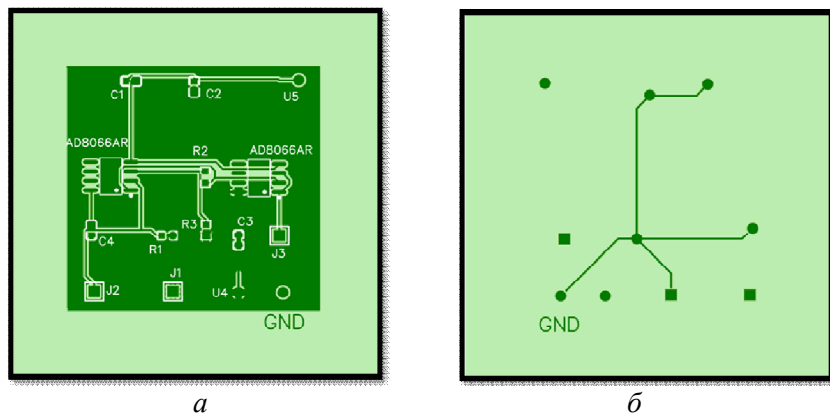


Рис. 2. Трассировка печатной платы в САПР EasyEDA:
а – верхний слой; б – нижний слой

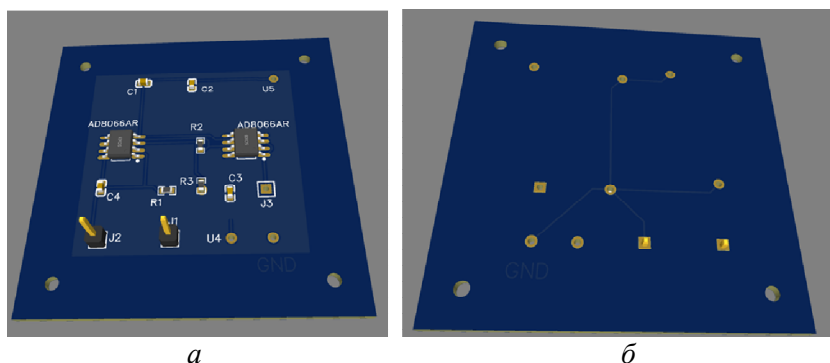


Рис. 3. 3D-модель печатной платы в САПР EasyEDA:
а – верхний слой; б – нижний слой

Заключение

В рамках работы был проведен комплексный анализ задач, связанных с детектированием переходных процессов в полупроводниковых структурах, и разработан высокоскоростной прецизионный усилитель на базе операционного усилителя AD8066AR. Характеристики разработанной схемы были подтверждены результатами схемотехнического моделирования. Спроектирована печатная плата усилителя. Таким образом, разработанное устройство позволяет фиксировать быстропротекающие переходные процессы с малой амплитудой.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. А.Г. Романов Особенности измерения переходных процессов в полупроводниковых барьерных структурах с низкой подвижностью носителей заряда // Сб. тез. докл. XXIV меж-дунар. конф. ст., асп., и мол. уч. по фундамент. наукам «Ломоносов-2017». Секц. «Физика». Подсекц. «Физика твердого тела» Москва: Физ. фак-т МГУ, 2017. С. 616 – 618.
2. В.Г. Мишустин, А.Г. Романов Метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости для исследования полупроводниковых материалов и барьерных структур на их основе // Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика-2017». Сборник статей. Москва, 2017. С. 123 – 128.
3. В.Г. Мишустин, А.Г. Романов Модернизированная измерительная ячейка для исследования полупроводниковых барьерных структур // Сб. тр. между-нар. науч.-техн. форума СТНО-2018 Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018. Т. 2. С. 133 – 138.
4. Техническое описание AD8066AR – Analog Devices. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/225513/AD/AD8066AR.html> (дата обращения 08.11.2025).
5. Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в Altium Designer. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
6. Кобрин Ю.П. Знакомство с САПР Micro-Cap v12 Evaluation. Учебное пособие. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – 55 с.
7. К.Н. Абрамова, А.В. Медведев, О.М. Кузнецова-Таджибаева Проектирование печатных плат в САПР EASYEDA: методические указания к практическим работам. – Томск: ТУСУР, 2024. – 76 с.

УДК 621.391.82; ГРНТИ 49.03.03

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ МОБИЛЬНОГО ПРИЕМНИКА И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ УЗЛОВ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ С ПОТЕРЯМИ

М.В. Грачев, Ю.Н. Паршин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, parshin.y.n@rsreu.ru*

Аннотация. Исследуется оптимизация траектории ретрансляции сигнала в сети устройств при удаленном расположении отдельных устройств от пункта обработки. Проводится модификация алгоритма оптимизации траектории ретрансляции сигнала в сети сенсорных устройств с учетом траектории и потерь в неоднородной среде. Даются рекомендации по выбору алгоритма оптимизации структуры информационной сети с учетом взаимной связи и особенностей распространения сигнала в неоднородной сплошной среде с потерями.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, сенсорный узел, мобильный приемник, неоднородная среда, маршрутизация, энергоэффективность.

OPTIMIZATION OF MOBILE RECEIVER TRAJECTORY AND SENSOR NODES POSITIONING IN A HETEROGENEOUS ENVIRONMENT WITH LOSSES

M.V. Grachev, Yu.N. Parshin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, parshin.y.n@rsreu.ru*

Abstract. This paper explores the optimization of signal relay trajectories in a network of devices when individual devices are located remotely from the processing point. A modification to the algorithm for optimizing signal relay trajectories in a network of sensor devices is being conducted, taking into account the trajectory and losses in a heterogeneous environment. Recommendations are given for choosing an algorithm for optimizing the structure of an information network, taking into account the interconnection and characteristics of signal propagation in a heterogeneous continuous medium with losses.

Keywords: wireless sensor network, sensor node, mobile receiver, heterogeneous environment, routing, energy efficiency.

Введение

В настоящее время беспроводная сенсорная сеть (БСС) стала мощным инструментом для решения многих задач современности. Наблюдение за полем боя и дорожным движением, сельское хозяйство и мониторинг окружающей среды, умные дома и умные города, требуют определенного протокола передачи информации для выполнения целевой задачи. БСС состоит из множества сенсорных узлов (СУ) вместе с одним или несколькими приемниками, где приемники имеют неограниченные источники энергии, а СУ работают от автономных источников питания, которые имеют ограниченный ресурс. Поэтому наряду с производительностью и памятью процессора основным ограничением в СУ является емкость аккумулятора. БСС состоит из сотен или тысяч сенсорных узлов, организованных ad-hoc образом для достижения заранее определенной цели. Передача данных от СУ к приемнику осуществляется посредством формирования динамической топологии. Чем ближе к приемнику располагаются СУ тем быстрее расходуется энергия их источников питания из-за большой нагрузки. В результате эти СУ становятся неработоспособными («мертвыми»), что влияет на производительность срока службы сети в целом. Для решения этой проблемы предлагается концепция мобильной беспроводной сенсорной сети (МБСС). В МБСС приемник может перемещаться пространстве относительно СУ и, таким образом, собирать данные с каждого из СУ. В работе БСС может возникнуть ситуация, называемая «энергетическая дыра», когда СУ активен, но не может отправлять данные вследствие малого уровня энергии источника питания. Для решения этой проблемы может также использоваться МБСС. В работе [1] предлагается использовать мобильный приемник (МП) информации, который может перемещаться по фиксированным или случайным траекториям для сбора данных от СУ. Проведен сравнительный анализ различных стратегий расположения МП: МП на границах, 4 фиксированных местоположения в регионе, случайное местоположение в регионе, фиксированный путь в регионе. В результате установлено, что при статистическом подходе СУ становятся «мертвыми» в 2246 раундах, при расположении на границах – в 2593 раундах, при расположении в фиксированных точка – в 4827 раундах, Все СУ становятся мертвыми в 11568 раундах при случайном расположении, и в 11513 раундах при фиксированном расположении. Таким образом, фиксиро-

ванное или случайное расположении увеличивают срок службы сети в 4...5 раз.

В работе [2] рассматриваются алгоритмы, использующие свойство мобильности в БСС, как подмножество и предшественника IoT. Предлагается использовать МБСС для беспроводной передачи энергии, обнаружения неисправностей сети и оценки алгоритмов в реальных условиях и на испытательном стенде.

В работе [3] для продления срока службы аккумуляторов предлагается использовать контролируемую мобильность приемника информации, предлагается набор алгоритмов для определения координат местоположения приемника и параметров принятия решений о движении. Для улучшения срока службы сети предлагается алгоритм построения топологии с балансировкой нагрузки. Представлены результаты сравнения производительности предложенных и известных компонентов схемы мобильности в случаях случайного движения и фиксированного расположения приемника.

В работе [4] предлагается протокол многорегиональной мобильной маршрутизации для минимизации энергопотребления, повышения стабильности и увеличения срока службы сети за счет реализации многоадресной связи между кластерами и базовой станцией (БС) через узлы маршрутизации, при этом СУ используют кратчайший путь маршрутизации для передачи данных на БС. Произведено сравнения производительности предложенного энергоэффективного протокола маршрутизации и производительности известной региональной мобильной маршрутизацией (МБСС). Показано, что предлагаемый протокол лучше МБСС на 12 % по стабильности сети и энергосбережению, имеет больший срок службы сети на 27 % и пропускную способность на 80 %.

В работе [5] кластеризация используется как эффективный метод для достижения масштабируемости, самоорганизации, энергосбережения, доступа к каналам, маршрутизации БСС. Кластеризация может использоваться для балансировки нагрузки, что позволяет продлить срок службы сенсорной сети за счет снижения энергопотребления. Предложен метод кластеризации, который будет балансировать нагрузку между кластерами за счет использования нескольких резервных узлов, обладающих большой энергией и производительностью процессора. Резервные заменяют головной узел кластера после того, как размер кластера достигает своего порогового предела.

В работе [6] представлена математическая модель МБСС, работающая с известным протоколом маршрутизации. Мобильность приемного узла определяется на основе значения определённого пребывания, которая определяется как близость приемного узла к месту назначения. Мобильность приемного узла заключается в равномерном распределении нагрузки соседних приемных узлов для балансировки уровня энергии и делегирования ответственности соседней приемного узла между сенсорными узлами.

В статье [7] представлен обзор разработанных методов, использующих мобильность сенсорных узлов и/или приемников(-ов) для эффективного увеличения срока службы МБСС. Алгоритмы маршрутизации классифицируются по категориям, в которых МБСС оснащена мобильными СУ, одним мобильным приемником или несколькими мобильными приемниками. Подробно рассматриваются и описываются способы управления мобильными приемниками для повышения энергоэффективности сети.

В статье [8] предлагается кластерный подход для увеличения срока службы и пропускной способности гетерогенных БСС. Предлагаемый подход объединяет прямую передачу данных на базовую станцию с передачей данных головным узлом кластера в БСС. Предложено усовершенствовать часть, до 10% СУ и выделить им вдвое больше энергии по сравнению с обычными. Установлено, что при увеличении числа усовершенствованных СУ свыше 30% срок службы и пропускная способность сети начинают снижаться. Поэтому предлагаемое решение с 10% усовершенствованных СУ можно считать оптимальным для повышения пропускной способности сети и срока службы беспроводных сенсорных сетей. В статье [9, 12, 13] рассматриваются различные методы увеличения срока службы БСС. Так как СУ имеют небольшие размеры, экономичны, маломощны, то ресурс их аккумулятора ограничен.

Целью работы является исследование возможности оптимизации траектории приемника и расположении беспроводных сенсоров в неоднородной среде с потерями.

Постановка задачи

Модель неоднородной сплошной среды можно задать в виде слоистой структуры [13], в которой изменение свойств среды задается в направлении только одной из осей прямоугольной системы координат. Значения параметров среды в перпендикулярных выбранной оси

плоскостях остаются постоянными. При моделировании распространения ЭМВ (электромагнитных волн) в сплошных неоднородных средах часто используется приближение геометрической оптики, что позволяет свести распространение ЭМВ к нахождению соответствующих траекторий лучей. Например, лучевые методы представляют собой традиционный инструмент для моделирования ионосферного распространения коротковолновых радиоволн [15].

В работе [16] моделирование траекторий распространения ЭМВ в сплошной неоднородной среде проводится с использованием лучевой модели, учитывающей многократное преломление сигнала на границах раздела слоев среды. Если среда обладает проводимостью $\sigma > 0$, то относительная диэлектрическая проницаемость среды

$$\varepsilon'_k = \varepsilon' - j \frac{\sigma \lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx \varepsilon' - j60\sigma\lambda = \varepsilon' - jE,$$

где E - коэффициент проводимости. Помимо этого становится комплексным показатель преломления $n_k = \sqrt{\mu_k \varepsilon_k}$, волновое сопротивление среды распространения. При распространении ЭМВ в проводящей среде на расстояние r ее амплитуда уменьшается по экспоненциальному закону [17]:

$$\tau = \frac{E_1}{E_2} = \frac{2Z_2 \cos \phi}{Z_1 \cos \phi + Z_2 \cos \psi} e^{-\frac{\omega |p| r}{c}},$$

где E_1 , E_2 - амплитуды электрических векторов падающей и прелом-

ленной ЭМВ, $Z_{ik} = \sqrt{\frac{\mu_{ik} \mu_0}{\varepsilon_{ik} \varepsilon_0}}$ - волновые сопротивления сред распространения падающей $i=1$, и преломленной $i=2$ волн, ε_0 , μ_0 - электрическая и магнитная постоянные, ω - угловая частота,

$$p = \sqrt{\frac{\varepsilon'_k}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{60\sigma\lambda}{\varepsilon'_k}\right)^2} - 1}$$

- коэффициент затухания. Величина магнитной проницаемости слоев сплошной среды и диэлектрической проницаемости среды полагаются постоянными и равными $\mu=1$ и $\varepsilon=1$ соответственно. Пропускательная способность среды T опре-

деляет отношение интенсивностей преломлённой и падающей волн и связана с амплитудным коэффициентом преломления τ :

$$T = \frac{Z_1 \cos \varphi}{Z_2 \cos \psi} |\tau|^2.$$

В соответствии с лучевой теорией [17] канальные коэффициенты матрицы **H** определяются как среднее значение комплексных коэффициентов преобразования электрического поля в каждом луче

$$h_{nm} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{r=1}^{M_{nm}} \sqrt{T_{nm}(r)} e^{j\phi_{nm}(r)},$$

где M – общее число лучей, излучаемых каждой передающей антенной, M_{nm} – число лучей, попадающих на эффективную площадь n -й приемной антенны от m -й передающей антенны, $T_{nm}(r)$ – пропускательная способность лучей, попадающих в апертуру приемной антенны, $\phi_{nm}(r)$ – сдвиг фазы сигнала в каждом из лучей, учитывающий геометрию расположения элементов.

В данной работе рассматривается неоднородная среда с вертикальными слоями с различной проводимостью. Выражение для коэффициента проводимости каждого слоя имеет вид:

$$E = \text{Im} \{ \varepsilon'_k(k) \} = E_{\text{нач}} + \Delta_y k, \quad E(k) > 0,$$

где $E_{\text{нач}}$ – начальное значение коэффициента проводимости для слоя с номером $k=0$. Коэффициент Δ_y описывает дискретное изменение коэффициента проводимости в зависимости от номера слоя.

Рассматривается беспроводная сенсорная сеть, состоящая из N сенсорных узлов, расположенных в некоторой области. Положение i -го узла задается вектором координат $s_i = (x_i, y_i)$. Каждый узел обладает ограниченным энергетическим ресурсом $E_i(0)$ и генерирует фиксированный объем данных B_i . Узлы взаимодействуют с МП по радиоканалу, имеющим ограниченный радиус связи R . В сплошной однородной среде с проводимостью при использовании всенаправленной антенны радиус связи является имеет одинаковую величину для

всех направлений, а мощность сигнала уменьшается экспоненциально одинаково во всех направлениях. В неоднородной среде условия распространения неодинаковы во всех направлениях, поэтому величина радиуса связи зависит от направления передачи, а также от пространственного положения приемника и передатчика.

Положение МП в некоторый момент времени описывается непрерывной траекторией:

$$\mathbf{p}(t) = (x(t), y(t), t \in [0, T]),$$

где T - время сбора данных. Прием данных от i -го узла возможен тогда, когда выполняется условие радиовидимости:

$$\|\mathbf{p}(t) - \mathbf{s}_i\| \leq R$$

Пусть затраты энергии i -го узла на передачу сообщения объемом k бит на расстоянии d равны E_{TX} , тогда остаточная энергия на узле $E_i^{\text{res}} = E_i(0) - E_{\text{TX}}$. Узел считается работоспособным, если $E_i^{\text{res}} > 0$. Время жизни сети определяется моментом выхода из строя первого узла:

$$T = \min_i \{t : E_i(t) = 0\}$$

Требуется найти такую траекторию МП $\mathbf{p}(t)$ которая максимизирует время жизни сети при ограничении энергии узлов.

Результаты численного анализа

Для оптимизации траектории движения МП в неоднородной среде требуется учет влияния свойств среды на величину зоны радиовидимости приемника и передатчика. Проведено исследование радиуса связи и особенностей распространения радиосигнала в слоистой неоднородной среде с дискретно изменяющейся проводимостью. Рассчитаны канальные коэффициенты для неоднородной сплошной среды с изменяющейся проводимостью. При моделировании предполагается наличие $K = 500$ слоев толщиной $\delta y = 0,02\lambda$ в диапазоне координат по вертикальной оси $y = 0, \dots, 10\lambda$. Коэффициент проводимости E изменяется линейно в заданном диапазоне $E_{\min} \dots E_{\max}$. Заданы координаты

наты передающего сенсора $x_{\text{ТХ}} = 5\lambda$, $y_{\text{ТХ}} = 5\lambda$. Для исследования анизотропных свойств распространения сигнала построены концентрические линии равной мощности на приемной стороне в зависимости от координат МП. Приемные и передающие антенны являются всенаправленными. На рисунке 1 показаны изолинии модуля канального коэффициента для плоского случая расположения передающего сенсора и МП для случаев однородной а) и неоднородной б) сред.

Результаты расчета показывают, что в неоднородной среде изолинии мощности приобретают вытянутую форму вдоль слоёв, что обусловлено разной степенью затухания сигнала в направлениях с отличающимися коэффициентами проводимости. Увеличение проводимости приводит к уменьшению эффективного радиуса связи, при котором сохраняется условие радиовидимости.

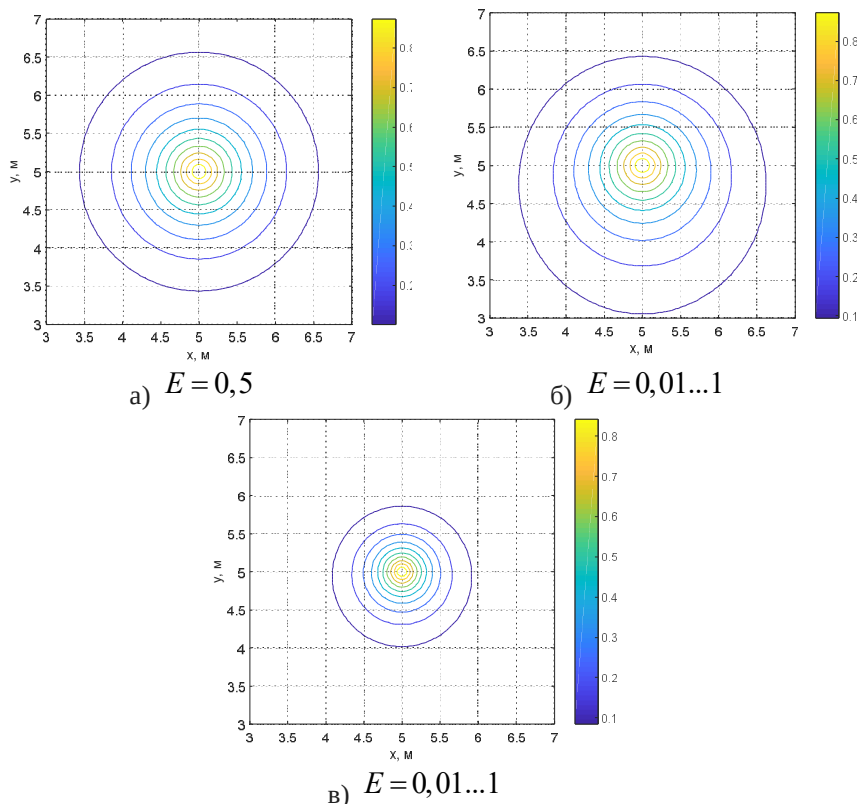


Рис 1. Изолинии модуля канального коэффициента

Выводы

Результаты проведенных исследований подтвердили существенное влияние пространственной неоднородности среды на параметры радиосвязи между сенсорными узлами и МП. Установлено, что изменение проводимости вертикальных слоёв приводит к деформации области радиовидимости. Таким образом, структура неоднородной среды, взаимное положение узлов сети, МП влияет на энергетические затраты узлов, время жизни сети и устойчивость канала связи. Полученные результаты необходимо учитывать при оптимизации траектории движения МП, энергоэффективного позиционирования узлов сети, а также траекторий передачи информации внутри сети в неоднородной среде с потерями. Согласование решение этих задач с учетом свойств неоднородной среды обеспечивает увеличение времени жизни сети и повышение надёжности передачи данных.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 24-29-00850, <https://rscf.ru/en/project/2429-00850/> в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Ahlawat N.1, Kaur J. A mobility based approach to strengthen the network lifetime of wireless sensor networks in 3D region // International journal of sensors, wireless communications and control, 2024, #1, vol.14, pp. 36-44.
2. Natalie Temene, Charalampos Sergiou, Chrysis Georgiou, Vasos Vassiliou, A Survey on Mobility in Wireless Sensor Networks, Ad Hoc Networks, Volume 125, 2022, pp. 1-17.
3. Metin Ko. Algorithms for sink mobility in wireless sensor networks to improve network lifetime. Bilkent university. A thesis for the degree of master of science. 2008. 65 p.
4. Mohammed F. Suleiman, Usman Adeel. An Energy Efficient Multi-Region Based Mobile Routing Protocol to Improve Network Lifetime in Wireless Sensor Networks // Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2023) 19-20 July 2023, Tenerife, Canary Islands, Spain.
5. Dirak Wajgi, Nileshtsingh V. Thakur. Load balancing based Approach to improve lifetime of wireless sensor network // International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 4, No. 4, August 2012, pp. 155—167.
6. Mohit Kumar, Dinesh Kumar, and Md. Amir Khusru Akhtar. Mathematical Model for Sink Mobility (MMSM) in Wireless Sensor Networks to Improve Network Lifetime // Communications in Computer and Information Sci-

ence ((CCIS, volume 839)). Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019 S. Verma et al. (Eds.): CNC 2018, CCIS 839, pp. 133–141, 2019.

7. Linh Nguyen, Hoc T. Nguyen. Mobility based network lifetime in wireless sensor networks: A review // Preprint · June 2019 DOI: 10.48550/arXiv.1906.07063.

8. Hradesh Kumar, Pradeep Kumar Singh. Node Energy Based Approach to Improve Network Lifetime and Throughput in Wireless Sensor Networks // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 2017, Vol. 9 No. 3-6, pp.83-88.

9. Rashmi Deshmukh, Rachana Deshmukh, Rahul S.Khokale. Techniques to Improve Network Lifetime of Wireless Sensor Networks -A Survey // International Journal of Advanced Research in Computer Science, Volume 8, No. 3, March – April 2017, pp. 707-710.

10. Parshin A., Parshin Yu. Investigation of Efficient Receiving of Ultra Low Power Signal for IoT Application // 2019 8nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Budva, Montenegro, June 10th-14th 2019, 842 p. – P. 32-35.

11. Maxim Grachev, Yuri Parshin. Channel Capacity and Efficiency Energy of Small-Size IoT Sensor in MIMO Communication System // 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Budva, Montenegro, June 7th-10th 2022. – P. 151-154.

12. Грачев М.В., Титов А.А. Анализ методов и алгоритмов проектирования энергоэффективных беспроводных сенсоров интернета вещей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 3-13.

13. Паршин Ю.Н., Паршин А.Ю., Грачев М.В. Таксономический анализ энергоэффективной системы передачи информации IoT // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 4. С. 45-49.

14. Coleman C. J. Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation / Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2017.

15. Parshin A. Yu, Grachev M. V. Capacity Estimation for a MIMO Communication Channel in Presence of Noise Complex // 2024 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Budva, Montenegro, June 11th-14th 2024. Pp. 95-98.

16. Паршин Ю.Н., Грачев М.В., Паршин А.Ю. Пропускная способность координированных информационных подсистем в неоднородных сплошных средах с потерями // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: РГРТУ, 2024. – 686 с. С. 127-134.

17. Семенцов Д. И. Основы теории распространения электромагнитных волн: учебное пособие / Д. И Семенцов, С. А. Афанасьев, Д. Г. Санников. – Ульяновск: УлГУ, 2012. – 112 с.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.11

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПОТОКАМИ ЧАСТИЦ НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Д.В. Литвинова*, В.Г. Литвинов**

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, dv_lit@mail.ru*

***Рязанский государственный радиотехнический университет,
Рязань, vglit@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрены вопросы влияния радиации на дефектообразование и качественные характеристики кремниевых полупроводниковых приборов, включая кремниевые гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи.

Ключевые слова: дефекты, облучение, кремний, фотоэлектрический преобразователь.

INFLUENCE OF PARTICLE FLUX IRRADIATION ON THE PARAMETERS OF SILICON SEMICONDUCTOR DEVICES

D.V. Litvinova*, V.G. Litvinov**

**Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
St.Petersburg, dv_lit@mail.ru*

***Razan State Radio Engineering University,
Ryazan, vglit@yandex.ru*

Abstract. This paper examines the influence of radiation on defect formation and quality characteristics of silicon semiconductor devices including silicon heterostructure photovoltaic converters.

Keywords: defects, irradiation, silicon, photovoltaic converter.

Введение

В настоящее время идет бурное развитие телекоммуникационных технологий с использованием околоземного космического пространства. Развитие цифровых технологий связано с успешным освоением новых технологических норм в микроэлектронике, что позволяет получать новую элементную базу с более высокими качественными характеристиками. Однако по-прежнему остается важным вопрос получения элементной базы с повышенной радиационной стойкостью. В данной работе проанализированы и обобщены известные данные о стимулированном радиацией дефектообразовании в кремниевых по-

лупроводниковых структурах и приборах и пути повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов.

Классификация радиационных дефектов в кремнии

Источником радиации в космическом пространстве является Солнце, от которого исходит солнечный ветер – поток квантов электромагнитного излучения, элементарных частиц (протонов, электронов и т.д.), ионов с энергией до нескольких десятков кэВ, а также космические лучи [1]. Отказы в работе полупроводниковых приборов, подвергающихся воздействию ионизирующего излучения, происходят вследствие генерации неравновесных носителей заряда в активных слоях полупроводниковых приборов, образования дефектов в полупроводниковых и диэлектрических слоях, гетерограницах.

Причины отказов принято рассматривать с двух точек зрения: 1) отказы вследствие накопления дозы облучения, 2) отказы, возникающие вследствие попадания отдельных высокоэнергетических частиц, поэтому называемые также одиночными событиями [2].

Накопление дозы облучения приводит к росту времени задержки распространения сигнала в интегральной схеме (ИС), изменению порогового напряжения на затворе полевого транзистора, смещению уровней логического нуля и единицы. При попадании отдельных высокоэнергетических частиц в ИС происходит линейная передача энергии частиц в материал ИС, описываемая величиной LET (Linear energy transfer):

$$LET = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx},$$

где ρ – плотность материала, dE/dx – скорость спада энергии частиц [2]. Вследствие этого может возникнуть тиристорный эффект вследствие ионизации, который затем может самоустраниться без сброса напряжения питания ИС [3], но может потребоваться обязательный сброс питания. Такое событие обозначается как SEL (Single event latch). Также может произойти событие SET (Single event transient) – однократный восстанавливаемый отказ, проявляющийся в кратковременном изменении состояния логического выхода. Частота одиночных событий возрастает с ростом энергии частиц. Возможен также однократный восстанавливаемый сбой памяти SEU (Single event upset) частота которого зависит от порогового уровня величины LET.

Необратимые эффекты также происходят вследствие однократных событий: 1) изменения состояния регистра из-за ионизации SHE (Single event hard error); 2) выход ячейки из строя из-за ионизации SEGR (Single event gate rupture); 3) выход ИС из строя вследствие увеличения тока потребления и перегрева SEB (Single event burnout) [2].

При облучении кремниевых и других полупроводниковых структур возникают собственные дефекты, пары Френеля [1], затем происходит ионизация вследствие захвата носителей заряда на электронные ловушки в объеме и на гетерограницах полупроводниковой структуры. Возможен также обратный эффект – уменьшение концентрации дефектов из-за аннигиляции и отжига дефектов [4].

Для повышения радиационной стойкости используют различные конструктивно-технологические, схемотехнические подходы. Например, в программируемых логических ИС (ПЛИС) загрузочные данные помещают в ячейки памяти ПЛИС. По данным [2] ячейки FLASH и Antifuse гораздо более радиационностойкие, чем SRAM вследствие конструктивных особенностей. В КМОП-структурах на стойкость к отказам первого типа влияют, главным образом, параметры и режимы формирования диэлектрических слоев, поскольку накопление заряженных дефектов в них напрямую влияет на пороговое напряжение и токи утечки.

Кроме вопросов радиационной стойкости кремниевых полупроводниковых приборов и ИС в последнее время наблюдается интерес к влиянию радиационного облучения фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе монокристаллического кремния и на основе гетероструктуры c-Si/ α -Si:H [5]. Данные ФЭП могут быть перспективны для изготовления небольших космических спутников и вывода их на околоземную орбиту.

В [1] нами рассматривались вопросы параметров радиационных дефектах в кремнии, вызванных γ -облучением, облучением электронами, нейтронами, α -частицами. Однако радиационные пояса Земли характеризуются, в основном, наличием излучения преимущественно состоящего из потоков протонов с энергиями до нескольких десятков МэВ и электронов с энергиями в несколько единиц МэВ (таблица 1).

Для изучения воздействия потоков частиц на ФЭП нами был обособлен набор методов комплексного исследования: 1) для изучения электрофизических свойств применять методы измерения температурной зависимости вольт-амперных характеристик (I-V-T) и температурной и частотной зависимости вольт-фарадных характеристик (C-

V-f-T), 2) для изучения спектра собственных и радиационных дефектов применить метод токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (I-DLTS), адаптированный для изучения образцов с увеличенными токами утечки и высокоомных структур [7, 8], 3) для измерения качественной характеристики фотоэлектрического преобразования энергии применить разработанную методику измерения спектральной зависимости квантовой эффективности ФЭП [9].

Таблица 1. Основные параметры составляющих космической радиации [6]

Вид корпускулярного излучения	Состав излучения	Энергия частиц, МэВ	Плотность потока, $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
Галактические космические лучи (ГКЛ)	протоны ядра гелия более тяжелые ядра	102–1015 (для всех групп ядер)	1,5·104 1,0·103 1,2·101
Солнечные космические лучи (СКЛ)	протоны	1–104	107–108
Радиационные пояса Земли (РПЗ)	протоны электроны	1–30 > 30 0,1–1,0 > 1,0	3·1011 2·108 1·1012 1·1010

Нами были исследованы облученные с р+ стороны электронами с одинаковой энергией 1 МэВ и четырьмя разными флюенсами 4·1012, 2·1013, 1·1014 и 5·1014 см-2 гетероструктурные ФЭП на основе n+-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/i-a-Si:H/p+-a-Si:H. Образцы представляли собой фактически двусторонние ФЭП. Результаты исследования показали, что облучение влияет в основном на спектральную зависимость квантового выхода, который уменьшался примерно на 5-10 % для флюенса 4·1012 см-2 и практически спадал до нуля для флюенса 5·1014 см-2 в диапазоне длин волн 400-900 нм, соответствующем поглощению в слоях аморфного гидрогенизированного кремния.

Выводы

Комплексное применение методов I-V-T, C-V-f-T, I-DLTS и метода измерения спектральной зависимости квантовой эффективности позволяет получить информацию о влиянии радиационного облучения на качественные характеристики полупроводниковых приборов.

Полученные экспериментальные данные по результатам комплексных исследований позволяют сделать выводы о меньшей деградации электрофизических характеристик и существенным ухудшением квантовой эффективности ФЭП в результате воздействия потока электронов.

Библиографический список

1. Литвинова Д.В., Литвинова В.С. Радиационные дефекты в полупроводниковых материалах и структурах // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: сб. тр. VIII Междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. С.160-163.
2. Котельников Е. Actel FAQ // Компоненты и технологии. 2010. № 6. С.53-58.
3. Чумаков А.И., Бобровский Д.В., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Сорокоумов Г.С., Швецов-Шиловский И.И.. Механизмы возникновения нестабильных тиристорных эффектов в КМОП ИС // Микроэлектроника, 2019, Т. 48, № 4, стр. 295-299.
4. Денисов А.А., Дорджин Г.С. Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (Практическое применение). Обзор по электронной технике. Серия 7. Технология, организация производства и оборудование. Вып.8 (1202). 1986. 56 с.
5. Литвинов В.Г. Электрофизические свойства облученных протонами и электронами кремниевых гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей. "Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS14)". Материалы XIV Международной конференции: сборник трудов. В 2 ч. Ч. 1. М.: МИЭТ, 2025. С. 110-111.
6. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2010. – 192 с.
7. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 118-123.
8. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Mishustin V.G., Karabanov S.M., Vikhrov S.P., Karabanov A.S. Measuring complex for analysis of recombination deep traps in semiconductor solar cells. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. 2015. С. 1071-1074.
9. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Маслов А.Д., Трусов Е.П., Литвинов В.Г. Квантовый выход двусторонних солнечных элементов типа НІТ //Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54. № 10 (10987). С. 1066-1071.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.33.33

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

И.А. Яцемирский, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Рязань, yailusha03@gmail.com*

Аннотация. В данной работе рассмотрены типы полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. Представлены основные параметры и характеристики современных фотоэлектрических преобразователей, методы их исследования.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, вольт-амперная характеристика, КПД, спектральная чувствительность, выходная мощность.

METHODS OF STUDYING SEMICONDUCTOR PHOTOELECTRIC CONVERTERS

I.A. Yatsemirsky, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, yailusha03@gmail.com*

Abstract. This paper examines the types of semiconductor photovoltaic converters. The main parameters and characteristics of modern photovoltaic converters, as well as their research methods, are presented.

Keywords: photoelectric converter, current-voltage characteristic, efficiency, spectral sensitivity, output power.

Введение

Фотоэлемент (ФЭ) или фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) – электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию. ФЭ подразделяются на электровакуумные и полупроводниковые фотоэлементы. Частным случаем использования ФЭ являются солнечные элементы (СЭ). В настоящее время СЭ являются наиболее важным источником энергии для спутников и космических кораблей при длительных полетах. Также развивается солнечная энергетика на поверхности Земли. Американский изобретатель Чарльз Фриттс в 1883 году создал первый в мире рабочий солнечный элемент на основе селена и тонкого слоя золота. Коэффициент полезного действия составлял около 1 % [1]. Первый солнечный элемент был создан

Чапином, Фуллером и Пирсоном в 1954 г. на основе диффузионного кремниевого р-n-перехода [2].

1. Методы диагностики ФЭП

По данным лаборатории «National Renewable Energy Laboratory» в настоящее время проводятся перспективные разработки в области создания высокоэффективных ФЭП и СЭ на основе нескольких полупроводниковых материалов и структур (таблица 1).

Структура ФЭП включает неоднородные полупроводниковые барьерные слои и контактную систему для сбора и отвода сгенерированных электронов и дырок во внешнюю цепь. Неоднородность структуры может быть получена разными способами: созданием р-n-переходов; созданием гетеропереходов. Возможны комбинации перечисленных способов.

Таблица 1. Эффективность солнечных ФЭП по данным на 2025 г. [3]

Тип материала и структуры	Эффективность ФЭП, %
Многопереходные элементы на основе полупроводниковых соединений АЗВ5	
2-х, 3-х и 4-х переходные ФЭП с концентратором	47,6
3-х и более переходные ФЭП без концентратора	39,5
2-х переходные ФЭП без концентратора	32,9
Однопереходные ФЭП на основе GaAs	
Однокристалльные ФЭП	27,8
Однокристалльные ФЭП с концентратором	30,8
Тонкопленочные кристаллические ФЭП	29,1
ФЭП на основе кристаллического Si	
Однокристалльные ФЭП с концентратором	27,6
Однокристалльные ФЭП без концентратора	26,1
ФЭП на основе мультикристаллического Si	23,3
ФЭП на основе кремниевой гетероструктуры (HIT)	27,8
ФЭП на основе тонкопленочного кристаллического Si	21,2
ФЭП на основе тонкопленочной технологии	
ФЭП на основе CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}(1-x)\text{Se}_2$) с концентратором	23,3
ФЭП на основе CIGS	23,6
ФЭП на основе CdTe	23,1
ФЭП на основе a-Si:H	14,0

Продолжение таблицы 1

ФЭП на основе новых фотоэлектрических технологий (Emerging PV)	
Сенсибилизированные красителем ФЭП	13,0
ФЭП на основе перовскитов	27,0
ФЭП на основе органических полупроводников	19,2
Тандемные ФЭП на основе органических полупроводников	14,2
ФЭП на основе CZTSSe (Cu ₂ ZnSn(S,Se) ₄)	15,8
ФЭП на основе квантовых точек	19,1
Тандемные ФЭП на основе перовскитов	30,1
Гибридные тандемные ФЭП	
ФЭП на основе структуры перовскит/Si	34,9
ФЭП на основе структуры перовскит/органический полупроводник	23,4
ФЭП на основе структуры перовскит/CIGS	26,3
ФЭП на основе структуры A3B5/Si	36,1

1.1 Нагрузочная ВАХ

К основным характеристикам ФЭП относят нагрузочную вольт-амперную характеристику. Вольт-амперная характеристика такого прибора определяется выражением [4]:

$$J_s = \frac{I_s}{A} = qN_cN_v \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) e^{\frac{-E_g}{kT}},$$

где:

J_s - плотность тока насыщения диода;

I_s - ток насыщения диода;

A – площадь прибора;

N_c - эффективная плотность состояний в зоне проводимости;

N_v - эффективная плотность состояний в валентной зоне;

N_A - концентрация акцепторной примеси в р-области диода;

N_D - концентрация донорной примеси в п-области диода;

D_n - коэффициент диффузии электронов;

D_p - коэффициент диффузии дырок;

τ_n - время жизни неосновных носителей (электронов) в р-области;

τ_p - время жизни неосновных носителей (дырок) в п-области.

Актуальным является измерение температурной и спектральной зависимости ВАХ ФЭП с помощью методик и оборудования, как, например, в [5, 6].

1.2 Максимальная мощность

Данный параметр определяется также путем измерения ВАХ ФЭП при его облучении светом с определенными параметрами [4]:

$$P_m = I_m V_m,$$

где I_m и V_m – значения тока и напряжения, при которых достигается максимальная выходная мощность. Также измеряют важнейшие величины $I_{кз}$ – ток короткого замыкания и $V_{хх}$ – напряжение холостого хода.

1.3 Коэффициент полезного действия (КПД)

Данный параметр характеризует экономическую целесообразность изготовления ФЭП при его использовании для построения солнечных электростанций:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{\left(V_m^2 I_{s\frac{q}{kT}} e^{\frac{qV_m}{kT}} \right)}{P_{in}},$$

где P_m – максимальная выходная мощность, P_{in} – мощность падающего излучения. Кроме КПД также контролируется квантовая эффективность ФЭП – параметр, показывающий насколько эффективно происходит генерация электронно-дырочных пар при поглощении одного фотона с той или иной длиной волны [6].

1.4 Спектральная чувствительность ФЭП

Данный параметр характеризует, насколько эффективно использовать ФЭП в качестве приемника излучения с той или иной длиной волны. Для солнечных элементов используют источники, имитирующие солнечное излучение (например АМ0, АМ1) [4].

Выводы

Перечисленные параметры измеряются практически одновременно и служат для анализа эффективности структуры ФЭП, его конструктивных особенностей, надежности и времени окупаемости при построении солнечных электростанций. Значительную роль также играет отработанность технологических процессов изготовления ФЭП. Дополнительную информацию об этом дают другие методы диагностики, которые применяются в комплексе со стандартными методами контроля ВАХ, КПД – рентгеновские методы, методы диагностики электрически и оптически активных дефектов с глубокими энергетическими уровнями в полупроводника [7, 8].

Библиографический список

1. <https://peretok.ru/articles/freezone/17444/> (Дата обращения 15.11.2025 г.).
2. Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power //Journal of Applied Physics. 1954. 25(5). P. 676–677.
3. <https://research.gatech.edu/national-renewable-energy-laboratory>. NREL (Дата обращения 15.11.2025 г.).
4. S. M. Sze, Kwok K. Ng Physics of Semiconductor Devices. Third edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007. 815 p.
5. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Mishustin V.G., Karabanov S.M., Vikhrov S.P., Karabanov A.S. Measuring complex for analysis of recombination deep traps in semiconductor solar cells. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. 2015. С. 1071-1074.
6. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Маслов А.Д., Трусов Е.П., Литвинов В.Г. Квантовый выход двусторонних солнечных элементов типа HIT //Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54. № 10 (10987). С. 1066-1071.
7. Денисов А.А., Дорджин Г.С. Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (Практическое применение). Обзоры по электронной технике. Серия 7. Технология, организация производства и оборудование. Вып.8 (1202). 1986. 56 с.
8. Литвинов В.Г. Электрофизические свойства облученных протонами и электронами кремниевых гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей. "Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS14)". Материалы XIV Международной конференции: сборник трудов. В 2 ч. Ч. 1. М.: МИЭТ, 2025. С. 110-111.

СЕКЦИЯ " ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ"

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР МИКРОВОЛНОВЫХ ОБЪЕМНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Е.П. Васильев

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, evasiliev48@mail.ru*

Аннотация. В данной работе рассматриваются особенности методов моделирования многослойных волноведущих структур для реализации объемных микроволновых функциональных устройств.

Ключевые слова: моделирование, полосковые линии, квазистатистический подход, ЕМ-моделирование, функциональные устройства, объемные интегральные схемы.

MODELING WAVEGUIDE STRUCTURES OF MICROWAVE VOLUME INTEGRATED CIRCUITS

E.P. Vasilyev

*Ryazan State Radio Engineering University,
named after V.F. Utkin
Ryazan, evasiliev48@mail.ru*

Abstract. This paper examines the features of methods for modeling multilayer waveguide structures for the implementation of volumetric microwave functional devices.

Keywords: modeling, striplines, quasi-static approach, EM modeling, functional devices, volumetric integrated circuits.

Введение

Перспективным направлением развития микроволновой аппаратуры является переход к использованию функциональных объемных интегральных схем (ОИС) [1], которые обладают следующими преимуществами:

1. Появляется возможность за счет создания 3D конструктивно-технологических решений и анализа волновых процессов в трехмерном пространстве и во времени получать качественно новые устройства с улучшенными показателями качества.

2. Объемная компоновка базовых элементов (БЭ) упрощает систему охлаждения радиоэлектронных средств (РЭС).

3. По сравнению с планарными конструкциями существенно улучшаются массогабаритные показатели (уменьшаются на 1-2 порядка).

Каждому БЭ необходимо обеспечить выбор оптимальной линии передачи (ЛП). Основные классы регулярных полосковых ЛП находят широкое применение в различных ФУ (длители, сумматоры, фильтры, переключатели) [2-4], которые сконструированы на принципах ОИС. При этом возникает задача обоснованного выбора метода моделирования многослойных ЛП.

Особенности моделирования многослойных полосковых структур

Первые теоретические работы по исследованию полосковых структур и неоднородностей на их основе использовали квазистатические подходы, которые вполне адекватны реальным объектам, особенно в длинноволновых диапазонах, когда выполняются условия $\Lambda > 8h\sqrt{\varepsilon}$; $\Lambda > 4w\sqrt{\varepsilon}$ (h, w – толщина подложки и ширина проводника; Λ – длина волны в линии; ε – относительная диэлектрическая проницаемость), кроме этого должны выполняться еще два условия, а именно $h \ll \Lambda$, $w \ll \Lambda$. Только в этом случае можно считать, что токи текут вдоль полосок и практически отсутствуют компоненты полей направленные вдоль полосок. При этом решаются уравнения Пуассона для потенциальной функции или для функции Грина с учетом граничных условий. Оригинальный подход исключает дифференциальные операции по одной из координат, при этом использовано преобразование Фурье, а также вводится пробная функция распределения плотности зарядов по полосковому проводнику с последующим ее уточнением исходя из принципа минимизации функционала для погонной емкости полосковой структуры. Другой подход основан на использовании интегрального уравнения:

$$\iint_{\Omega} \rho_s(x', y') G(x, y/x', y') dx' dy' = \Phi(x, y),$$

где $\rho_s(x', y')$ – поверхностная плотность зарядов;

$G(x, y/x', y')$ – функция Грина;

Ω – периметр поперечного сечения проводника;

$\Phi(x, y)$ – потенциальная функция.

Функция Грина определяется методом зеркальных изображений. Для приближенного решения интегрального уравнения периметр поперечного сечения полоски разбивается на N частей. Предполагается, что на каждой частичной полоске плотность зарядов ρ_{sk} постоянна. Тогда интегральное уравнение сводится к системе N линейных неоднородных уравнений для плотностей зарядов ρ_{sk} на частичной полоске Ω_k :

$$\sum_{k=1}^N \rho_{sk} \iint_{\Omega} G(x, y/x', y') dx' dy' = \Phi(x, y), k=1, 2, \dots, N.$$

Данная система уравнений решается численными методами.

В ряде работ приводится вывод телеграфных уравнений для волн в многослойной, многополосной линии с анизотропным заполнением, проницаемости слоев ε_i , μ_i (i – номер слоя) могут быть тензорами. При этом получены интегральные уравнения, позволяющие найти матрицы C^ε , L^μ коэффициентов телеграфных уравнений. Данные соотношения справедливы и в случае когда ε и μ зависят от частоты, так как частота, входящая в ε и μ , не связана с размерами сечения полосковой линии (ПЛ). Уравнения справедливы и для случая, когда в состав слоев входят ферриты, магнитные полупроводники, плазма, помещенные в постоянное магнитное поле. В частности, эти уравнения остаются справедливыми и для магнитостатических волн.

ПЛ можно представить в виде сочетания элементарных ячеек. Объединение ячеек эквивалентно размещению в соответствующих сечениях электрических или магнитных стенок в зависимости от типа рассматриваемой волны. Таким образом, граничные условия определяются конфигурацией или конструктивным типом полосковой структуры. Обычно накладываемые ограничения при решении электродинамической задачи сводятся к следующим: проводники нулевой толщины обладают идеальной проводимостью; абсолютные проницаемости сред, между которыми они размещены, равны ε_{ai} , μ_{ai} ($i=1, 2, 3...$); закон изменения составляющих электромагнитных полей собственных волн от времени t и продольной координаты z предполагается в форме $\exp[j(\omega t - \beta z)]$ (где β – подлежащая определению фазовая постоянная собственной волны; ω – круговая частота; j – мнимая единица).

Тогда решение задачи можно свести к интегрированию уравнения Гельмгольца для каждой из частичных областей, входящих в рассматриваемую ячейку. Поля собственных волн должны удовлетворять граничным условиям: касательная составляющая вектора напряженности электрического поля $E_\tau = 0$ на электрических стенках; касательная составляющая вектора напряженности магнитного поля $H_\tau = 0$ на магнитных стенках; условиям непрерывности касательных составляющих на границах раздела сред; условиям Мейкснера на ребрах плоского проводника. При решении уравнения Гельмгольца методом частичных областей результат представляется в виде бесконечной системы уравнений, в каждое из которых входят двойные ряды с медленной сходимостью. Высокая степень приближения к строгому решению достигается при очень большом числе уравнений и членов в двойных рядах, что приводит к значительным вычислительным трудностям с точки зрения временных затрат. Поэтому зачастую находят применение альтернативные методы и в частности метод Шварца. Вместо бесконечной системы уравнений аналитическое решение записывается в виде двойных рядов, которые быстро сходятся. При этом обычно удается просуммировать один из рядов и свести решение к одному ряду, отдельные части которого также поддаются суммированию. В результате решение представляется в виде простых и компактных формул удобных для программной реализации. Идея метода Шварца заключается в следующем. В рассматриваемом сечении плоской структуры выделяются две подобласти частично перекрывающиеся друг друга и образующие некоторую общую область. Затем решается задача для одной из подобластей. Для нее обычно известны граничные условия за исключением того участка контура подобласти, который одновременно является границей общей части. На этом участке граничные условия задаются произвольно. Далее решается задача для второй подобласти. Поскольку часть контура второй подобласти входит в первую подобласть, граничные условия для этой части задаются из решения задачи, полученного из первой подобласти. Таким способом находится первое приближение. Затем вновь решается задача для первой подобласти, причем граничные условия на участке контура, входящего во вторую подобласть, определяются из предыдущего решения для второй подобласти. Процесс повторяется до тех пор, пока следующее приближение не повторит предыдущее в пределах заданной точности. Последовательности полученных приближений схо-

дятся к предельным функциям, решающим поставленную задачу для суммы двух подобластей.

В последнее время все больше распространение для исследования высших типов волн в полосковых структурах, находят проекционные методы (метод Бубнова-Галеркина, Ритца, Треффта и др.) [1]. В частности метод Галеркина для некоторой граничной задачи $J\bar{u} = \bar{f}$, (где J – дифференциальный оператор, заданный с надлежащими граничными условиями) состоит в том, что строится представление решения \bar{u} в виде суммы

$$\bar{u}^N = \sum_{n=1}^N a_n^N \bar{u}_n,$$

с неопределенными коэффициентами a_n^N . Очевидно, что разность $J\bar{u} - \bar{f}$ равна нулю, а потому равны нулю ее проекции на базис $\{\bar{u}_n\}$, коэффициенты Фурье

$$\begin{aligned} (J\bar{u} - \bar{f}, \bar{u}_n) &: \\ (J\bar{u} - \bar{f}, \bar{u}_k) &= 0, k=1,2,\dots,\infty. \end{aligned}$$

Берутся N соотношений ортогональности

$$(J\bar{u}^N - \bar{f}, \bar{u}_k) = 0, k=1,2,\dots,N,$$

которые порождают систему линейных уравнений относительно коэффициентов a_n^N . Таким образом, метод Галеркина сводит граничную задачу к системе линейных уравнений.

С другой стороны задачу на собственные значения для полосковых структур можно свести к вариационной задаче нахождения минимума функционала. Описанные проекционные методы универсальны, однако они требуют большого количества преобразований и вычислений, существенно возрастающих при усложнении конструктивных типов полосковых структур.

В последнее время получены строгие решения для трехмерных полосковых структур. Рассматривается полностью экранированная трехслойная, трехмерная полосковая структура, для которой находятся тангенсальные составляющие электрического поля через плотность

поверхностного тока. При этом полный ток аппроксимируется одномерными рядами с последующим введением пробных функций.

Одними из самых мощных и универсальных численных методов являются метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ) в прямой и вариационных постановках. МКЭ находит применение в задачах возбуждения, которые сводятся к расчету неоднородных по длине волноведущих полосковых структур. Другой класс – это спектральные задачи связанные с расчетом однородных по длине регулярных волноведущих структур с неоднородной геометрией поперечного сечения и произвольным изменением свойств среды в поперечном направлении.

Возможности использования конечного элемента различной формы, размеров и пространственной ориентации обуславливает упрощение дискретизации граничных условий при сложной форме поперечного сечения волноведущей структуры.

Другое отличие МКЭ от МКР заключается в способе алгебраизации уравнений $Ju(\bar{x}) = f(\bar{x})$. Если в МКР аппроксимируются производные $\partial u / \partial \bar{x}$, то в МКЭ аппроксимируется решение $u(\bar{x})$ некоторой функцией $v(\bar{x})$ с неопределенными коэффициентами. Решение исходной задачи получается путем вычисления этих коэффициентов, а задача вычисления коэффициентов формулируется как задача минимизации функционала, характеризующего качество аппроксимации $u(\bar{x})$ функцией $v(\bar{x})$. В свою очередь последняя формулировка приводит к решению системы алгебраических уравнений.

Определенные сложности при использовании МКР возникают в случае разрывных коэффициентов исходной задачи, что приводит к снижению скорости сходимости конечно-разностного решения к точному. Устранение указанных трудностей, может быть реализовано на базе аппарата точных и усеченных разностных схем, что позволило создавать для задач с разрывными коэффициентами схемы на непрерывных сетках.

При использовании МКР для решения спектральных задач можно выделить два основных подхода. Первый основан на проекционно-сеточных методах (ПСМ), а второй на построении консервативных конечно-разностных схем с помощью метода баланса. В начале, с помощью МКЭ были исследованы металлодиэлектрические волноводы, а затем данный подход был обобщен на открытые волноведущие структуры с произвольной формой поперечного сечения.

МКР в вариационной постановке обладает относительно невысокой скоростью сходимости. Использование конечных элементов более высокого порядка, позволяет повысить точность при тех же размерах матриц, однако элементы выше четвертого порядка применять нецелесообразно.

При расчетах волноведущих полосковых структур со сложными граничными условиями, т.е. криволинейными границами раздела в плоскости поперечного сечения, для более точной аппроксимации границ исследуемой области используются изопараметрические и криволинейные квадратичные элементы, но как показала практика эффективней использовать большое количество простейших конечных элементов.

Специфика внутренних задач решаемых МКР или МКЭ в наибольшей степени проявляется при учете граничных условий для регулярных и нерегулярных (лежащих на расстоянии меньше шага сетки от граничной поверхности) точек сетки. Методики нахождения потенциальных функций в регулярных точках следующая. Вначале формируются граничные условия, в которые включаются значения потенциалов граничной и ближайших внутренних точек и данные о положении границы (расстояние до узловой нерегулярной точки и угол наклона нормали к границе). Полученные выражения разрешаются относительно потенциала граничной точки. Затем этот потенциал подставляется в конечно-разностное уравнение, записанное для приграничного узла. В точках, имеющих только одну внутреннюю соседнюю точку, значение функции отыскивается аппроксимацией значений функций в трех ближайших узлах, лежащих на прямой линии. Таким образом потенциалы граничных точек вообще исключаются из рассмотрения.

Применительно к полосковым структурам в последние десять лет бурно развивается МКР в пространственно-временной области. При этом традиционные граничные условия получили развитие, где граничные условия формируются с учетом дисперсионных свойств физической модели. Предложен подход, позволяющий учитывать затухающие и другие моды высшего порядка.

При практическом использовании МКР и МКЭ возникает ряд проблем: ошибки МКР, интерполяция, сходимость и фиктивные решения. Погрешность МКР обусловлена в основном двумя причинами: а) заменой дифференциальных уравнений конечно-разностными, приводящей к ошибкам при определении искомым функций в узловых точ-

ках; б) отличием в построении интерполирующих и искомым функций несмотря на точное определение потенциальных функций в узлах сетки. При этом не только шаг сетки, но и характер анализируемого поля влияет на точность.

Выводы

В настоящее время не существует универсальных алгоритмов, которые бы позволяли эффективно бороться с нефизическими (фиктивными) решениями, которые возникают при использовании МКР и МКЭ. Однако можно выделить два подхода, используемых для решения данной проблемы: апостериорный, когда истинные моды отделяются от фиктивных после процесса вычисления, и априорный, когда используются такие постановки задач, при которых фиктивные решения не возникают.

Библиографический список

1. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. М. Наука.1985. 256 с.
2. Васильев Е.П. Анализ методов моделирования микроволновых устройств на примере полосового фильтра с расширенной полосой заграждения. // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №72. 2020. – С. 62-70.
3. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп, Лыу Тхань Дат. Полосовой фильтр на связанных микрополосковых линиях с двумя секторными резонаторами // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №75. 2021. – С. 15-23.
4. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп. Анализ численными методами конструктивных вариантов миниатюрных радарных резонансных элементов // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №84. 2023. – С. 3-14.

УДК 007:681.512.2; ГРНТИ 50.41.25

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ЧИСЛА ДЛЯ ВСТАВКИ ТАКСОНОМИЧЕСКОГО СЛОЯ В НЕЙРОННУЮ СЕТЬ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ

И.Ю. Каширин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, igor-kashirin@mail.ru*

Аннотация. В статье приводится краткое описание технологии применения иерархических чисел в искусственных нейронных сетях, являющихся основой больших языковых моделей LLM. Центральным элементом технологии является модернизация семантического пространства большой модели на примере Distilbert-base-uncased. Расширение пространства достигается включением 1D слоя нейронной сети, реализующего вычисление эмбедингов иерархических чисел на основе сопоставления с онтологической базой знаний.

Ключевые слова: большие языковые модели, расширение семантического пространства, модели представления знаний, иерархические числа.

HIERARCHICAL NUMBERS FOR INSERTING TAXONOMIC LAYER INTO NEURAL NETWORK OF LANGUAGE

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, igor-kashirin@mail.ru*

Abstract. The article provides a brief description of the technology for using hierarchical numbers in artificial neural networks, which are the basis of large language models LLM. The central element of the technology is the modernization of the semantic space of a large model using the example of Distilbert-base-uncased. The space is expanded by including a 1D layer of a neural network that calculates hierarchical number embeddings based on matching with an ontological knowledge base.

Keywords: large language models, semantic space expansion, knowledge representation models, and hierarchical numbers.

Введение

Иерархические числа для идентификации понятий в базах знаний искусственного интеллекта впервые были введены в [1]. Эффективность их использования обеспечивается операциями соответствующей

универсальной алгебры [2]. Эти операции имеют априорные свойства, позволяющие выстраивать архитектуру отношений базы знаний, основанных на онтологических таксономиях [3]. Такими конструктивными таксономиями являются, например, родовидовые, причинно-следственные и меронимические (часть-целое).

При программной реализации больших языковых моделей или моделей, основанных на BERT-сетях, иерархические числа могут быть использованы для расширения семантического пространства моделей с помощью дополнения эмбеддингов словарных конструкций иерархическими числами.

Расширение эмбеддингов словарных конструкций иерархическими числами

Базовая архитектура нейросетевой языковой модели, дополненной инструментарием иерархических чисел, для предметной области «классификация политических событий» приведена на рисунке.

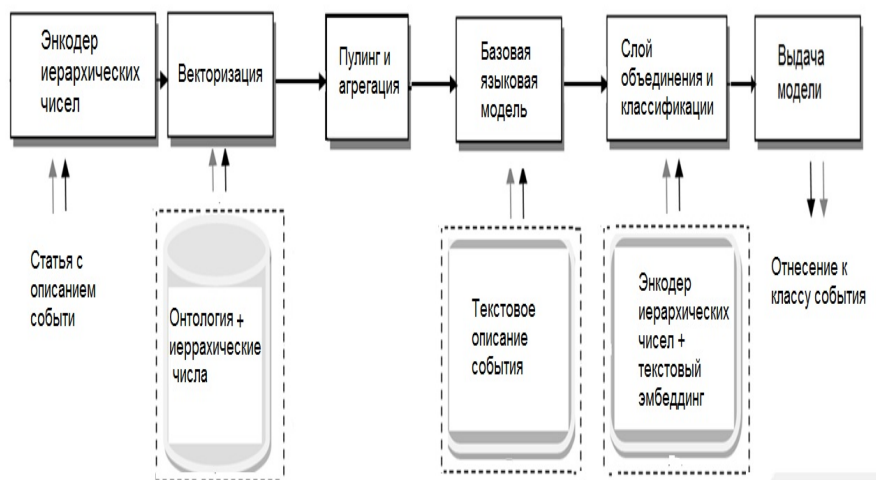


Рис.1. Базовая архитектура нейросетевой языковой модели, дополненной инструментарием иерархических чисел

Предполагается, что нейросетевая языковая модель предназначена для решения задачи оценки политических текстов на степень военной опасности события, которое описывается во входном тексте.

Входным модулем архитектуры является энкодер иерархических чисел, который предназначен для токенизации [4] предложений есте-

ственного языка. При этом для каждого слова генерируются не стандартные эмбединги, а иерархические числа, соответствующие местоположению обозначаемого словом понятия, отношения, признака или события в онтологической базе знаний. База знаний предварительно создается с помощью ансамбля интеллектуальных классифицирующих программ, среди которых модно выделить: Word2Vec, SpaCy, Natasha, GloVe, ELMo.

Затем при векторизации последовательность эмбедингов обрабатывается 1D сверточными слоями. Глобальный пулинг агрегирует признаки в один плотный вектор. Агрегация предполагает, что каждый вектор токена умножается на некоторый вес, и затем эти взвешенные векторы суммируются. Веса могут быть фиксированными или обучаемыми, как в механизмах внимания [5].

На следующем этапе работает большая предобученная языковая модель, в нашем случае это DistilBert. Модель использует собственную векторизацию, получая соответствующие токены словарных конструкций.

Затем применяется объединение иерархических токенов с токенами предобученной модели. При этом формируется дополнительный полносвязный слой нейронной сети (self.fusion_layer) после конкатенации, который позволяет модели изучить сложные взаимодействия между текстовыми и иерархическими признаками.

В заключительной части архитектуры для обеспечения выдачи классификационного результата формируется) Финальный линейный слой (self.classifier) для предсказания выходной метки. В нашем случае, это категории военной опасности события (label_map = {0: "Низкий риск", 1: "Средний риск", 2: "Высокий риск"}).

Основные операторы формирования таксономического слоя на языке Python v.3 приведены далее.

```
import torch
import torch.nn as nn
from transformers import AutoTokenizer, AutoModel
import numpy as np
import random

# Энкодер Иерархических Чисел
class HierarchicalNumberEncoder(nn.Module):
    def __init__(self, vocab_sizes, embedding_dim_per_component,
```

```
        cnn_out_channels, kernel_size, dropout=0.2):
    super().__init__()
    # Количество уровней в иерархии
    self.num_components = len(vocab_sizes)

    # Embedding слой для каждого компонента иерархии
    # nn.ModuleList для сохранения несколько модулей
    self.component_embeddings = nn.ModuleList([
        nn.Embedding(vocab_size, embedding_dim_per_component)
        for vocab_size in vocab_sizes ])
    # 1D Сверточный слой для обработки
    # последовательности эмбедингов
    self.conv1d=
        nn.Conv1d(in_channels=embedding_dim_per_component,
            out_channels=cnn_out_channels,kernel_size=kernel_size,
                padding=kernel_size // 2)
    self.relu = nn.ReLU()
    self.dropout = nn.Dropout(dropout)
    # Адаптивный пулинг
    self.pool = nn.AdaptiveMaxPool1d(output_size=1)

def forward(self, hierarchical_numbers):
    # hierarchical_numbers: (batch_size, num_components)
    # Получение эмбедингов для каждого компонента
    embeddings_list = []
    for i in range(self.num_components):
        component_tensor = hierarchical_numbers[:, i]
        embedded_component=
            self.component_embeddings[i](component_tensor)
        embeddings_list.append(embedded_component)
    # Объединение эмбедингов в последовательность CNN
    stacked_embeddings = torch.stack(embeddings_list, dim=1)
    cnn_input = stacked_embeddings.permute(0, 2, 1)
    #Пропуск через 1D CNN
    cnn_output = self.conv1d(cnn_input)
    cnn_output = self.relu(cnn_output)
    cnn_output = self.dropout(cnn_output)
    #Пулинг для получения финального вектора
    pooled_output = self.pool(cnn_output).squeeze(dim=2)
    return pooled_output
```

Языковая Модель с Интеграцией Иерархии

class LanguageModelWithHierarchy(nn.Module):

```

    def __init__(self, llm_model_name, num_labels,
                  vocab_sizes, embedding_dim_per_component,
                  cnn_out_channels, kernel_size,
                  dropout_llm=0.1, dropout_fusion=0.2):
        super().__init__()
        self.llm = AutoModel.from_pretrained(llm_model_name)
        self.tokenizer = AutoTokenizer.from_pretrained(llm_model_name)
        self.llm_embedding_dim = self.llm.config.hidden_size
        # Инициализация энкодера иерархических чисел
        self.hierarchical_encoder = HierarchicalNumberEncoder(
            vocab_sizes=vocab_sizes, embedding_dim_per_component
            = embedding_dim_per_component,
            cnn_out_channels=cnn_out_channels,
            kernel_size=kernel_size,
            dropout=dropout_fusion )
        # Слой для объединения (слияния) эмбеддингов
        self.fusion_layer = nn.Sequential(
            nn.Linear(self.llm_embedding_dim + cnn_out_channels,
                self.llm_embedding_dim), nn.ReLU(),
            nn.Dropout(dropout_fusion) )
        # Финальный классификатор
        self.classifier =
            nn.Linear(self.llm_embedding_dim, num_labels)
        self.llm_dropout = nn.Dropout(dropout_llm)
        # Получение эмбеддинга текста от LLM
        def forward(self, input_ids, attention_mask,
                    hierarchical_numbers):
            llm_output = self.llm(input_ids=input_ids,
                                   attention_mask=attention_mask)
            text_embedding = llm_output.last_hidden_state[:, 0, :]
            text_embedding = self.llm_dropout(text_embedding)
            #Получение эмбеддинга иерархического числа
            hierarchy_embedding=
                self.hierarchical_encoder(hierarchical_numbers)
            # Объединение эмбеддингов (конкатенация)
            combined_embedding = torch.cat((text_embedding,
                hierarchy_embedding), dim=-1)
            #Пропуск через слой слияния

```

```
fused_embedding =
    self.fusion_layer(combined_embedding)
# (batch_size, llm_dim)
# Финальная классификация
logits = self.classifier(fused_embedding)
return logits
```

Экспериментальные исследования

В качестве экспериментальных исследований использовались новостные политические тексты электронных информационных ресурсов общим числом более 5000 электронных статей. Были проанализированы западные издания: Aljazeera, Bloomberg, cnn, nytimes, WSJ, theguardian. Российские англоязычные статьи были материалами следующих электронных ресурсов: en.kremlin, medusa, RT, tass, Interfax.

В качестве экспертов для оценки точности классификации были задействованы преподаватели Рязанского государственного радиотехнического университета. Оценки сводились к основным параметрам: Context understanding – глубина понимания контекста и Relevance – релевантность. При сравнении расширенной иерархическими индексами одели distilbert-base-uncased с базовой моделью distilbert-base-uncased (2025) оценка релевантности оказалась примерно равной, глубина понимания была оценена в расширенной модели примерно на 15% точнее.

Библиографический список

1. И.Ю.Каширин Иерархические числа для проектирования ICF-таксономий искусственного интеллекта. Вестник РГРТУ. 2020. № 71. стр.71-82. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-71-82.
2. И.Ю.Каширин Эмбединги иерархических чисел для обогащения трансформерных языковых моделей внешними онтологическими знаниями // Вестник РГРТУ. 2025. № 93 / Vestnik of RSREU. 2025. No 93. С.72-82. DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-72-82.
3. И.Ю.Каширин Теория иерархических чисел в задачах вычисления семантического сходства естественно-языковых конструкций. Вестник РГРТУ. 2024. № 88. С.38-52 DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-38-52.
4. I.Yu.Kashirin. A neural network for classifying media into western and eastern. [Electronic resource]. Update date: 30.12.2024, URL: <https://kashirin.net> (date of application: 02.10.2025).

5. Vaswani, Ashish; Shazeer, Noam; Parmar, Niki; Uszkoreit, Jakob; Jones, Llion; Gomez, Aidan N; Kaiser, Łukasz; Polosukhin, Illia (December 2017). "Attention is All you Need" (PDF). In I. Guyon and U. Von Luxburg and S. Bengio and H. Wallach and R. Fergus and S. Vishwanathan and R. Garnett (ed.). 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 30. Curran Associates, Inc. arXiv:1706.03762.

УДК 004.421; ГРНТИ 50.51.17

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКА ПОКРЫТИЙ БИНАРНЫХ ТАБЛИЦ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ПРОЕКТНЫХ АЛЬТЕРНАТИВ

С.В. Скворцов, В.И. Хрюкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, vi_x@mail.ru*

Аннотация. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности алгоритмов поиска покрытий двоичных таблиц минимальным количеством столбцов. Показано, что комплексное применение рассмотренных алгоритмов в составе систем поддержки принятия решений позволяет оперативно и с достаточно высокой точностью решать задачи управления проектными альтернативами.

Ключевые слова: бинарная таблица, задача покрытия, эвристический последовательный алгоритм.

RESEARCH OF ALGORITHMIC METHODS OF BINARY TABLES COVERAGE SEARCH IN THE TASK OF ANALYSIS OF DESIGN ALTERNATIVES

S.V. Skvortsov, V.I. Khryukin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, vi_x@mail.ru*

Abstract. In this paper the results of experimental studies on the efficiency of algorithms for finding binary table coverages with a minimum number of columns has been presented. It has been shown that the combined use of the algorithms discussed in this article in decision support systems allows for the rapid and accurate solution of project alternative management tasks.

Keywords: binary table, the task of covering, a heuristic sequential algorithm.

Введение

Для решения ряда задач, связанных с управлением проектами, нередко требуется построение числовых таблиц, определяющих состояние работ [1-3]. Анализируя эти таблицы, можно диагностировать процесс реализации проекта. Для ускорения таких действий следует уменьшать размеры таблиц, что приводит к необходимости решения задачи, связанной с определением минимального покрытия [4]. Существующие подходы к решению этой задачи основываются на методе ветвей и границ [5]. Использование такого метода предполагает на каждом этапе построение дерева решений с оценкой целевой функции по каждому из вариантов и выбора варианта с наилучшей оценкой. Очевидно, что алгоритмы, реализующие этот метод, обладают в общем случае экспоненциальной оценкой трудоемкости. В связи с этим в работе предлагаются алгоритмы, направленные как на снижение трудоемкости, так и на упрощение процедуры выбора варианта покрытия.

Краткое описание исследуемых алгоритмов

Рассматриваемые алгоритмы предназначены для покрытия двоичных таблиц минимальным количеством столбцов так, чтобы в каждой строке таблицы оставалась хотя бы одна единица [5].

Алгоритм минимизации числа столбцов таблицы

Работа этого алгоритма основана на направленном переборе вариантов покрытия таблицы столбцами с отбрасыванием неперспективных комбинаций. К таким относятся те варианты, в которых число покрывающих столбцов превышает полученное на текущем этапе значение наименьшего покрытия. Алгоритм включает следующие действия.

1. Положить число столбцов, с помощью которых осуществляется покрытие $p = n$ (n – число столбцов таблицы). Задать номер варианта покрытия $k = 0$.

2. Выбрать новый вариант покрытия $k = k + 1$.

3. Для k найти соответствующее двоичное n -разрядное число $a = a_n a_{n-1} \dots a_i \dots a_2 a_1$. По a определить столбцы, участвующие в покрытии. Если $a_i = 1$, то i -й столбец используется для покрытия, в противном случае нет.

4. Определить число столбцов $r = \sum_{i=1}^n a_i$, участвующих в покрытии.

Если $r \geq p$, то переход к п.2.

5. Провести покрытие таблицы r столбцами. Если это допустимо, то положить $p = r$ и зафиксировать выбранные столбцы.

6. Проверка условия окончания. Если $k \leq 2^n - 1$, то переход к п.2, иначе конец алгоритма.

Произведем оценку сложности этого алгоритма. Очевидно, что количество вариантов покрытия таблицы n столбцами составляет $2^n - 1$, а процесс покрытия предполагает однократный просмотр таблицы размера $m \times n$. В результате для определения оптимального варианта покрытия потребуется не более $(2^n - 1)mn$ операций, а оценка вычислительной сложности составит $O(mn2^n)$.

Последовательный эвристический алгоритм

Работа этого алгоритма основана на циклическом просмотре столбцов и включении на каждом этапе одного из них в покрытие. При включении столбца в покрытие из таблицы вычеркиваются все строки, которые на пересечении с выбранным столбцом имеют единичные элементы.

1. Найти строку с одним единичным элементом. Если такой строки нет, то перейти к п.3

2. Выбирать столбец, которому соответствует строка с единственным ненулевым элементом. Перейти к п.4.

3. Выбрать столбец, обеспечивающий покрытие максимального количества строк. Если таких столбцов несколько $M = \{k_1, k_2, \dots, k_p\}$, то выбирается тот, который при удалении соответствующих строк из таблицы оставляет в ней минимальное количество единиц. Таким образом, выбирается тот столбец $k \in M$, для которого число единиц

$$F_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ik} x_{ij} \text{ максимально, т.е. выполняется условие } \max_{k \in M} F_k.$$

4. В таблице обнулить строки соответствующие единицам в выбранном столбце и зафиксировать его номер.

5. Если таблица содержит ненулевые элементы, то перейти к п.2, в противном случае – конец алгоритма.

В каждом цикле просмотра столбцов выбирается лишь один претендент на включение в покрытие, а количество столбцов в покрытии в предельном случае может составлять n . С учетом того, что в каждом цикле число рассматриваемых столбцов уменьшается на единицу, количество просмотров столбцов составит $mn^3/4$. Так как при выборе покрывающего столбца производится преобразование матрицы размера $m \times n$, то количество операций не будет превышать $m^2n^4/4$, а оценка вычислительной сложности последовательного алгоритма соответственно составит $O(m^2n^4)$.

Экспериментальные исследования

Число столбцов для покрытия таблицы, полученных по эвристическому алгоритму, может оцениваться относительно оптимальных решений, найденных с помощью точного алгоритма.

Для сравнительной оценки характеристик алгоритмов, представленных выше, был проведен вычислительный эксперимент по решению задачи покрытия минимальным количеством столбцов таблицы, элементы которой сформированы посредством управляемой псевдослучайной генерации.

Цели эксперимента:

- оценка качества решений, получаемых с использованием эвристического последовательного алгоритма, относительно оптимальных результатов;
- оценка влияния на точность решений таких параметров таблицы неисправностей как ее размеры и плотность заполнения;
- анализ особенностей и получение практических рекомендаций по применению разработанных алгоритмов, например, при решении задачи построения диагностических графов, обеспечивающих минимальное число проверочных связей.

Комплекс программных средств для проведения эксперимента содержит следующие основные модули:

- программа генерации таблиц экспертных оценок с заданными параметрами;
- программа составления минимальных покрытий по алгоритму поиска оптимальной структуры диагностического графа [4, 6];
- программа приближенного решения задачи на основе последовательного эвристического алгоритма.

Программа генерации таблиц экспертных оценок производит формирование бинарных таблиц с псевдослучайными характеристиками.

При этом задаются число столбцов n , число строк m , степень заполнения.

В процессе эксперимента исследована работа всех перечисленных программ для 450 вариантов таблиц неисправностей, в которых число столбцов n варьировалось от 10 до 25, число строк m - от 50 до 250, степень заполнения – от низкой (менее 20%) до высокой (более 40%).

Программа построения минимальных покрытий обеспечивает получение оптимальных решений, но соответствующий алгоритм имеет экспоненциальную оценку трудоемкости, что приводит к решению при $n > 30$ одной задачи на персональном компьютере в течение нескольких часов. Программа на основе последовательного эвристического алгоритма решает задачу за значительно меньшее время (соответствующий алгоритм имеет *полиномиальную* оценку трудоемкости), но не гарантируют достижения оптимального результата.

В качестве результатов определялось минимальное значение целевой функции F равное количеству столбцов, участвующих в покрытии.

Полученные результаты

Качество приближенных решений, полученных с использованием программы на основе последовательного эвристического алгоритма, характеризуют данные из табл. 1 - табл. 3, в которых отклонения Δ от оптимальных решений определяются как

$$\Delta = [(F_i - F_{opt}) / F_{opt}] \cdot 100\%,$$

где F_i - значение целевой функции, полученное указанной программой для i -го варианта таблицы; F_{opt} - оптимальное значение целевой функции, полученное программой составления минимальных покрытий для той же таблицы.

Таблица 1. Количество решений (%) в пределах отклонений Δ

Оптимальное решение	Отклонение Δ от оптимального решения		
	не более 10 %	не более 15 %	не более 25 %
76,8	79,6	88,4	98,9

Таблица 2. Количество оптимальных решений (%)

Размер $m \times n$ таблицы	Степень заполнения таблицы			В среднем по размеру
	высокая	средняя	низкая	
50×10	77,5	97,5	95	90
125×15	65	57,7	100	74,2
250×25	70	45	85	66,6
В среднем по заполнению	70,8	66,7	93,3	76,9

Таблица 3. Среднее относительное отклонение Δ в процентах (%)

Размер $m \times n$ таблицы	Степень заполнения таблицы			В среднем по размеру
	высокая	средняя	низкая	
50×10	5,6	0,3	1,4	2,8
125×15	7,7	5,1	0	4,3
250×25	5,3	6,6	0,4	4,1
В среднем по заполнению	6,2	4,0	0,5	3,6

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о достаточно высокой эффективности последовательного алгоритма с точки зрения точности решений (табл. 1), поскольку 76,8 % решений совпали с оптимальными, а отклонения остальных результатов от оптимальных практически не превысили 25 %. Табл. 2 детализирует данные из табл. 1 и показывает процент точных решений в зависимости от размера таблицы и степени ее заполнения. При этом следует отметить, что для каждого варианта было решено 40 задач. Представленные данные показывают, что последовательный эвристический алгоритм позволяет получить более качественное решение или при небольших размерах таблицы или при ее малой заполнении.

Табл. 3 показывает средние значения отклонений Δ приближенных решений от оптимальных результатов для различных размеров таблицы и степени ее заполнения. Здесь отмечается уменьшение среднего относительного отклонения при снижении степени заполнения таблицы. Причем эта тенденция не зависит от размера таблицы.

Выводы

Результаты проведенного вычислительного эксперимента в целом показали высокую эффективность разработанных алгоритмов (среднее отклонение составляет около 3% при 76,8% точных решений).

Комплексное применение предложенных алгоритмов в составе систем поддержки принятия решений обеспечивает возможность варьирования необходимых временных затрат на синтез графовых моделей, характеризующих состояние проекта. В частности, алгоритм, обеспечивающий получение оптимальных решений, целесообразно использовать только для графов с количеством ребер не превышающим 25. Во всех других случаях рекомендуется применять эвристический алгоритм, в пользу которого указывает и такой факт, что при $n = 25$ среднее отклонение составляет около 4%.

Библиографический список

1. Романова М.В. Управление проектами. М.: ИНФРА-М, 2007, 256 с.
2. Сворцов С.В., Хрюкин В.И., Сворцова Т.С. Анализ согласованности мнений специалистов в условиях противоречивости экспертных оценок проектных альтернатив // Вестник РГРТУ. 2021. № 76. С. 53-64.
3. Тишкина В.В. Алгоритм сбора и анализа экспертных мнений для формирования рекомендательной базы при управлении объектами учёта на основе нечётко-множественного подхода // Вестник РГРТУ. 2021. № 77. С. 93-100.
4. Сворцов С.В., Хрюкин В.И., Сворцова Т.С. Оптимизация процесса самодиагностики при организации активной отказоустойчивости многопроцессорных систем // Вестник РГРТУ. 2022. № 79. С. 49-55.
5. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Наука, 1978, 347 с.
6. Сворцов Н.В., Сворцов С.В., Хрюкин В.И. Дешифрация диагностического синдрома многопроцессорной системы в реальном времени// Системы управления и информационные технологии. 2010. № 1. С.10-15.

УДК 004.023; ГРНТИ 27.41.41

ПРЕЖДЕВРЕМЕННАЯ СХОДИМОСТЬ В МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.Н. Сапрыкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, saprykin.a.n@rsreu.ru*

Аннотация. В статье анализируются ключевые причины преждевременной сходимости в метаэвристических алгоритмах глобальной оптимизации, включая мультимодальность целевых функций, сходимость по принципу домино и потерю популяционного разнообразия. Рассматриваются современные подходы к противодействию преждевременной сходимости.

Ключевые слова: преждевременная сходимость, метаэвристики, глобальная оптимизация, популяционное разнообразие.

PREMATURE CONVERGENCE IN METAHEURISTIC ALGORITHMS FOR GLOBAL OPTIMIZATION

A.N. Saprykin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazan, saprykin.a.n@rsreu.ru*

Abstract. This article analyzes key causes of premature convergence in metaheuristic algorithms for global optimization, including multimodality of objective functions, domino convergence, and loss of population diversity. Modern approaches to counteracting premature convergence are discussed.

Keywords: premature convergence, metaheuristics, global optimization, population diversity.

Введение

Преждевременная сходимость является одной из ключевых проблем, ограничивающих эффективность метаэвристических алгоритмов глобальной оптимизации. Она возникает, когда алгоритм преждевременно концентрируется на локальном оптимуме, утрачивая способность исследовать другие области пространства поиска. В статье рассматриваются причины преждевременной сходимости, включая мультимодальность целевых функций, сходимость по принципу домино и потерю популяционного разнообразия. Также анализируются стратегии балансировки между исследованием и использованием, а также методы противодействия преждевременной сходимости.

Алгоритмы глобальной оптимизации, особенно метаэвристические, неизбежно сталкиваются с проблемой сходимости. Сходимость считается преждевременной, если алгоритм перестаёт генерировать новые перспективные решения и фокусируется на ограниченной области пространства поиска, в то время как в других его частях может находиться лучшее решение. Особенно остро эта проблема проявляется в мультимодальных задачах, где целевая функция имеет множество локальных и/или глобальных оптимумов.

В природных системах аналогичное поведение объясняется принципом нишевого упреждения, когда в стабильной экологической нише доминирует, как правило, один вид. Однако в контексте оптимизации отсутствует надёжный критерий, позволяющий отличить глобальный оптимум от локального, что затрудняет принятие решения об остановке алгоритма.

Сходимость по принципу домино

Особым типом преждевременной сходимости является сходимость по принципу домино. Он возникает, когда компоненты решения (например, гены или стандартные блоки) вносят неодинаковый вклад в значение целевой функции. Блоки с сильным положительным влиянием быстро фиксируются в популяции, в то время как менее значимые остаются неоптимизированными. Поскольку алгоритм последовательно «оптимизирует» наиболее важные компоненты, менее заметные признаки могут восприниматься как шум и игнорироваться.

В генетических алгоритмах это усугубляется тем, что операторы мутации периодически разрушают уже найденные сильные блоки, требуя их повторного обнаружения. В результате алгоритм не успевает оптимизировать менее значимые компоненты, и глобальный оптимум остаётся недостижимым даже при многократных перезапусках.

Потеря популяционного разнообразия

Ключевым фактором, способствующим преждевременной сходимости, является потеря разнообразия в популяции решений. Разнообразие позволяет алгоритму одновременно исследовать разные области пространства поиска и избегать застревания в локальных оптимумах. Его снижение приводит к гомогенизации популяции и, как следствие, к сходимости.

Центральной концепцией в управлении разнообразием является баланс между исследованием и использованием. Исследование подра-

зумевают генерацию новых, потенциально перспективных решений в ранее неизученных областях (например, через мутацию с большим шагом). Использование, напротив, направлено на улучшение уже известных решений (например, через кроссовер или локальный поиск).

Алгоритмы, чрезмерно ориентированные на использование, быстро сходятся, но рискуют застрять в локальном оптимуме. Чрезмерное исследование, в свою очередь, замедляет сходимость и может не привести к улучшению решений даже за длительное время. Оптимальная стратегия требует динамической адаптации соотношения этих двух компонентов.

Методы противодействия преждевременной сходимости

На сегодняшний день не существует универсального способа предотвратить преждевременную сходимость, так как эффективность методов зависит от структуры задачи и параметров алгоритма. Тем не менее, можно выделить несколько методов.

Метод 1. Перезапуск алгоритма. Данный метод предполагает случайную инициализацию новых запусков, вследствие чего поиск перестает концентрироваться в окрестностях локального оптимума, что обеспечивает достаточное разнообразие решений для достижения глобального оптимума.

Одним из представителей таких методов является метод GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), который представляет собой эффективный подход, направленный на баланс между интенсификацией и диверсификацией поиска [5].

GRASP сочетает в себе жадную конструктивную фазу с последующей локальной оптимизацией. На этапе построения решения алгоритм формирует кандидатское множество на основе адаптивной жадной функции, но вместо детерминированного выбора наилучшего элемента случайным образом выбирает одного из лучших кандидатов. Такой рандомизированный жадный подход обеспечивает генерацию разнообразных начальных решений при каждом запуске процедуры, что существенно снижает вероятность застревания в одном и том же локальном оптимуме. Последующая фаза локального поиска позволяет улучшить каждое построенное решение, сохраняя при этом разнообразие траекторий поиска благодаря стохастической природе начальной фазы.

Таким образом, GRASP эффективно противодействует преждевременной сходимости за счёт встроенной механизма контролируемой

случайности на этапе конструирования решений, что делает его особенно ценным в условиях высокой мультимодальности целевой функции и сложной ландшафтной структуры пространства решений. Эмпирические исследования подтверждают, что многократные независимые запуски GRASP-процедуры позволяют исследовать различные регионы пространства поиска и повышают вероятность нахождения высококачественных, а в ряде случаев и глобально оптимальных решений.

Однако этот подход неэффективен при сходимости по принципу домино.

Метод 2. Использование алгоритмов семейства SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm). Данный метод предлагает использование эффективного механизма поддержания разнообразия популяции и предотвращения преждевременной конвергенции к локальным фронтам Парето [4].

Ключевым элементом алгоритмов SPEA является использование внешнего архива недоминируемых решений, который накапливает и сохраняет перспективных кандидатов на протяжении всего процесса эволюции. Оценка приспособленности особей основывается не только на их доминировании, но и на «силе» – количестве решений, которые данная особь доминирует. Это позволяет более точно дифференцировать качество решений в многомерном пространстве целей и избегать чрезмерного давления отбора, характерного для традиционных генетических алгоритмов. Кроме того, в этих алгоритмах дополнительно вводится механизм плотностной оценки, основанный на расстоянии до ближайшего соседа в архиве, что способствует равномерному распределению решений вдоль фронта Парето и препятствует скоплению особей в узких регионах пространства поиска.

Метод 3. Самоадаптация параметров алгоритма. Данный метод предполагает, что параметры алгоритма изменяются динамически в зависимости от текущего состояния поискового процесса, представляют собой эффективный механизм поддержания баланса между исследованием и эксплуатацией.

Самоадаптивные метаэвристики кодируют управляющие параметры непосредственно в генотип особей или регулируют их на основе статистики поведения популяции (например, уровня разнообразия, частоты улучшений решений или степени сходимости). Такой подход позволяет алгоритму автоматически усиливать исследовательскую компоненту при обнаружении стагнации или снижения разнообразия,

а также повышать интенсивность локального поиска в перспективных регионах пространства решений. Например, в самоадаптивных генетических алгоритмах вероятность мутации может увеличиваться при снижении энтропии популяции, тем самым «оживляя» поиск и предотвращая застревание в локальных оптимумах.

Выводы

В частности, рассмотренные в статье подходы к преодолению преждевременной сходимости могут быть успешно применены в рамках алгоритмов многопутевой маршрутизации и балансировки трафика, предложенных в работах [1–3]. Эти задачи характеризуются высокой неопределённостью, обусловленной как динамикой сетевой нагрузки, флуктуациями задержек и пропускной способности, так и сложной структурой пространства решений с множеством локальных оптимумов. Внедрение методов, направленных на сохранение разнообразия поисковой популяции, включая рандомизированную жадную инициализацию, использование внешних архивов недоминируемых решений и динамическую настройку параметров алгоритмов, способно существенно снизить риск преждевременной конвергенции и повысить качество и стабильность найденных маршрутов. В результате достигается более высокая робастность и адаптивность механизмов управления трафиком в реальных, постоянно меняющихся условиях программно-конфигурируемых сетей.

Библиографический список

1. Перепелкин Д.А. Интеллектуальная многопутевая маршрутизация в программно-конфигурируемых сетях на основе алгоритма миграции стаи птиц / Д.А. Перепелкин, М.А. Иванчикова, В.Т. Нгуен // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 82. – С. 44-59.
2. Перепелкин Д.А. Исследование и анализ процессов многопутевой маршрутизации и балансировки потоков данных в программно-конфигурируемых сетях на основе генетического алгоритма / Д.А. Перепелкин, В.Т. Нгуен // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 79. – С. 31-48.
3. Перепелкин Д.А. Нейросетевая многопутевая маршрутизация в программно-конфигурируемых сетях на основе алгоритмов оптимизации муравьиной колонии / Д.А. Перепелкин, В.Т. Нгуен // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2024. – № 89. – С. 39-55.

4. Coello Coello, C. A. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems / C. A. Coello Coello, D. A. Van Veldhuizen, G. B. Lamont. – 2nd ed. – New York : Springer, 2007. – XXII, 800 p.

5. Festa, P. An annotated bibliography of GRASP – Part I: Algorithms / P. Festa, M. G. C. Resende // International Transactions in Operational Research. – 2009. – Vol. 16, № 1. – P. 1–24.

УДК 004.42; ГРНТИ 50.05

ОБЛАЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ PYTHON С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

А.Н. Сапрыкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, saprykin.a.n@rsreu.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрены подходы к организации параллельности в облачных информационных системах на основе python, включая многопроцессорную обработку, асинхронное программирование, оркестрацию задач, использование распределённых фреймворков и гибридные архитектуры. Показано, что комбинированное применение этих подходов позволяет эффективно распределять вычислительные и сетевые нагрузки, обеспечивая высокую производительность, масштабируемость и отказоустойчивость при сохранении простоты разработки и сопровождения программных систем.

Ключевые слова: облачные информационные системы, параллельные вычисления, асинхронное программирование, многопроцессорность, гибридные архитектуры.

PYTHON-BASED CLOUD INFORMATION SYSTEMS WITH PARALLEL ARCHITECTURE

A.N. Saprykin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, saprykin.a.n@rsreu.ru*

Abstract. This paper examines approaches to implementing parallelism in Python-based cloud information systems, including multiprocessing, asynchronous programming, task orchestration, distributed frameworks, and hybrid architectures. It is shown that the combined use of these approaches enables efficient distribution of computational and network loads, ensuring high performance, scalability, and

fault tolerance while maintaining ease of development and maintenance of software systems.

Keywords: cloud information systems, parallel computing, asynchronous programming, multiprocessing, hybrid architectures.

Введение

Современные информационные системы всё чаще сталкиваются с необходимостью обработки больших объёмов данных в реальном времени, что требует высокой производительности, масштабируемости и гибкости архитектурных решений. В этих условиях облачные технологии становятся ключевым инструментом, обеспечивая динамическое распределение ресурсов, отказоустойчивость и экономически эффективную модель использования вычислительных мощностей. Одновременно с этим параллельные вычисления позволяют значительно ускорить выполнение ресурсоёмких задач за счёт одновременной обработки данных на множестве вычислительных узлов.

Язык программирования Python, благодаря своей простоте, богатой экосистеме библиотек и широкому сообществу разработчиков, занимает лидирующие позиции в области разработки научных, аналитических и промышленных приложений. Его применение в сочетании с облачной инфраструктурой и параллельной архитектурой открывает новые возможности для создания высокопроизводительных, масштабируемых и легко поддерживаемых информационных систем [1].

Подходы к параллельности в Python для облачных информационных систем

Подход 1. Разбиение данных и многопроцессорная обработка

Для вычислительно интенсивных задач, выполнение которых ограничено глобальной блокировкой интерпретатора, применяется запуск нескольких независимых процессов. Исходные данные разделяются на части, и каждая часть обрабатывается отдельным процессом (рисунок 1).

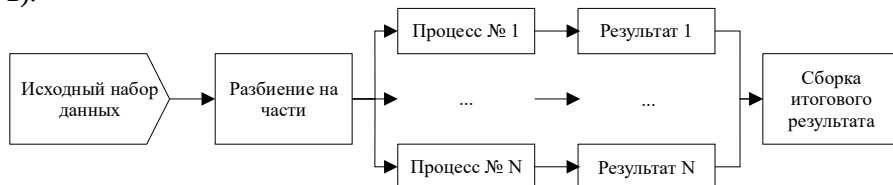


Рис. 1. Схема работы подхода 1

Использования данного подхода рассмотрим на задаче параллельной обработки списка чисел. Пример кода, иллюстрирующий принцип его работы, представлен ниже.

```
import multiprocessing as mp
def square(x):
    return x * x
if __name__ == "__main__":
    data = list(range(1000))
    with mp.Pool(processes=4) as pool:
        results = pool.map(square, data)
    print(f"Первые 5 результатов: {results[:5]}")
```

Подход 2. Асинхронное программирование

В контексте облачных информационных систем, характеризующихся высокой интенсивностью операций ввода-вывода, эффективным подходом к обеспечению масштабируемости является применение асинхронного программирования. В языке Python данный подход реализуется посредством ключевых слов `async` и `await`, а также стандартной библиотеки `asyncio`, предоставляющей инфраструктуру для организации событийного цикла. Использование асинхронной модели позволяет выполнять такие I/O-операции, как как HTTP-запросы к внешним API, взаимодействие с распределёнными базами данных или облачными файловыми системами без блокировки основного потока выполнения [2]. Это достигается за счёт кооперативной многозадачности. При возникновении ожидания завершения I/O-операции управление немедленно возвращается событийному циклу, который может переключиться на выполнение других задач. Для реализации асинхронных сетевых взаимодействий, в частности при разработке клиент-серверных компонентов облачных систем, широко применяется библиотека `aiohttp`, обеспечивающая неблокирующие HTTP-запросы и поддержку асинхронных веб-серверов (рисунки 2).

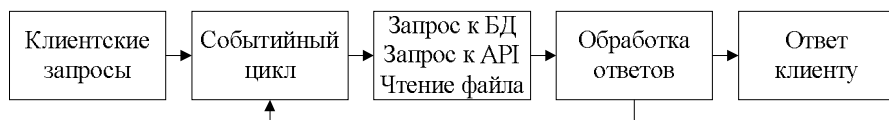


Рис. 2. Схема работы подхода 2

Использования данного подхода рассмотрим на задаче реализации микросервиса на основе фреймворка FastAPI с использованием асинхронных HTTP-обработчиков, осуществляющих неблокирующие обращения к внешним сервисам. Пример кода, иллюстрирующий принцип его работы, представлен ниже.

```
from fastapi import FastAPI
import asyncio
import httpx
app = FastAPI()
async def fetch_url(url):
    async with httpx.AsyncClient() as client:
        response = await client.get(url)
        return response.status_code
@app.get("/check")
async def check_urls():
    urls = ["https://api1.example.com",
"https://api2.example.com"]
    tasks = [fetch_url(url) for url in urls]
    statuses = await asyncio.gather(*tasks)
    return {"statuses": statuses}
```

Подход 3. Оркестрация распределённых задач с использованием систем планирования

В облачных информационных системах, характеризующихся сложными вычислительными и аналитическими конвейерами, эффективное управление параллельным выполнением задач достигается посредством применения специализированных систем оркестрации. Такие инструменты, как Celery, Prefect и Apache Airflow, обеспечивают декомпозицию вычислительных процессов на логически независимые задачи, которые могут выполняться асинхронно, параллельно или в заданной последовательности [3]. Оркестратор отвечает за планирование запуска задач, распределение их по доступным вычислительным узлам, контроль зависимостей между этапами и мониторинг состояния выполнения (рисунок 3).

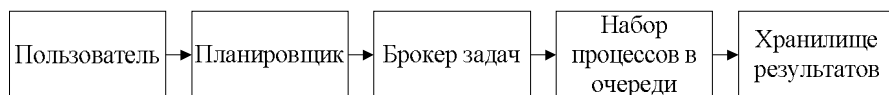


Рис. 3. Схема работы подхода 3

Использования данного подхода рассмотрим на задаче реализации распределённой обработки данных с использованием системы оркестрации Celery. Логика вычислительной задачи инкапсулируется в виде декорированной функции, зарегистрированной в экземпляре Celery-приложения, при этом в качестве брокера сообщений используется Redis. Пример кода, иллюстрирующий принцип его работы, представлен ниже.

```
from celery import Celery
app=Celery('tasks', broker='redis://localhost:6379/0')
@app.task
def process_log_chunk(chunk_id: int) -> str:
    return f"Chunk {chunk_id} processed"

from tasks import process_log_chunk
results=process_log_chunk.delay(i) for i in range(10)]
output = [r.get() for r in results]
print(output)
```

Подход 4. Применение универсальных распределённых вычислительных фреймворков

Фреймворки такого типа обеспечивают единый программный интерфейс для выполнения вычислений как в локальном, так и в распределённом режиме. Они абстрагируют разработчика от низкоуровневых деталей сетевого взаимодействия, сериализации данных и управления ресурсами, предоставляя высокоуровневые конструкции для параллельного и распределённого исполнения задач (рисунок 4). Примерами могут служить такие платформы, как Ray или Dask Distributed, которые характеризуются способностью динамически распределять вычислительные задачи по узлам кластера и эффективно управлять памятью и зависимостями между операциями [4, 5].

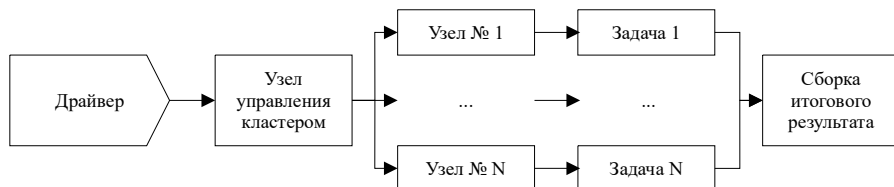


Рис. 4. Схема работы подхода 4

Использования данного подхода рассмотрим на задаче организации параллельного выполнения вычислительно интенсивных задач в облачной информационной системе с использованием среды Ray. Инициализация среды может осуществляться как локально, так и в распределённом режиме с подключением к удалённому кластеру. Пример кода, иллюстрирующий принцип его работы, представлен ниже.

```
import ray
ray.init()
@ray.remote
def simulate(params):
    return sum(x ** 2 for x in params)
futures = [simulate.remote([i, i + 1, i + 2]) for i in
range(100)]
results = ray.get(futures)
print(f"Среднее значение: {sum(results) /
len(results)}")
```

Подход 5. Гибридные подходы к организации параллелизма

Гибридные подходы к параллелизму предполагают комбинирование нескольких моделей и механизмов параллельного выполнения в рамках единой архитектуры с целью достижения оптимального баланса между производительностью, масштабируемостью и эффективностью использования ресурсов. В контексте облачных информационных систем на основе Python такие подходы позволяют адаптировать стратегию параллелизма к специфике различных уровней обработки данных.

Типичная гибридная архитектура может включать асинхронное программирование для обработки I/O-интенсивных операций (например, приёма HTTP-запросов), системы оркестрации задач для управления длительными фоновыми процессами, а также распределённые вычислительные фреймворки для выполнения CPU- или память-интенсивных операций в масштабе кластера. Такая композиция обеспечивает разделение ответственности между компонентами системы, где каждый уровень использует наиболее подходящую модель параллелизма, что в совокупности повышает общую эффективность, отказоустойчивость и гибкость облачного приложения.

Выводы

В работе систематизированы и проанализированы основные подходы к реализации параллельных и распределённых вычислений в об-

лачных информационных системах с использованием языка программирования Python. Показано, что применение многопроцессорной обработки, асинхронного программирования, систем оркестрации задач и универсальных распределённых фреймворков позволяет эффективно решать задачи, требующие высокой производительности, масштабируемости и отказоустойчивости. Особую значимость представляет гибридная организация параллелизма, при которой различные модели комбинируются в зависимости от природы обрабатываемых данных и специфики вычислительных операций.

Экспериментальные примеры, приведённые в статье, подтверждают практическую применимость рассмотренных методов в таких областях, как построение высоконагруженных веб-сервисов, обработка больших объёмов данных и управление длительными фоновыми процессами. Полученные результаты согласуются с современными тенденциями в разработке облачных платформ и программно-конфигурируемых систем, отражёнными в исследованиях [6–8], где акцент делается на оптимизацию ресурсного планирования, интеграцию IoT-устройств и построение масштабируемых архитектур обработки данных.

Таким образом, совмещение возможностей языка Python, облачной инфраструктуры и современных парадигм параллельных вычислений формирует основу для создания гибких, адаптивных и высокопроизводительных информационных систем, отвечающих требованиям современных прикладных задач.

Библиографический список

1. McKinney, W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter / Wes McKinney. – 3rd ed. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2022. – 560 p.
2. FastAPI – High performance, easy to learn, fast to code, ready for production [Электронный ресурс] // FastAPI Documentation. – URL: <https://fastapi.tiangolo.com/> (дата обращения: 28.10.2025).
3. Celery – Distributed Task Queue [Электронный ресурс] // Celery Project Documentation. – URL: <https://docs.celeryq.dev/en/stable/> (дата обращения: 28.10.2025).
4. Dask Development Team. Dask: Parallel Computing with Task Scheduling // Journal of Open Source Software. – 2021. – Vol. 6, № 63. – P. 3391.
5. Moritz, P. et al. Ray: A Distributed Framework for Emerging AI Applications // Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Operating Systems De-

sign and Implementation (OSDI 2018). – Carlsbad: USENIX Association, 2018. – P. 561–577.

6. Перепелкин Д.А. Разработка облачной платформы и визуальной программной системы конфигурирования устройств Интернета вещей / Д.А. Перепелкин, Д.Д. Ткачев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 82. – С. 73-88.

7. Перепелкин Д.А. Разработка шлюза и облачной платформы программноконфигурируемой сети устройств Интернета вещей / Д.А. Перепелкин, Д.Д. Ткачев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 84. – С. 88-98.

8. Спицын А.А. Алгоритм настройки параметров расписания облачных вычислений на основе оптимизации роя частиц // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 75. – С. 44-52.

УДК 004.94; ГРНТИ 50.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А.А. Кокунов, А.И. Таганов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alxtag@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается проблема обеспечения формализованной оценки текущего уровня возможностей отдельных рабочих процессов проектной организации по стадиям жизненного цикла создаваемой программной продукции в контексте требований международных стандартов ИСО. Решение задачи основано на использовании формализованной методики процессного моделирования и градиентной оптимизации надежности и контролей алгоритмических процессов.

Ключевые слова: стандарты ИСО, процессы жизненного цикла программного обеспечения, оценка уровня возможностей процесса, алгоритмическая модель процесса, градиентная оптимизация надежности и контролей процесса.

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE RELIABILITY OF ALGORITHMIC PROCESSES OF THE SOFTWARE LIFECYCLE

A.A. Kokunov, A.I. Taganov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, alxtag@yandex.ru*

Annotation. The paper considers the problem of providing a formalized assessment of the current level of capabilities of individual operational processes of a project organization according to the stages of the life cycle of software products being created in the context of the requirements of international ISO standards. The solution of the problem is based on the use of a formalized methodology of process modeling and gradient optimization of reliability and controls of algorithmic processes.

Key words: ISO standards, software lifecycle processes, assessment of the level of process capabilities, an algorithmic process model, gradient optimization of reliability and process controls.

Введение

В настоящее время в различных областях нашей жизни используется, разрабатывается и внедряется огромное количество программного обеспечения (ПО) различного назначения. В условиях рыночной экономики проблема обеспечения высокого качества и надежности программных продуктов стоит как никогда остро. Для решения данной проблемы в стандартах системы менеджмента качества ИСО указывается целый ряд важных требований и положений, следуя которым проектные организации в области ИТ-технологий могут добиться высоких показателей качества и надежности выпускаемой программной продукции. В число наиболее востребованных стандартов в области программной инженерии, менеджмента качества и управления рисками программных проектов входят положения стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 [1] и ГОСТ Р ИСО/МЭК 33001-2017 [2] (Семейства стандартов ИСО/МЭК 330XX) и др.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 — «Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств». Это фундаментальный, процессно-ориентированный стандарт, который предоставляет полный набор процессов, видов деятельности и задач, которые могут быть применены при приобретении, поставке, разработке, эксплуатации и сопровождении программного обеспечения. Данный стандарт создает общую структуру для всех участников жиз-

ненного цикла программных средств (заказчиков, поставщиков, разработчиков). Его можно рассматривать как «карту» или алгоритм всего проекта.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 33001-2017 — «Информационные технологии. Оценка процессов. Концепции и термины». Это оценочный стандарт, который описывает, как оценивать эффективность процессов и устанавливает общие принципы и требования для оценки процессов. Данный стандарт предоставляет методологию и метрики для объективной оценки того, насколько процессы, описанные в ГОСТ 12207, грамотно выстроены, работают и совершенствуются.

ГОСТ 33020-2017 устанавливает 6 уровней возможностей процессов программной инженерии, используемых при оценке процессов проектной организации [3]:

- «0» - незавершенный процесс;
- «1» - выполненный процесс;
- «2» - управляемый процесс;
- «3» - установленный процесс;
- «4» - предсказуемый процесс;
- «5» - инновационный процесс.

Переход с 3-го на 4-й уровень совершенства процесса является одним из наиболее сложных переходов во всей модели и требует как кадровых, так и технических доработок. «Предсказуемый процесс» характеризуется наличием свойств «Количественный анализ» и «Количественный контроль». Проще говоря, переход на данный уровень требует введение количественных метрик процесса в соответствии с бизнес-целями организации, а также их отслеживание и реагирование на негативные изменения.

Предлагается подход к анализу наиболее важных показателей процесса – вероятности его корректного функционирования (работы без внесения ошибок), вероятности возникновения различных ошибок (в зависимости от рассматриваемой области и типа ошибки могут быть как критические, так и допустимые), стоимость и/или время выполнения процесса (обычно один из этих показателей сводится к другому).

Для реализации данной идеи анализируемый процесс разбивается на низкоуровневые (атомарные) подпроцессы, после чего сводится к дискретному виду и представляется в виде алгоритмического процесса (АП). Использование единой универсальной алгоритмической формы представления поведения дискретных систем в форме АП хорошо

проработано [4-5, 8] и открывает возможности для количественного анализа описанных показателей и дальнейшей оптимизации процесса.

В качестве реакции на негативные изменения рассматриваемых показателей качества и надежности процессов предлагается внедрение контрольно-доработочных процедур в структуру самого широкого спектра процессов [1, 8-11].

Анализ и оптимизация алгоритмических процессов

Задача анализа и оптимизации алгоритмических процессов сводится к переводу рассматриваемых процессов в математическую модель, их анализу по показателям, установленными бизнес-целями и, при необходимости, внедрение контрольных операций и оптимизация процесса. Общий алгоритм решения задачи представлен на рисунке 1.

Первым этапом решения задачи является перевод установленного в соответствии с ГОСТ 12207 процесса в математическую модель. В данном случае рассматривается многомерная концепция учета ошибок и в качестве математической модели выбраны матрицы модели надежности операторов АП. Такой подход был предложен А.П. Ротштейном в работе [6] как идейное продолжение работ Губинского А.И. [7]. В дальнейшем данный подход получил развитие в работе [5].

Для этого анализируемый процесс разбивается на атомарные операции, для которых формируются графы переходов с учетом рассматриваемых типов ошибок. На основе данных графов формируется матрица модели надежности каждого из операторов. Также определяется общий перечень возможных контрольно-доработочных операций и для них аналогично формируются матрицы модели надежности, которые включают в себя вероятности обнаружения различных типов ошибок для контролей, вероятности устранения ошибок для операций доработки и их стоимость выполнения.



Рис. 1. Алгоритм анализа установленного процесса

Следующий шаг – выделение критичных параметров и установка целевых значений. Он включает в себя определение граничных значений, при которых работа алгоритма удовлетворяет текущие бизнес-цели процесса, в частности, вероятность отсутствия ошибок на выходе АП и вероятность возникновения на выходе АП некоторой i -й ошибки, при этом стоимость выполнения должна быть минимальной.

После выполнения перечисленных этапов открывается возможность для анализа и оптимизации АП. При несоответствии характеристик процесса заданным параметрам добавляются контрольно-доработочные операции из перечня возможных и выполняется оптимизация процесса. Одним из подходов к оптимизации алгоритмических процессов является применение и программная реализация принципов градиентной оптимизации.

Градиентная оптимизация алгоритмических процессов

Сутью градиентного поиска является аппроксимирование целевой функции в направлении градиента с целью нахождения максимума («Градиентное восхождение») или же, наоборот, в обратном направлении – для нахождения минимума («Градиентный спуск»). Применение данного подхода для бинарной концепции учета ошибок предложено в [6]. В работе настоящей рассмотрена итеративная процедуру изменения значения управляемой переменной (вектора контрольных операций) с целью улучшения градиента контроля. Градиент контроля представляет собой следующее отношение:

$$\nabla_i(x_i) = \frac{\Delta p^1(X, x_i)}{\Delta C(X, x_i)},$$

где $\Delta p^1(X, x_i)$ – приращение вероятности безошибочного выполнения АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора A_i ;

$\Delta C(X, x_i)$ – приращение стоимости выполнения АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора A_i .

В данном случае градиент показывает относительную эффективность внедрения дополнительного контроля с доработкой в рамках выполнения АП. Обобщение данного выражения на случай многомерной концепции учета ошибок будет иметь вид:

$$\nabla_i(x_i) = \frac{P(X, x_i = x_i + 1) - P(X, x_i)}{C(X, x_i = x_i + 1) - C(X, x_i)},$$

где *числитель* – приращение матрицы модели надежности АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора A_i ;

знаменатель – приращение стоимости выполнения АП при введении контроля с доработкой после рабочего оператора A_i .

Первый элемент результирующей матрицы будет соответствовать отношению приращения вероятности безошибочного выполнения АП к приращению стоимости по результатам введения дополнительного контроля с доработкой после рабочего оператора A_i . Остальные элементы первой строки будут представлять собой отношения убыли вероятностей ошибок разных типов к приращению стоимости.

Программная реализация

Следующим этапом решения задачи является разработка программной реализации для анализа и оптимизации рассмотренной математической модели. В данной работе рассмотрена задача расстановки контрольно-доработочных операций при заданных ограничениях на безошибочность и заданных ограничениях на ошибки разных типов. Реализованный алгоритм аппроксимирует матрицу надежности АП к заданному вектору ограничений при этом минимизирует затраты, т.е. стоимость выполнения АП.

В общем случае исходные данные считываются из файлов и включают в себя минимальный набор для формирования матриц каждого оператора. Формирование таких файлов осуществляется на основе статистических данных, накопленных организацией в ходе своей деятельности, а также экспертных оценок специалистов в области анализируемого процесса. В случаях наличия необходимых статистических данных в базах данных организации возможна интеграция программного обеспечения в существующую информационную систему предприятия.

Параметры оптимизации задаются в интерфейсе программы и включают в себя целевой уровень безошибочности и вектор ограничений для рассматриваемых типов ошибок.

На рисунке 2 представлен результат работы программы. В данном случае оптимизация применялась к АП из 30 операций, в котором возможны 5 типов ошибок. В результате работы программы представляется пошаговая информация по оптимизации, график соотношения стоимости и вероятности безошибочного выполнения АП на каждом шаге и итоговый результат оптимизации.

Третий участок оптимизации

Итерация 27

Новый вектор контролей:

1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1

Матрица надежности АП

0.760730	0.024201	0.042752	0.069834	0.027615	0.074867
0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Стоимость выполнения АП

10763.811

Оптимизация завершена!

Рис. 2. Результат работы программы

В ходе оптимизации АП критерии по 1, 2 и 4 типу ошибок были достигнуты на 22 итерации. Второй участок оптимизации с 23 по 26 итерацию достиг требуемого уровня по всем параметрам. Третий участок оптимизации (27 итерация) снял избыточный контроль и уменьшил стоимость выполнения, при этом оставив все параметры в допустимых рамках.

Выводы

Использование предложенного формализованного подхода к моделированию и оптимизации АП позволяет менеджменту организации понимать, насколько их процессы в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010, ГОСТ Р ИСО/МЭК 33001-2017 соответствуют бизнес-целям, предоставляя количественную метрику, охватывающую весь рассматриваемый процесс. Применение на практике программной реализации предложенного подхода позволяет упростить количественный контроль путем периодического расчета показателей процесса и позволяет превентивно реагировать на возможные риски качества путем внедрения контрольно-доработочных операций. Также в рамках концепции ГОСТ Р ИСО/МЭК 33001-2017 формализованный подход позволяет ускорить анализ 4-го уровня возможностей анализируемых рабочих процессов жизненного цикла ПО посредством своевременного предоставления расчетных статистических показателей процесса, протокола и графика оптимизации.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. – Введ. 30.11.2010. – М.: Стандартинформ, 2011. – 99 с.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 33001-2017. Информационные технологии. Оценка процесса. Понятия и терминология. – Введ. 26.05.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 15 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 33020-2017. Информационные технологии. Оценка процесса. Система измерения процесса для оценки возможностей процесса. – Введ. 26.03.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 15 с.
4. Кокунов А.А., Таганов А.И. Модельное представление алгоритмических процессов космических информационных систем для задач оценки надежности и оптимизации. В сборнике: 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Мат. докл. – Рязань, 2023. С. 251 – 254.
5. Ротштейн А.П., Штовба С.Д., Козачко А.Н. Моделирование и оптимизация надежности многомерных алгоритмических процессов. – Винница: «УНИВЕРСУМ-Вінниця», 2007. – 215 с.
6. Ротштейн А. П., Кузнецов П. Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. – К.: Техника, 1992. – 180 с.
7. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: Наука, 1982. – 270 с.
8. Таганов А.И. Методика анализа и сокращения рисков проектов сложных программных систем по характеристикам качества // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 31. - С. 77-82.
9. Перепелкин Д.А., Фам А.М. Математические модели планирования упорядоченного набора операций для распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях // Вестник РГРТУ. 2022. Выпуск 79. С. 56-67.
10. Янов Е.С., Анцев А.В. Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. - С. 85-94.
11. Волошко А.Г., Ивутин А.Н., Крюков О.С. Оптимизация производственных процессов с использованием математического аппарата расширенных сетей Петри // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. - С. 127-142.

УДК 004.023; ГРНТИ 50.03.05

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СИСТЕМНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРОЕКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕЧЕТКОСТИ ПРОЕКТНЫХ ДАННЫХ

А.И. Таганов, А.А. Кокунов*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, kt.rsreu@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрено решение задачи формализации и оптимизации состава системных требований, формируемых на этапе концептуального проектирования автоматизированной системы в условиях нечеткости проектных данных. В основу предложенного подхода к решению указанной задачи в работе использован метод, основанный на введении правил порождения структурно-компоновочных векторов и использовании нечеткого представления требований к проектируемой системе в виде вектора требований. Показано, что использование методов и положений теории нечетких множеств позволяет корректно реализовать процедуру оптимизации состава системных требований к проектируемой автоматизированной системе на этапе эскизного проектирования.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система, системные требования, нечеткие множества, процедура формализации и оптимизации требований.

OPTIMIZATION OF SYSTEM REQUIREMENTS OF THE AUTOMATED SYSTEM DESIGN WHEN DESIGN DATA IS NOT CLEAR

A.I. Taganov, A.A. Kokunov*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazanь, kt.rsreu@yandex.ru*

Abstract. This paper discusses the problem of formalization and optimization of system requirements formed at the stage of conceptual design of the automated system in conditions of unclear design data. The basis of the proposed approach to solving this problem in the work is a method based on the introduction of rules for generating structural-layout vectors and using a vague representation of the requirements for the designed system in the form of a vector of requirements. It is shown that the use of methods and provisions of fuzzy set theory makes it possible to correctly implement the procedure for optimizing the composition of system requirements for the designed automated system at the stage of preliminary design.

Keywords: automated information system, system requirements, fuzzy sets, procedure of requirements formalization and optimization.

Введение

В настоящее время автоматизированные системы (АС) являются неотъемлемой частью глобальных систем связи, навигации, мониторинга, дистанционного зондирования Земли и др. Такие системы позволяют получать актуальную информацию о состоянии Земной поверхности, воздушных масс, транспортной доступности, экологической обстановки и т.п., а также обеспечивать стабильную связь практически в любой точке мира. Постоянная доступность таких систем, а также их корректное функционирование является важным критерием, который необходимо рассматривать и анализировать на этапе эскизного проектирования и формализации пользовательских и системных требований к новым проектам создаваемых АС очень часто в условиях нечеткости исходных проектных данных [1-4, 7].

Начальные этапы проектирования АС традиционно считаются наиболее сложными и важными в том смысле, что практически до 75 % стоимости таких систем закладывается на стадии концептуального и эскизного проектирования. Ошибки, допущенные здесь при формализации и оптимизации системных требований, трудно устранимы на последующих этапах проектирования и их устранение обычно связано с существенными временными и трудовыми затратами [4, 7].

Задача выбора актуального состава системных требований к архитектуре создаваемой АС решается на одной из начальных стадий проектирования системы - стадии технических предложений и эскизного проектирования. Цель решения задачи – выделение из множества возможных вариантов организации архитектуры системы нескольких наиболее перспективных вариантов и их ранжирование по степени удовлетворения функциональных и технических требований к системе на основании исходных данных, имеющихся к моменту начала решения задачи. Окончательный выбор вариантов состава архитектуры системы и системных требований производится на стадии технического проектирования с учетом уточненных данных об информационном, программном, лингвистическом и методическом обеспечении АС, которые разрабатываются для предварительно выбранного состава архитектуры. При этом, формирование системных требований и выбор со-

става архитектуры АС выполняются по времени раньше, чем формирование требований к отдельным функциональным подсистемам, поэтому на начальных этапах проектирования объективно присутствует неопределенность в формировании требований к системе, например, к производительности вычислительного комплекса, объемам оперативной и внешней памяти и др. Такая неопределенность и нечеткость исходных данных, как показала практика, значительно усложняет задачу формализации и оптимизации состава системных требований к АС и для ее решения требуется применение соответствующих методов принятия решения, основанных на использовании методов теории нечетких множеств и нечеткой логики [5, 6].

В общем случае исходными данными для решения задачи формирования системных требований к архитектуре АС являются [1-3]: технические требования к системе, сформулированные в техническом задании на ее создание; проектные решения, определяющие функциональную архитектуру системы; существующие проектные решения по структуре и составу компонентов (типовые решения); нормативно-справочная информация, включающая ГОСТы, ОСТы, руководящие методические документы, каталоги и справочники с описаниями функциональных возможностей и технических характеристик компонентов технического обеспечения, операционных систем и базовых программно-технических комплексов и др. Для решения задачи формализации и оптимизации состава системных требований в условиях нечеткости проектных данных необходимо предварительно обосновать соответствующий формализованный подход.

Формализация системных требований в условиях нечеткости

Рассматриваемый и исследуемый в работе подход к формализации и оптимизации системных требований к АС основан на введении правил порождения структурно-компоновочных векторов (СКВ) и использовании нечеткого представления требований к проектируемой системе в виде вектора системных требований (ВСТ) [4, 7]. Структурно-компоновочный вектор (СКВ-вектор) задает вариант состава архитектуры проектируемого комплекса. При этом компонентами СКВ-вектора при выборе состава архитектуры АС часто являются [1-3, 8-11]:

- конфигурация технических средств (типы АРМов, процессоров, периферийного оборудования, типы и объем оперативной памяти, внешней памяти и др.);
- конфигурация системного программного обеспечения (типы ОС, СУБД, CASE-инструментарий и др.);
- средства прикладных систем, не подлежащие разработке (информационно-поисковые системы, системы управления конфигурацией, документированием, тестированием, графические подсистемы и другие компоненты).

С другой стороны, вектор системных требований, формализованный в виде системы нечетких множеств, в общем случае включает в себя составляющие компоненты [4, 7, 8]:

- требования к факторам качества (надежности, сопровождаемости, удобству применения, эффективности, универсальности, и др.);
- требования к набору критериев качества (устойчивости функционирования, работоспособности, структурности, простоте конструкции, наглядности, повторяемости, легкости освоения, доступности эксплуатационных программных документов, удобству эксплуатации и обслуживания, уровню автоматизации, временной эффективности, ресурсоемкости, гибкости, мобильности, модифицируемости, полноте реализации, согласованности, логической корректности, стоимости, безопасности информации и др.);
- требования к проекту АС, формализованные в виде нечетких множеств [7, 8].

Вектор системных требований определяется также на основе множества выходных характеристик АС и универсального множества значений характеристик. При этом, нечеткое подмножество, определенное на универсальном множестве характеристик с известной функцией принадлежности, задает требование АС к характеристике. Совокупность этих подмножеств и образует ВСТ.

Формально формирование ВСТ системы выполняется следующим образом. Пусть Y - множество выходных характеристик АС,

Z_i – универсальное множество значений характеристики $y_i \in Y$, $i = 1, n$.

Нечеткое множество S_i , определенное на множестве Z_i с функцией принадлежности μ_i , задает требование g_i к характеристике y_i

системы. При этом часть требований может задаваться обычными, четкими подмножествами.

Совокупность этих подмножеств образует ВСТ $G = (g_1, \dots, g_n)$.

Если S_i – дискретное подмножество, то оно задается перечислением элементов.

Задание на множестве Z_i непрерывного подмножества S_i означает задание алгоритмом для вычисления функции принадлежности его элементов $\mu_i = f_{\mu_i}(Z_i)$.

Пусть, например, требование к надежности АС задано в виде нечеткого ограничения: *«Интенсивность отказов должна быть близка к минимально возможной»*. Для отображения этого требования на множество значений интенсивностей отказов удобно использовать нормированное, т.е. заданное на интервале (0,1), множество значений интенсивностей отказов $Z_{\lambda n}$. Для определения элементов множества $Z_{\lambda n}$ используется соотношение:

$$Z_{\lambda j n} = Z_{\lambda \min} / Z_{\lambda j}, \quad (1)$$

где $Z_{\lambda j n}$ – элемент множества $Z_{\lambda n}$, представляющий собой нормированное значение интенсивности отказов Z_{λ} для j -го варианта реализации АС, а $Z_{\lambda \min} = \min Z_{\lambda j}$ – значение интенсивности отказов для j -го варианта реализации АС.

Соотношение (1) можно использовать также для задания функции принадлежности нечеткого подмножества S_{λ} :

$$\mu_{\lambda j} = Z_{\lambda \min} / Z_{\lambda j}, \quad (2)$$

где $\mu_{\lambda j}$ – значение функции принадлежности j -го элемента подмножества S_{λ} , заданного требованием к надежности системы.

Удобным способом представления непрерывного подмножества S_{λ} – задание узловых элементов и применение интерполяционных функций (например, линейной) для вычисления функции принадлежности промежуточных элементов подмножества. Так, наиболее соот-

ветствующим, с точки зрения эксперта, его пониманию нечеткого ограничения «Интенсивность отказов ИС должна быть близка к минимально возможной» может быть заданно таким подмножеством:

$$S_{\lambda}^* = (\mu_1 / b_1, \dots, \mu_i / b_i, \dots, \mu_n / b_n),$$

где b_i - нормированное значение характеристики “Интенсивность отказов”;

μ_i – степень соответствия, с точки зрения эксперта, нормированного значения характеристики b_i нечеткому ограничению «Интенсивность отказов ИС должна быть близка к минимально возможной».

Значение функции принадлежности элемента $S_{\lambda}^* = b^*$ находится, например, между значениями b_i и b_j из уравнения кусочно-линейной интерполяции: $\pi_s = \mu_j + (\mu_j - \mu_i) / (b_j - b_i) * (b^* - b_i)$.

Выбор состава архитектуры АС понимается как задача отыскания на множестве СКВ нечеткого подмножества, удовлетворяющего всей совокупности требований и представляющего собой пересечение нечетких подмножеств СКВ, задаваемых ограничениями, накладываемыми отдельными требованиями. Значение функции принадлежности искомого нечеткого подмножества СКВ используется в качестве критерия при выборе архитектуры АС; наилучшими считаются варианты с наибольшими значениями функции принадлежности. Для отыскания нечетких подмножеств P_i вариантов АС, удовлетворяющих требованиям S_i , используется принцип обобщения [4, 5], суть которого можно проиллюстрировать следующим образом.

Пусть S – нечеткое подмножество множества Z , заданное на оси OZ; X – множество вариантов АС, заданное на оси OX; φ – известное отношение на множестве $Z * X$. Тогда P – искомое подмножество. Другими словами, P – образ множества S при отображении

$$\varphi(S) \rightarrow X. \text{ Если } S = \mu_s(z_1) / z_1 \cup, \dots, \cup \mu_s(z_N) / z_N,$$

то в соответствии с принципом обобщения

$$P = \varphi(S) = \mu_s(z_1) / \varphi(z_1) \cup, \dots, \cup \mu_s(z_N) / \varphi(z_N). \quad (4)$$

В соотношении (4) $\varphi(z_1)$ – точка множества X , а $\mu_s(z_N)$ – степень принадлежности $\varphi(z_1) \varphi(z)$ нечеткому подмножеству $\varphi(S)$ множества X .

При выборе состава АС следует обратить внимание на тот факт, что отображение $\varphi : Z \rightarrow X$ неизвестно и для нахождения его элементов используется обратное ему отображение $f : X \rightarrow Z$, которое задается значениями характеристик АС или алгоритмами для их вычисления.

Алгоритм решения задачи

Отыскание подмножества СКВ, удовлетворяющего ВТС, состоит из следующих шагов:

Шаг 1. – Формирование множества СКВ $X = (x_i)$.

Шаг 2. – Отображение множества X на множество значений характеристик Z_i , имеет вид $f_i : X \rightarrow Z_i (i=1, \dots, n)$.

Шаг 3. – Определение нечетких подмножеств P_i с функциями принадлежности $\mu_i(f_i(X))$, $(i=1, \dots, n)$, задаваемых на множестве X по требованиям g_i к характеристикам $z_i \subseteq Y$.

Шаг 4. – Нахождение пересечения подмножеств P_i

$$P = \bigcap_{i=1}^n P_i, \quad (5)$$

где P – искомое нечеткое подмножество СКВ, удовлетворяющее вектору требований G .

При определении пересечения нечетких множеств используется мультипликативная форма представления функции принадлежности множества пересечения $\pi^*(X_j)$ через функции принадлежности составляющих множеств:

$$\pi^*(X_j) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \mu_i(f_i(X_j)), \quad j = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Выражение (6) учитывает коэффициенты предпочтения отдельных характеристик α_i , причем $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. С точки зрения принятия решения о выборе АС функции принадлежности в (6) имеют следующий смысл: $\mu_i^{\alpha_i}(f_i(X_j))$ – частные критерии выбора по характеристике Y_i с учетом веса α_i , $\pi^*(X_j)$ – обобщенный критерий соответствия варианта X_j системным требованиям ВСТ.

Свойство дифференцируемости выражения (4) можно использовать при определении устойчивости полученного решения. Множество P считается устойчивым, если при вариации функции принадлежности μ_i в заданных пределах порядок элементов ранжированного по значению $\pi^*(X_j)$ множества P не меняется.

Выводы

В работе рассмотрен и обоснован подход к решению задачи формализации и оптимизации состава системных требований, формируемых на этапе концептуального проектирования АС в условиях нечеткости проектных данных. Основой рассмотренного подхода является контекст, построенный на введении правил порождения структурно-компоновочных векторов и использовании нечеткого представления требований к проектируемой системе в виде вектора требований. Показано, что использование методов и положений теории нечетких множеств позволяет корректно реализовать процедуру оптимизации состава системных требований к архитектуре проектируемой автоматизированной системы на этапе эскизного проектирования.

Библиографический список

1. ГОСТ 34.201-2020. Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем.
2. ГОСТ 34.602 - 2020 Информационные технологии Техническое задание на создание автоматизированной системы.
3. ГОСТ Р 71765 - 2024 Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Общие требования.
4. Выбор состава программно-технического комплекса САПР: Практи. пособие / Ю.Г.Нестеров, И.С.Папшев; Под. ред. А.В.Петрова. М.: Высш. шк., 1990.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А.Поспелова. - М.: Наука, 1986.
6. Демидова Л.А., Советов П.Н., Горчаков А. В. Кластеризация представлений текстов программ на основе цепей Маркова // Вестник РГРТУ. 2022. Выпуск 81. С. 51-64.
7. Корячко В.П., Таганов Р.А. Модели и методы структурной оптимизации в условиях неопределенности: Методические указания к лабораторным работам № 1-3 / Рязан. гос. радиотех. акад. Рязань, 2001. 32 с.
8. Корячко В.П., Таганов А.И., Таганов Р.А. Методологические основы разработки и управления требованиями к программным системам.- М. Горячая линия-Телеком, 2009. 224 с.
9. Кокунов А.А., Таганов А.И. Модельное представление операторов алгоритмических процессов информационных систем для задач оценки надежности и оптимизации. В сборнике: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань, 2022. С. 210 – 218.
10. Янов Е.С., Анцев А.В. Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. - С. 85-94.
11. Волошко А.Г., Ивутин А.Н., Крюков О.С. Оптимизация производственных процессов с использованием математического аппарата расширенных сетей Петри // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. - С. 127-142.

УДК 62.77; ГРНТИ 50.47.02

КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА КАК ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕХОДА ОТ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА К ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

А.М. Авилова, О.В. Миловзоров

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, nastya.mosina.2002@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается применение компьютерного метода обратного инжиниринга как современного инструмента перехода от физического образца к цифровой модели изделия. Представлены теоретические основы метода, его этапы и ключевые программные решения, обеспечивающие высокую точность восстановления геометрии объектов. Установлено, что использование 3D-сканирования и CAD-систем позволяет значительно сократить трудоёмкость проектных работ, повысить точность и обеспечить возможность интеграции данных в цифровые производственные процессы.

Ключевые слова: обратный инжиниринг, 3D-сканирование, CAD-моделирование, цифровая модель, реконструкция изделия, конструкторская документация.

TO THE ISSUE OF REVERSE ENGINEERING AND ITS APPLICATION IN THE DEVELOPMENT OF DESIGN DOCUMENTATION

A.M. Avilova, O.V. Milovzorov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, nastya.mosina.2002@gmail.com*

Annotation. The article discusses the application of the computer reverse engineering method as a modern tool for the transition from a physical sample to a digital product model. The theoretical foundations of the method, its stages and key software solutions that ensure high accuracy of object geometry reconstruction are presented. It has been established that the use of 3D scanning and CAD systems can significantly reduce the complexity of design work, improve accuracy and enable data integration into digital production processes.

Keywords: reverse engineering, 3D scanning, CAD modeling, digital model, product reconstruction, design documentation.

Введение

Современное развитие промышленности характеризуется стремительным переходом к цифровым технологиям проектирования и производства. Одним из ключевых направлений этой цифровизации является применение методов обратного инжиниринга, позволяющих преобразовать физические объекты в их точные цифровые аналоги [1, 2]. Такой подход обеспечивает возможность последующего анализа, модификации, восстановления или производства изделий без необходимости наличия исходной конструкторской документации.

Во многих отраслях машиностроения, приборостроения и ремонта оборудования нередко возникает потребность в восстановлении геометрии деталей, документация на которые была утеряна, или снятых с производства. Традиционные ручные методы измерений, выполняемые при помощи штангенциркулей, микрометров и других измерительных инструментов, требуют значительных трудозатрат и не всегда обеспечивают необходимую точность. В отличие от них, компьютерные методы обратного инжиниринга позволяют автоматизировать процесс получения и обработки геометрических данных, значительно сокращая время разработки и повышая качество создаваемых 3D-моделей.

Компьютерный метод обратного инжиниринга основывается на применении специализированного оборудования и программного обеспечения – таких как 3D-сканеры, системы фотограмметрии и CAD-программы, поддерживающие работу с облаками точек. Эти технологии позволяют не только точно воспроизводить геометрию изделия, но и создавать параметрические цифровые модели, пригодные для последующего анализа, модификации и интеграции в современные производственные процессы, включая аддитивные технологии и системы цифрового двойника.

Актуальность исследования определяется необходимостью внедрения эффективных и универсальных методов цифровизации физических объектов в условиях ускоренной модернизации промышленности и перехода к концепции «умного производства». Применение компьютерного метода обратного инжиниринга открывает широкие перспективы для восстановления, реконструкции и совершенствования изделий, а также для повышения производственной гибкости и сокращения затрат.

Теоретические основы компьютерного обратного инжиниринга

Понятие и сущность обратного инжиниринга

Обратный инжиниринг представляет собой процесс исследования, анализа и восстановления структуры изделия по его физическому образцу с целью создания цифровой модели или конструкторской документации. В промышленности данный метод применяется для решения широкого спектра задач – от восстановления утраченных чертежей до модернизации и адаптации изделий под новые технологические процессы.

В отличие от традиционного проектирования, где разработка начинается с идеи и математической модели, обратный инжиниринг движется в противоположном направлении – от готового физического объекта к его цифровому представлению. Это позволяет воссоздать геометрические параметры изделия, а также выявить технологические и конструктивные особенности, недоступные при визуальном осмотре.

Компьютерный метод как основа цифровизации процесса

Компьютерный метод обратного инжиниринга основывается на применении современных цифровых технологий – 3D-сканирования, фотограмметрии, обработки облаков точек и параметрического моделирования. В отличие от ручных измерений, этот подход обеспечивает высокую точность, автоматизацию и возможность быстрой интеграции данных в CAD/CAM/CAE-системы [3, 4].

Ключевая идея метода заключается в преобразовании геометрической информации, полученной с поверхности физического объекта, в трёхмерную цифровую модель. На практике процесс состоит из последовательных этапов:

- Сканирование объекта – получение данных о геометрии с помощью 3D-сканера или фотограмметрической системы.
- Формирование облака точек – создание массива пространственных координат, описывающих поверхность изделия.
- Построение полигональной модели (mesh-модели) – объединение облаков точек в единую поверхность.
- Создание параметрической CAD-модели – перевод полигональной модели в формат, пригодный для инженерных расчётов, черчения и производства.

Средства и программные решения компьютерного обратного инжиниринга

Для реализации компьютерного метода применяется специализированное программное обеспечение, обеспечивающее комплексную обработку данных. Наиболее распространённые системы включают:

- Geomagic Design X – профессиональное ПО для преобразования облаков точек в параметрические модели;
- SolidWorks и Siemens NX – CAD-системы, поддерживающие импорт и редактирование сканированных данных;
- Autodesk ReCap и MeshLab – инструменты для очистки и оптимизации облаков точек;
- CATIA – система, интегрирующая этапы 3D-моделирования и анализа;
- ANSYS SpaceClaim – для подготовки геометрии к инженерному анализу и симуляции.

Применение этих решений позволяет выполнять обработку данных на всех стадиях – от оцифровки до построения полного цифрового прототипа изделия.

Преимущества и ограничения метода

Основными преимуществами компьютерного обратного инжиниринга являются:

- высокая точность и повторяемость результатов;
- сокращение времени разработки конструкторской документации;
- возможность цифрового хранения и анализа данных;
- автоматизация процесса реконструкции изделий;
- интеграция с системами аддитивного производства и цифрового двойника.

Однако метод имеет и ряд ограничений: высокая стоимость оборудования, необходимость квалифицированных операторов, а также ограниченная точность при сканировании объектов со сложными оптическими свойствами (блестящих, прозрачных или мягких поверхностей).

Практическая реализация компьютерного метода обратного инжиниринга

Этапы реализации процесса

Практическая реализация компьютерного метода обратного инжиниринга представляет собой последовательность технологических операций, направленных на преобразование физического изделия в его цифровой аналог. Процесс включает несколько ключевых этапов:

Подготовка физического образца.

На данном этапе выполняется очистка и фиксация детали для обеспечения устойчивого положения при сканировании. При необходимости поверхность покрывается матирующим спреем для устранения отражений и повышения точности считывания геометрии.

3D-сканирование.

Сканирование осуществляется с помощью лазерных или оптических 3D-сканеров, которые формируют облако точек – совокупность пространственных координат, описывающих поверхность объекта. Для объектов сложной формы используется многопозиционное сканирование с последующей сшивкой фрагментов в единую модель.

Обработка облака точек.

На этом этапе выполняется фильтрация шумов, устранение дубликатов и выравнивание сегментов. После обработки формируется непрерывное облако точек, которое затем используется для построения полигональной модели.

Создание полигональной модели (mesh).

На основе облака точек строится сетчатая (треугольная) модель поверхности. При необходимости производится сглаживание, устранение артефактов и редуцирование полигонов для оптимизации размера файла.

Построение параметрической CAD-модели.

Финальным этапом является реконструкция геометрии изделия в параметрической форме, пригодной для последующего редактирования, анализа и создания конструкторской документации. Для этого используются CAD-системы (SolidWorks, CATIA, Siemens NX, Geomagic Design X и др.).

Экономическое обоснование применения компьютерного метода обратного инжиниринга

Цель и значимость экономической оценки

Экономическое обоснование внедрения компьютерного метода обратного инжиниринга направлено на определение его эффективности по сравнению с традиционными ручными способами измерений и проектирования.

Актуальность анализа заключается в том, что переход на цифровые методы требует определённых инвестиций – в оборудование, программное обеспечение и обучение персонала, – однако в долгосрочной перспективе способен существенно снизить затраты на проектно-конструкторские работы и повысить производственную эффективность.

Сравнительный анализ трудоёмкости и затрат

Для проведения экономической оценки рассмотрены два подхода к разработке конструкторской документации на основе физического образца:

- традиционный метод ручных измерений, выполняемых штангенциркулем и микрометром;
- компьютерный метод обратного инжиниринга, основанный на применении 3D-сканирования и CAD-моделирования.

В таблице приведены результаты сравнительного анализа ручного и компьютерного методов по показателям средняя трудоёмкость, средняя погрешность измерений, время оформления чертежей, возможности хранения результатов работы в цифровом виде, повторного использования результатов, моделирования и 3D-печати.

Таблица. Сравнительный анализ ручного и компьютерного методов

Показатель	Ручной метод	Компьютерный метод
Средняя трудоёмкость, чел./ч	100	40–50
Средняя погрешность измерений, мм	0,2–0,5	0,05–0,1
Необходимое время на оформление чертежей	2–3 дня	0,5–1 день
Возможность цифрового хранения данных	Отсутствует	Есть
Возможность повторного использования модели	Нет	Да
Возможность анализа и 3D-печати	Нет	Да

Согласно результатам анализа, применение компьютерного метода позволяет:

- снизить трудоёмкость работ на 50–60 %;
- сократить время на проектирование в 2–3 раза;
- уменьшить число ошибок и переделок, связанных с неточностями измерений;
- повысить качество и универсальность получаемой документации.

Опыт практического использования обратного инжиниринга для типовых и стандартизованных деталей

Обратный инжиниринг весьма эффективен при необходимости восстановления документации для типовых и стандартизованных деталей, геометрические характеристики которых определяются стандартами. Таковыми, например, являются зубчатые колеса, модуль которых определен ГОСТами, а размеры — конкретными цифрами в соответствии с конструкторской документацией. Был проведен эксперимент по восстановлению цифровой модели зубчатого колеса [5].

Для таких деталей целесообразно применение CAD-систем с соответствующими модулями. В проведенном эксперименте использовалась отечественная система КОМПАС-3D, в составе которой есть модуль проектирования зубчатых колес. Подобные модули имеются во многих CAD-системах. Для восстановления документации и построения цифровой модели подобных деталей достаточно определить базовые размеры основного конструктивного элемента, в нашем примере — зуба, габаритные размеры и отдельные конструктивные особенности, такие, как наличие и размеры шпоночного паза и др.

Также модуль позволяет создать визуализацию зацепления, представленного на рисунке 2. Благодаря ползунку в верхнем левом углу можно наглядно увидеть перемещение зубьев шестерней относительно друг друга.



Рис. 1. Зубчатое колесо для восстановления цифровой модели

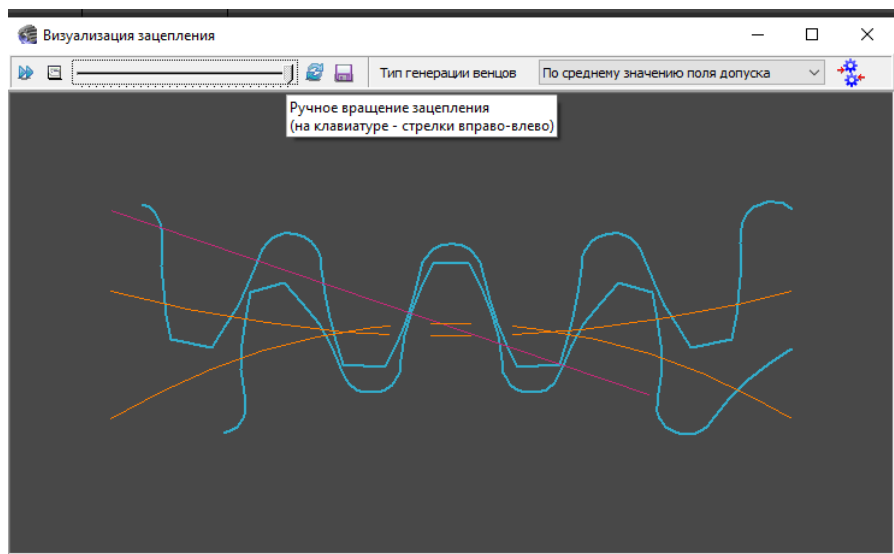


Рис. 2. Визуализация зубчатого зацепления моделируемого колеса

Программа позволяет вывести результаты расчета в табличном виде, из которых можно выбрать все необходимые недостающие параметры для оформления КД (рис. 3).

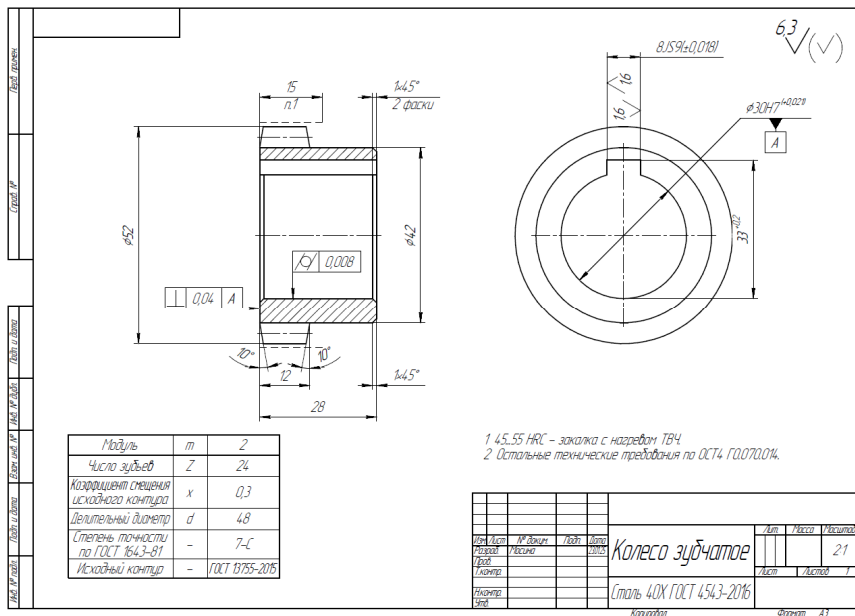


Рис. 3. Восстановленная документация

Выводы

Проведённое исследование подтвердило, что компьютерный метод обратного инжиниринга является эффективным инструментом перехода от физического образца к цифровой модели изделия. Его применение позволяет автоматизировать процесс получения геометрических данных, повысить точность и сократить сроки проектирования. Использование программных комплексов, таких как SolidWorks, КОМПАС-3D, Autodesk ReCap и Geomagic Design X, обеспечивает комплексное выполнение всех этапов – от 3D-сканирования до подготовки параметрической CAD-модели и оформления конструкторской документации.

Экономическая оценка показала, что внедрение данного метода снижает трудоёмкость работ на 50–60 %, уменьшает вероятность ошибок и повышает качество конечного результата. Практическая значимость заключается в возможности применения метода для восстановления утраченных чертежей, модернизации изделий и создания цифровых архивов.

Таким образом, компьютерный метод обратного инжиниринга способствует цифровой трансформации промышленности, повышает эффективность проектно-конструкторских процессов и открывает перспективы для дальнейшего развития технологий «умного производства».

Библиографический список

1. Васильев А.А. Обратный инжиниринг и 3D-сканирование в машиностроении. — М.: Инфра-Инженерия, 2021. — 216 с.
2. Копылов С.П. Методы и средства обратного инжиниринга: учебное пособие. — Екатеринбург: УрФУ, 2019. — 158 с.
3. Головин Д.Н. Применение CAD/CAM/CAE-систем в инженерных разработках. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 304 с.
4. Ильин П.В. Технологии цифрового двойника и реверс-инжиниринга. — М.: Машиностроение, 2022. — 192 с.
5. Миловзоров О.В., Мосина А.М. От ручных измерений к цифровым моделям: реализация обратного инжиниринга с использованием КОМПАС-3D // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан.гос. радиотехн. ун-т, 2025. С. 168-175. [1]

УДК 004.932, ГРНТИ 89.57.35

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА ВОЗДУШНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.А. Шелобанов, В.В. Стротов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, anatolijselobanov210@gmail.com*

Аннотация. В данной работе представлен алгоритм обнаружения воздушных объектов на тепловизионных изображениях длинноволнового инфракрасного диапазона (8 – 12 мкм) с последующей классификацией. Разработанный алгоритм использует комбинацию классических методов для первичного выделения кандидатов и нейронные сети для их верификации и классификации. Такое сочетание позволяет эффективно выделять объекты на сложном фоне.

ALGORITHM FOR DETECTION AND TRACKING OF AERIAL OBJECTS

A.A. Shelobanov, V.V. Strotov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, anatolijselobanov210@gmail.com*

Abstract. This paper presents an algorithm for detecting aerial objects in long-wave infrared (8–12 μm) thermal images with subsequent classification. The developed algorithm employs a combination of classical methods for primary candidate detection and neural networks for their verification and classification. This combined approach allows for effective object extraction against cluttered backgrounds.

Введение

Автоматическое обнаружение и сопровождение воздушных объектов является ключевой задачей в таких областях, как видеонаблюдение, навигация и оборонные системы. Тепловизионные камеры длинноволнового инфракрасного диапазона (8–12 мкм) предоставляют существенное преимущество, позволяя работать в условиях недостаточной видимости, ночью и при наличии легких атмосферных помех [1, 2]. Особую сложность представляет обнаружение малоразмерных объектов, таких как БПЛА, тепловое пятно которых может составлять всего несколько пикселей и быть сравнимо с шумами матрицы.

Однако анализ тепловизионных изображений сопряжен с рядом трудностей, включая низкую контрастность, высокий уровень шума и схожесть полезного сигнала с элементами фона [3]. Существующие методы обнаружения можно условно разделить на классические, основанные на выделении признаков и движении, и современные, использующие глубокое обучение. Среди классических подходов, такие как фоновое вычитание [4], чувствительны к динамике фона, в то время как детекторы на основе сверточных нейронных сетей (СНС), например, YOLO [5], требуют значительных вычислительных ресурсов для обработки всего изображения в поисках мелких объектов.

В данной работе предлагается гибридный алгоритм, комбинирующий достоинства обоих подходов для компенсации их недостатков. Алгоритм реализует двухэтапную схему обработки: на первом этапе используются оптимизированные классические методы (включая анализ центральной области кадра и частотную фильтрацию) для быстрого предварительного обнаружения и сегментации кандидатов, что позволяет значительно сузить область поиска. На втором этапе для ве-

рификации и классификации выделенных объектов применяется модель машинного обучения, что обеспечивает высокую точность и устойчивость к ложным срабатываниям при умеренных вычислительных затратах.

Решение задачи обнаружения и классификации объекта

Алгоритм разделяется на два этапа.

1. Обнаружение воздушных объектов.
2. Классификация.

Алгоритм обнаружения

Предлагаемый алгоритм предназначен для выделения локальных яркостных аномалий на изображении, таких как воздушные объекты в тепловизионных данных. Основная идея метода заключается в сравнении яркости небольших участков изображения с яркостью их окружения.

Первоначально изображение $I(x,y)$ размером $W \times H$ подвергается ограничению области обработки через применение прямоугольной маски $M(x,y)$:

$$M(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{если } \left| x - \frac{W}{2} \right| \leq \frac{W}{6} \text{ и } \left| y - \frac{H}{2} \right| \leq \frac{H}{6} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

В алгоритме применяется двухканальная фильтрация. Высокочастотная компонента выделяется посредством равномерного фильтра размером 7×7 пикселей, который выполняет локальное усреднение яркости и эффективно подчеркивает мелкомасштабные детали изображения. Низкочастотная компонента формируется с помощью кольцевого фильтра 33×33 пикселя с нулевой центральной областью 7×7 пикселей. Конструкция данного фильтра позволяет оценивать характеристики фона в непосредственной близости от анализируемой точки, исключая влияние самой точки на результат фильтрации.

Высокочастотный фильтр (HW): $HW(i,j) = \frac{1}{49}$, $i, j = 1..7$.

Низкочастотный фильтр (HF): $HF(i,j) = \begin{cases} 0, & \text{при } 14 \leq i, j \leq 20 \\ \frac{1}{33^2 - 7^2}, & \text{иначе} \end{cases}$.

Операция свертки для ВЧФ: $f_{HW}(x,y) = (f * HW)(x,y) = \sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 f(x+i, y+j) \cdot HW(i,j)$.

Операция свертки для НЧФ: $f_{HF}(x, y) = (f * HF)(x, y) = \sum_{i=-16}^{16} \sum_{j=-16}^{16} f(x+i, y+j) \cdot HF(i, j)$.

Для выделения целевых объектов применяется метод полосовой пространственной фильтрации, реализуемый через построение разностного поля как поэлементной разности между высокочастотной и низкочастотной компонентами. Данный подход эффективно выделяет пространственный частотный диапазон, соответствующий характерным размерам воздушных объектов, подавляя как низкочастотные фоновые вариации, так и высокочастотный шум.

$$f_{BP}(x, y) = f_{HW} - f_{HF}.$$

Области с положительными значениями в разностном поле интерпретируются как статистически значимые аномалии, где локальная яркость существенно превышает фоновый уровень. Для автоматического выделения этих аномалий используется адаптивный порог, вычисляемый по правилу трёх сигм.

$$T = 3\sigma_{BP},$$

где σ_{BP} - стандартное отклонение разностного поля.

$$\sigma_{BP} = \sqrt{\frac{1}{W \cdot H} \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H [f_{BP}(x, y)]^2 - \mu_{BP}^2},$$

где W, H – ширина и высота изображения;

μ_{BP} - математическое ожидание $f_{BP}(x, y)$,

$$\mu_{BP} = \frac{1}{W \cdot H} \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H f_{BP}(x, y).$$

Финальная бинарная маска вычисляется как:

$$BW(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } f_{BP}(x, y) \geq T \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Классификация

После этапа сегментации все обнаруженные объекты подвергаются классификации с использованием ансамблевой модели Bagged Trees (Bootstrap Aggregating of Decision Trees). Данный метод сочетает преимущества алгоритмов на основе деревьев решений и повышает обобщающую способность за счет агрегирования прогнозов множества отдельных классификаторов.

Для каждого сегментированного объекта вычисляется комплекс признаков, формирующий многомерное признаковое пространство.

Статистические признаки теплового портрета:

- Средняя яркость - математическое ожидание интенсивности пикселей объекта:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i, y_i),$$

где $I(x_i, y_i)$ - интенсивность пикселя с координатами $I(x_i, y_i)$; N - количество пикселей объекта;

- Дисперсия яркости - мера рассеяния теплового сигнала:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(x_i, y_i) - \mu)^2;$$

- Коэффициент асимметрии - характеристика скошенности распределения яркости:

$$\gamma_1 = \frac{m_3}{\sigma^3},$$

$$m_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(x_i, y_i) - \mu)^3;$$

- Коэффициент эксцесса - показатель остроты пика распределения теплового излучения:

$$\gamma_2 = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3,$$

$$m_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(x_i, y_i) - \mu)^4;$$

- Контраст с фоном - относительное превышение яркости объекта над фоновым значением:

$$\Delta\mu = |\mu_{\text{фон}} - \mu|,$$

где $\mu_{\text{фон}}$ - средняя яркость фоновой области вокруг объекта.

Геометрические признаки:

- Отношение сторон - соотношение высоты к ширине ограничивающего прямоугольника:

$$R = \frac{W}{H};$$

- Абсолютная разность - характеризует динамику изменения теплового изображения объекта между последовательными кадрами:

$$D = \sum_{x,y} |I_t(x,y) - I_{t-1}(x,y)|.$$

Динамические признаки:

- Угловой коэффициент линейной регрессии для высоты - тренд изменения вертикального размера:

$$\alpha_H = \frac{n \sum_{t=1}^n t H_t - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n H_t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2},$$

где H_t – высота объекта в кадре t ; n – количество наблюдаемых кадров; t – номер кадра;

- Угловой коэффициент линейной регрессии для ширины - тренд изменения горизонтального размера.

Экспериментальные исследования

Для оценки эффективности предложенного алгоритма обнаружения и классификации воздушных объектов было проведено комплексное экспериментальное исследование на специализированной выборке тепловизионных изображений длинноволнового инфракрасного диапазона (8-12 мкм). Выборка содержала примеры воздушных объектов различных типов, снятых в различных условиях наблюдения, включая дневное и ночное время, а также различные метеорологические условия. Все данные были размечены на два класса: «самолет» и «другой», где второй класс включал ложные срабатывания, птиц и атмосферные помехи. Выборка была разделена на обучающую (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) подвыборки.

Точность классификации оценивалась с использованием матрицы ошибок (confusion matrix) на тестовой выборке. Для количественной оценки эффективности алгоритма рассчитывались стандартные метрики классификации:

- Accuracy

$$Acc = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} = 0,86;$$

- Precision

$$Prec = \frac{TP}{TP+FP} = 0,84;$$

- Recall

$$Rec = \frac{TP}{TP+FN} = 0,87;$$

- F1-score

$$F1 = \frac{2 \cdot \text{Prec} \cdot \text{Rec}}{\text{Prec} + \text{Rec}} = 0,85,$$

где TP = 1993 – корректно обнаруженные самолеты, FP = 361 – ложные срабатывания, FN = 257 – пропущенные самолеты, TN = 1839 – корректно отвергнутые объекты.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили, что использование сегментации на основе разности фильтров в сочетании с классификатором Bagged Trees позволяет достигать устойчивых результатов обнаружения и классификации воздушных объектов. Комплексный признаковый пространство, включающий статистические, геометрические и динамические характеристики объектов, обеспечивает высокую разделяющую способность между классами. Особенно эффективно проявили себя динамические признаки, основанные на анализе последовательности кадров, что подчеркивает важность временного контекста для задач классификации в тепловизионном диапазоне.

Библиографический список

1. Zhang, T.A Review of Advanced Thermal Imaging Technologies for Unmanned Aerial Vehicle Applications / T. Zhang, G. Liu // *Infrared Physics & Technology*. – 2022. – Vol. 125. – P. 104-112.
2. Zhao, M. Dim and Small Target Detection in Infrared Images: A Review / M. Zhao, W. Li, L. Lu // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 59, Iss. 12. – P. 10217-10231.
3. Li, Y. Infrared Small Target Detection Based on Local Contrast and Gaussian Smoothness / Y. Li, B. Zhang, S. Wang // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 123-134.
4. Elguebaly, T. A Comprehensive Review of Background Subtraction Algorithms for Infrared Videos / T. Elguebaly, N. Bouguila // *Pattern Recognition*. – 2019. – Vol. 92. – P. 1-23.
5. Wang, C. Computational Complexity Analysis of Real-Time Object Detectors for Embedded Systems / C. Wang, Z. Qin // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21(15). – P. 501-521.

УДК 681.518.3; ГРНТИ 45.03.07

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ
КОНТУРОВ НА РАЗНОПОЛЯРНЫЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ
ИМПУЛЬСЫ РАЗЛИЧНОЙ АМПЛИТУДЫ****В.В. Карасев, И.Б. Кольцов***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, v.v.karasev@mail.ru*

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования реакции индуктивно связанных контуров на сигнал, образованный из двух прямоугольных импульсов одинаковой длительности, первый из которых имеет положительную полярность, а второй – отрицательную, причем его амплитуда почти в два раза меньше амплитуды первого импульса. Полученные параметры реакции свидетельствуют о целесообразности использования такого метода возбуждения связанных контуров для надежной передачи информационного кода от вращающейся части измерительной системы через воздушный зазор на её стационарную часть.

Ключевые слова: вращающиеся объекты, воздушный зазор, индуктивно связанные контуры, импульсные сигналы.

**STUDY OF THE RESPONSE OF INDUCTIVELY COUPLED
CIRCUIT ELECTRONS TO MULTIPOLAR RECTANGULAR
PULSES OF VARIOUS AMPLITUDE****V.V. Karasev, I.B. Koltsov***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, v.v.karasev@mail.ru*

Abstract. This paper presents the results of a study of the response of inductively coupled circuits to a signal formed by two rectangular pulses of equal duration, the first of which has a positive polarity and the second a negative one, with its amplitude almost half that of the first pulse. The obtained response parameters demonstrate the feasibility of using this method of exciting coupled circuits for reliably transmitting information from the rotating part of the measuring system through an air gap to its stationary part.

Keywords: rotating objects, air gap, inductively coupled circuits, pulse signals.

Введение и постановка задачи

Испытание вращающихся объектов предполагает передачу получаемых при этом данных через воздушный зазор. Для решения такой

задачи существуют несколько вариантов. Наиболее востребованными из них являются передача данных с помощью радиоканала, оптического канала и на основе воздушного трансформатора с импульсным возбуждением его вращающегося контура. На рисунке 1 представлена функциональная схема радиотелеметрической системы фирмы Manner (ФРГ) [1], в которой используется индуктивная связь между вращающейся и стационарной её частями.

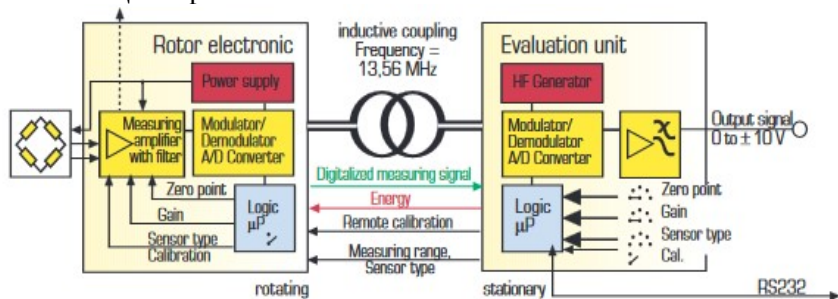


Рис. 1. Функциональная схема аппаратуры Manner

Схожие технологии, предполагающие использование одного индуктивного канала связи как для передачи кода данных на стационарную аппаратуру, так и энергии питания вращающейся части аппаратуры, отечественный разработчик НПП Мера [2] применяет в реализации многоканальной радиотелеметрической системы MIC-1500, приемно-передающая антенна которой представлена на рисунке 2.

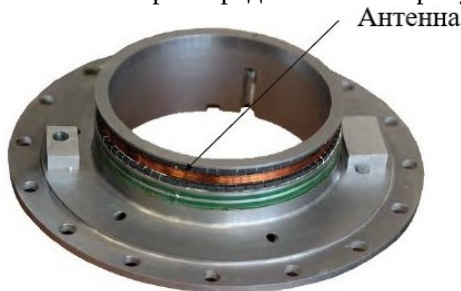


Рис. 2. Приемно-передающая антенна системы MIC-1500

Однако, если канал передачи через воздушный зазор в системе от Manner реализован на основе одновитковой роторной антенны, над которой фиксируется на достаточно близком расстоянии так называемый измерительный фланец (рис. 3), индуктивно связанный с вра-

щающейся антенной, то в аппаратуре MIC-1500 – это многовитковая антенна, заключенная в конструктивно целостный фланец, обеспечивающий минимальное излучение в окружающую среду.



Рис. 3. Канал связи через воздушный зазор в системе Manner

Кстати, другая фирма Magtrol (США), известная своими торсиометрами и использующая аналогичное взаимодействие с вращающейся аппаратурой, применяет экран [3] для эффективной электромагнитной защиты канала связи.

Альтернативой представленному радиоканалу является тракт передачи оцифрованных на вращающейся части измерительной системы данных через индуктивно связанные контуры (ИСК) на основе воздушного трансформатора [4]. Он существенно проще по своему функциональному составу. В нем отсутствуют традиционные элементы канала радиопередачи: генераторы несущей и поднесущих, модуляторы сигналов поднесущих на передающей аппаратуре, а также демодуляторы и фильтры на неподвижной части системы, усложняющие тракт и вносящие дополнительные погрешности преобразования. На рис. 4 показана схема бесконтактной передачи импульсов тока I_1 кодовых посылок через воздушный зазор. Для упрощения дальнейших исследований контуры выбраны одинаковыми. От вида возбуждающего тока I_1 существенно зависят параметры реакции U_2 на него. Известно [4], что наибольшей амплитудой реакции обладают ИСК, возбуждаемые прямоугольными импульсами тока. Одну из самых коротких по времени реакции обеспечивает возбуждение ИСК экспоненциальными импульсами [5]. Вызывает интерес в плане практического использования возбуждение ИСК парой прямоугольных импульсов тока разной полярности одинаковой длительности, разной амплитуды.

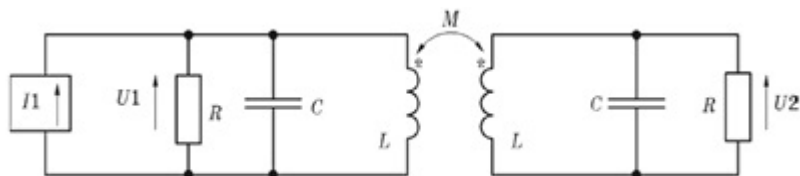


Рис. 4. Схема исследования ИСК

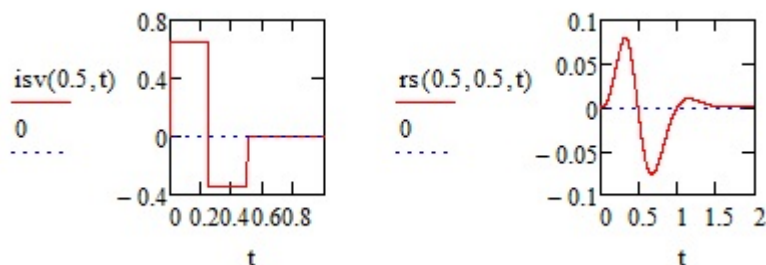
Экспериментальные исследования

Исследования выполнены в пакете MathCAD для граничного между аperiodическими и колебательным режимами работы ИСК. Для названного режима справедливо $d = 2 / \sqrt{1 + k}$ и справедлива следующая переходная характеристика [4].

$$U2(k, t) = 0.5 I_0 \rho \left[\omega t - \sqrt{\frac{1-k^2}{2k}} \sin \left(\sqrt{\frac{2k}{1-k^2}} \omega t \right) \right] \exp \left(\frac{-\omega t}{\sqrt{1+k}} \right), \quad (1)$$

где коэффициент связи между контурами $k = M/L$, частота собственных колебаний контуров $\omega = 1 / \sqrt{LC}$, волновое сопротивление контуров $\rho = \sqrt{L/C}$, I_0 - величина скачка тока $I1$, затухание $d = \rho/R$.

Опишем с учетом (1) реакцию rs как сумму реакций на скачки тока isv . На рисунке 5 длительность входного импульсного воздействия $\tau = 0.5$ (первый параметр isv и второй параметр rs) и $k = 0.5$ для ИСК (первый параметр rs). Амплитудные характеристики реакции нормированы к величине $I_0 \rho = 1$ В, а временные – к $\omega = 2\pi$ с-1.

Рис. 5. Сигнал isv возбуждения ИСК и их реакция rs на него

На рисунке 6 представлены зависимости амплитуды ms первой полуволны реакции ИСК на входное импульсное воздействие isv от k и t . Аналогичные зависимости для модуля амплитуды $m2s$ второй полу-

волны реакции приведены на рисунке 7. Полувольтны демонстрируют схожее поведение амплитуд полувольт при изменении коэффициента k связи между контурами и длительности τ входного воздействия. Вторая полуволна может использоваться для принятия решения о значении переданного разряда кода. Рисунок 8 позволяет сопоставить амплитуду ms первой полуволны реакции ИСК на сигнал isv с амплитудами mg и mge реакций на прямоугольные и экспоненциальные импульсы соответственно. Она занимает промежуточное положение между ними и превосходит по величине амплитуду mge в известном способе [5].

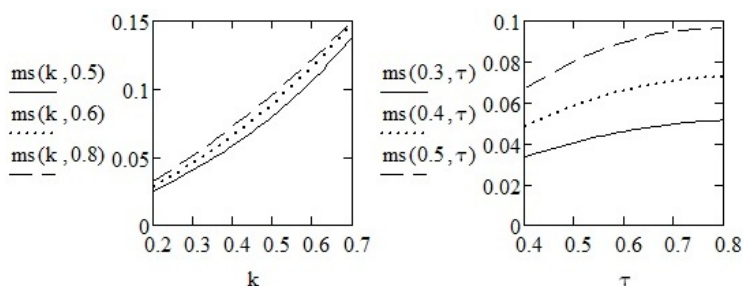


Рис. 6. Зависимость амплитуды ms первой полуволны реакции ИСК на сигнал isv от k и τ

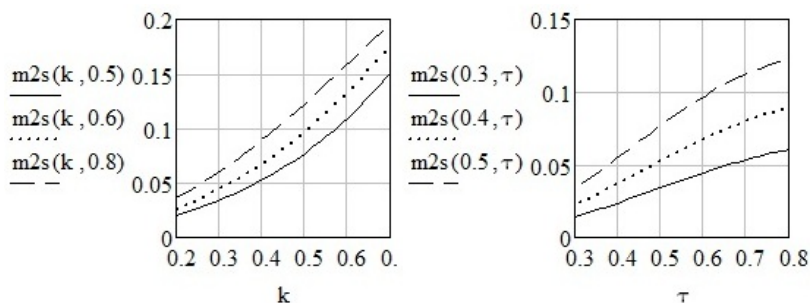


Рис. 7. Зависимость модуля амплитуды $m2s$ второй полуволны реакции ИСК на сигнал isv от k и τ

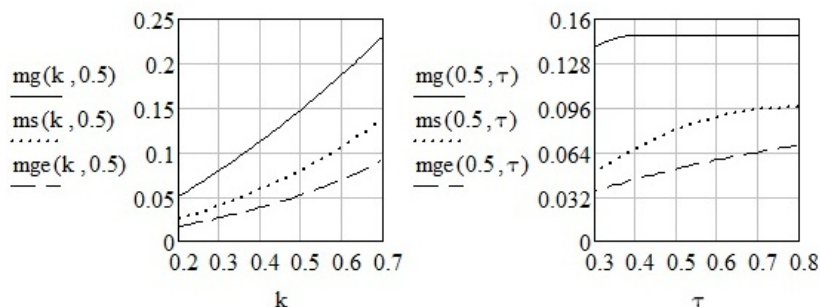


Рис. 8. Сравнение трех видов возбуждения по амплитуде реакции

Оценим скоростные возможности рассматриваемого способа возбуждения сигналом isv . С этой целью на рисунке 9 приведены зависимости длительности τ_s всей реакции, взятой на уровне $0.01ms$, от коэффициента k связи и длительности τ возбуждающего сигнала. На этом же рисунке показаны аналогичные зависимости длительности τ_g реакции на прямоугольный импульс и длительности τ_{ge} реакции на экспоненциальный импульс. Из рисунка следует, что вблизи $k = 0.5$ и $\tau = 0.5$ возбуждение сигналом имеет неоспоримое преимущество перед возбуждением прямоугольным и экспоненциальными импульсами по скорости протекания реакции.

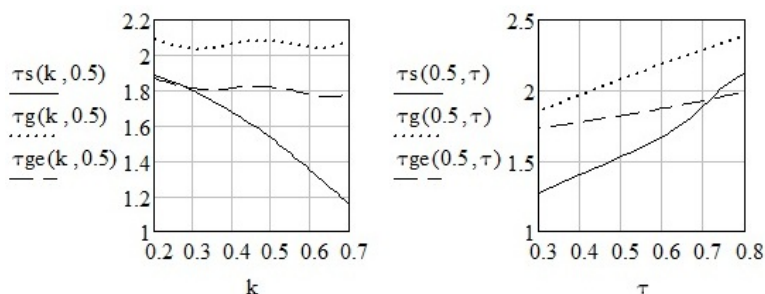


Рис. 9. Длительность реакции ИСК на разные виды возбуждения

Выводы

Исследования возбуждения первичного контура ИСК последовательно из двух разнополярных прямоугольных импульсов одинаковой длительности, соотносящихся по амплитуде как 2:1, подтвердили целесообразность такого возбуждения как по амплитудным, так и по временным параметрам сигнала, формируемого на выходе ИСК.

Библиографический список

1. Manner Sensortelemetrie GmbH. 2007. 28 p.
2. Телеметрическая система MIC-1500. – URL : <http://nppmera.ru/assets/-files/documentation/MIC-1500sm.pdf>.
3. Датчики крутящего момента фланцевого типа серии TF. – URL : <https://www.magtrol.ru/files/torque/TF-manual.pdf>.
4. Карасев, В. В. Измерительные системы для вращающихся узлов и механизмов / В. В. Карасев, А. А. Михеев, Г. И. Нечаев; под ред. Г. И. Нечаева. – Москва : Энергоатомиздат, 1996. 176 с.
5. Зилотова М.А., Карасев В.В., Николаева А.В. Способ передачи данных через воздушный зазор и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2565527. Бюл. № 29, 2015.

УДК 004.023; ГРНТИ 50.03.05

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РИСКОВ ПРОГРАММНОГО ПРОЕКТА В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОСТИ

Ф.А. Сафонов*, А.И. Таганов, М.И. Цыцына****

**Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,
Москва, svf3lix@yandex.ru*

***Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина,
Рязань, kt.rsreu@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрено применение формализмов теории нечетких множеств и процедуры Гитмана-Левина для построения эвристического алгоритма классификации рисков программного проекта в условиях нечеткости проектных данных. Использование предложенного алгоритма автоматической классификации рисков в составе процедуры процесса анализа и идентификации рисков проекта позволяет повысить степень объективности принимаемых специалистами решений по управлению рисками проекта в условиях нечеткости проектных данных.

Ключевые слова: программный проект, риски проекта, нечеткие множества, алгоритм классификации рисков.

AUTOMATIC RISK CLASSIFICATION SOFTWARE PROJECT IN CONDITIONS OF FUZZINESS

F.A. Safonov*, A.I. Taganov, M.I. Tsitsyna****

**Plekhanov Russian University of Economics,
Moscow, svf3lix@yandex.ru*

***Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazan, kt.rsreu@yandex.ru*

Annotation. In this paper, we consider the application of the formalisms of fuzzy set theory and the Gitman-Levin procedure to construct a heuristic algorithm for classifying risks of a software project in conditions of fuzzy design data. The use of the proposed algorithm for automatic risk classification as part of the procedure for analyzing and identifying project risks makes it possible to increase the degree of objectivity of decisions made by specialists on project risk management in the context of project data fuzziness.

Keywords: software project, project risks, fuzzy sets, risk classification algorithm.

Введение

В процессе выполнения сложных программных проектов возникают разного рода риски проекта, которые зачастую негативным образом влияют на весь ход выполнения проекта и его конечные результаты. Для снижения отрицательного влияния рисков на выполнение проекта используются на практике различные методы, технологии и алгоритмы управления рисками проекта [6 - 11]. При этом особую группу развивающихся методов и технологий управления рисками программного проекта составляют алгоритмические решения, направленные на создание эффективных средств анализа и идентификации рисков проекта в условиях нечеткости проектных данных. Одной из задач этого плана является проблема автоматической классификации и идентификации рисков по всем стадиям ЖЦ проекта [4, 7 - 11].

Анализ известных методов и алгоритмов автоматической классификации рисков в условиях нечеткости проектных данных проекта показал, что в первом приближении все известные методы и алгоритмы автоматической классификации рисков проекта можно разделить как эвристические, оптимизационные и иерархические. При этом группа эвристических подходов и методов в последнее время развивается наиболее интенсивно вследствие динамики развития современных информационных технологий [4 - 8].

В число подлежащих анализу в работе эвристических алгоритмов автоматической классификации рисков проекта вошли алгоритмы Гитмана-Левина, алгоритм Тамуры - Хигути – Танаки, алгоритм Кутюрье – Фьолео, алгоритм Берштейна – Дзюбы и другие. При этом алгоритмические подходы Гитмана-Левина [12] являются одними из первых эвристических процедур, использующих понятие нечеткого множества, и строят разбиение нечеткого множества объектов, подлежащих классификации, на унимодальные нечеткие множества и тем самым расширяют возможности для построения целевого эвристического алгоритма анализа рисков программного проекта в условиях нечеткости проектных данных.

Формализмы задачи автоматической классификации рисков

Анализ литературных источников показал [1 - 4, 8, 12], что известные эвристические алгоритмы автоматической классификации, как правило, непосредственно опираются на постановку задачи выделения в исследуемой совокупности объектов $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, структура которой характеризуется нечеткостью групп объектов A^1, \dots, A^c , являющихся нечеткими множествами с соответствующими функциями принадлежности $\mu_{A^l}(x_i), l=1, \dots, c, i=1, \dots, n$, или, для краткости, $\mu_{li}, l=1, \dots, c, i=1, \dots, n$. В основе такой постановки задачи, как правило, лежат содержательные представления исследователя о нечеткости структуры исследуемой совокупности рисков и условиях объединения этих рисков в классы.

Для пояснения принципа работы предлагаемого здесь алгоритма автоматической классификации рисков программного проекта введем необходимые понятия и определения.

Пусть $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество классифицируемых объектов (рисков проекта), на котором задано нечеткое множество $B = \{(x_i, \mu_B(x_i))\}, i=1, \dots, n$; таким образом, B – дискретное нечеткое множество точек, подлежащих классификации. Пусть τ точка, в которой значение функции принадлежности максимально, то есть $\mu_B(\tau) = \sup_{x_i \in X} \mu_B(x_i)$. В таком случае на множестве B могут быть опре-

делены следующие множества:

$$B_g = \{x_i \mid \mu_B(x_i) \geq \mu_B(x_g)\} \text{ и } B_{g(d)} = \{x_i \mid d(\tau, x_i) \geq d(\tau, x_g)\},$$

где $x_i \in B$ и d – некоторая метрика.

Нечеткое множество B является симметричным в том и только в том случае, если $\forall x_i \in B, B_g = B_{g(d)}$. Очевидно, что если нечеткое множество B является симметричным, то справедливо соотношение $\forall x_i, x_k \in B, d(x_i, \tau) \leq d(x_k, \tau) \Leftrightarrow \mu_B(x_i) \geq \mu_B(x_k)$.

Нечеткое множество B является унимодальным в том и только в том случае, если четкое множество B_g является связанным $\forall x_i \in B$.

Дискретные нечеткие множества $\tilde{A}^1, \dots, \tilde{A}^G$ определяют разбиение нечеткого множества B на G нечетких подмножеств. Точка $\tilde{\tau}^g \in \tilde{A}^g, g \in [1, G]$, для которой выполняется условие $\mu_{\tilde{A}^l}(\tau) = \sup_{x_i \in \tilde{A}^l} \mu_{\tilde{A}^l}(x_i), l=1, \dots, c$, будет именоваться *модальной точкой*

или просто *модой* группы \tilde{A}^g . Некоторая мода $\tilde{\tau}^g \in \tilde{A}^g, g=1, \dots, G$ будет именоваться локальным максимумом функции $\mu_B(x_i)$ и обозначаться символом τ^g , если для нее выполняется соотношение $\mu_B(\tau^g) = \max_{x_i \in B} \mu_B(x_i)$.

Некоторой точке $x_k \in \tilde{A}^g$ ставится в соответствие точка $x_i \in (B - \tilde{A}^g)$, такая, что $d(x_i, x_k) = \min_{x_i \in (B - \tilde{A}^g)} [d(x_i, x_k)]$, тогда точка x_k

будет именоваться *внутренней точкой* подмножества \tilde{A}^g в том и только в том случае, если множество $B_j = \{x_i \mid d(x_j, x_i) < d(x_j, x_k)\}$ включает в себя, по меньшей мере, одну точку из множества \tilde{A}^g .

Необходимо указать, что в оригинальной версии алгоритма используется пороговое значение $\hat{d}, \hat{d} > 0$, так что $B_j = \{x_i \mid d(x_j, x_i) \leq \hat{d}\}$, и с каждой точкой x_j сопоставляется число $u_j = \text{card}(B_j)$; иными словами, u_j – число точек в \hat{d} - окрестности точки x_j .

Очевидно, что если в качестве функции, сопоставляющей точке x_j значение u_j выступает функция принадлежности нечеткого множества B , то в качестве порога может быть выбрано некоторое значение α - порог различия элементов, объединяемых в кластеры, $\alpha \in [0, 1]$. Следует отметить, что результат разбиения на группы $\tilde{A}^1, \dots, \tilde{A}^G$ пол-

ностью определяется порогом \hat{d} , который должен быть не настолько низким, что $u_j=1, \forall x_j \in X$, и не настолько высоким, чтобы $\forall x_j \in X, u_j=n, n=card(X)$.

Таким образом, если некоторая мода является внутренней точкой подмножества, то она является локальным максимумом функции $\mu_B(x_i)$. При этом базовая версия эвристического алгоритма состоит из двух процедур, причем первая процедура, в свою очередь, состоит из двух частей: первая часть разбивает дискретное нечеткое множество B точек, подлежащих классификации, на симметричные нечеткие подмножества, а вторая часть отыскивает локальные максимумы мультимодальной функции принадлежности нечеткого множества B . Вторая процедура разбивает нечеткое множество B на унимодальные нечеткие множества, используя в качестве основы полученную в результате работы первой процедуры информацию о числе, взаимном расположении и значениях функции принадлежности точек $\tau^l, l=1, \dots, c$ – локальных максимумов функции принадлежности $\mu_B(x_i)$. В изложенном ниже варианте алгоритма автоматической классификации рисков программного проекта последний представлен в виде единой эвристической кластер процедуры.

Алгоритм автоматической классификации рисков проекта

Входными данными алгоритма классификации рисков проекта является матрица $X_{m \times n} = [x_i^2]$; параметром алгоритма – порог различия объектов \hat{d} ; формализмы алгоритма основываются на источниках и результатах исследований, представленных в [1-4,7-11].

Схема алгоритма.

1. Строятся следующие последовательности:

Последовательность $A = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ точек $x_i, i=1, \dots, n$ исследуемой совокупности, $x_i \in B$, упорядоченных в соответствии со значениями их функции принадлежности, так что $y_1 = \arg \max_i \mu_B(x_i), y_n = \arg \min_i \mu_B(x_i)$ и $y_i \leq y_j$ при $\mu_B(x_i) \geq \mu_B(x_j)$, где $\mu_B(x_i)$ и $\mu_B(x_j)$ – функции принадлежности точек x_i и x_j соответственно;

Последовательность $A_{(1)} = \{y_1^{(1)}, \dots, y_n^{(1)}\}$, представляющая собой упорядоченную в соответствии с их расстояниями до точки $y_1^{(1)} = y_1$, то есть $d(y_1^{(1)}, y_j^{(1)}) \leq d(y_1^{(1)}, y_i^{(1)})$ при $j \leq i$, последовательность точек – «кандидатов» в группу \tilde{A}^1 , то есть группу, для которой точка $y_1^{(1)} = y_1 = \hat{\tau}^1$ будет являться модой, так что первым «кандидатом» в группу \tilde{A}^1 будет точка $y_2^{(1)}$ следующей точкой – «кандидатом» в группу \tilde{A}^1 будет точка $y_3^{(1)}$, и так далее;

2. Если $y_1 = y_i^{(1)}$ для $i = 2, 3, \dots, r-1$ и $y_r \neq y_r^{(1)}$, то $y_1, i = 1, 2, \dots, r-1$ распределяются в группу \tilde{A}^1 , а точка $y_1^{(1)} = y_1 = \hat{\tau}^1$ рассматривается как мода второй группы, так что формируется последовательность $A_{(2)} = \{y_1^{(2)}, \dots, y_p^{(2)}\}$, в которой точки упорядочиваются по расстоянию до точки $y_1^{(2)} = y_r = \hat{\tau}^2$, так что $d(y_1^{(2)}, y_j^{(2)}) \leq d(y_1^{(2)}, y_r^{(2)})$ при $j \leq t$; подобный процесс выполняется для любой последовательности $A_{(f)} = \{y_1^{(f)}, \dots, y_p^{(f)}\}$ так, что если $y_1^{(f)} = \hat{\tau}^f$ – мода группы \tilde{A}^f , то первым «кандидатом» в группу \tilde{A}^f будет точка $y_2^{(f)}$;

3. Производится формирование групп в соответствии со следующим правилом: пусть к некоторому моменту построено G групп, то есть, сконструированы последовательности $A_{(g)}, g = 1, \dots, G$ точек – «кандидатов» $y_k^{(g)}$, и пусть некоторую точку $y_q \in A$ требуется приписать некоторой группе $\tilde{A}^g, g = 1, \dots, G$, тогда как все предшествующие ей точки $y_i \in A, i < q$ расклассифицированы, тогда оказываются возможными следующие ситуации:

3.1. если $y_q = y_k^{(g)}$ и $y_q = y_k^{(m)}, m = 1, \dots, G, m \neq g$, то точка y_q включается в формируемую группу \tilde{A}^g ;

3.2. если $y_q = y_k^{(g)}$ для некоторого $g \in L$, где L – множество индексов, представляющих те группы, точки – «кандидаты» которых идентичны y_q , то точка y_q включается в ту группу, к которой припи-

сан ее ближайший сосед, имеющий наибольшее значение функции принадлежности;

3.3. если $y_q \neq y_k^{(g)}$ для $g = 1, \dots, G$, то формируется новая группа, для которой точка y_q является модой;

Процесс продолжается до исчерпания последовательности $A = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$;

4. Для каждой группы $\tilde{A}^g, g = 1, \dots, G$ и соответствующей ей моды $\hat{\tau}^g$ находится минимальное расстояние $R_g = d(\hat{\tau}^g, x_{p(g)}) = \min_{x_k \in (B - \tilde{A}^g)} [d(\hat{\tau}^g, x_k)]$ до точки $x_{p(g)} \in B$, являющейся ближайшей к группе \tilde{A}^g и лежащей вне ее: $x_{p(g)} \notin \tilde{A}^g$; точка $\hat{\tau}^g = \tau^g$ будет локальным максимумом, если множество $B_{R_g} = \{x_i \mid d(x_{p(g)}, x_i) < R_g\}$, включает в себя точки группы \tilde{A}^g , в противном случае точка $\hat{\tau}^g$ является не локальным максимумом, а граничной точкой группы \tilde{A}^g ; данная процедура применяется ко всем модам $\hat{\tau}^g \in \tilde{A}^g, g = 1, \dots, G$, так что формируется последовательность локальных максимумов $\tau^l, l = 1, \dots, c$, упорядоченная в соответствии со следующим правилом: для локальных максимумов τ^i и $\tau^j, i, j = 1, \dots, c$ при $\mu_B(\tau^i) > \mu_B(\tau^j)$ локальные максимумы τ^i и τ^j расположены так, что $i \leq j$;

5. Ко всем точкам, за исключением локальных максимумов $\tau^l, l = 1, \dots, c$, порождающих кластеры $A^l, l = 1, \dots, c$, применяется следующее правило: точка $x_i \in B$, расположенная в последовательности A в j -й позиции, то есть $x_i = y_j$, распределяется в ту группу A^l , в которой находится ее ближайший сосед с более высоким значением функции принадлежности, так что строится разбиение $P = \{A^1, \dots, A^c\}$ и алгоритм прекращает работу.

Приведенная версия процедуры основана на предположении, что при $i \neq j$ выполняется неравенство $\mu_B(x_i) \neq \mu_B(x_j)$. Вместе с тем, возможной оказывается также ситуация, когда значение функции принадлежности оказывается одинаковым для нескольких точек, то

есть $\mu_B(x_i) = \mu_B(x_j), i \neq j, i, j \in [1, n]$. В таком случае проблема решается внесением изменения на шаге 3 процедуры и перестановкой элементов в последовательности A следующим образом: при сформированных G группах некоторая точка $y_q \in A$ подлежит включению в некоторую группу $\tilde{A}^g, g = 1, \dots, G$. Если $y_q \neq y_k^{(g)}$ для $g = 1, \dots, G$ и если $\mu_B(y_{q+1}) = \mu_B(y_q)$ то необходимо проверить выполнение равенства $y_{q+1} = y_k^{(g)}, g = 1, \dots, G$. Новая группа с модой y_q образуется только в том случае, если ни одна из точек y_{q+1}, y_{q+2}, \dots , имеющих такое же значение функции принадлежности, как и точка y_q , не идентична с точкой $y_k^{(g)}, g = 1, \dots, G$.

Может оказаться, что наибольшее значение функции принадлежности в некоторой группе \tilde{A}^g получают несколько точек, поэтому сложно определить, какая из них является локальным максимумом. В качестве метода, позволяющего преодолеть подобное затруднение, может быть использовано на шаге 4 приведенной выше процедуры следующее правило: пусть \tilde{A}_τ^g – подмножество точек из \tilde{A}^g , имеющих, как и точка $\hat{\tau}^g$, максимальное значение функции принадлежности; каждая из точек подмножества \tilde{A}_τ^g проверяется как мода группы \tilde{A}^g , и если хотя бы одна из них является пограничной для группы \tilde{A}^g , то точка $\hat{\tau}^g$ не рассматривается как локальный максимум.

Следует также указать, что в изложении схемы алгоритма не описывается шаг, соответствующий второй процедуре авторской версии и, соответственно, шагу 5 версии, представленной выше, где группы $\tilde{A}^g, g = 1, \dots, G$ нечеткого множества B порождают унимодальные нечеткие множества $A^l, l = 1, \dots, c$. Вместо этого предлагается следующая процедура построения нечетких кластеров $A^l, l = 1, \dots, c$: пусть $\tau^l, l = 1, \dots, c$ – сформированная последовательность локальных максимумов; если на множестве $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ задана нечеткая толерантность T , так что $\mu_T(x_i, x_j)$ – степень сходства элементов

$x_i, x_j \in X, i, j = 1, \dots, n$, то степень принадлежности μ_B элемента x_i кластеру A^l может быть вычислена по формуле

$$\mu_B = \mu_T(x_i, x_j) / \left(\sum_{j=1}^c \mu_T(x_j, \tau^l) \right).$$

Заключение

Представленный в работе алгоритм автоматической классификации рисков программного проекта, основанный на формализмах теории нечетких множеств и эвристической процедуре классификации объектов Гитмана-Левина, позволяет на практике быстро обрабатывать достаточно большие массивы данных, а полученные в результате кластеры могут иметь как эллиптическую, так и сферическую форму. Таким образом, этот алгоритм может рассматриваться как процедура комбинированной прямой классификации в том смысле, в котором этот термин использовался И.Д. Манделем в своих исследованиях и работах.

Библиографический список

1. Берштейн Л.С., Дзюба Т.А. Решение задач классификации на нечетких графах // Новости искусственного интеллекта, 2000. - № 3. - С. 113-121.
2. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети - М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 284 с.
3. Вятчинин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации: Монография. - Минск: Технопринт, 2004. - 219 с.
4. Демидова Л.А., Советов П.Н., Горчаков А. В. Кластеризация представлений текстов программ на основе цепей Маркова // Вестник РГРТУ. 2022. Выпуск 81. С. 51-64.
5. Корячко В.П., Минаев В.А., Степанов Р.О., Фаддеев А.О.. Математическое и компьютерное моделирование сейсмических рисков на территориях расположения объектов критической инфраструктуры // Вестник РГРТУ. 2023. № 84. С. 133-142.
6. Мандель И.Д. Кластерный анализ. - Москва: Финансы и статистика, 1988. - 176 с.
7. Перепелкин Д.А., Фам А.М. Математические модели планирования упорядоченного набора операций для распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях // Вестник РГРТУ. 2022. Выпуск 79. С. 56-67.
8. Таганов А.И. Анализ и классификация рисков проекта методами нечеткой классификации // Информационные технологии моделирования и управления - Воронеж: Научная книга, 2010. - Вып. 63. - С. 455 - 461.

9. Таганов А.И. Основы идентификации, анализа и мониторинга проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости: Монография. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 224 с.

10. Цыцына М.И. Анализ методов и стандартов в области менеджмента надежности и риска космических систем // В книге: Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2019. - С. 337-338.

11. Цыцына М.И. Применение методов нечеткой классификации для оптимизации состава контролируемых рисков качества программного проекта // В сборнике: Материалы IX научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. - Рязань: РГРТУ, 2023.

12. Gitman J., Levine M.D. An Algorithm for Detecting Unimodal Fuzzy Sets and Its Application as a Clustering Technique // IEEE Transactions on Computers. - 1970. - Vol. C-19. - pp. 583-593.

УДК 004.4; ГРНТИ 50.41

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КЛИМАТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.Н. Сапрыкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, saprykin.a.n@rsreu.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрен подход к построению программного обеспечения для централизованного мониторинга климатического оборудования на основе гибридной архитектуры, сочетающей HTTP-опрос сетевых кондиционеров и GSM-ориентированное взаимодействие с оператором посредством SMS-сообщений. Показано, что данная архитектура обеспечивает устойчивое функционирование системы в условиях отсутствия или нестабильности стационарного сетевого подключения, поддерживает динамическое управление узлами, контроль критических параметров и интеграцию с аппаратным измерительно-командным комплексом, сохраняя при этом простоту развертывания и сопровождения.

Ключевые слова: программное обеспечение мониторинга, гибридная архитектура, HTTP-опрос, GSM-взаимодействие.

SOFTWARE ARCHITECTURE FOR CENTRALIZED CONTROL OF AIR CONDITIONING EQUIPMENT PARAMETERS

A.N. Saprykin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, saprykin.a.n@rsreu.ru*

Abstract. This paper examines an approach to building software for centralized monitoring of climate control equipment based on a hybrid architecture that combines HTTP polling of network air conditioners and GSM-based interaction with the operator via SMS messages. It is shown that this architecture ensures stable system operation in the absence or instability of a fixed network connection, supports dynamic node management, monitoring of critical parameters, and integration with a hardware measurement and command system, while maintaining ease of deployment and maintenance.

Keywords: Monitoring software, hybrid architecture, HTTP polling, GSM interaction.

Введение

В условиях повышения требований к энергоэффективности и надёжности систем климатического обеспечения особую актуальность приобретают решения, поддерживающие удалённый и централизованный контроль параметров работы оборудования. В отличие от традиционных промышленных протоколов, всё большее число современных сетевых кондиционеров оснащается встроенными веб-интерфейсами и API, доступными по протоколу HTTP, что упрощает интеграцию в IP-ориентированные системы управления, но одновременно ставит задачи обеспечения устойчивого и безопасного взаимодействия в условиях нестабильной сетевой инфраструктуры.

Особый интерес представляют сценарии развёртывания в удалённых или маломобильных объектах — например, на телекоммуникационных станциях, складских комплексах или в сельской местности, — где стационарное подключение к интернету может отсутствовать или быть ненадёжным. В таких условиях перспективным оказывается использование GSM-канала для передачи управляющих команд и критически важных уведомлений оператору. При этом взаимодействие «оператор – система» реализуется не через веб-интерфейс или облачный портал, а посредством SMS сообщений, что обеспечивает доступность управления даже при отсутствии интернет соединения.

Такой гибридный подход требует особой архитектурной организации программного обеспечения, так как на сегодняшний день боль-

шинство коммерческих решений для мониторинга климатического оборудования ориентированы на постоянное подключение к локальной сети или облаку и не предусматривают автономного GSM-интерфейса оператора. В связи с этим разработка специализированной архитектуры программного обеспечения, интегрирующей HTTP-опрос климатического оборудования и GSM-ориентированное взаимодействие с оператором, является актуальной.

Таким образом, реализация заявленной архитектуры программного обеспечения требует не только программной, но и соответствующей аппаратной основы, обеспечивающей корректный сбор данных и надёжное исполнение управляющих воздействий в условиях распределённого развёртывания. В качестве такой основы в настоящей работе используется измерительно-командный комплекс (ИКП), спроектированный с учётом ограничений на каналы связи и совместимости с существующими моделями кондиционеров.

Структура и функциональная организация измерительно-командного комплекса

Измерительно-командный комплекс представляет собой иерархическую распределённую систему, предназначенную для сбора климатических данных и формирования управляющих воздействий на кондиционеры. В состав комплекса входят центральный контроллер, блоки сопряжения и периферийные модули – датчики температуры и относительной влажности, а также инфракрасные излучатели [1]. Связь между центральным блоком и блоками сопряжения реализована по промышленному интерфейсу RS-485, тогда как подключение датчиков и излучателей к блокам сопряжения осуществляется по коротким кабельным линиям до 5 м, что обеспечивает масштабируемость и устойчивость к помехам.

Каждый кондиционер обслуживается двумя термодатчиками: один фиксирует температуру воздушного потока на выходе внутреннего блока, второй – в зоне контроля микроклимата. Совместный анализ абсолютных значений и их разности позволяет оценить эффективность теплообмена и диагностировать нештатные режимы работы. Влажные датчики обеспечивают контроль относительной влажности, необходимый при строгих требованиях к условиям эксплуатации технологического оборудования, на их основе вычисляются также абсолютная влажность и температура точки росы.

Управление кондиционерами осуществляется по инфракрасному каналу с использованием команд, идентичных штатным пультам дис-

танционного управления. Система поддерживает адаптацию к новым моделям оборудования за счёт захвата и декодирования оригинальных ИК-последовательностей. Взаимодействие с внешними системами, включая программное обеспечение мониторинга и GSM-модемы, реализовано через стандартный последовательный интерфейс RS-232 [2, 3].

Датчики и излучатели размещаются в миниатюрных герметичных корпусах, обеспечивающих механическую защиту и удобство монтажа при соблюдении требований к пространственному расположению в зоне ламинарного потока, в характерной точке помещения и в пределах угла приёма ИК-приёмника соответственно. Питание комплекса осуществляется от сети переменного тока 220 В при типовой потребляемой мощности не более 5 Вт. Крепление блоков выполняется через скрытые монтажные отверстия.

Обработка данных и реализация логики управления осуществляются в программной подсистеме, развёрнутой на удалённом компьютере; передача информации между ИКП и программным комплексом организована с использованием GSM-модемов, что обеспечивает функционирование системы в условиях отсутствия стационарного подключения.

Архитектура программного обеспечения мониторинга

Общая схема интеграции разработанного программного обеспечения (ПО) в систему централизованного управления климатическим оборудованием приведена на рисунке 1.

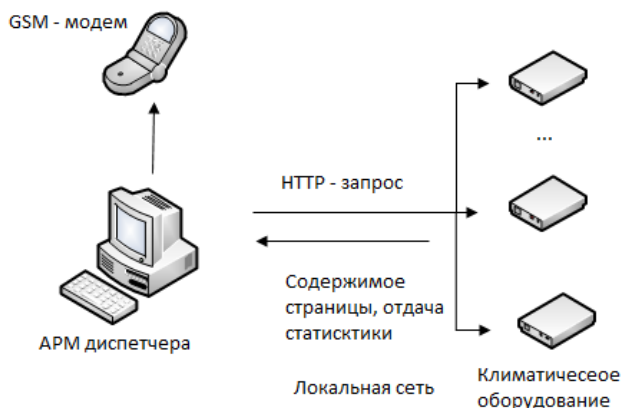


Рис. 1. Общая схема работы ПО

Программа реализована в виде клиентского приложения с графическим интерфейсом и построена на объектно-ориентированной архитектуре. Объектная модель отражает иерархию взаимосвязанных компонентов, включающих представления пользовательского интерфейса, логику управления узлами мониторинга и средства взаимодействия с внешними устройствами.

Ключевым элементом архитектуры является класс MainForm, обеспечивающий инициализацию главного окна, управление жизненным циклом узлов (добавление, активация/деактивация, обновление метрик), сохранение и загрузку настроек, а также реализацию таймерного цикла опроса активных узлов по HTTP. Активные узлы представляются экземплярами класса MNode, инкапсулирующего адрес устройства, текущие показатели, критические пороги и состояние (активен/неактивен). Обновление метрик производится путём HTTP-запроса к веб-API кондиционера с последующим парсингом ответа.

Взаимодействие с оператором организовано через SMS-канал. Метод SendMessage() класса MainForm обеспечивает отправку уведомлений через GSM-модем, подключённый по COM-порту, с автоматической записью исходящих сообщений в локальный журнал. Проверка превышения критических значений реализована в методе MetricWarning(), инициирующем отправку оповещения при нарушении установленных порогов.

Формы AddMonitoringNodeForm, SetCriticalValueForm и SettingsForm реализуют шаблон диалогового окна и обеспечивают соответственно добавление новых узлов мониторинга с валидацией входных данных, задание пороговых значений с контролем корректности числового ввода, и настройку параметров COM-порта и интервала опроса. Все окна используют единый механизм управления доступностью управляющих элементов (например, кнопки подтверждения активируются только при корректном заполнении полей).

Старт приложения инициируется методом Main() класса Program, который создаёт и отображает экземпляр MainForm. Диаграмма классов, отражающая структуру и связи компонентов, приведена на рисунке 2.

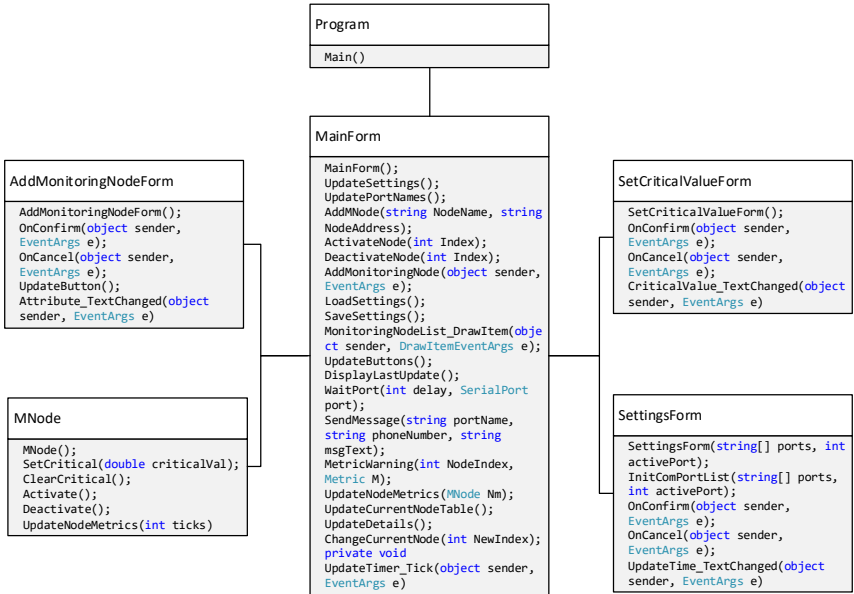


Рис. 2. Диаграмма классов

Выводы

В работе разработана архитектура программного обеспечения для централизованного контроля климатического оборудования в условиях нестабильной сетевой инфраструктуры. Предложенная система сочетает HTTP-опрос кондиционеров через их встроенные веб-интерфейсы и GSM-взаимодействие с оператором посредством SMS-сообщений, что обеспечивает надёжность управления при отсутствии постоянного подключения к интернету.

Программная часть реализована как приложение с объектно-ориентированной архитектурой, в которой предусмотрены валидация входных данных, автоматическое обновление активных узлов, контроль критических порогов и логирование событий. Возможность адаптации к новым моделям кондиционеров повышает практическую применимость решения.

Библиографический список

1. ГОСТ 34273–2017. Системы автоматизации технологических процессов. Общие требования к распределённым системам мониторинга и управления. – Введ. 2019-01-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 32 с.
2. Козырев А. А., Козырева О. Л. Проектирование систем дистанционного мониторинга на базе GSM/GPRS-технологий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 6. – С. 45–51.
3. Смирнов А. Ю., Петров И. Б. Промышленные интерфейсы передачи данных: от RS-232 до Ethernet. – М.: Горячая линия–Телеком, 2019. – 288 с.

УДК 81'322.4; ГРНТИ 16.31.21

ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ПЕРЕВОДА ЯПОНСКИХ ПОЛИТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ НА РУССКИЙ ЯЗЫК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛЕКСИКО-СТИЛИСТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ

К.А. Гиасян, А.О. Сапрыкина

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина
Рязань, keide@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе предложен подход к автоматизации перевода японских политических текстов на русский язык на основе системного анализа и формализации ключевых лексико-стилистических трансформаций. Показано, что явное моделирование операций, таких как стилистическая адаптация, культурно-терминологическая спецификация и реметафоризация, позволяет значительно повысить стилистическую и прагматическую адекватность машинного перевода в сравнении с универсальными системами.

Ключевые слова: автоматизация перевода, политический текст, японский язык, лексико-стилистические трансформации.

AN APPROACH TO AUTOMATIZATION OF THE TRANSLATION OF JAPANESE POLITICAL TEXTS INTO RUSSIAN BASED ON THE ANALYSIS OF LEXICAL AND STYLISTIC TRANSFORMATIONS

K.A. Giasyan, A.O. Saprykina

*Ryazan State University named for S.A. Esenin,
Ryazan, keide@yandex.ru*

Abstract. This paper proposes an approach to automating the translation of Japanese political texts into Russian based on a systematic analysis and formalization of key lexico-stylistic transformations. It is shown that explicit modeling of operations such as stylistic adaptation, culture-specific terminological specification, and remetaphorization significantly improves the stylistic and pragmatic adequacy of machine translation compared to general-purpose systems.

Keywords: translation automating, political text, Japanese language, lexico-stylistic transformations.

Введение

Современные системы машинного перевода, такие как, например, Google Translate, Yandex.Translate, демонстрируют ограниченную способность к адекватной передаче лексико-стилистических особенностей и культурно-обусловленных языковых единиц, характерных для японских политических текстов. В условиях растущего спроса на автоматизированный анализ японских новостных сообщений, официальных заявлений и политических документов — например, в задачах медиамониторинга, политического анализа и прогнозирования — данное ограничение становится значимым барьером для обеспечения точности и надёжности автоматизированного перевода.

В работе выдвигается гипотеза о том, что качество машинного перевода политических текстов с японского на русский язык может быть существенно повышено за счёт явного моделирования ключевых лексико-стилистических трансформаций. Целью настоящей статьи является обоснование подхода к автоматизации перевода, основанного на системном анализе и формализации переводческих операций, применяемых в контексте политического дискурса.

Анализ предметной области и формализация преобразований

Исходным материалом является японский политический текст (предложение или документ). Требуется обеспечить адекватное и стилистически корректное русскоязычное изложение текста. Задача состоит в создании модели, способной выявлять те места, где необходимы преобразования, и осуществлять к ним предусмотренные операции, тем самым улучшая качество машинного перевода политических текстов.

На основе изучения лексико-стилистических особенностей японско-русских политических текстов выделены ключевые виды преобразований:

- Операция «Стилистическая адаптация»: призвана обеспечить соответствие стилистического регистра целевого текста нормам русского политического и официально-делового дискурса. В японских политических текстах часто используются устойчивые канцелярские конструкции, такие как *～については* (ни цуйтэ ва), буквально означающая «в отношении...» или «что касается...» [3]. Хотя синтаксически и семантически эта конструкция передаёт нейтральную референцию на тему, её прямая калька на русский язык (например, «по поводу...» или «относительно...») может нарушать стилистическую норму или звучать неестественно в официальном контексте. В русском политическом и административном дискурсе устоявшимися эквивалентами выступают канцеляризмы «касательно...» или «в отношении...», которые не только точнее передают прагматическую функцию исходной конструкции, но и сохраняют требуемый уровень формальности. Применение данной операции позволяет системе автоматизированного перевода генерировать не просто семантически корректный, но и стилистически адекватный вывод.

- Операция «Культурно-терминологическая спецификация»: направлена на корректную передачу лексических единиц, не имеющих прямых эквивалентов в русском языке, но несущих значимую прагматическую нагрузку в японском политическом дискурсе. Классическим примером служит термин *腹芸* (харагэи) — устойчивое понятие японской политической культуры, обозначающее неформальные, часто невербальные формы взаимодействия, основанные на интуитивном понимании позиций собеседника, недоговорённости и намёках. Прямой перевод этого термина невозможен без потери смысла; в русско-

зычном политическом контексте адекватной заменой выступает описательная конструкция «негласная политическая договорённость», которая сохраняет как семантическое содержание, так и функциональную роль единицы в оригинальном тексте.

- Операция «Конкретизация»: глагол широкого смысла 行う (оконау) — «осуществлять». В то время как русские конкретные глаголы «проводить (политику)», «осуществлять (соглашение)» [3].
- Операция «реметафоризация»: перевод метафор и экспрессивных фраз с использованием культурно-близких выражений на русском языке [4].
- Операция «Опущение экспрессивной семы»: упрощение или нейтрализация эмоционально окрашенных слов и выражений для стилистической адекватности [4].

В следующем отрывке политического текста представлен прием такого преобразования как реметафоризация. В данном тексте описывается конфликт внутри партии и выражение недовольства по отношению к неправильно выбранным действиям со стороны председателя партии.

Текст оригинала	Адекватный перевод
。。。維新執行部に動きがないまま、国民民主が与党と合意に至った。会食に出席した一人は「みすみす国民民主に持って行かれた。どうしようもない」と不満を爆発させた。	...Пока руководство «Партии инноваций Японии» бездействовало, «Демократическая партия для народа» достигла соглашения с правящей коалицией. Один из участников встречи за обедом выразил недовольство: «Они позволили Демократической партии для народа <i>увести победу из-под носа</i> . С этим нельзя ничего поделать.»

В переведенном выше отрывке фраза *みすみす国民民主に持って行かれた* (мисумису кокумин минсю ни моттэ икарэта) можно перевести как «Они позволили **Демократической партии для народа** *увести победу из-под носа*». В оригинале используется форма адверсативного непрямого пассива глагола ику икарэта, которое выражает недовольство члена «**Партии инноваций Японии**». В русском языке используется метафора «увести победу из-под носа», которая передаёт чувства говорящего. Кроме того, используется опущение эмоционально-экспрессивной семы фразеологизма: *不満を爆発させた* (фуман о бакухацу сасета) переводится как «разозлился» вместо буквального перевода «взорвался от злости».

Предлагаемый подход

В рамках настоящего исследования предлагается концептуальная гибридная архитектура автоматизированного перевода, ориентированная на обработку японских политических текстов. Предполагается, что система может быть построена на основе сочетания нейросетевой модели машинного перевода (например, такой как GPT-4, или специализированной NMT-системы) и модуля пост-обработки, реализующего формализованные лексико-стилистические трансформации.

В общих чертах, рабочий цикл такой системы мог бы включать следующие этапы:

1. Генерация предварительного перевода с использованием базовой нейросетевой модели;
2. анализ полученного текста на предмет наличия контекстов, соответствующих заранее выявленным шаблонам, требующим стилистической или культурно-терминологической адаптации;
3. применение соответствующих операций трансформаций;
4. синтез итогового варианта перевода путём интеграции скорректированных фрагментов с сохранением семантической целостности и стилистической адекватности целевого текста.

Подобный подход, хотя и не реализован в виде программного прототипа в рамках данного исследования, демонстрирует потенциальную возможность повышения качества машинного перевода за счёт целенаправленного учёта особенностей политического дискурса.

Оценка эффективности подхода

Эффективность предложенного подхода предполагается оценивать на основе качественного сравнения результатов базового машинного перевода и версий, скорректированных с учётом формализованных лексико-стилистических трансформаций. В качестве методики выступает экспертный анализ адекватности передачи смысла, стилистической корректности и соответствия нормам русского политического дискурса.

Хотя количественные метрики (например, BLEU, METEOR) могут применяться для оценки лексико-грамматической близости к эталонному переводу, они недостаточны для измерения стилистической и прагматической адекватности, особенно в контексте культурно-специфических единиц. Поэтому основной акцент следует делать на качественную оценку.

На примере анализа фрагмента японского политического текста показано, что применение операций «реметафоризации», «культурно-терминологической спецификации» и «опущения экспрессивной семы» позволяет существенно повысить естественность и функциональную эквивалентность перевода. Это подтверждает гипотезу о том, что явное моделирование переводческих трансформаций способствует улучшению качества автоматического перевода в узкой предметной области.

Заключение

Проведённое исследование подтверждает, что качество машинного перевода японских политических текстов на русский язык может быть значительно повышено за счёт системного учёта лексико-стилистических и культурно обусловленных особенностей. Предложенный подход, основанный на формализации ключевых переводческих трансформаций — таких как стилистическая адаптация, культурно-терминологическая спецификация, конкретизация, реметафоризация и опущение экспрессивной семы, — позволяет преодолеть ограничения универсальных систем машинного перевода в узкоспециализированном дискурсе. Хотя в работе представлена концептуальная, а не реализованная архитектура, она задаёт теоретическую основу для будущих инженерных решений в области автоматизированного анализа политического контента. Перспективы развития включают создание расширенного шаблонного тезауруса, интеграцию подхода в аналитические платформы и применение методов машинного обучения для автоматического пополнения базы правил. Таким образом, явное моделирование переводческих операций открывает путь к созданию более точных, стилистически адекватных и прагматически корректных систем перевода в сфере международного политического мониторинга.

Библиографический список

1. Алтунян, А. Г. Анализ политических текстов : учебное пособие / А. Г. Алтунян. – Москва: Университетская книга: Логос, 2006. – 256 с.
2. Комиссаров, В. Н. Теория перевода (лингвистические аспекты) / В. Н. Комиссаров. – Москва : Высшая школа, 1990. – 232 с.
3. Солонович, Л. В. Семантико-стилистические трансформации в художественном тексте : сопоставительно-типологический аспект (на материале немецких и русских переводов) : автореф. дис. ... канд. филол. наук : 10.02.20 / Л. В. Солонович. – Минск, 2016. – 24 с.

4. Чудинов, А. П. Политическая лингвистика : учеб. пособие для студентов, аспирантов, преподавателей-филологов / А. П. Чудинов. – Москва : Флинта : Наука, 2006. – 248 с.

УДК 004.5:811; ГРНТИ 50.41.29

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ МНОГОЯЗЫЧНОЙ СРЕДЫ

А.О. Сапрыкина, А.А. Яркович

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина
Рязань, keide@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрены принципы проектирования человеко-машинного взаимодействия для многоязычной среды. Показано, что применение методологии интернационализации и локализации позволяет обеспечить удобство и эффективность интерфейсов для глобальной аудитории, несмотря на существующие технические сложности и культурные различия.

Ключевые слова: HCI, пользовательский интерфейс, многоязычная среда, интернационализация, локализация.

HCI APPROACHES TO MULTILINGUAL USER INTERFACE DESIGN

A.O. Saprykina, A.A Yarkovich

*Ryazan State University named for S.A. Esenin,
Ryazan, keide@yandex.ru*

Abstract. This paper examines the principles of human-computer interaction (HCI) design for multilingual environments. It is shown that the application of internationalization and localization methodology ensures the usability and efficiency of interfaces for a global audience, despite existing technical challenges and cultural differences.

Keywords: HCI, user interface, multilingual environment, internationalization, localization.

Введение

В современном глобализированном мире программные приложения и цифровые системы используются людьми из разных языковых и культурных сред. Область взаимодействия человека и компьютера (HCI) традиционно концентрируется на создании интуитивно понят-

ных и эффективных интерфейсов. Однако когда эти интерфейсы должны работать в многоязычной среде, задачи и сложности многократно возрастают. Управление HCI в таких условиях выходит далеко за рамки простого перевода текста. Оно требует глубокого понимания культурных нюансов, технических ограничений и принципов адаптивного дизайна, чтобы система оставалась удобной, доступной и эффективной для каждого пользователя, независимо от его родного языка. Эта статья исследует основные принципы, практические примеры и ключевые проблемы проектирования и управления системами для многоязычной аудитории [1].

Человеко-машинное взаимодействие (HCI)

Согласно ACM (Association for Computing Machinery) HCI (человеко-машинное взаимодействие) — это междисциплинарная область, лежащая на стыке компьютерных наук, психологии и дизайна [2]. Она посвящена проектированию и исследованию того, как люди взаимодействуют с вычислительными системами через пользовательские интерфейсы. Эти интерфейсы включают в себя не только экраны и устройства ввода, но и сложные системы, такие как самолеты или электростанции.

Компоненты человеко-машинного взаимодействия включают пользователя, компьютерную систему, интерфейс, задачи пользователя и среду использования. Пользователь — это человек с определенными когнитивными и физическими возможностями, которые влияют на способы взаимодействия. Компьютер предоставляет вычислительные ресурсы и обрабатывает данные, а интерфейс служит посредником, позволяя пользователю вводить команды и получать обратную связь от системы через визуальные, аудио или сенсорные каналы. Задачи отражают цели, которые пользователь хочет достичь с помощью системы, а среда — это физические и социальные условия, в которых происходит взаимодействие.

Взаимодействие строится на цикле обмена информацией: пользователь посылает команды, система их обрабатывает и возвращает результаты, которые воспринимаются пользователем для дальнейших действий. Процесс включает адаптацию интерфейса под потребности пользователя, обеспечение удобства и эффективности работы. Обратная связь от системы помогает пользователю понять состояние и результаты своих действий. Все эти компоненты вместе обеспечивают эффективное и интуитивное взаимодействие человека с компьютером,

учитывая особенности человека и возможности техники, чтобы сделать использование технологий более простым и полезным.

Стратегии обеспечения глобальной доступности пользовательских интерфейсов

Эффективное управление HCI в многоязычной среде основывается на нескольких фундаментальных принципах, часто обозначаемых как интернационализация (i18n) и локализация (L10n).

Интернационализация представляет собой комплекс технических и архитектурных решений, направленных на проектирование программного обеспечения, способного к адаптации для различных языков и регионов без модификации исходного кода. Локализация определяется как процесс адаптации интернационализированного продукта для конкретной локали, под которой понимается уникальная комбинация языка и региональных стандартов [3].

В случае HCI, интернационализация — это фундаментальный этап проектирования, направленный на создание программного обеспечения с поддержкой Unicode и возможностью работы с различными языковыми и культурными особенностями без необходимости менять исходный код. Это позволяет не только подстраивать текст, но и адаптировать такие сложные аспекты, как чтение текста справа налево, вертикальное написание, формат даты и времени, валюты и даже цветовую символику. Локализация — это следующий конкретный шаг, реализуемый для каждой целевой локали, где происходит перевод интерфейса, документации и адаптация визуальных и функциональных элементов под культурные особенности пользователя, включая правовые нормы и предпочтения в оформлении. В HCI это необходимо для обеспечения удобства использования и понятности интерфейса для разных групп пользователей, что улучшает их восприятие продукта и повышает эффективность взаимодействия.

Без грамотной интернационализации и локализации приложения могут вызывать недопонимание и неудобства, снижая качество пользовательского опыта в глобальной среде. Такой подход позволяет создавать действительно универсальные интерфейсы, способные учитывать многообразие языков и культур, что важно в современном мире с глобальными пользователями.

Примеры HCI в многоязычной среде

Например, платформа электронной коммерции, такая как Amazon, стремится обеспечить бесшовный процесс покупки для пользователей

по всему миру. В рамках HCI интерфейс полностью переведен на множество языков, цены показываются в местной валюте с учетом региональных налогов, а поисковый алгоритм понимает и исправляет распространенные опечатки на разных языках. Кроме того, рекомендации товаров адаптированы к культурным и сезонным предпочтениям пользователей. Корпоративное программное обеспечение, например SAP или Microsoft Office, направлено на повышение продуктивности сотрудников международных компаний. Оно предоставляет полностью локализованный интерфейс, включая меню, диалоговые окна и справочную документацию, а также поддерживает проверку орфографии и грамматики для всех поддерживаемых языков и различные календарные системы и форматы юридической отчетности в соответствии с каждой страной. Мобильные операционные системы, такие как iOS и Android, обеспечивают культурно адаптированный, но единообразный интерфейс на личных устройствах [5].

Пользователи могут выбирать язык и регион, а система автоматически настраивает форматы даты, времени, раскладки клавиатуры и голосовых помощников. В магазинах приложений доступен локализованный контент. Многоязычные веб-сайты компаний, например Nike или Jade Roller, поддерживают десятки языков с переключателями языков и валют, а контент адаптирован под культурные особенности различных регионов. POS-системы в сфере туризма и торговли используют многоязычные интерфейсы для упрощения взаимодействия с представителями разных национальностей, устраняя языковые барьеры. Автоматизированные системы ответов и чат-боты функционируют на нескольких языках с учетом культурных особенностей, что улучшает качество обслуживания пользователей.

Все эти примеры демонстрируют важность интернационализации и локализации в HCI, обеспечивая удобство и доступность интерфейсов для глобальной и мультикультурной аудитории.

Технические и лингвокультурные барьеры в разработке многоязычных интерфейсов

Проблематика HCI в многоязычной среде связана с рядом постоянных сложностей.

Во-первых, техническая сложность заключается в том, что реализация полной поддержки i18n с самого начала требует значительных первоначальных инвестиций и дисциплины, а ретроактивная интернационализация большой кодовой базы становится очень трудоемкой и дорогостоящей задачей.

Во-вторых, лингвистические и культурные особенности представляют собой серьезные ловушки — прямой перевод часто оказывается неэффективным, что способно привести к недопониманию или даже оскорблению пользователей.

Третья проблема связана с нарушением макета и дизайна: расширение текста из-за перевода может разрушить тщательно разработанный интерфейс, вызывая обрезку текста или наложение элементов, а языки с написанием справа налево (RTL), такие как арабский и иврит, требуют зеркального отражения всего макета, к чему многие дизайн-системы не готовы[4].

Четвертый аспект — высокие эксплуатационные расходы, поскольку любое добавление новой функции или изменение текста требует перевода на все поддерживаемые языки, что замедляет циклы разработки и увеличивает расходы. Наконец, фрагментация пользовательского опыта возникает, когда локализация проводится не всесторонне — пользователи в разных регионах получают неоднородные версии продукта, где могут отсутствовать функции или поддержка, что снижает общее качество и вызывает ощущение второсортности продукта.

Все эти проблемы требуют комплексного подхода при проектировании и поддержке многоязычных интерфейсов для обеспечения удобства и эффективности взаимодействия с пользователями по всему миру.

Выводы

Проведенный теоретический анализ подтвердил целесообразность применения методологии интернационализации (i18n) и локализации (L10n) для проектирования пользовательских интерфейсов в многоязычной среде. Исследование показало, что последовательная реализация данного подхода позволяет сохранить удобство использования и функциональную эффективность интерфейсов для глобальной аудитории.

Анализ практических примеров и выявленных проблем разработки демонстрирует, что создание успешных многоязычных интерфейсов требует комплексного решения технических, лингвистических и культурологических задач. Преодоление таких трудностей, как различия в длине текста, особенности RTL-языков и культурные различия, возможно через интеграцию принципов i18n и L10n на всех этапах проектирования.

Библиографический список

1. Раскин, Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем / Д. Раскин. – Москва, 2003. – 272 с.
2. Мальковский, М. Г. Пользовательский интерфейс: семиотические аспекты : учеб. курс / М. Г. Мальковский. – Москва, 2020.
3. Купер, А. Об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия. — Пер. с англ. — СПб.: Символ-Плюс, 2009. — 688 с.
4. Языковое и культурное разнообразие в киберпространстве. Сборник материалов II Международной конференции (Якутск, 12–14 июля 2011 г.) / Сост. Кузьмин Е. И., Паршакова А. В. – М.: Межрегиональный центр библиотечного сотрудничества, 2013. – 384 с.
5. Ту, Янджу. Человеко-ориентированное машинное взаимодействие / Янджу Ту // Энергия единой сети. – 2024. – № 5–6 (75). – С. 58–63.

УДК 004.65, ГРНТИ 50.41.21

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ ДЛЯ КОРПОРАТИВНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ: ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ПОДХОД

Т.И. Кондрашова, А.Н. Колесенков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, tatyanacondrashova00@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается концепция интеллектуальной системы управления базами данных (ИСУБД), предназначенной для обработки пространственной информации в корпоративных геоинформационных системах (КГИС). Целью исследования является преодоление концептуального и технологического разрыва между хранением гетерогенных пространственных данных и выполнением сложной аналитики в реальном времени. Предлагаемый архитектурный подход предполагает глубокую интеграцию гибридного ядра хранения пространственных данных, ML-движка, интеллектуального оптимизатора запросов, семантического процессора и модуля активного мониторинга. Ключевым новым результатом является метод встроенной в СУБД оптимизации запросов на основе анализа планов выполнения и машинного обучения, а также модель семантического представления пространственных сущностей. Теоретическая значимость работы заключается в систематизации принципов интеграции ИИ в СУБД для пространственных данных.

Практическая полезность подтверждается оценкой предполагаемой эффективности: расчетное снижение времени выполнения аналитических запросов на 25-40% и сокращение объема перемещаемых данных до 60%.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления базами данных, корпоративные ГИС, пространственные данные, машинное обучение в СУБД, оптимизация запросов, семантический процессор, гибридное хранение данных.

CONCEPT OF AN INTELLIGENT DATABASE MANAGEMENT SYSTEM FOR CORPORATE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS: A PROPOSED ARCHITECTURAL APPROACH

T.I. Kondrashova, A.N. Kolesenkov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, tatyanakondrashova00@gmail.com*

Abstract. This paper discusses the concept of an Intelligent Database Management System (IDBMS) designed for processing spatial information in corporate geographic information systems (CGIS). The aim of the research is to bridge the conceptual and technological gap between storing heterogeneous spatial data and performing complex real-time analytics. The proposed architectural approach involves deep integration of a hybrid spatial data storage core, an ML engine, an intelligent query optimizer, a semantic processor, and an active real-time monitoring module. The key novel result is a method for built-in DBMS query optimization based on the analysis of execution plans and machine learning, as well as a model for the semantic representation of spatial entities. The theoretical significance of the work lies in the systematization of the principles of AI integration into DBMS for spatial data. Practical utility is confirmed by an assessment of the expected efficiency: an estimated 25-40% reduction in the execution time of analytical queries and up to a 60% reduction in the volume of data moved.

Keywords: intelligent database management system, corporate GIS, spatial data, in-database machine learning, query optimization, semantic processor, hybrid data storage.

Введение

Современные корпоративные геоинформационные системы (КГИС) сталкиваются с возрастающими проблемами при обработке больших объемов пространственных данных. Традиционные СУБД с пространственными расширениями достигают пределов своей эффек-

тивности при работе с гетерогенными данными от IoT-устройств, дистанционного зондирования и мобильных приложений [1].

Актуальность исследования определяется необходимостью преодоления концептуального разрыва между системами хранения данных и аналитическими платформами в КГИС. Существующие решения требуют сложных процессов ETL (Extract, Transform, Load) для выполнения продвинутой аналитики, что снижает оперативность принятия решений [2].

Исторически задача управления пространственными данными решалась с помощью специализированных систем, которые организовывали информацию в пространственном контексте. Однако эти системы не были рассчитаны на современные объемы и скорость поступления данных. В настоящее время контекст локации является связующей нитью для понимания скрытых паттернов и взаимосвязей в таких областях, как изменение климата и поведение потребителей. Это требует новых архитектурных решений.

Целью работы является разработка концепции интеллектуальной системы управления базами данных (ИСУБД), предполагающей глубокую интеграцию методов искусственного интеллекта в ядро системы обработки пространственных данных.

Проведенный анализ современных исследований позволяет предположить, что дальнейшее развитие СУБД для КГИС будет связано с конвергенцией технологий управления данными и машинного обучения. Изучение таких систем, как PostgreSQL с расширением MADlib, демонстрирует потенциальную возможность выполнения ML-алгоритмов непосредственно в среде базы данных [3]. Однако специализированные архитектурные решения для пространственных данных требуют дополнительной концептуальной проработки, что и является предметом данного исследования.

Обзор литературы и постановка проблемы

Развитие систем для работы с пространственными данными прошло путь от ранних прототипов SDMS, использующих графические представления, до современных ГИС-платформ, таких как ArcGIS, которые предлагают комплексный набор пространственных алгоритмов. Однако в основе большинства из них лежат реляционные СУБД с пространственными расширениями (например, PostGIS), которые не предназначены для нативной интеграции с моделями машинного обучения.

Существующие методики повышения производительности СУБД, такие как создание индексов, переписывание запросов и использование материализованных представлений, требуют значительного участия человека-администратора и не адаптируются к изменяющимся паттернам рабочих нагрузок. Это приводит к тому, что сложные аналитические запросы выполняются недопустимо долго из-за необходимости перемещения больших объемов данных во внешние системы аналитики.

Архитектура экспертных систем в ИИ, включающая такие компоненты, как база знаний, механизм логического вывода и модуль объяснений, представляет значительный интерес для создания интеллектуальных надстроек над СУБД. Однако вопрос о том, как наиболее эффективно встроить эти компоненты непосредственно в ядро СУБД, отвечающее за обработку пространственных данных, остается открытым [4]. Предлагаемая концепция ИСУБД призвана дать ответ на этот вызов.

В основе исследования лежит методология концептуального проектирования систем, включающая следующие этапы:

1. Анализ и синтез требований: на основе изучения современных вызовов в области КГИС и ограничений существующих СУБД были сформулированы ключевые требования к ИСУБД: поддержка гетерогенных пространственных данных, интеллектуальная оптимизация запросов и семантическая обработка.

2. Архитектурное моделирование: разработана концептуальная архитектура системы с выделением ключевых модулей и спецификацией интерфейсов между ними.

3. Моделирование эффективности: для обоснования предполагаемых преимуществ подхода использовано математическое моделирование и расчет ключевых метрик производительности на основе типовых сценариев использования КГИС.

Для оценки целевой функции оптимизации в рамках интеллектуального оптимизатора предполагается использование подхода, избегающего ошибок анализа данных, таких как переобучение и некорректное тестирование вне выборки. Это обеспечит надежность работы системы в реальных условиях.

Предлагаемая архитектура ИСУБД

В рамках предлагаемой концепции предполагается архитектура ИСУБД, включающая следующие ключевые модули, взаимодействие которых отображено на рисунке 1.

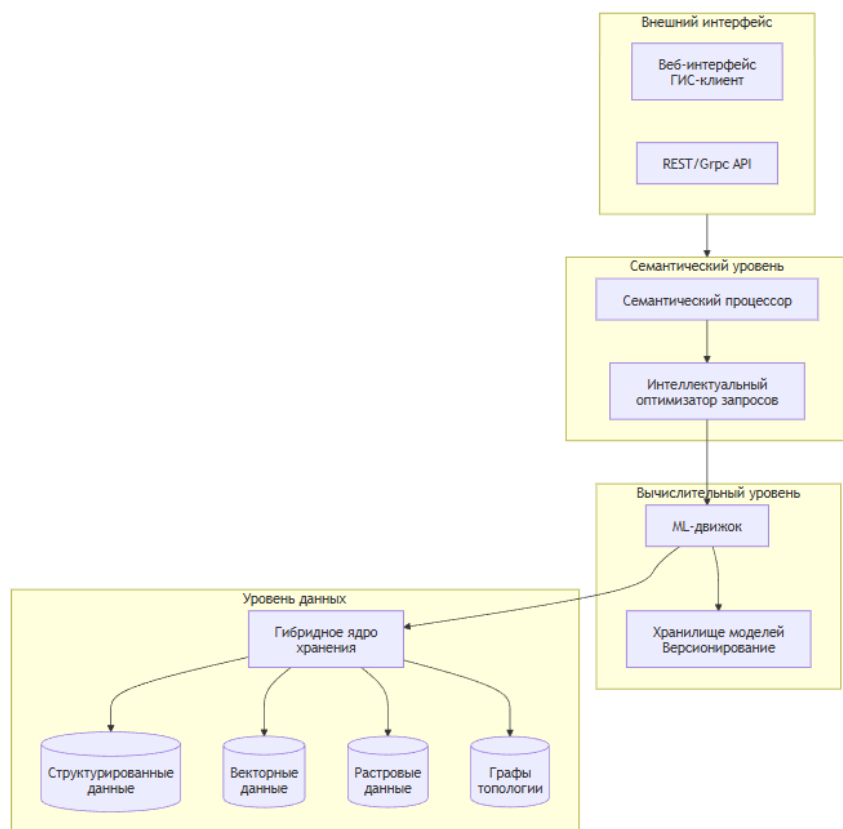


Рис. 1. Общая архитектура интеллектуальной СУБД для КГИС

Гибридное ядро хранения пространственных данных отвечает за физическое хранение разнородных пространственных данных. В отличие от традиционных подходов, он реализует гибридную модель, совмещающую реляционные таблицы, векторные данные (точки, линии, полигоны), растровые данные (снимки) и графы (для топологий и сетей).

ML-движок с хранилищем моделей. Это ядро интеллектуальной обработки. Оно позволяет обучать, хранить и выполнять модели машинного обучения непосредственно внутри СУБД. Модуль поддерживает версионирование моделей, их жизненный цикл и обеспечивает изоляцию процессов выполнения. ML-движок интегрирован с гибридным

ным ядром, что позволяет ему обращаться к данным напрямую, минимизируя накладные расходы на перемещение информации.

Новизна интеллектуального оптимизатора запросов заключается в использовании методов машинного обучения для анализа планов выполнения запросов и выбора оптимальной стратегии. Оптимизатор обучается на истории выполненных запросов, их планах и реальной производительности. Он способен предсказывать стоимость плана не только на основе статистики, но и на основе скрытых паттернов в данных.

Семантический процессор отвечает за интерпретацию пользовательских запросов, сформулированных на естественном языке или в виде высокоуровневых команд. Он извлекает пространственные сущности и их смысловые связи, преобразуя их в формализованный запрос на языке SQL с использованием пространственных функций. Модуль использует онтологии предметной области (например, градостроительства, экологии) для понимания контекста.

Концептуальный принцип работы системы иллюстрирует следующий сценарий обработки запроса прогнозирования экологических рисков. Пользователь формулирует запрос: "Выявить участки с высокой вероятностью подтопления в период паводка". Семантический процессор извлекает пространственные сущности, после чего ML-движок может выполнять прогнозную модель на основе исторических данных о рельефе и гидрологических характеристиках [5]. Особенностью предлагаемой концепции является предполагаемая возможность выполнения ML-моделей непосредственно в процессе обработки SQL-запросов, что теоретически должно исключить необходимость миграции больших объемов пространственных данных во внешние аналитические системы.

Модуль активного мониторинга в реальном времени непрерывно анализирует потоки данных от датчиков IoT и других источников. Он использует легковесные ML-модели для обнаружения аномалий и прогнозирования критических состояний непосредственно в момент поступления данных, без обязательной записи в основное хранилище. Это позволяет системе реагировать на события в режиме, близком к реальному времени.

Для валидации концепции был проведен расчетный анализ эффективности предложенной архитектуры по сравнению с традиционным подходом (СУБД + внешняя ML-система). За основу взяты метрики, характерные для задач КГИС: время выполнения запроса и объем пе-

ремещаемых данных. Ключевое преимущество ИСУБД — значительное сокращение накладных расходов на перемещение данных, что напрямую ведет к снижению времени отклика системы.

Предлагаемая концепция развивает идеи, заложенные в системах типа PostgreSQL-MADlib, но идет дальше за счет:

1. Глубокой интеграции ML-моделей в процесс оптимизации запросов, а не только их выполнения.
2. Нативной поддержки семантического интерфейса, что выводит взаимодействие с СУБД на новый уровень абстракции.
3. Архитектуры гибридного хранения, спроектированной специально для многомодальных пространственных данных, а не их эмуляции в реляционной модели.

Реализация предложенной концепции сопряжена с рядом вызовов:

1. Сложность реализации. Интеграция разнородных компонентов требует разработки новых протоколов взаимодействия.
2. Производительность ML-движка. Выполнение сложных моделей внутри СУБД может создавать нагрузку, конкурирующую с основными операциями обработки запросов. Необходим механизм приоритизации и ресурсных квот.
3. Качество семантического процессора. Точность интерпретации запросов напрямую зависит от полноты онтологий, разработка которых требует привлечения экспертов предметной области.

Выводы

Разработанная концепция интеллектуальной СУБД представляет предполагаемый архитектурный подход к управлению пространственными данными в корпоративных ГИС. Теоретическая значимость работы заключается в систематизации принципов интеграции искусственного интеллекта в СУБД для пространственных данных и формулировании направлений дальнейших исследований.

Предполагаемые преимущества предложенного подхода:

- Глубокая интеграция ML-моделей в процесс выполнения запросов, обеспечивающая расчетное снижение времени выполнения сложных аналитических задач на 25-40%.
- Возможность семантической обработки пространственных данных, что делает систему доступной для специалистов, не являющихся экспертами в SQL.

- Модуль активного мониторинга в реальном времени, позволяющий выявлять аномалии и прогнозировать события без задержек, связанных с ETL-процессами.

- Снижение латентности и объема перемещаемых данных до 60% за счет выполнения вычислений в месте хранения данных.

Перспективы дальнейших исследований включают детальную проработку архитектуры системы, разработку прототипа и проведение экспериментальной апробации на реальных корпоративных данных. Планируется оценить производительность системы на типовых рабочих нагрузках КГИС и сравнить с традиционными подходами к управлению пространственными данными. Отдельным направлением является разработка редактора онтологий для наполнения семантического процессора в различных предметных областях.

Библиографический список

1. Иванов А.В., Петров С.К. Современные тенденции развития систем управления базами данных // Информационные технологии. – 2022. – Т. 28. – № 3. – С. 45-52.
2. Smith J., Johnson M. Geospatial Data Management in Enterprise Systems // Proceedings of the International Conference on Spatial Data Science. – 2021. – P. 75-84.
3. Brown K., Davis R. In-Database Machine Learning for Spatial Data // Journal of Geospatial Information. – 2023. – Vol. 15. – No. 2. – P. 110-125.
4. Баранчиков А.И., Федосова Е.Б. Реинжиниринг реляционных баз данных на основе кластеризации атрибутов и технологий интеллектуального анализа данных // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 86. – С. 156-161.
5. Сидоров П.А., Козлов М.И. Интеллектуальный анализ пространственных данных. – М.: Издательство МГУ, 2023. – 184 с.
6. Chen L., Wang H. Adaptive Query Optimization for Spatial Databases // ACM Transactions on Database Systems. – 2022. – Vol. 47. – No. 4. – P. 1-35.
7. Акинина Н.В., Курагин А.В., Колесенков А.Н., Костров Б.В. Разработка картографических веб-приложений на основе геоинформационных технологий // Телекоммуникации. – 2023. – № 2. – С. 23-31.
8. Щенева Ю.Б. Алгоритм многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С. 202-212.
9. Отраднов К.К., Алешкин А.С., Калинин В.Н. Преимущества использования графовых баз данных при разработке прикладных приложений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 86. – С. 73-85.

УДК 621.9.047; ГРНТИ 55.20.19

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ****Р.Н. Дятлов***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, kaitp@list.ru*

Аннотация. Рассматривается проблема повышения точности электрохимической обработки материалов в машиностроении через разработку математической модели процесса электрохимического полирования. Предложена двухэтапная методика численного решения задачи распределения потенциала и тока в электрохимической ячейке с учётом нелинейных граничных условий на электродах. Модель позволяет прогнозировать неравномерность съёма материала, определять технологические режимы для удаления дефектного слоя и повышения чистоты поверхности деталей.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, математическое моделирование, уравнение Лапласа, метод конечных разностей, электрохимическое полирование, точность обработки.

**MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROCHEMICAL
MACHINING OF MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING****R.N. Dyatlov***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, kaitp@list.ru*

Abstract. The problem of improving the accuracy of electrochemical machining of materials in mechanical engineering is considered through the development of a mathematical model of the electrochemical polishing process. A two-stage methodology for the numerical solution of the problem of potential and current distribution in an electrochemical cell is proposed, taking into account nonlinear boundary conditions on the electrodes. The model allows predicting the non-uniformity of material removal, determining technological regimes for removing the defective layer, and improving the surface finish of parts.

Keywords: electrochemical machining, mathematical modeling, Laplace equation, finite difference method, electrochemical polishing, machining accuracy.

Введение

Электрохимическая обработка (ЭХО) материалов является перспективным технологическим методом в машиностроении, обеспечивающим высокую производительность и отсутствие механических напряжений в обрабатываемых деталях. Однако точность изготовления деталей электрохимическим методом на порядок ниже точности их изготовления электроэрозионным методом, что сдерживает широкое внедрение ЭХО в промышленность [1].

После электроэрозионной обработки на поверхности детали образуется дефектный слой толщиной около 100 мкм, а чистота поверхности составляет $R_z = 3$ мкм. Для удаления дефектного слоя и повышения чистоты поверхности до $R_z \approx 0,4$ мкм применяется электрохимическое полирование. Процесс должен проводиться при таких технологических режимах, которые обеспечивают полное удаление дефектного слоя, требуемую величину шероховатости, максимальную производительность и минимальное отклонение от плоскости обрабатываемой поверхности.

Основной причиной низкой точности электрохимической обработки является неравномерное распределение плотности тока по обрабатываемой поверхности детали. Математическое моделирование процесса позволяет исследовать влияние геометрии межэлектродного зазора, режимов обработки и свойств электролита на распределение тока и точность формообразования.

Физико-математическая постановка задачи

Основные допущения. Рассматривается двумерная стационарная задача распределения потенциала в области G межэлектродного зазора при $t > 0$ (рис. 1).

Принимаются следующие допущения:

1. Электропроводность электролита χ постоянна по всей области.

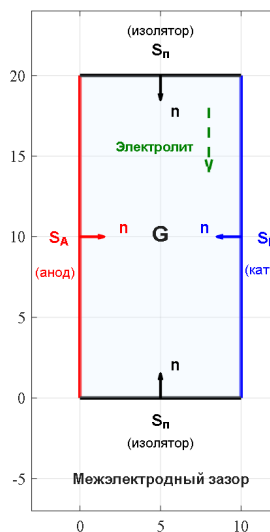


Рис. 1. Расчётная область электрохимической ячейки

2. Джоулевым разогревом электролита можно пренебречь.
3. Толщина анодного диффузионного слоя мала по сравнению с межэлектродным зазором.

4. Процесс протекает в стационарном режиме.

Уравнение для потенциала. При принятых допущениях распределение потенциала $\varphi(x, y)$ в области G описывается уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0.$$

Граничные условия. Граница области G состоит из трёх участков с различными граничными условиями.

На изоляторе S_n (условие непротекания тока):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{S_n} = 0.$$

На катоде S_k (уравнение Тафеля для водородного электрода):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{S_k} = -i_0 \exp\left(-\frac{zF\varphi_k}{RT}\right),$$

где i_0 – ток обмена, z – валентность ионов, F – постоянная Фарадея, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

На аноде S_A (условие миграционно-диффузионной кинетики):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{S_A} = \text{const.}$$

Теория переноса ионов в электролите

Механизмы переноса. Перенос ионов в электролите осуществляется тремя механизмами: миграцией в электрическом поле, диффузией и конвекцией. Плотность тока для i -го иона определяется выражением [2]:

$$i_i = -D_i F z_i \frac{\partial c_i}{\partial n} - \beta_i F^2 z_i^2 c_i \frac{\partial \varphi}{\partial n},$$

где D_i – коэффициент диффузии, c_i – концентрация, β_i – подвижность ионов i -го типа.

Бинарный электролит. Для бинарного электролита (например, NaOH), содержащего катионы и анионы с зарядами $z_1 = z_2 = 1$, при условии отсутствия электрохимических реакций ($i_1 = 0$) и с учётом электронейтральности раствора ($C = C_1 z_1 = C_2 z_2$), выражение для плотности тока принимает вид:

$$i_2 = \frac{2D_1\chi}{F} \frac{\partial \ln C}{\partial n},$$

где $\chi = F^2 D_1 D_2 z_1 z_2 C / (RT)$ – электропроводность электролита, $D_1 = 1,35 \times 10^{-5}$ см²/с – коэффициент диффузии ионов Na^+ .

Конвективная диффузия. При учёте конвекции электролита с вектором скорости \vec{u} уравнение переноса записывается в форме:

$$i = \chi F \left(\frac{z\vec{u} - \nabla p}{RT} - 1 \right) \frac{\partial \phi}{\partial n},$$

где p – давление в электролите. Конвективная составляющая существенна при высоких скоростях прокачки электролита через межэлектродный зазор.

Методика численного решения

Решение задачи выполняется методом конечных разностей [3] в два этапа.

Этап I. Решение уравнения Лапласа. На первом этапе область G покрывается прямоугольной сеткой, и уравнение Лапласа аппроксимируется разностной схемой без учёта анодной поляризации. Граничные условия записываются следующим образом [4]:

1. На изоляторе: $\phi_{OM} = \phi_K$.
2. На катоде: $\Delta\phi_K = \phi_{пр. сл} - \phi_K + u_K$.
3. На аноде: $\Delta\phi_A = u_A$,

где индексы «ОМ» и «пр. сл» обозначают значения потенциалов в узлах на оси межэлектродного зазора и в прикатодном слое соответственно.

Этап II. Учёт анодной поляризации. На втором этапе решается нелинейное граничное условие на аноде с использованием итерационного процесса. Уравнение Тафеля для анода имеет вид:

$$i = a \exp(b\phi_A) - 1,$$

где $b = zF/(RT)$, a – константа, зависящая от материала анода и состава электролита.

Объединяя условия миграционно-диффузионной кинетики и уравнение Тафеля, получаем итерационную формулу для потенциала на аноде:

$$\Delta\phi_1 = \phi_A - \phi_{пр. сл} + \Delta\phi_p - k[e^{b\phi_A} - C],$$

где $k = aD_1/(z_1 z_2 C)$, $C = C_1 z_1 + C_2 z_2$.

Итерационный процесс продолжается до выполнения условия сходимости:

$$|\varphi_1^{(l+1)} - \varphi_1^{(l)}| \leq \varepsilon,$$

где l – номер итерации, $\varepsilon = 10^{-5}$ – заданная точность.

Расчётная схема и алгоритм.

Входные данные. Для проведения расчётов задаются следующие параметры:

1. Геометрические размеры обрабатываемой детали.
2. Величина межэлектродного зазора.
3. Электрохимические константы (a , b , k , C).
4. Параметры электролита (электропроводность χ , коэффициент диффузии D_1).
5. Режимы обработки (напряжение, скорость подачи электролита).

Последовательность расчёта. Алгоритм расчёта включает следующие шаги:

1. Генерация расчётной сетки в области G .
2. Решение уравнения Лапласа на фиксированной сетке (этап I).
3. Расчёт распределения потенциала с учётом анодной поляризации (этап II).
4. Определение распределения плотности тока $i(x)$ вдоль анодной поверхности.
5. Расчёт профиля съёма материала $h(x)$ по закону Фарадея.
6. Оценка точности обработки и времени удаления дефектного слоя.

Критерии оценки качества. Основными критериями качества электрохимической обработки являются:

1. Равномерность распределения плотности тока по обрабатываемой поверхности.
2. Величина отклонения от плоскости после обработки.
3. Время полного удаления дефектного слоя в точке с минимальной плотностью тока.
4. Достигнутая шероховатость поверхности R_z .

Результаты моделирования

Распределение тока и профиль обработки. Численное решение задачи позволяет получить распределение плотности тока $i = f(x)$ (рис. 2) вдоль обрабатываемой поверхности детали (например размером $42 \times 10 \times 2$ мм).

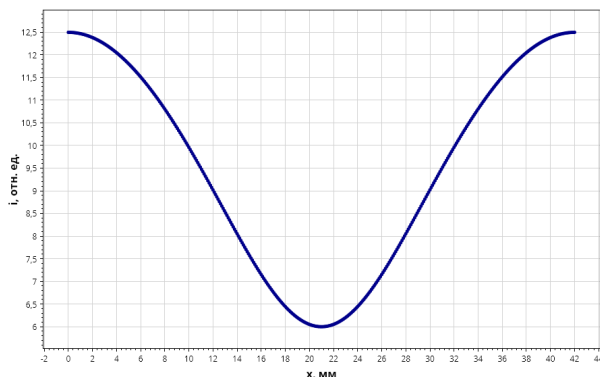


Рис. 2. Распределение плотности тока вдоль анодной поверхности – график, демонстрирующий неравномерность тока по длине обрабатываемой детали

Неравномерность распределения тока приводит к неравномерному съёму материала $h = f(x)$ (рис. 3), что определяет точность обработки.

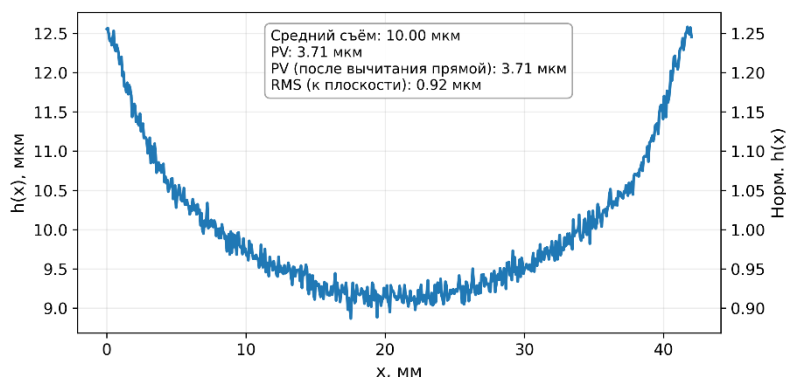


Рис. 3. Профиль съёма материала – график, показывающий глубину удаления материала в различных точках детали после электрохимической обработки, где PV – пик-впадина

Время удаления дефектного слоя в точке с минимальной плотностью тока i_{\min} определяет общую длительность технологического процесса. Отклонение от плоскости характеризует точность формообразования и зависит от геометрии детали, величины зазора и режимов обработки.

Пути повышения точности. Для повышения точности электрохимической обработки предлагается:

1. Оптимизация геометрии межэлектродного зазора для выравнивания распределения тока.
2. Использование профилированных электродов-инструментов.
3. Регулирование режимов обработки (напряжения, скорости подачи электролита).
4. Применение импульсных режимов питания.
5. Введение диэлектрических экранов в зонах повышенной плотности тока.

Заключение

Разработанная математическая модель электрохимической обработки материалов позволяет прогнозировать распределение потенциала и плотности тока в межэлектродном зазоре с учётом нелинейных электрохимических процессов на электродах. Двухэтапная методика численного решения обеспечивает эффективный расчёт параметров процесса и оценку точности обработки.

Модель может быть использована для проектирования технологических процессов электрохимического полирования деталей в машиностроении, оптимизации режимов обработки и разработки мероприятий по повышению точности формообразования. Дальнейшее развитие модели должно учитывать нестационарность процесса, трёхмерную геометрию детали и влияние газовыделения на межэлектродном зазоре.

Библиографический список

1. Мирзоев Р.А. Электрохимическая обработка металлов. Анодные процессы: учебное пособие. – Санкт-Петербург: ЛПИ, 2020. – 150 с.
2. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Изд. 3-е, испр. – М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2016. – 686 с. – (Нефтегазовый инжиниринг). – ISBN 978-5-4344-0386-3.
3. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
4. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – 5-е изд. – М.: Наука, 1977. – 735 с.

УДК 658.7; ГРНТИ 06.81.35

АЛГОРИТМ СИНХРОНИЗАЦИИ «ТОЧНО-В-СРОК» / «ТОЧНО-В-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ» ДЛЯ ПОСТАВКИ КРУПНЫХ УЗЛОВ НА СБОРОЧНУЮ ЛИНИЮ АВТОМОБИЛЬНОГО ЗАВОДА

А.А. Андреев, В.Ю. Тарасова

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, aaa060404@bk.ru*

Аннотация: В статье рассматривается современный подход к организации снабжения сборочного производства в автомобильной промышленности, а именно алгоритм синхронизации поставок по принципам «Just-in-Time» (JIT) и «Just-in-Sequence» (JIS). Проанализированы ключевые принципы, технологическая основа и практическая реализация данного алгоритма, направленного на минимизацию логистических издержек и оптимизацию производственных процессов. Особое внимание уделено интеграции информационных систем, а также вызовам, связанным с человеческим фактором и необходимостью высочайшей дисциплины всех участников цепи.

Ключевые слова: логистика, автомобилестроение, Just-in-Time, Just-in-Sequence, синхронизация, алгоритм, сборочная линия, поставки, узел.

Введение

Современное автомобилестроение характеризуется высокой сложностью продукта, массовой кастомизацией и жесткой конкуренцией. Массовая кастомизация — серийное производство изделий с индивидуальными вариантами исполнения — стала новым стандартом, делая неэффективными традиционные системы снабжения с крупными буферными запасами. Они связывают значительные оборотные средства и увеличивают складские издержки. Ответом на эти вызовы стала философия «Бережливого производства» (Lean Production), ключевыми элементами которой являются концепции поставок «Just-in-Time» (JIT, точно в срок) и их более совершенной формы — «Just-in-Sequence» (JIS, точно в последовательности).

Целью данной статьи является описание и анализ комплексного алгоритма синхронизации JIT/JIS — поставок крупных узлов (таких как сиденья, двигателя, панели кузова) на конечную сборочную линию (Final Assembly Line).

Теоретические основы JIT и JIS

Just-in-Time (JIT) – это стратегия управления, при которой компоненты поступают на производственную линию непосредственно в момент начала их использования, что позволяет практически полностью исключить складские запасы [1, с. 45]. Основная цель JIT – устранение всех видов потерь (яп. «муда»).

Just-in-Sequence (JIS) – это эволюционное развитие принципа JIT. Данная концепция подразумевает не только своевременную, но и строго последовательную поставку компонентов в соответствии с порядком движения автомобилей по сборочной линии [2, с. 118]. JIS особенно критичен для крупногабаритных и кастомизированных узлов, хранение которых у линии затруднено, а установка зависит от конкретной комплектации.

Алгоритм синхронизации JIT/JIS-поставок

Описываемый алгоритм является по своей сути JIS-алгоритмом, так как его ядро – обеспечение последовательности. Однако он невозможен без соблюдения базового принципа JIT – поставки точно к моменту использования. Таким образом, JIS включает в себя JIT как необходимое условие. Алгоритм функционирует как непрерывный цикл, связывающий сборочный цех, логистический центр и поставщиков.

Этап 1: Формирование производственной программы и последовательности

Входные данные: Централизованная система планирования предприятия (ERP-система) формирует ежедневный или сменный план сборки (Production Order).

Процесс: На основе плана сборки генерируется финальная последовательность автомобилей (Assembly Sequence). Она определяет точный порядок прохождения каждого VIN по конвейеру, учитывая технологические и коммерческие ограничения.

Результат: Утвержденная последовательность, которая определяет работу для всей цепочки поставок.

Этап 2: Трансляция последовательности поставщику

Входные данные: Утвержденная последовательность сборки.

Процесс: Через систему электронного обмена данными (EDI) последовательность в реальном времени передается на завод-поставщик. Передача происходит с определенным горизонтом планирования – временным окном, обычно составляющим 2-4 часа до момента сборки.

Результат: Поставщик получает точный «плейлист» того, в каком порядке должны быть отгружены узлы.

Этап 3: Комплектация и формирование отгрузочной партии у поставщика

Входные данные: Полученная от автозавода последовательность.

Процесс: На участке комплектации поставщика происходит подбор узлов в строгом соответствии с полученным порядком. Крупные узлы маркируются штрих-кодом или RFID-меткой. Собранная партия размещается в грузовики в обратной последовательности (принцип «последним зашел – первым вышел»).

Результат: Сформированный и промаркированный груз, готовый к отгрузке.

Этап 4: Транспортировка и мониторинг

Входные данные: Сформированный груз.

Процесс: Происходит перевозка от поставщика к сборочному цеху. Критически важным является отслеживание местоположения транспорта в режиме реального времени с помощью GPS/ГЛОНАСС.

Результат: Груз прибывает к воротам завода за несколько тактов до момента установки первого узла из партии.

Этап 5: Приемка и точечная поставка на линию

Входные данные: Прибывший груз.

Процесс: На приемном пункте может проводиться выборочный контроль маркировки. Далее, с помощью внутризаводского транспорта узлы доставляются непосредственно к месту монтажа.

Результат: Крупный улок поступает в зону монтажа точно в момент, когда автомобиль-заказчик подъезжает к данной позиции.

Этап 6: Подтверждение установки и обратная связь

Входные данные: Факт установки узла на автомобиль.

Процесс: Сканирование штрих-кода установленного узла и VIN автомобиля подтверждает корректность операции.

Результат: Замыкание информационного контура, предоставление данных для расчетов с поставщиком.

Технологическая основа и человеческий фактор

Успешная реализация описанного алгоритма невозможна без мощной информационно-технологической платформы: ERP, MES, WMS, TMS-системы и системы автоматической идентификации [3, с. 215].

Однако даже самая совершенная технология бесполезна без должного управления человеческим фактором. Высочайшая дисциплина требуется от всех звеньев цепи: от оператора на линии комплектации

у поставщика, который не имеет права перепутать последовательность, до водителя, который должен соблюдать график с точностью до минут, и логиста на заводе, координирующего разгрузку. Любая ошибка на любом этапе – неправильная маркировка, опоздание транспорта, сбой при сканировании – немедленно останавливает конвейер. Поэтому внедрение JIS/JIT всегда сопровождается глубокой перестройкой процессов и непрерывным обучением персонала.

Заключение

Представленный алгоритм синхронизации JIT/JIS-поставок представляет собой высокоинтегрированную логистическую систему, которая трансформирует цепочку поставок в единый, синхронизированный с тактом сборки поток. Его внедрение позволяет автомобильным заводам достичь значительных преимуществ: радикальное сокращение складских площадей и запасов, снижение логистических издержек, повышение гибкости производства и возможность массовой кастомизации продукции.

Основными вызовами при реализации являются высочайшая требовательность к надежности поставщиков и транспортной инфраструктуры, значительные первоначальные инвестиции в ИТ, а также критическая зависимость от человеческого фактора. Недостаточная квалификация персонала или низкая производственная дисциплина могут свести на нет все преимущества системы. Тем не менее, в условиях современного рынка эффективное использование алгоритмов JIT/JIS является не просто конкурентным преимуществом, а необходимостью для выживания и развития автомобильного производства.

Библиографический список

1. Liker, J. K. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer* / J. K. Liker. — McGraw-Hill, 2004.
2. Christopher, M. *Logistics & Supply Chain Management* / M. Christopher. — 5th ed. — Pearson UK, 2016.
3. Stadler, H. *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies* / H. Stadler, C. Kilger, H. Meyr // Eds. — 5th ed. — Springer, 2015.

УДК 691.328; ГРНТИ 67.09.33

РЕГРЕССИОННЫЕ МЕТОДЫ И ИХ ГИБРИДНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

А.А. Заборова, М.О. Баканов

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет

Москва, anastasiaborova1@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается разработанный авторами алгоритмический подход к прогнозированию эксплуатационных свойств бетона на основе моделей машинного обучения. Отмечено, что применение методов машинного обучения (ML) сокращает время подбора смесей, уменьшает затраты на разработку, снижает содержание цемента, а также сокращает выбросы углекислого газа на 50 млн тонн ежегодно.

Ключевые слова: машинное обучение, линейная модель, гибридное моделирование.

REGRESSION METHODS AND THEIR HYBRID ARCHITECTURE FOR PREDICTIVE MODELLING OF CONCRETE STRENGTH

A.A. Zaborova, M.O. Bakanov

National Research University of Civil Engineering,

Moscow, anastasiaborova1@gmail.com

Abstract. The paper discusses the authors' algorithmic approach to predicting concrete performance based on machine learning models. Therefore, the application of machine learning (ML) methods reduces mixing time, reduces rework costs, reduces cement content and reduces carbon emissions by 50 million tons annually.

Keywords: machine learning, linear modelling, hybrid modeling.

Введение

Проблема точного прогнозирования прочности бетона остается актуальной для создания долговечных и надежных конструкций. Традиционные методы, основанные на эмпирических зависимостях, характеризуются погрешностью порядка 20% и длительностью цикла оптимизации 30 дней соответственно [1]. Следствием данного подхода является перерасход цемента, производство которого генерирует до 7% глобальных выбросов CO₂ [2]. Ужесточение экологических требований при одновременном росте спроса на бетон диктует необходимость

разработки высокоточных и эффективных методов подбора составов. Целью исследования является разработка и верификация гибридного подхода на основе машинного обучения для предиктивного моделирования прочности бетона.

Современные подходы к прогнозированию свойств бетона охватывают широкий спектр алгоритмов машинного обучения, каждый из которых обладает характерными преимуществами и ограничениями [3, 4]. Глубокие нейронные сети (DNN), демонстрируя высочайшую точность ($R^2=0,96\div0,98$) за счет автоматического выявления сложных нелинейных зависимостей, остаются ресурсоёмкими «черными ящиками» с требованием к объему данных $n>500$. Ансамблевые методы, такие как Random Forest и градиентный бустинг (XGBoost, CatBoost), обеспечивают сбалансированное сочетание точности ($R^2=0,76\div0,95$) и интерпретируемости, эффективно обрабатывая категориальные признаки и зашумленные данные. Линейные модели, сохраняя ценность для экспресс-анализа благодаря скорости и прозрачности, фундаментально ограничены в моделировании сложных физико-химических взаимодействий многокомпонентных систем, что особенно критично при работе с современными составами, содержащими различные добавки [5].

Научная новизна и преимущество предлагаемого авторами подхода заключаются в разработанном гибридном стекинг-ансамбле, который преодолевает ключевые ограничения существующих методов за счет синергетической архитектуры, комбинирующей разнородные алгоритмы (Ridge, Random Forest, MLPRegressor) с мета-моделью на основе линейной регрессии. Данная композиция обеспечивает оптимальное соотношение точности ($R^2=0,913$) и обобщающей способности, демонстрируя устойчивость к переобучению, в отличие от отдельных ансамблевых методов. Подобные подходы доказали эффективность в смежных задачах материаловедения — от неразрушающего прогнозирования прочности и деформационных свойств [7] до анализа структурных модификаций полимерно-армированных бетонов [6] и выявления ключевых технологических факторов с использованием нейросетевых моделей [9].

Интеграция SHAP-анализа обеспечивает математически обоснованную интерпретируемость для сложных моделей, количественно оценивая вклад технологических параметров, где выявлено доминирующее влияние водоцементного отношения ($\beta = -8,2$ МПа) и возраста бетона ($\beta = +6,7$ МПа). Практическая значимость подтверждена расче-

тами: внедрение позволяет снизить расход цемента на 15% при сохранении проектной прочности (отклонение < 0,5 МПа) с экономическим эффектом 1200 руб/м³, формируя методологическую основу для перехода от эмпирического к научно обоснованному предиктивному моделированию в строительном материаловедении.

Методы

Исследование выполнено на общедоступном наборе данных «Concrete_Data.xls» (рис. 1). С целью повышения информативности исходных признаков сгенерированы производные параметры, отражающие физико-химические процессы гидратации и структурообразования: водоцементное отношение, суммарное вяжущее, логарифм содержания суперпластификатора, расчётная пористость. Обработка выбросов проводилась робастными методами (Interquartile Range), а для кодирования категориального признака «возраст» применен One-Hot Encoding.

	цемент	доменный шлак	зола-уноса	вода	суперпластификатор	крупный заполнитель	мелкий заполнитель	возраст	прочность бетона при сжатии
0	540.0	0.0	0.0	162.0	2.5	1040.0	676.0	28	79.986111
1	540.0	0.0	0.0	162.0	2.5	1055.0	676.0	28	61.887366
2	332.5	142.5	0.0	228.0	0.0	932.0	594.0	270	40.269535
3	332.5	142.5	0.0	228.0	0.0	932.0	594.0	365	41.052780
4	198.6	132.4	0.0	192.0	0.0	978.4	825.5	360	44.296075
...
1025	276.4	116.0	90.3	179.6	8.9	870.1	768.3	28	44.284354
1026	322.2	0.0	113.6	196.0	10.4	817.9	813.4	28	31.178794
1027	148.5	139.4	108.6	192.7	6.1	892.4	780.0	28	23.896601
1028	185.1	186.7	0.0	175.6	11.3	989.6	788.9	28	32.768036
1029	260.9	100.5	78.3	200.6	8.6	864.5	761.5	28	32.401235

1030 rows x 10 columns

Рис. 1. Датасет Concrete_Data.xls

Для сравнительного анализа использованы модели Ridge, Lasso, Linear Regression и Random Forest. Масштабирование признаков и их отбор с помощью метода SelectKBest (f_regression) позволили идентифицировать 14 наиболее значимых переменных (рис. 2).

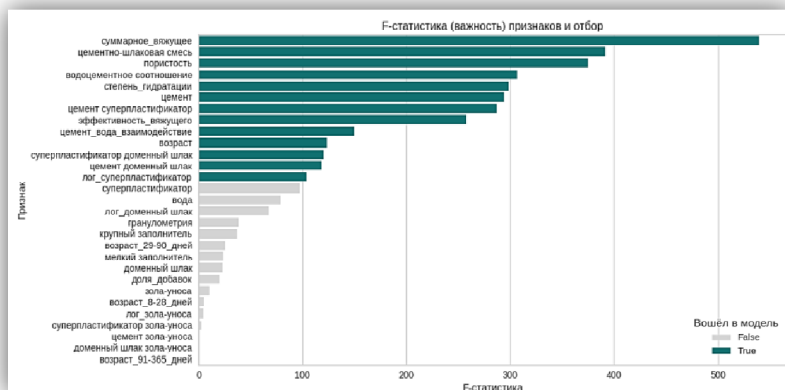


Рис. 2. f-статистика признаков

Научная новизна работы заключается в разработке гибридной стекинг-архитектуры, интегрирующей три разнородных базовых алгоритма: Ridge, Random Forest и MLPRegressor. Мета-моделью выступила линейная регрессия, агрегирующая предсказания базовых моделей и исходные признаки. Обеспечение интерпретируемости результатов было достигнуто за счет применения SHAP-анализа. Дополнительно создан интерактивный инструмент, позволяющий в режиме реального времени оценивать влияние технологических параметров на прочность.

Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ показал (рис. 3), что ансамблевый метод Random Forest обеспечивает максимальную точность на тестовой выборке ($R^2 = 0,985$, MAE = 1,12 МПа, RMSE = 1,84 МПа), существенно превосходя линейные модели ($R^2 \sim 0,75$). Вместе с тем кросс-валидация выявила признаки переобучения ($\Delta R^2 = 0,092$).

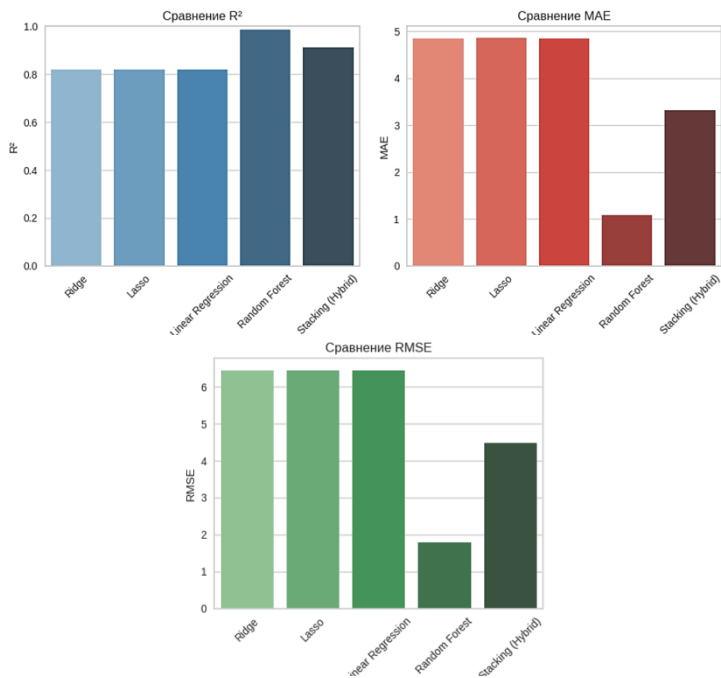


Рис. 3. Метрики для сравнения моделей

Разработанная гибридная стекинг-модель (рис. 4) продемонстрировала сбалансированное сочетание точности и обобщающей способности: $R^2 = 0,913$, MAE = 3,32 МПа, RMSE = 4,48МПа.

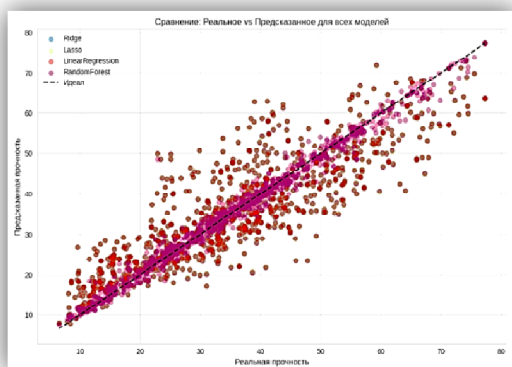


Рис. 4. Визуализация «реальное vs предсказанное»

Данный факт свидетельствует о ее способности эффективно учитывать как линейные зависимости, так и сложные нелинейные взаимодействия компонентов смеси.

SHAP-анализ подтвердил ключевое влияние водоцементного отношения ($\beta = -8,2$ МПа) и возраста бетона ($\beta = +6,7$ МПа) на прочность, что согласовано с теоретическими представлениями. Остаточный анализ выявил гетероскедастичность, однако узкие доверительные интервалы прогнозов (средняя ширина 0,40 МПа) подтверждают высокую надёжность модели.

Выводы

Предложенный гибридный подход позволяет перейти от эмпирического к научно обоснованному предиктивному моделированию состава бетона. Практическая значимость подтверждена расчётами: внедрение модели обеспечивает снижение расхода цемента на 15% при сохранении проектной прочности (отклонение $< 0,5$ МПа), что соответствует требованиям ГОСТ 31914-2023 и дает экономический эффект порядка 1200 рублей на 1 м³ бетона.

Перспективы работы связаны с дальнейшей оптимизацией ансамбля — внедрением бустинговых алгоритмов, регуляризации и механизмов онлайн-обучения для адаптации к дрейфу данных. Предложенный метод формирует основу для создания цифровых двойников технологических процессов в строительном материаловедении.

Библиографический список

1. Яковлев, А. А. *Экспериментальный метод определения составов бетона и раствора* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/19161540/> – Дата обращения: 18.02.2025. With concrete, less is more [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rmi.org/with-concrete-less-is-more/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 12.09.2025).
2. McKinsey & Company. *Decarbonizing cement and concrete value chains: Takeaways from Davos* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/industries/engineering-construction-and-building-materials/our-insights/decarbonizing-cement-and-concrete-value-chains-takeaways-from-davos> (дата обращения: 18.02.2025).
3. Bello S. A. A deep learning approach to concrete water-cement ratio prediction / S. A. Bello, [и др.] // *Results in Materials*. – 2022. – Т. 15. – PP. 100300. — URL: https://www.researchgate.net/publication/359998541_A_Deep_Learning_Approach_to_Concrete_Water-Cement_Ratio_Prediction (дата обращения: 10.02.2025).

4. Xu Y. Composition prediction of pore solution in hardened concrete materials based on machine learning / Y. Xu, [и др.] // *Developments in the Built Environment*. – 2023. – Т. 16. – PP. 100285. — URL: https://www.researchgate.net/publication/376096492_Composition_prediction_of_pore_solution_in_hardened_concrete_materials_based_on_machine_learning (дата обращения: 10.02.2025).;

5. Mahjoubi S. Deep learning from physicochemical information of concrete with an artificial language for property prediction and reaction discovery / S. Mahjoubi, [и др.] // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2023. – Т. 190. – PP. 106870. — URL: https://www.researchgate.net/publication/363000790_Deep_learning_from_physicochemical_information_of_concrete_with_an_artificial_language_for_property_prediction_and_reaction_discovery (дата обращения: 10.02.2025).

6. Lyngdoh G. A. Prediction of concrete strengths enabled by missing data imputation and interpretable machine learning / G. A. Lyngdoh, [и др.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2022. – Т. 128. – PP. 104414. — URL: https://www.researchgate.net/publication/358027883_Prediction_of_concrete_strengths_enabled_by_missing_data_imputation_and_interpretable_machine_learning (дата обращения: 10.02.2025).

7. Salazar B. Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete / B. Salazar, [и др.] // *Materials & Design*. – 2020. – V. 196. – PP. 109184. — URL: https://www.researchgate.net/publication/346007976_Polymer_lattice-reinforcement_for_enhancing_ductility_of_concrete (дата обращения: 10.02.2025).

8. El-Mir A. Machine learning prediction of concrete compressive strength using rebound hammer test / A. El-Mir, [и др.] // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – V. 64. – PP. 105538. — URL: https://www.researchgate.net/publication/365356868_Machine_learning_prediction_of_concrete_compressive_strength_using_rebound_hammer_test (дата обращения: 10.02.2025).;

9. Yildirim A. One-hour-ahead solar radiation forecasting by MLP, LSTM, and ANFIS approaches / A. Yildirim, M. Bilgili, A. Ozbek // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – 2023. – V. 135. – № 1. – PP. 10. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-022-00946-x> (дата обращения: 10.02.2025).

УДК 004.8; ГРНТИ 20.15.05

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

А.И. Баранчиков, Е.Б. Федосова

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, lena.fedosova2019@mail.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрена проблема тестирования разработанных алгоритмов интеллектуального анализа данных. В связи с нехваткой в открытом доступе тестовых реляционных баз данных встает задача разработки учебных баз, содержащих большое количество данных, приближенных к реальным предметным областям. Предложен подход к проектированию тестовых реляционных баз данных.

Ключевые слова: реляционные базы данных, интеллектуальный анализ данных, Data mining.

DEVELOPING TEST RELATIONAL DATABASES METHOD FOR TESTING DATA MINING ALGORITHMS

A.I. Baranchikov, E.B. Fedosova

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, lena.fedosova2019@mail.ru*

Abstract. This paper considers testing algorithms for data mining problem. The lack of publicly available relational test databases raises the need to develop training databases containing large amounts of data, closely related to real-world subject areas. An approach to designing relational test databases is proposed.

Keywords: relational databases, data mining.

Введение

В настоящий момент одним из самых распространенных способов организации данных являются базы данных (БД), работающие на основе реляционной модели данных[1. 2]. Многие производственные предприятия в своей работе используют такие СУБД, как MS SQL Server, Postgres, MySQL, Oracle и др. Зачастую в различных подразделениях предприятия используются отдельные узконаправленные БД, связанные со спецификой работы конкретного подразделения. Подобные БД, как правило, не связаны между собой структурно, но часто дублируют общую информацию, что может приводить к неэффектив-

ности использования памяти, несвоевременному обновлению информации и к другим нежелательным последствиям.

В последние десятилетия на фоне тенденции к укрупнению информационных пространств предприятий все чаще возникает необходимость спроектировать единую для всего предприятия БД. Для решения этой задачи можно использовать два подхода. Первый из них заключается в разработке новой БД «с нуля», с первых этапов проектирования БД. При таком подходе не учитывается семантика проверенных длительной эксплуатацией БД, из-за чего повышаются как временные, так и материальные затраты, а также в силу большого объема данных разработчик может допустить ошибки при проектировании БД.

Для устранения подобных ошибок можно воспользоваться подходом, при котором разработка новой, единой для всего предприятия БД осуществляется на основании объединения уже имеющихся в эксплуатации БД. В работах [1, 2, 3] исследуется возможность реализации такого подхода с помощью применения методов интеллектуального анализа данных (Data mining) и последующего участия эксперта (рисунок 1). Такой подход обладает рядом преимуществ: сохранение проверенной длительным использованием семантики имеющихся БД, уменьшение материальных и временных затрат, повышение достоверности данных и т.д.



Рис. 1. Комбинированный подход к анализу реляционных БД

Однако любые разработанные алгоритмы нуждаются в апробации для проверки качества их работы, выявления и устранения ошибок,

оценки эффективности алгоритма и т.д. Используемые на реальные предприятиях БД не всегда можно получить для тестирования алгоритмов по ряду причин: хранение конфиденциальной информации, секретность данных и т.д. В связи с этим возникает необходимость в разработке тестовых (учебных) баз данных, позволяющих тестировать разработанные алгоритмы в условиях, приближенных к реальным.

Проектирование тестовых реляционных БД

Проектирование БД в общем случае можно разделить на следующие этапы.

1. Анализ предметной области и формирование требований к разрабатываемой БД.

2. Концептуальное проектирование. Разработка концептуальной модели, отражающей сущности предметной области и их взаимосвязи (без привязки к СУБД).

3. Логическое проектирование.

Преобразование концептуальной модели в логическую структуру таблиц в соответствии с реляционной моделью данных (создание схем отношений, нормализация отношений).

4. Физическое проектирование

Выбор СУБД и разработка физической структуры БД (создание таблиц, индексов и прочих объектов с учетом синтаксиса выбранной СУБД).

В случае разработки тестовых реляционных БД этапы проектирования можно сократить, поскольку шаги, связанные с формированием требований и анализом предметной области, в случае тестовой БД не столь важны. Реальные БД могут насчитывать десятки таблиц, однако для прогонки алгоритмов интеллектуального анализа данных важна не сложность схемы данных, а данные, содержащиеся в реляционных таблицах, и их количество. Схема данных должна быть только приближенной к реальной предметной области. А так как реальная предметная область в случае разработки тестовой БД отсутствует, то формирование подробных требований невозможно. В данном случае достаточно условное приближение к реальным предметным областям на основе информации, находящейся в открытом доступе.

Главной целью разработки тестовой БД является создание набора данных, организованного на базе реляционной модели. Следовательно, основное внимание следует обратить на заполнение отношений.

Для заполнения отношений данными рекомендуется использовать информацию, приближенную к реальным. Кроме того, область применения тестовых реляционных БД накладывает ограничение на минимальный объем данных в таблицах: для эффективной апробации разработанных алгоритмов интеллектуального анализа данных необходимо большое количество строк в каждом отношении, насчитывающее десятки тысяч записей (особенно в дочерних таблицах). Для получения данных для таблиц можно воспользоваться общедоступными ресурсами, а также любыми популярными нейросетями, позволяющими сгенерировать большое количество строк для реляционных таблиц.

Пример разработки тестовой реляционной БД

В качестве примера разработки тестовой БД рассмотрим создание БД для предметной области «Метрологическая служба предприятия». Предположим, что на нефтеперерабатывающем предприятии существует метрологическая лаборатория, занимающаяся поверкой измерительных средств. Поверка осуществляется как на предприятии, так и во внешних организациях в зависимости от сложности процесса поверки и типа измерительного устройства. Поверки проводятся в соответствии с рекомендуемыми периодами.

Поверки производят сотрудники метрологической службы, которые отслеживают сроки поверки, и по необходимости проводят поверку на месте или отправляют измерительное средство в поверочные организации. Средства измерения (СИ) расположены на перерабатывающих установках, одно СИ может быть установлено на одной установке, на одной установке расположено множество СИ. У каждой установки и у каждого СИ есть свой уникальный идентификационный номер.

На основании вышеприведенного описания можно выделить следующие сущности.

- 1) Средство измерения (информация об измерительных средствах).
- 2) Тип проверки СИ (внеочередная поверка, инспекционная поверка, калибровка, первичная поверка, периодическая поверка, экспертная поверка).
- 3) График заводских поверок (информация о датах поверок СИ и сотрудниках, выполнивших поверку).
- 4) График внешних поверок (информация о датах поверок, осуществленных во внешних организациях).

5) Перерабатывающая установка (сведения о перерабатывающей установке).

6) Сотрудник (информация о сотрудниках метрологической службы).

7) Поверочная организация (информация о организации, проводившей поверку).

Отношения связаны следующими связями: (Средство измерения 1:М График внешних поверок), (Средство измерения 1:М График заводских поверок), (Тип поверки 1:М Средство измерения), (Перерабатывающая установка 1:М Средство измерения), (Поверочная организация 1:М График внешних поверок), (Сотрудник 1:М График заводских поверок).

Для создания тестовой БД была выбрана СУБД Postgres. В соответствии с вышеописанной моделью была разработан SQL-скрипт создания БД. В результате выполнения разработанного скрипта была создана тестовая БД, схема данных которой приведена на рисунке 2.

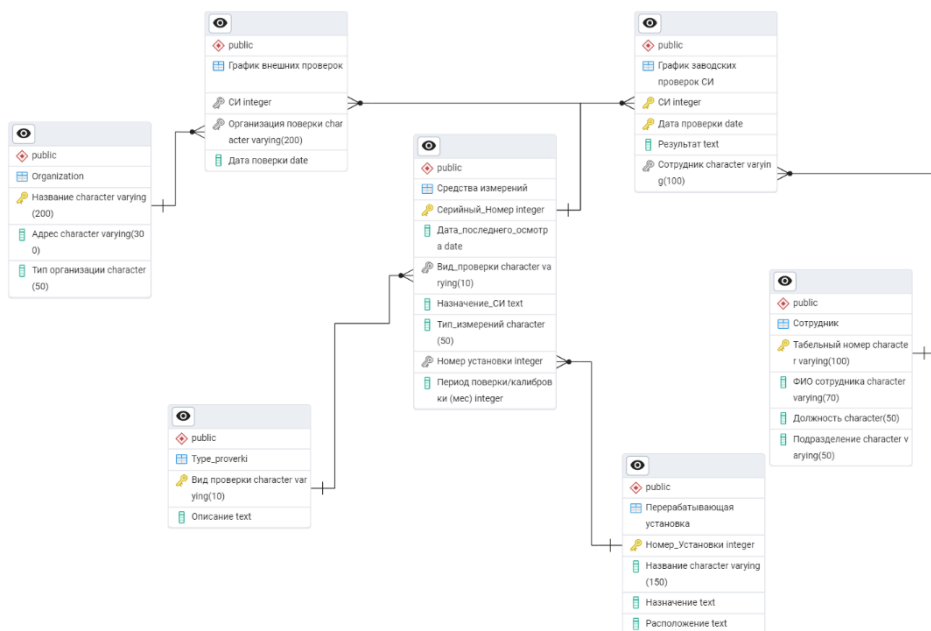


Рис. 2. Схема данных разработанной тестовой БД

Каждая из представленных таблиц заполнена данными (от 3000 до 12000 записей). Заполнение таблиц данными проводилась с помощью команды COPY ... FROM (команда перенесения данных из табличных файлов в СУБД Postgres).

Для апробации алгоритмов, посвященных объединению нескольких реляционных БД в одну [3-5] необходим набор из нескольких БД. Представленная БД является одной из разрабатываемого набора тестовых реляционных БД, который необходим для тестирования алгоритмов интеллектуального анализа данных, направленных на объединение реляционных БД.

Выводы

В работе рассмотрен вопрос разработки тестовых реляционных баз данных, необходимых для апробации разрабатываемых алгоритмов интеллектуального анализа данных. Приведен пример разработки реляционной БД для предметной области «Метрологическая служба предприятия».

Библиографический список

1. Мейер Д. Теория реляционных баз данных. Пер. с англ. – Москва: Мир. - 1987. - 608 с.
2. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных, 8-е издание.: пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1328 с.
3. Баранчиков А.И., Федосова Е.Б. Применение методов Data Mining для анализа и выявления закономерностей в реляционных базах данных // Радиотехнические и телекоммуникационные сети, №2, С. 40-45. 2023.
4. Баранчиков А.И., Федосова Е.Б. Реинжиниринг реляционных баз данных на основе кластеризации атрибутов и технологий интеллектуального анализа данных // Вестник РГРТУ, №86, С. 156-161. 2023.
5. Баранчиков А.И., Федосова Е.Б. Нахождение функциональных зависимостей в реляционных базах данных с помощью методов интеллектуального анализа данных // Современные технологии в науке и образовании: сборник трудов VIII международного научно-технического форума. Т.4. – Рязань: РГРТУ, 2025 - С. 134-136.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

Пороговая сегментация малоконтрастных изображений. Генетический алгоритм**Я.А. Буянкина, П.В. Бабаян***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, yana.buyanckina@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается актуальная проблема сегментации изображений, полученных в условиях наблюдения, характеризующихся мультимодальностью гистограммы объекта. Для решения этой проблемы используется генетический алгоритм. В рамках исследования представлена реализация алгоритма, а также проведены эксперименты с различными изображениями, что позволяет оценить его эффективность. Результаты экспериментов включают в себя расчёт характеристик, которые демонстрируют улучшение качества сегментации по сравнению с традиционными методами такими как метод Отцу, и энтропийные методы Капура и Тсаллиса.

Ключевые слова: пороговая сегментация изображения, генетический алгоритм, функция распределения яркости, ROC-характеристика.

THRESHOLD SEGMENTATION OF LOW-CONTRAST IMAGES. GENETIC ALGORITHM**Y.A. Buyankina, P.V. Babayan***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, yana.buyanckina@yandex.ru*

Abstract. The paper considers the current problem of segmentation of images obtained under observation conditions characterized by multimodality of the object histogram. To solve this problem, a genetic algorithm is used. The study presents the implementation of the algorithm, as well as experiments with various images, which allows us to evaluate its effectiveness. The results of the experiments include the calculation of characteristics that demonstrate an improvement in the quality of segmentation compared to traditional methods such as the Otsu method and the entropy methods of Kapur and Tsallis.

Keywords: threshold image segmentation, genetic algorithm, brightness distribution function, ROC characteristic.

Введение

В области обработки изображений сегментация выделяет интересные объекты из цифровых кадров. Простой подход — пороговая сегментация: гистограмма яркости делится на части с глобальным порогом, после чего пиксели классифицируются как объект или фон. Эффективность зависит от разделимости гистограммы.

Проблема пороговой сегментации в современной обработке изображений заключается в том, что этот метод может быть недостаточно эффективным при работе с изображениями, имеющими сложные или неоднородные гистограммы яркости.

Для улучшения результатов сегментации в таких случаях часто требуется применение более сложных и вычислительно затратных методов, таких как адаптивная пороговая обработка или использование алгоритмов машинного обучения.

Работа фокусируется на сегментации изображений с тёмным фоном и контрастным объектом (несколько зон яркости), таких как ночные снимки летательных аппаратов, 3D-сканы или ИК-изображения с бликами. При наблюдении таких объектов в неравномерном или малом освещении их изображения содержат зоны разных уровней яркости, зеркальные или блестящие поверхности, блики. Применение традиционных методов сегментации к таким изображениям обычно не обеспечивает приемлемого качества. В настоящей работе для сегментации изображений, относящихся к рассматриваемому классу, предлагается использовать генетический алгоритм.

Методы пороговой сегментации: недостатки и их решение с помощью генетического алгоритма

Метод Отцу — это алгоритм вычисления порога t , минимизирующий среднюю ошибку сегментации, т.е. среднюю ошибку от принятия решения о принадлежности пикселей изображения объекту или фону [1].

Метод Капура относится к энтропийным методам бинаризации изображений [2]. Энтропия Капура — это метрика для многоуровневой сегментации изображений, которая разделяет изображение на разные классы, а величина энтропии определяет, является ли класс однородным.

Недавние разработки статистической механики, основанные на концепции неэкстенсивной энтропии, также называемой энтропией

Тсаллиса, усилили интерес к исследованию возможного распространения энтропии Шеннона на алгоритмы обработки изображений [3]. Энтропия Тсаллиса основана на сегментации изображений с помощью принципа максимальной энтропии. Метод был создан для обработки медицинских изображений (первоначально – маммография) [4].

Каждый из этих методов имеет свои особенности и применяется в зависимости от задачи. Однако все они обладают определёнными недостатками и ограничениями, которые необходимо учитывать при выборе метода для конкретной задачи обработки изображений.

1. Чувствительность к равномерности распределения интенсивности пикселей и к шуму.
2. Возможность неправильного выбора порога при наличии нескольких пиков в гистограмме.
3. Методы могут быть неэффективны для изображений с низкой контрастностью, сложными текстурами, неоднородным фоном, перекрывающимися объектами и т.д.

Данные методы пороговой сегментации демонстрируют недостаточную эффективность при обработке изображений с тёмным фоном и контрастными объектами интереса, исходя из вышеописанных пунктов. Для решения подобных задач требуется применение альтернативных методов сегментации, более точно учитывающих специфику изображений с указанными характеристиками. В данной работе был применён генетический алгоритм в силу его особенностей:

1. Гибкость (настройка параметров в зависимости от условий).
2. Способность находить глобальные оптимумы.
3. Устойчивость к шуму в изображениях.
4. Возможность многоклассовой сегментации.

Генетический алгоритм (GA) - это естественная метаэвристика, которая имитирует гены. Генетический алгоритм используется для поиска оптимальных решений, когда не существует детерминированного метода или если детерминированный метод сложен в вычислительном отношении. GA - это алгоритм, основанный на популяции (т.е. он генерирует несколько решений на каждой итерации). Количество решений на итерации называется размером популяции. Каждое решение представлено в виде хромосомы, и каждая хромосома состоит из генов [5].

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились с целью оценивания качества выделения объекта интереса на изображениях. Использовался набор изображений различного характера и формата. Пример одного из изображений представлен на рис. 1.

Для определения правильности выделения был применён метод ROC-графика (Receiver Operating Characteristic - Рабочая Характеристика Приёмника). Методология ROC основана на теории статистических решений и была разработана в контексте электронного обнаружения сигналов и проблем с радарными в начале 1950-х годов. Кривые истинного и ложного выделения могут быть использованы для выбора рабочей точки, которая позволила бы обеспечить оптимальный баланс между положительным и ложноположительным результатами [6]. ROC-кривая строится по всем порогам (от 0 до 255), а затем отмечаются маркерами найденные пороги по разным методам.

Результаты были сопоставлены двумя методами: визуальным и количественным. Для каждого сюжета (рис. 1) вручную создавались маски объектов, определялся порог сегментации по четырём методам (рис. 2-5), после чего определялись частоты правильного (ТР – true Positive) и ложного выделения (ФР – false Positive). График, отображающий зависимость ТР от ФР (рис. 6), помогает оценить качество выделения объектов: чем выше находится точка – тем выше значение правильного выделения, чем левее – тем ниже значение ложного выделения.

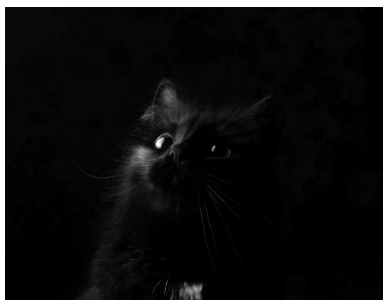


Рис. 1. Оригинальное изображение (контрастность -300, яркость +100)

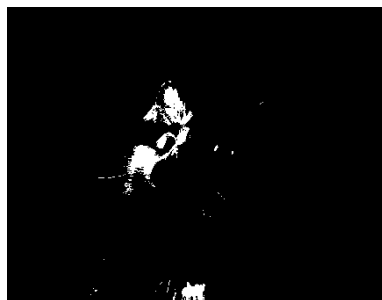


Рис. 2. Сегментированное изображение метод Отцу (порог 8)

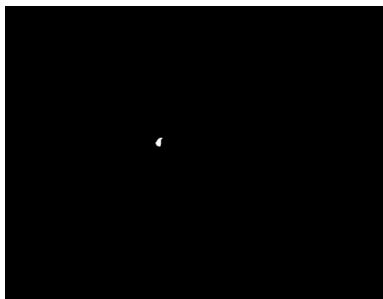


Рис. 3. Сегментированное изображение метод Капура (порог 44)

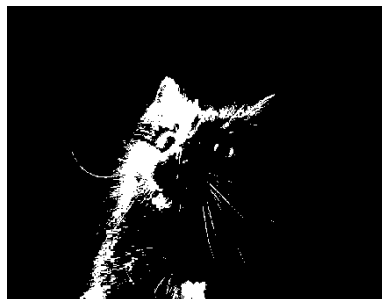


Рис. 4. Сегментированное изображение метод Тсаллиса (порог 3)



Рис. 5. Сегментированное изображение генетический алгоритм (пороги 5 23 55 112)

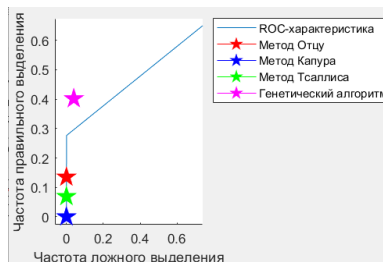


Рис. 6. ROC-характеристика с отмеченными маркерами разных методов.

Результаты выборки были усреднены и показаны на диаграмме на рис. 7. Можно заметить, что самые высокие показания правильного выделения наблюдаются у генетического алгоритма.

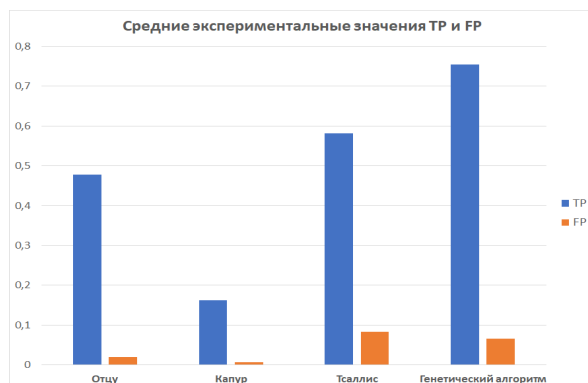


Рис. 7. Диаграмма усреднённых экспериментальных значений TP и FP

Так как изображения включают шум и иные области с тем же уровнем яркости, что и основной объект интереса, то и показания FP будут увеличены. Для точности экспериментов необходима дополнительная обработка результатов сегментации на наличие включений и областей шума.

Оценка эффективности алгоритма требует комплексного подхода, учитывающего не только истинно положительные и ложноположительные результаты. Важно понимать, что простое сравнение по значениям может привести к некорректным выводам о качестве сегментации изображений. Поскольку невозможно произвольно регулировать соотношение TP и FP, то необходимо использовать метрики, учитывающие ещё показатели FN (False Negatives — количество неправильно классифицированных отрицательных объектов) и TN (True Negatives — количество правильно классифицированных отрицательных объектов).

Assurasy (точность, правильность) показывает долю правильных классификаций от общего числа случаев. Precision (точность) показывает, какая доля положительных предсказаний алгоритма действительно верна. Recall (полнота) показывает, какая доля действительно положительных объектов была корректно идентифицирована алгоритмом. F1-метрика — гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой (recall). Это сбалансированная метрика для оценки моделей классификации, особенно в условиях несбалансированных данных, где один класс встречается гораздо чаще, чем другой.

Результаты данной выборки были усреднены (табл. 1) и показаны на диаграмме на рис. 8. Можно заметить, что самые высокие показания наблюдаются у генетического алгоритма.

Таблица 1. Усреднённые значения метрик

Метрика	Метод Отцу	Метод Капура	Метод Тсал- лиса	Генетический алгоритм
Accuracy	0,8317714	0,8287143	0,7987429	0,9276429
Precision	0,7397571	0,7668857	0,5840429	0,6623857
Recall	0,4778857	0,1624857	0,5810429	0,6889286
F1-score	0,4299633	0,2087228	0,4116805	0,5960298

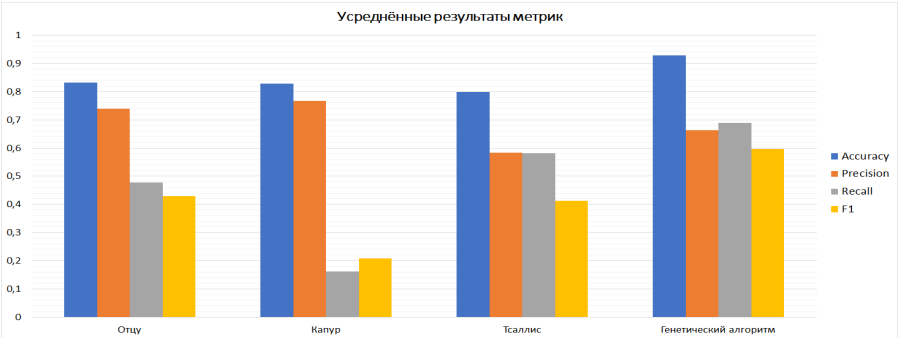


Рис. 8. Диаграмма усреднённых экспериментальных значений метрик

Эксперименты проводились на ПЭВМ с операционной системой Windows 10, на базе процессора AMD Ryzen 5 4600H с оперативной памятью объемом 8 Гб. В качестве вычислительной среды выполнения использовался пакет прикладных программ Matlab версии R2021b.

Также нельзя не сказать о вычислительной сложности алгоритмов — ключевом аспекте при проектировании и создании программных алгоритмов, особенно при работе с большим объемом данных или выполнении вычислительно сложных операций. В таблице 2 представлены усреднённые затраты времени

Таблица 2. Анализ вычислительной сложности алгоритмов

Размер изображения (px)	Затраченное время на обработку изображений (с.)			
	Метод Отцу	Метод Капур	Метод Тсаллиса	Генетический алгоритм
250×250	0,018451	0,022705	3,870947	0,069
640×640	0,019144	0,026152	31,71997	0,081
1024×1024	0,02907	0,034318	78,20478	0,097

Таким образом можно сделать вывод, что генетический алгоритм пороговой сегментации изображений можно применять в обработке видеопоследовательностей в режиме реального времени, если камера будет снимать не более 10-12 кадров в секунду (зависит от разрешения камеры).

Выводы

Применение сегментации с использованием генетического алгоритма (GA) продемонстрировало значительное улучшение качества выделения контрастных объектов интереса на рассматриваемой выборке изображений. Генетический алгоритм позволяет эффективно идентифицировать и разделять различные компоненты изображения, включая шум, объекты интереса и яркие блики. Это обеспечивает возможность целенаправленного выбора нужной части изображения, содержащей требуемый объект интереса.

Библиографический список

1. Nobuyuki Otsu A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms — IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, vol.1(9), pp.62-66, DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4310076/authors#authors>
2. Amelia Carolina Sparavigna. On the Role of Tsallis Entropy in Image Processing — International Scientific Research Journal, 2015, vol.1(6), pp.16-24, DOI: 10.18483/IRJSci.79, Available at: <https://hal.science/hal-01352704v1>
3. P.D. Sathya, R. Kayalvizhi PSO-Based Tsallis Thresholding Selection Procedure for Image Segmentation — International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), vol. 5— No.4, August 2010, pp. 39-46, DOI: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume5/number4/903-1279/>
4. Prem Kumar Kalra, Nirmal Kumar An automatic method to enhance microcalcifications using normalized Tsallis entropy — Signal Processing, vol.90, March 2010, pp. 952-958, DOI: 10.1016/j.sigpro.2009.09.012, Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165168409004034?via%3Dihub>
5. Omar Banimelhem, Yahya Ahmed Yahya Multi-Thresholding Image Segmentation Using Genetic Algorithm — Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV), 2011, Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Multi-Thresholding-Image-Segmentation-Using-Genetic-Banimelhem-Yahya/589b57ba67ae9b87c256ec45ad36b36d89f110d5>
6. Zweig M. H., Campbell G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine — Clinical chemistry. 1993, vol. 39, No. 4, pp. 561-577, DOI: 10.1093/clinchem/39.4.561 Available at: <https://doi.org/10.1093/clinchem/39.4.561>

УДК 517.926; ГРНТИ 517.926

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОСТИ
ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ
КАК ПРЕЛЮДИЯ К РЕШЕНИЮ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ
С МУЛЬТИПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ
НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МАКСИМУМА Л.С. ПОНТРЯГИНА**

Т.Л. Львова, В.В. Миронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, lvovatl@yandex.ru, mironov1vv@mail.ru*

Аннотация. В данной работе для системы линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами получены необходимые и достаточные условия расположения корней характеристического уравнения в левой полуплоскости. С помощью принципа максимума для одной нелинейной системы уравнений получены достаточные условия.

Ключевые слова: устойчивость линейных систем дифференциальных уравнений, матрица монодромии, мультипликаторы, принцип максимума Понтрягина.

**SOME ASPECTS OF THE STABILITY OF LINEAR
DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH PERIODIC
COEFFICIENTS AS A PRELUDE TO THE SOLUTION
OF THE GENERAL PROBLEM WITH MULTIPERIODIC
COEFFICIENTS BASED ON THE MAXIMUM
PRINCIPLE OF L.S. PONTRYAGIN**

T.L. Lvova, V.V. Mironov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, lvovatl@yandex.ru, mironov1vv@mail.ru*

Abstract. In this work, for a system of linear differential equations with periodic coefficients, necessary and sufficient conditions are obtained for the roots of the characteristic equation to be located in the left half-plane. Using the maximum principle, sufficient conditions are obtained for one nonlinear system of equations.

Keywords: stability of linear systems of differential equations, monodromy matrix, multipliers, the Pontryagin maximum principle.

Введение

Исследование механических, электрических и других систем на устойчивость является одной из тех задач, правильное решение которых играет основную роль при проектировании этих систем. Математической моделью каждой из упомянутых систем является некоторое дифференциальное уравнение или система дифференциальных уравнений совместно с начальными и граничными условиями.

Свойство устойчивости решения дифференциального уравнения или системы уравнений это одно из условий корректности этого решения. Под устойчивым понимается такое решение, которое изменяется сколь угодно мало при достаточно малых изменениях начальных условий.

В теории устойчивости разрабатываются критерии, с помощью которых можно судить, является ли данное решение устойчивым. Создателем теории устойчивости движения как математической науки является А.М. Ляпунов. Он сформулировал наиболее общее определение устойчивости и установил достаточные условия устойчивости и неустойчивости невозмущенного движения, описываемого системой обыкновенных дифференциальных уравнений [1].

Проблемы оценки динамической устойчивости упругих конструкций, анализа периодических процессов в системах автоматики, исследования поведения ускорителей элементарных частиц, моделирования нейросетей, коммуникационных технологий, управления механизмами связаны с системами линейных дифференциальных уравнений, коэффициенты которых периодически, либо почти периодически меняются [2]. Хотя реальные физические процессы зачастую лучше описывать нелинейными моделями, упрощённые линейные аппроксимации широко используются для исследования особенностей решений, включая устойчивость.

Линейная система дифференциальных уравнений

Для систем линейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x, \quad (1)$$

с непрерывной или кусочно-непрерывной на $(-\infty; +\infty)$ периодической матрицей $A(t)$:

$$A(t+T) = A(t), \quad (T > 0)$$

справедлива теорема Флоке.

Теорема Флоке. Для линейной системы (1) с T -периодической матрицей нормированная при $t=0$ фундаментальная матрица решений (матрицант) имеет вид

$$X(t) = \Phi(t)e^{\Lambda t},$$

где $\Phi(t)$ – класса C^1 (или кусочно-гладкая) T -периодическая неособенная матрица, причем $\Phi(0) = E$, и Λ – постоянная матрица.

Следовательно, структура решений системы (1) вполне определяется матрицей монодромии $X(T)$. Корни ρ_j характеристического уравнения $\det(X(T) - \rho E) = 0$, называются мультипликаторами.

Известно [3], что линейная однородная периодическая система устойчива тогда и только тогда, когда все ее мультипликаторы расположены внутри замкнутого единичного круга $|\rho| \leq 1$, причем мультипликаторам, лежащим на окружности $|\rho| = 1$, соответствуют простые элементарные делители. Для асимптотической устойчивости необходимо и достаточно, чтобы все мультипликаторы находились внутри единичного круга, $|\rho| < 1$.

Запишем характеристическое уравнение матрицы монодромии $X(T)$ в виде

$$\rho^n - \sigma_1 \rho^{n-1} + \dots + (-1)^n \sigma_n = 0, \quad (2)$$

где $\sigma_1 = \sum_{j=1}^n \rho_j = \text{Sp } X(t)$, $\sigma_n = \det X(t) = \exp \int_0^T \text{Sp } A(t) dt$.

Условия устойчивости тривиального решения системы (1) выразим через коэффициенты $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ уравнения (2). С помощью дробно-

линейного преобразования $\rho = \frac{1+\lambda}{1-\lambda}$ переведем круг единичного радиуса с центром в начале координат плоскости ρ ($\rho = \alpha + i\beta$) в левую полуплоскость комплексного переменного λ ($\lambda = \gamma + i\delta$). Уравнение (2) преобразуется при этом в следующее [4]

$$\sum_{i=0}^n b_i \lambda^i = 0, \quad (3)$$

где обозначено

$$b_i = \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \sigma_k \sum_{p=0}^i (-1)^{i-p} C_{n-k}^p C_k^{i-p} + (-1)^n C_n^i \sigma_n.$$

Применяя критерий Гурвица [3], получим необходимые и достаточные условия расположения корней уравнения (3) в левой полуплоскости λ ($\operatorname{Re} \lambda < 0$), выраженные через коэффициенты характеристического уравнения матрицы монодромии

$$\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \dots, \Delta_n > 0, \quad (4)$$

где Δ_r представляет собой алгебраическую сумму $r!$ слагаемых вида $\sigma_1^{\alpha_1} \sigma_2^{\alpha_2} \dots \sigma_n^{\alpha_n}$, α_i – целые неотрицательные числа, такие что

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = r, \quad r = 1, 2, \dots, n.$$

С геометрической точки зрения неравенствами (4) задается область устойчивости G_σ в n -мерном пространстве коэффициентов $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, уравнения границы которой имеет весьма громоздкий вид с возрастанием порядка системы n . Для получения упрощенных достаточных условий устойчивости или неустойчивости можно заменить интересующую нас область другой областью \tilde{G}_σ , вписанной в точную область G_σ для устойчивости или описанную для неустойчивости вокруг неё, уравнение границы которой имеет более простой вид. Например, впишем в G_σ выпуклую область \tilde{G}_σ , определенную системой линейных неравенств

$$\sum_{j=1}^n \ell_{ij} \sigma_j \geq L_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Для случая $n = 3$ соотношение (4) принимает вид

$$\begin{cases} \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + 1 > 0, \\ \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 + 1 > 0, \\ \sigma_1 \sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_3 + 1 > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Неравенствам (5) геометрически соответствует область, лежащая внутри прямоугольного треугольника $A_1 A_2 A_3$, где координаты вершин

$$A_1(-\sigma_3; -1), \quad A_2(-2 + \sigma_3; 1 - 2\sigma_3), \quad A_3(2 + \sigma_3; 1 + 2\sigma_3).$$

Внутри треугольника $A_1 A_2 A_3$ – асимптотическая устойчивость, на границе устойчивость, кроме вершин A_2, A_3 . Точки A_2, A_3 , которым

соответствуют кратные корни уравнения (2), подлежат дополнительному исследованию на устойчивость.

В случае $\sigma_3 = 1$ треугольник $A_1 A_2 A_3$ превращается в отрезок биссектрисы первого и третьего координатных углов.

При $n = 4$ система неравенств становится громоздкой, однако, если система (1) имеет канонический вид или обладает свойством t – инвариантности, то характеристическое уравнение (2) – возвратное, и область устойчивости G_σ можно найти [5].

К сожалению, способов нахождения точных значений коэффициентов характеристического уравнения матрицы монодромии нет. Поэтому стремятся наложить ограничения на коэффициенты исходной системы (1) позволяющие гарантировать расположение мультипликаторов, необходимое и достаточное для устойчивости.

В дальнейшем, попробуем с помощью принципа максимума Понтрягина [5] получить достаточные условия устойчивости и неустойчивости системы линейных дифференциальных уравнений с квазипериодическими и (или) мультипериодическими коэффициентами.

Нелинейная система дифференциальных уравнений

В [7] рассматривается система автоматического регулирования

$$\frac{dx}{dt} = Ax + b\varphi(\sigma, t), \quad \sigma = (c, x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i, \quad \varphi(0, t) = 0, \quad (2)$$

где x n -мерный вектор обобщенных координат системы, A – постоянная $n \times n$ гурвицева матрица, $\varphi(\sigma, t)$ – скалярная функция, удовлетворяющая обычным условиям существования и единственности решения системы (2) и при любом t имеет место условие

$$0 \leq \varphi(\sigma, t) \leq k\sigma^2. \quad (3)$$

Задача состоит в исследовании абсолютной устойчивости системы (2). Система (2) называется абсолютно устойчивой, если

1) для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что если начальные условия x_0 лежат в $\delta(\varepsilon)$ -окрестности, то решение $x(t)$ системы (2) при всех $t \geq t_0$ лежит в ε -окрестности начала координат при любом выборе функции $\varphi(\sigma, t)$, удовлетворяющей неравенству (3);

2) каковы бы ни были начальные данные, любое решение системы (2) при $t \rightarrow +\infty$ стремится к положению равновесия $x = 0$ системы (2) при любой $\varphi(\sigma, t)$, удовлетворяющей неравенству (3).

Предполагая, что $\varphi(\sigma, t) = u(t)\sigma$ вводится в рассмотрение линейная нестационарная система

$$\frac{dx}{dt} = Ax + bu(t)\sigma. \quad (4)$$

Условие (3) для системы (4) переходит в неравенство

$$0 \leq u(t) \leq k. \quad (5)$$

Рассматривается функционал

$$J(u) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_i^2(x_0, T), \quad 0 < T < +\infty$$

на множестве U измеримых функций, удовлетворяющих условию (5). Ставится задача об отыскании функций $\tilde{u}(t) \in U$, доставляющих максимум функционалу $J(u)$. Далее, согласно принципу максимума [6], имеем

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} 0, & (b^*, q)(c^*, x) > 0, \\ k, & (b^*, q)(c^*, x) < 0, \end{cases}$$

где $q = colon(q_1, \dots, q_n)$ удовлетворяет системе

$$\frac{dq}{dt} = -A^*q - cub^*q, \quad q(T) = -x(T).$$

Случай $(b^*, q)(c^*, x) = 0$ на множестве ненулевой меры принадлежащем отрезку $[0, T]$ оказывается невозможным, так как каждая из функций (b^*, q) и (c^*, x) имеет лишь конечное число нулей на любом конечном интервале.

Заключение

Принцип максимума Понтрягина попробуем применить для получения достаточных условий устойчивости и неустойчивости системы линейных дифференциальных уравнений с квазипериодическими и (или) мультипериодическими коэффициентами. Работа [8] дает перспективные инструменты в решении поставленных задач.

Библиографический список

1. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. Собрание сочинений, т.2 – Москва, Ленинград: Издательство АН СССР, 1956.

2. Якубович В. А., Старжинский В. М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами. – Москва: Издательство «Наука», 1972.
3. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. – Москва: Издательство «Наука», 1967.
4. Лось Г. А., Теоремы о неустойчивости решений линейного однородного дифференциального уравнения n -го порядка с периодическими коэффициентами // Дифференциальные уравнения. 1968. Т. 4. №4. с. 625-630.
5. Курашин В. Н. О нахождении области устойчивости одного дифференциального уравнения 4-го порядка с периодическими коэффициентами // Дифференциальные уравнения. Труды пединститутов РСФСР. 1978. Вып. 2.
6. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – Москва: Издательство «Наука», 1983.
7. Пятницкий Е. С. Абсолютная устойчивость нестационарных нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 1970. №1. с. 5-15.
8. Миронов В. В., Северцев Н. А. Методы анализа устойчивости систем и управляемость движением. Монография. / ВЦ РАН им. А.А. Дородницына. – М.: Изд. РУДН, 2002, 165 с.

УДК 007.52; ГРНТИ 28.19.27

СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МОДЕЛИ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

И.Ю. Филатов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, rgrta@inbox.ru*

Аннотация. В статье рассматривается теория ситуационного управления, возникшая на стыке кибернетики, искусственного интеллекта и теории принятия решений. Анализируются исторические предпосылки и базовые концепции подхода, ключевой из которых является понятие «ситуация» как целостная и структурированная модель состояния управляемого объекта и внешней среды. Подробно описана архитектура систем ситуационного управления, включающая ситуационную модель, базу знаний, решатель и механизм обратной связи. Особое внимание уделяется процессу ситуационного вывода как ядру функционирования таких систем. Исследуются основные классы моделей представления знаний: продукционные, фреймовые и онтологические. Рассмотрены прикладные аспекты использования ситуационного управления в таких областях, как управление слож-

ными техническими системами, интеллектуальные транспортные системы, мониторинг бизнес-процессов и медицинская диагностика. Определены современные тенденции и перспективы развития подхода, связанные с интеграцией методов машинного обучения, обработки больших данных и когнитивных технологий, что позволяет перейти от реактивного к проактивному и адаптивному управлению.

Ключевые слова: ситуационное управление, теория принятия решений, искусственный интеллект, ситуационная модель, база знаний, экспертные системы, кибернетика.

SITUATIONAL CONTROL: THEORETICAL FOUNDATIONS, MODELS, AND APPLIED ASPECTS

I. Yu. Filatov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, rgrta@inbox.ru*

Abstract. This article examines the theory of situational control, which emerged at the intersection of cybernetics, artificial intelligence, and decision-making theory. The historical background and basic concepts of the approach are analyzed, with the key concept being the "situation" as a holistic and structured model of the state of the controlled object and the external environment. The architecture of situational control systems is described in detail, including the situational model, knowledge base, solver, and feedback mechanism. Particular attention is paid to the process of situational inference as the core of such systems' functioning. The main classes of knowledge representation models are explored: production rules, frames, and ontologies. Applied aspects of using situational control in areas such as managing complex technical systems, intelligent transportation systems, business process monitoring, and medical diagnostics are considered. Current trends and future prospects for the development of the approach are defined, associated with the integration of machine learning methods, big data processing, and cognitive technologies, enabling a transition from reactive to proactive and adaptive control.

Keywords: situational control, decision-making theory, artificial intelligence, situational model, knowledge base, expert systems, cybernetics.

Введение

Современные сложные системы, будь то технологические комплексы, экономические объекты или социальные процессы, характеризуются высокой степенью неопределенности, динамичности и наличием большого числа взаимосвязанных факторов. Традиционные подходы к управлению, основанные на жестких алгоритмах и детерминированных моделях, зачастую оказываются неэффективными в условиях быстро меняющейся обстановки. Ответом на этот вызов стала парадигма *ситуационного управления* (СУ), предложенная в 1970-х годах Д.А. Поспеловым и его школой [4].

Ситуационное управление — это теория и практика построения систем управления, в которых решения вырабатываются на основе анализа и оценки текущей ситуации. В отличие от классического программного управления, где реакции системы заранее predetermined, СУ предполагает выбор адекватной стратегии поведения из множества возможных в зависимости от контекста. Данный подход нашел применение в самых различных областях, где требуется гибкость и интеллектуальность в принятии решений.

Целью представленного исследования является систематический анализ теоретических основ, моделей и прикладных аспектов ситуационного управления.

Теоретические основы ситуационного управления

Базовые понятия

Фундаментальными концепциями СУ являются:

- *Ситуация (S)* — это формализованное описание состояния управляемого объекта и внешней среды в определенный момент времени, достаточное для принятия решения о управляющем воздействии. Ситуация представляет собой не просто набор данных, а целостную и структурированную модель, отражающую существенные для управления связи и свойства [3].
- *Цель управления (G)* — желаемое состояние системы.
- *Управляющее воздействие (U)* — действие или команда, переводящая систему из текущей ситуации в целевую или приближающую к ней.
- *База знаний (БЗ)* — совокупность правил, моделей и эвристик, описывающих связи между ситуациями и адекватными для них управляющими воздействиями.

Архитектура системы ситуационного управления

Типичная архитектура системы СУ включает следующие компоненты (Рис. 1):

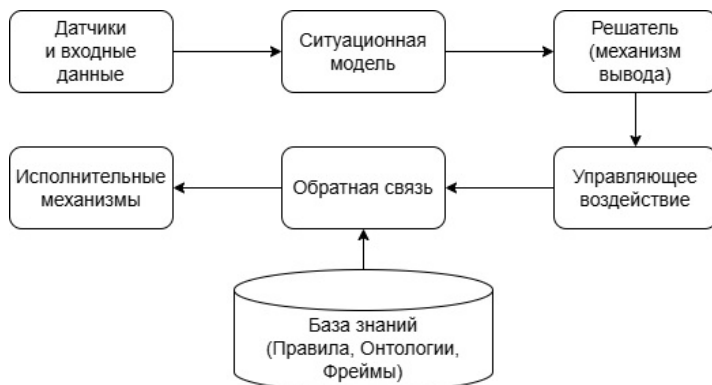


Рис. 1. Упрощенная архитектура системы ситуационного управления

1. *Сенсоры и источники данных*: осуществляют сбор информации о состоянии объекта и среды.
2. *Модуль идентификации ситуации*: на основе поступающих данных формирует и распознает текущую ситуацию, сопоставляя ее с эталонами из базы знаний.
3. *База знаний*: хранит знания о предметной области в виде продукционных правил («Если <ситуация>, то <решение>»), фреймов, онтологий или сценариев.
4. *Решатель (Механизм логического вывода)*: на основе идентифицированной ситуации и целей управления выбирает наилучшее управляющее воздействие из базы знаний.
5. *Исполнительные механизмы*: реализуют выбранное управляющее воздействие.
6. *Обратная связь*: обеспечивает оценку результатов управления и коррекцию ситуационной модели [2].

Модели и методы представления знаний в СУ

Качество ситуационного управления напрямую зависит от адекватности представления знаний. Наиболее распространены следующие модели:

1. *Продукционные модели.* Знания представляются в виде набора правил «ЕСЛИ-ТО». Это интуитивно понятный и простой в реализации формат, хорошо зарекомендовавший себя в экспертных системах. Однако при большом количестве правил может возникнуть проблема конфликтов и непрозрачности логики вывода.

2. *Фреймовые модели.* Ситуация представляется в виде фрейма — структуры данных, содержащей слоты для описания характеристик и действий. Фреймы удобны для представления стереотипных ситуаций и организации иерархии знаний (например, фрейм «Аварийная ситуация» с дочерними фреймами «Пожар», «Разгерметизация» и т.д.).

3. *Онтологические модели.* Онтология формально описывает понятия предметной области и отношения между ними. Это наиболее мощный и гибкий инструмент, позволяющий осуществлять сложный логический вывод и обеспечивать семантическую интероперабельность между различными системами [1].

Процесс ситуационного вывода включает этапы: сопоставление текущих данных с образцами из базы знаний, выбор подходящего правила или сценария, разрешение конфликтов (если применимо несколько правил) и выполнение действия.

Прикладные аспекты ситуационного управления

Ситуационный подход доказал свою эффективность в многочисленных приложениях:

- *Управление сложными техническими системами.* АСУ ТП (Автоматизированные Системы Управления Технологическими Процессами) в энергетике, авиации, космонавтике. Система в реальном времени идентифицирует аномальные и аварийные ситуации и предпринимает меры по их локализации.

- *Интеллектуальные транспортные системы (ИТС).* Адаптивное управление светофорами, перераспределение транспортных потоков в зависимости от загруженности, ДТП или дорожных работ.

- *Корпоративное управление и мониторинг бизнес-процессов (BAM — Business Activity Monitoring).* Системы анализируют операционные данные и идентифицируют ситуации, требующие вмешательства менеджера (например, «срыв критического срока», «аномальный рост затрат»).

- *Медицинские диагностические системы.* Анализ симптомов пациента и данных обследований для идентификации заболевания и рекомендации схемы лечения [5].

Выводы

Теория ситуационного управления предоставляет мощный аппарат для построения интеллектуальных систем, способных функционировать в условиях неполноты информации и динамически меняющейся обстановки. Его сила заключается в ориентации на контекст и использовании моделей знаний предметной области.

Современное развитие СУ связано с интеграцией традиционных методов с передовыми технологиями:

1. *Машинное обучение и Big Data:* позволяют автоматически выявлять сложные, нетипичные ситуации и формировать правила управления на основе анализа исторических данных, переходя от экспертного описания к дата-драйвен подходам.

2. *Когнитивные технологии:* направление на создание систем, способных не только реагировать на ситуации, но и понимать их, строить прогнозы и объяснять свои решения.

3. *Проактивное управление:* современные системы СУ стремятся не только реагировать на уже возникшие ситуации, но и прогнозировать их наступление, позволяя предотвращать негативные сценарии.

Таким образом, ситуационное управление остается актуальной и развивающейся научно-практической парадигмой, продолжая эволюционировать и находить новые применения в эпоху цифровой трансформации и искусственного интеллекта.

Библиографический список

1. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2001.
2. Клещев А.С., Арзамасов Ю.Г. Ситуационный контроль в гибких производственных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2010. — № 2. — С. 39-50.
3. Осипов Г.С. Приобретение знаний интеллектуальными системами. — М.: Физматлит, 2015.
4. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986.
5. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. — 4th Edition. — Pearson, 2020.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОЦЕНКИ
СМЕЩЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИИ****Д.А. Баженов¹, Е.С. Жгутова¹, Д.В. Трофимов²**¹ *Рязанский государственный радиотехнический университет
им.В.Ф.Уткина,**Рязань, bazenovd60@gmail.com*² *Акционерное общество «Научно-производственный комплекс
«Альфа-М», Рязань, samael1978@rambler.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрены основные методы и подходы для оценивания смещения на изображении в условиях подвижного датчика изображений. Рассматриваются четыре основных класса методов: корреляционные, частотные на основе фазовой корреляции, пространственные на основе оптического потока и методы на основе выделения особенностей изображения. Представлено описание гироскопических датчиков и их роль в оценке параметра смещения. Кроме того, в работе предлагается объединить работу оптического алгоритма и показаний гироскопического датчика. За счет этого предполагается увеличить точность оценивания параметра смещения и, соответственно, повысить качество совмещения изображений.

Ключевые слова: смещение, совмещение изображений, корреляционные методы, преобразование Фурье, оптический поток, особые точки.

**A COMBINED APPROACH FOR ESTIMATING
IMAGE DISPLACEMENT****D.A. Bajenov¹, E.S. Zhgutova¹, D.V. Trofimov²**¹ *Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, bazenovd60@gmail.com*² *Joint stock society «Scientific and Production Complex «Alpha-M»,
Ryazan, samael1978@rambler.ru*

Abstract. This paper discusses the main methods and approaches for estimating image displacement in a mobile image sensor. Four main classes of methods are considered: correlation, frequency based on phase correlation, spatial based on optical flow, and image feature extraction methods. A description of gyroscopic sensors and their role in the estimation of the displacement parameter is presented. In addition, the paper proposes to combine the operation of an optical algorithm and the readings of a gyroscopic sensor. Due to this, it is

expected to increase the accuracy of estimating the displacement parameter and, accordingly, improve the quality of image alignment.

Keywords: displacement, image alignment, correlation methods, Fourier transform, optical flow, singular points.

Введение

В современном мире цифровой обработки изображений и компьютерного зрения задача совмещения двух кадров динамически изменяемой во времени видеопоследовательности является одной из фундаментальных. Она лежит в основе решения задач таких, как стабилизация видео [1], панорамирование [2], совмещение медицинских изображений, слежения за объектами [3], навигация [2], дистанционное зондирование [4] и др. Данная задача заключается в поиске параметров геометрического преобразования, которое наилучшим образом совмещает одно изображение с другим.

Формально задача может быть сформулирована следующим образом: для двух изображений $I_1(x)$ и $I_2(x)$, где $x = (x, y)^T$ – координаты пикселя, необходимо найти параметры преобразования T такие, что:

$$I_2(x) = I_1(T(x)) + \eta(x), \quad (1)$$

где $\eta(x)$ – аддитивный шум, а $T(x)$ – функция геометрического преобразования, которая может описывать как простое смещение изображения, так и сложные нелинейные искажения.

В данной работе в качестве геометрического преобразования выбрано смещение как наиболее часто встречающееся в реальных условиях и в рамках решаемой задачи. Несмотря на многочисленные исследования, данная проблема остается актуальной в связи с появлением новых практических приложений и устройств, где необходимо оценивать смещение, а также увеличением требований к точности и скорости работы алгоритмов.

Алгоритмы оценки смещения на изображениях

Известно достаточно большое количество методов вычисления величины смещения на изображении, которые можно разделить на следующие группы:

- корреляционные методы (методы на основе поиска заранее известного эталона на изображении с использованием различных корреляционных функций) [1];
- методы, основанные на фазовой корреляции с использованием преобразований Фурье [1];

- методы, основанные на оптическом потоке [5];
- методы, основанные на выделении особенностей изображения. В данную группу входят методы на основе особых точек [6], а также многоэталонный подход [7].

Корреляционные методы

Корреляционные методы оценки параметров геометрических преобразований широко применяются при совмещении изображений различных спектральных диапазонов или снятых в разное время. Чаще всего используют при оценке параметров смещения. В научной литературе [1] приводится описание нескольких видов корреляционных алгоритмов, отличающихся способом вычисления критериальной функции и методом ее анализа. Часто используются разностные критериальные функции, как одни из наиболее простых для аппаратной реализации. Реже применяются алгоритмы, в которых находится глобальный минимум критериальной функции, вычисленной с использованием произведений эталонного и анализируемого изображений. Кроме того, используются нормированные критериальные функции.

Данные алгоритмы показывают неплохие результаты при отсутствии шумов и движущихся объектов. Главным недостатком корреляционных подходов является большой объем вычислений, который замедляет работу алгоритмов. Кроме того, данные алгоритмы сильно чувствительны к шумам.

Методы фазовой корреляции

Одним из путей снижения вычислительных затрат является использование быстрых спектральных преобразований. Известный факт, что при больших размерах массивов дискретная свертка эффективнее вычисляется при использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1]. Например, при решении задачи оценки параметров евклидова преобразования алгоритм базируется на свойствах преобразования Фурье, который отражает поведение двумерного спектра Фурье при смещении и повороте изображения. Из [1] следует, что при повороте функции на угол и смещении на величину происходит поворот ее амплитудного спектра на такую же величину, а сдвиг не оказывает никакого влияния на амплитудный спектр функции.

Метод оптического потока

Подходы, использующие оптический поток, основаны на вычислении направления движения как локальных, так и глобальных участков изображения [5]. Обычно оптическим потоком называют такие изменения как: изменение яркости в узлах сетки отсчетов, движение точек яркостей сцены, контрастности, градиента и т.д. Оптический поток представляют в виде векторного поля, которое задает скорость движения точек или фрагментов изображения. Суть оптического потока заключается в том, чтобы найти параметры преобразования, которые позволяют сопоставить каждой точке исходного изображения точку на текущем изображении. Описывается он обычно с помощью дифференциальных уравнений с частными производными при этом яркость изображения считают неизменной во времени.

Анализ существующей литературы показывает, что настоящие методы широко применяются в различных системах технического зрения и показывают хорошие результаты. Например, в работе [8] с помощью метода на основе оптического потока решается задача слежения за движущимися объектами. Если говорить о недостатках данных методов, то к ним также относится высокая вычислительная сложность. Реализация некоторых операций в современных системах при работе в реальном времени проблематична.

Методы, основанные на выделении особенностей изображения

Структурные методы базируются на выделении элементов исходного и преобразованного изображения. К таким элементам относят: точки, линии, углы, участки небольшого размера, контуры и многое другое [9]. После выбора структурного элемента устанавливают его соответствие на двух изображениях, обычно вычисляют межкадровые сдвиги точек исходного изображения. Одними из самых информативных структурных элементов являются контура объектов. Выделение контуров сильно уменьшает обрабатываемую информацию на изображении, при этом сохраняя структурные свойства, которые при последующей обработке изображения можно использовать.

Еще одним примером структурных элементов являются особые точки. Особые точки обладают определенной характерной окрестностью, в которой содержатся признаки, отличающие особую точку от других [6]. В зависимости от алгоритма к таким точкам относятся: углы, точки, которые отличаются яркостью или цветом и др. Таких точек на изображении существенно меньше, а поэтому и вычислений будет совершаться меньше. Методы на основе особых точек основаны

на нахождении соответствия точек на двух изображениях. Любой алгоритм состоит из трех основных этапов: поиск точек, описание их окрестностей и сопоставление на двух изображениях. Сопоставление двух изображений состоит в сравнении дескрипторов. Точка на первом изображении, чей дескриптор максимально совпадает с дескриптором на втором, и будет являться исходной. В настоящее время существует огромное множество таких алгоритмов, которые отличаются методом поиска точек, эффективностью вычислительных операций, по качеству выделения и др.

Недостатком данного подхода является то, что они не применимы для низкокачественных изображений, получаемых с датчиков, и при малых размерах объекта. Наличие сильного шума и размытия на изображении сильно снижают качество обнаружения особых точек. Особые точки можно использовать при реализации методов оптического потока.

Существует еще один подход – многоэталонный алгоритм предложен и подробно описан в [10]. Для сокращения вычислительных затрат при использовании корреляционных методов предлагается искать на изображении наиболее информативные участки небольшой площади и производить измерение координат оптимизацией корреляционного критерия с последующим вычислением параметров геометрических преобразований по изменению координат соответствующих участков. Алгоритм запоминает местоположение выбранных опорных участков, затем определяет их положение на следующем кадре и, таким образом, вычисляет оценки параметров геометрических преобразований, присутствующих на изображении. Для слежения за опорными участками используется алгоритм оценки положения на основе сопоставления с эталоном.

Данный подход позволяет значительно уменьшить объем обрабатываемой и хранимой информации, а также снижает требования к присутствию на изображении тех или иных видов структурных элементов [10].

Анализ существующих подходов и методов, решающих задачу оценки параметров геометрических преобразований, позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время до сих пор не существует какого-то универсального подхода, дающего существенный выигрыш в скорости, качестве работы, в аппаратной реализации и др.

Применение гироскопического датчика угла для оценки смещения

Помимо классических методов компьютерного зрения, основанных на анализе пиксельных данных, для оценки смещения на изображении активно используются данные инерциальных датчиков – гироскопов и акселерометров [11]. Эти датчики позволяют напрямую измерять угловую скорость и линейное ускорение камеры, предоставляя ценную информацию для компенсации дрожания и стабилизации видео.

Существует большое количество гироскопических датчиков и даже совмещенных систем: *механические, волоконно-оптические, лазерные, твердотельные, МЭМС-гироскопы* и т.д [12]. Принцип действия *механических гироскопов* основан на сохранении углового момента быстро вращающегося ротора. При изменении ориентации основания гироскопа возникает прецессия, пропорциональная приложенному моменту. *Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ)* используют эффект Саньяка – разность фаз встречных световых волн в замкнутом оптическом контуре, пропорциональную угловой скорости вращения. *Лазерные гироскопы (ЛГ)* также основаны на эффекте Саньяка, но используют кольцевой лазерный резонатор. Разность частот встречных волн пропорциональна угловой скорости. Принцип действия *твердотельных гироскопов (ТВГ)* основан на использовании инертных свойств упругих волн, возбуждаемых в виде радиальных колебаний на второй моде в полусферическом цилиндрическом или кольцевом резонаторах [13]. *MEMS-гироскопы (микроэлектромеханические системы)* основаны на эффекте Кориолиса. Вибрационная масса при угловом движении испытывает силу Кориолиса, вызывающую вторичное движение, которое измеряется емкостными, пьезоэлектрическими или пьезорезистивными датчиками [12]. Ниже представлена таблица для сравнения характеристик гироскопов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики гироскопов

Параметр	Механические	ВОГ	Лазерные	MEMS
Точность, %/ч	0.1-1.0	0.01-0.1	0.001-0.01	1-100
Диапазон, %/с	до 400	до 1000	до 500	до 2000
Готовность	3-15 мин	< 1 с	1-5 мин	< 1 с
Срок службы	5-10 лет	> 15 лет	> 10 лет	5-15 лет
Стоимость	Высокая	Очень высокая	Экстремально высокая	Низкая
Энергопотребление	Высокое	Среднее	Высокое	Низкое

Выбор конкретного типа гироскопического датчика определяется требованиями приложения по точности, надежности, стоимости, массогабаритным показателям и условиям эксплуатации.

Данные гироскопических датчиков интегрируются с алгоритмами компьютерного зрения через фильтры (чаще всего Калмана), создавая комбинированные системы оценки смещения. Таким образом, в данной работе предлагается комбинированный подход для оценки смещения: выбранный программный метод и показания гироскопического датчика.

Описание работы предложенного алгоритма

Основным контуром являются смещения, полученные с гироскопического датчика:

$$\begin{aligned} B_a &= Q_a(n) - Q_a(n-1) - \Phi_a, \\ D_x G &= B_a K_\phi + L_x K_l, \\ \Phi_a &= \Phi_a + K_\phi (Q_a(n) - Q_a(n-1)), \end{aligned}$$

где B_a – текущее мгновенное значение смещения в градусах угла поворота относительно оси вращения, $Q_a(n)$ – текущее значение угла гироскопа, $Q_a(n-1)$ – предыдущее значение угла гироскопа, Φ_a – фильтрованная оценка смещения датчика во времени для компенсации дрейфа, $D_x G$ – величина пиксельного смещения, полученная с гироскопа, K_ϕ – коэффициент приведения градусов с гироскопа в пиксели изображения, L_x – оценочное линейное смещение линии визирования, K_l – расчетный коэффициент смещения. K_l зависит от дальности до объектов, относительно которых смещается линия визирования. В процессе анализа от оптических алгоритмов K_l постоянно принимает различные значения вплоть до нулевых.

Основная процедура совмещенного вычисления смещений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} |D_x O - D_x G| &< S_r D_l \ominus 1, \\ S_r D_l &= S_r D_l + K_{di} |D_x O - D_x G|, \end{aligned}$$

где $D_x O$ – величина пиксельного смещения, полученная от оптического алгоритма;

$S_r D_l$ – вычисляемое значение доверительного интервала;

K_{di} – коэффициент фильтрации.

Оптические методы позволяют оценить смещение изображения более точно. Если смещение, полученное с помощью оптических методов, находится в корреляции с данными, полученными гироскопическими датчиками, то в алгоритме сдвига изображения используются именно они. Таким образом, комбинируя данные с разных источников удастся значительно повысить надежность определения межкадрового смещения, где зачастую даже одно неверное определение приводит к неправильной работе алгоритмов, использующих данные с вычитания фона или временную фильтрацию изображения.

Выводы

В работе представлен краткий обзор методов и подходов для оценки смещения на изображении в условиях подвижного датчика изображений, описаны их преимущества и недостатки. Кроме того, приведено краткое описание существующих гироскопов. Предложен комбинированный подход, который позволяет объединять показания с гироскопических датчиков и результат алгоритма оценки параметра смещения. За счет этого предполагается увеличить точность совмещения изображений.

Библиографический список

1. Бабаян П.В., Смирнов С.А., Муравьев В.С., Стротов В.В. Обработка изображений в системах обнаружения и сопровождения объектов. Классические методы. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2024. – 168 с: ил.
2. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории: учебное пособие // составители С. С. Рацен, А. В. Симаков, Т. В. Симакова, Е. П. Евтушкова, Н. В. Литвиненко. – Тюмень: ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023. – 149 с.
3. Babayan P. V., Kozhina E. S. A Study of the Automatic Object Extraction Algorithm on the Image Sequence Under Scaling Ttransformations // 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE, 2023. – PP. 1-4.
4. Токарева О.С., Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие // Томск: издательство Томского политехнического университета. – 2010. – Т.5.
5. Колосов К. С. и др. Методы видеонавигации БПЛА с использованием оптического потока // Сб. трудов XIII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019). Москва, Россия. – 2019. – С. 290.

6. Веричев А. В. Обучаемый детектор особых точек изображения // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017)-Самара: Новая техника. – 2017. – С. 670-675.
7. Корепанов С. Е., Смирнов С. А., Стротов В. В. Критерий работоспособности многоэталонного алгоритма оценки параметров геометрических преобразований изображений // Научно-техническая конференция "Техническое зрение в системах управления-2017". – 2017. – С. 47-48.
8. Ершов М.Д. Разработка и исследование алгоритмов оценки параметров движущихся объектов в задачах видеоаналитики: Диссертация канд. тех. наук. – Рязань., 2020. – 231 с.
9. Стротов В. В. Сравнение двух структурных алгоритмов оценки параметров геометрических преобразований изображений // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – №. 3. – С. 21-25.
10. Стротов В.В. Модели и алгоритмы оценивания параметров динамических изображений в бортовых системах видеослежения: Диссертация канд. тех. наук. – Рязань., 2009. – 179 с.
11. Bell Steven, Troccoli Alejandro, Pulli Kari. A Non-Linear Filter for Gyroscope-Based Video Stabilization. – 2014.
12. Усманова З. С., Умарова Л. Х. Гироскоп и его применение // Актуальные проблемы естественных наук. – 2021. – С. 362-370.
13. Волчихин И. А. и др. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – №. 9-2. – С. 59-78.

УДК 624.131.37; ГРНТИ 55.01.81

ТРЕБОВАНИЯ К УСЛОВИЯМ, ОБЕСПЕЧЕНИЮ И ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГРУНТА

С.В. Губарева

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, volkovasvetlan@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается комплексный подход к организации и проведению испытаний грунтов, являющихся ключевым элементом в обеспечении надежности и безопасности строительных объектов. Систематизированы основные требования к условиям испытаний, техническому обеспечению, методикам измерений и безопасности. Особое внимание уделено стандартизации процессов в соответствии с действующими нормативными документами, что позволяет минимизировать погрешности и обеспечить воспроизводимость результатов. На примере грунта детально проанализированы этапы от отбора

проб до формирования итоговой отчетности, что имеет важное практическое значение.

Ключевые слова: испытания грунта, стандартизация, физико-механические свойства, лабораторные исследования, методики испытаний, техника безопасности, протокол испытаний.

REQUIREMENTS FOR CONDITIONS, SUPPORT, AND TESTING ON THE EXAMPLE OF SOIL

S.V. Gubareva

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, volkovasvetlan@yandex.ru*

Abstract. The article discusses a comprehensive approach to the organization and conduct of soil tests, which are a key element in ensuring the reliability and safety of construction sites. The main requirements for test conditions, technical support, measurement methods, and safety are systematized. Special attention is paid to the standardization of processes in accordance with current regulatory documents, which helps to minimize errors and ensure the reproducibility of results. The article provides a detailed analysis of the stages from sample collection to the generation of final reports, which is of great practical importance.

Keywords: soil testing, standardization, physical and mechanical properties, laboratory research, test methods, safety precautions, and test reports.

Качество и долговечность любого строительного сооружения неразрывно связаны со свойствами основания, на котором оно возведено. Грунт, как природный материал, характеризуется значительной неоднородностью и изменчивостью свойств, что обуславливает необходимость его тщательного изучения. Достоверное определение физико-механических характеристик грунтов является основой для проектирования фундаментов, оценки устойчивости откосов и прогнозирования поведения грунтовых массивов под нагрузкой.

Эффективность и точность таких исследований напрямую зависят от строгого соблюдения регламентированных требований на всех этапах – от отбора образцов до обработки и интерпретации данных. Нарушение установленных процедур на любом из этих этапов может привести к получению некорректных результатов, что, в свою очередь, влечет за собой риски принятия ошибочных проектных решений, перерасход материалов или, что наиболее опасно, аварийные ситуации.

Методологическая основа и организация испытаний

Основу достоверных испытаний грунтов составляет строгое следование требованиям межгосударственных и национальных стандартов. Эти документы регламентируют не только методы непосредственных измерений, но и все сопутствующие процессы.

Ключевым начальным этапом является корректный отбор проб. Отбор образцов должен производиться в соответствии с ГОСТ 12071-2014, который устанавливает правила их упаковки, транспортирования и хранения. Нарушение герметичности упаковки может привести к изменению естественной влажности, а механическое повреждение – к нарушению структуры грунта, что делает образцы непригодными для определения прочностных и деформационных характеристик. Каждая проба должна сопровождаться актом отбора, содержащим исчерпывающую информацию о месте, глубине залегания и дате отбора, что обеспечивает прослеживаемость и корректную интерпретацию результатов [1].

Испытания подразделяются на лабораторные и полевые. Лабораторные исследования, регламентированные ГОСТ 30416-2020, позволяют с высокой точностью определить основные физико-механические показатели в контролируемых условиях. Полевые испытания (например, по ГОСТ 5686-2020) необходимы для оценки свойств грунта в его естественном залегании, когда отбор ненарушенных образцов затруднен или когда требуется определить параметры, зависящие от масштабного эффекта (например, несущую способность свай) [2].

Требования к условиям и техническому обеспечению испытаний

Создание стабильных и контролируемых условий проведения испытаний является обязательным условием получения воспроизводимых результатов.

1 Условия в лаборатории. Испытания должны проводиться в специализированных лабораториях, где поддерживается постоянная температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха не более 60%. Данные параметры минимизируют влияние внешних факторов на процессы высушивания, гигроскопичности и деформирования образцов. При проведении полевых работ необходимо обеспечить безопасные условия труда, включая устойчивость грунта на площадке и отсутствие его подтопления.

2 Техническое оснащение. Используемое оборудование должно быть поверено и иметь действующие свидетельства о поверке. К базовому комплексу приборов относятся:

- Для определения физических характеристик: сушильные шкафы, аналитические и технические весы, режущие кольца стандартного объема.
- Для определения гранулометрического состава: наборы сит с различным диаметром ячеек и ареометры.
- Для определения механических свойств: одометры, приборы трехосного сжатия и сдвижные устройства.

Работа на неповеренном или неисправном оборудовании категорически запрещена, так как это приводит к систематическим погрешностям, искажающим реальную картину свойств грунта.

3 Подготовка проб и персонал. Подготовка грунта к испытаниям включает очистку от посторонних включений (корни, камни) и, при необходимости, кондиционирование – приведение влажности к заданному значению или высушивание до постоянной массы. Эти операции требуют аккуратности для сохранения свойств образца.

Квалификация персонала является не менее важным фактором, чем исправность оборудования. Лаборанты и инженеры должны иметь соответствующую подготовку, быть ознакомлены с методиками испытаний и строго соблюдать правила техники безопасности.

Аспекты безопасности при проведении испытаний

Комплексный подход к безопасности включает три основных этапа: подготовку, непосредственное проведение испытаний и завершение работ.

На этапе подготовки необходимо проверить исправность всего оборудования, особенно нагревательных элементов сушильных шкафов. Запрещается оставлять такие приборы без присмотра во избежание возгорания. При операциях, связанных с измельчением и просеиванием грунта (например, для гранулометрического анализа), обязательно использование средств индивидуальной защиты – респираторов и защитных очков для предотвращения попадания пыли в дыхательные пути и глаза.

В процессе испытаний, связанных с применением химических реактивов, работы должны проводиться в вытяжном шкафу с использованием средств защиты (перчатки, очки, халат). При работе с механическими прессами и приборами трехосного сжатия недопустимы пере-

грузки и нарушение инструкций по фиксации образцов, так как это может привести к их разрушению и травмам.

По завершении работ все электроприборы должны быть отключены, реактивы убраны в специально отведенные места, а рабочее место – очищено. Отработанные химические вещества и загрязненные образцы подлежат утилизации в соответствии с установленными экологическими нормативами.

Методики определения ключевых характеристик грунта

Определяемые показатели можно условно разделить на физические и механические. К физическим относятся влажность, плотность (скелета грунта и частиц), гранулометрический состав и производные от них показатели – коэффициенты пористости, текучести и раскатывания. Механические характеристики включают угол внутреннего трения, сцепление и модуль деформации.

1 Определение физических характеристик. Классическим методом определения влажности является метод высушивания пробы грунта до постоянной массы при температуре 105–110°C (ГОСТ 5180-2015). Расчет производится по формуле, связывающей массу испарившейся воды и массу сухого грунта. Плотность (ρ) определяется методом режущего кольца, суть которого заключается во взвешивании пробы грунта, отобранной в цилиндр известного объема. Гранулометрический состав устанавливается ситовым методом (для фракций крупнее 0,05 мм) и ареометрическим (для более мелких фракций) в соответствии с ГОСТ 12536-2014. На основе полученных данных строится интегральная кривая распределения частиц по размерам [3].

2 Определение механических характеристик. Для оценки деформационных и прочностных свойств применяются одометрические испытания и испытания на сдвиг. Одометрическое испытание (ГОСТ 12248.2-2020) имитирует компрессию грунта в условиях отсутствия бокового расширения. Метод ступенчатого нагружения позволяет построить компрессионную кривую и рассчитать модуль деформации. Наиболее полную информацию о прочности дает метод трехосного сжатия, при котором образец грунта подвергается всестороннему давлению с последующим доведением до разрушения путем увеличения девиаторной нагрузки. По результатам серии испытаний строятся круги Мора, по огибающей которых определяются такие ключевые параметры, как угол внутреннего трения (φ) и сцепление (c).

Режимы испытаний и отчетность

Для моделирования различных условий эксплуатации грунтового основания применяются стандартные и специальные режимы испыта-

ний. Стандартный режим предполагает исследования при естественной влажности образца. Специальные режимы включают циклическое замораживание-оттаивание для оценки морозостойкости и длительное нагружение для изучения ползучести грунта.

Критериями прекращения испытаний являются разрушение образца, достижение предельной деформации или стабилизация измеряемых параметров в течение заданного времени [4, 5].

Важнейшим завершающим этапом является документирование результатов. Основным отчетным документом является протокол испытаний, который должен содержать реквизиты лаборатории, ссылки на примененные методики, таблицы с результатами, заключение о соответствии нормативным требованиям и подписи ответственных исполнителей (инженера-геотехника, научного руководителя, начальника лаборатории).

Таким образом, процесс испытаний грунтов представляет собой сложную, многоэтапную и строго регламентированную систему. Ее эффективность основывается на неразрывной связи между тремя ключевыми компонентами: стандартизированными методиками, точным поверенным оборудованием и высококвалифицированным персоналом [6].

Соблюдение установленных требований к условиям проведения испытаний, техническому обеспечению и безопасности является обязательным и непреложным условием для получения достоверных и объективных данных о свойствах грунтов. Эти данные, в свою очередь, служат надежной основой для принятия обоснованных проектных решений в промышленном, гражданском и дорожном строительстве, что в конечном итоге способствует повышению уровня эксплуатационной надежности и безопасности строительных объектов. Дальнейшее развитие данной области связано с совершенствованием измерительной аппаратуры, автоматизацией процессов сбора и обработки данных, а также разработкой новых методов моделирования сложных напряженно-деформированных состояний грунтовых оснований.

Библиографический список

1. ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. — Введ. 2016-01-01. — М. : Стандартинформ, 2015. — 32 с.
2. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. — Введ. 2021-09-01. — М. : Стандартинформ, 2020. — 48 с.

3. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — Введ. 2016-07-01. — М. : Стандартиформ, 2015. — 52 с.

4. Гуляева К. А., Артемьева И. Л. Инструментарий для проектирования систем понятий и баз знаний предметных областей с объектами сложной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 62-77.

5. Пылькин А. Н., Тишкина В. В. Информационная система формирования управленческих решений по улучшению текущего состояния объекта управления / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 76-86.

6. Казаков О. Д. Оценка эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 177-186.

УДК 658.58; ГРНТИ 55.01.81

ОСОБЕННОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ДОПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТАДИИ КАК ИНСТРУМЕНТА СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

С.В. Губарева

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, volkovasvetlan@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается роль и значение исследовательских испытаний на допроизводственной стадии жизненного цикла продукции и технологических процессов. Анализируются их ключевые особенности, отличающие данный вид деятельности от иных форм контроля и испытаний. Доказывается, что системное и заблаговременное проведение исследовательских испытаний является наиболее эффективным инструментом проактивного управления технологическими рисками. Определены основные виды, этапы и методологические принципы организации таких испытаний, а также дана оценка их экономической эффективности.

Ключевые слова: технологические риски, исследовательские испытания, допроизводственная стадия, снижение рисков, прототипирование, жизненный цикл продукции, надежность, безопасность.

FEATURES OF RESEARCH TESTS AT THE PRE-PRODUCTION STAGE AS A TOOL FOR REDUCING TECHNOLOGICAL RISKS

S.V. Gubareva

Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, volkovasvetlan@yandex.ru

Abstract. The article examines the role and significance of research tests at the pre-production stage of the product and technological process life cycle. It analyzes the key features that distinguish this type of activity from other forms of control and testing. The article proves that systematic and early-stage research tests are the most effective tool for proactive management of technological risks. The article defines the main types, stages, and methodological principles of organizing such tests, and assesses their economic efficiency.

Keywords: technological risks, research tests, pre-production stage, risk reduction, prototyping, product life cycle, reliability, and safety.

Современная промышленность характеризуется высокой сложностью продукции, интенсивностью используемых технологий и уже сточением требований к безопасности, надежности и экологичности. В этих условиях минимизация технологических рисков, под которыми понимается вероятность возникновения событий, приводящих к отказам, авариям, финансовым потерям или ущербу репутации, становится критически важной задачей для любого производителя. [1]

Традиционные подходы, направленные на контроль качества уже готовой продукции, являются реактивными и зачастую не позволяют выявить системные или скрытые дефекты, заложенные на этапах проектирования и разработки. В отличие от них, проактивная стратегия управления рисками предполагает их идентификацию и устранение на самых ранних стадиях. Ключевым элементом такой стратегии выступают исследовательские испытания, осуществляемые на допроизводственной стадии [2].

Сущность и отличительные особенности исследовательских испытаний на допроизводственной стадии

Допроизводственная стадия охватывает этапы научно-исследовательских работ (НИР), опытно-конструкторских работ (ОКР), технологической подготовки производства и создания опытных образцов. Исследовательские испытания на этой стадии представляют собой комплекс экспериментов, направленных не на приемку готового изделия, а на изучение свойств материалов, принципов

работы, поведения прототипов и технологических процессов в различных условиях.

Их главная задача – сбор информации для верификации расчетных моделей, подтверждения или опровержения научных гипотез, выявления неизвестных ранее эффектов и, что наиболее важно, оценки потенциальных уязвимостей и точек отказа.

Ключевой особенностью исследовательских испытаний является их проактивный характер. Они проводятся до запуска серийного производства, и их основная цель заключается в предотвращении возникновения проблем, а не в констатации их наличия. Эта фундаментальная направленность отличает их от контрольных испытаний. Если последние отвечают на вопрос «соответствует ли изделие требованиям?», то исследовательские ставят перед собой задачи понять, «как оно работает?», «почему оно ломается?» и «каковы пределы его функционирования?».

Для достижения этих целей активно применяется имитация критических и аномальных условий эксплуатации. Испытания часто проводятся в режимах, далеко выходящих за рамки нормальной эксплуатации, таких как термоудар, вибронагрузки на резонансных частотах или кибератаки на программное обеспечение. Это позволяет определить реальный запас прочности системы и выявить ее критические точки. Данный процесс строится на цикле «испытание – анализ результатов – доработка прототипа – новое испытание», что позволяет последовательно и целенаправленно устранять выявленные недостатки. Важно отметить, что в качестве объектов испытаний выступают несерийные образцы – лабораторные макеты, стендовые прототипы и опытные партии, которые могут существенно отличаться от конечного продукта, что обеспечивает необходимую свободу для исследований [3].

Классификация и методология исследовательских испытаний

Исследовательские испытания отличаются большим разнообразием, что обусловлено спецификой объектов и целей исследования. По своему объекту они могут быть направлены на изучение свойств новых материалов, функциональность отдельных элементов и узлов, взаимодействие сложных систем, устойчивость программного обеспечения или отработку новых технологических процессов.

С точки зрения цели, определяющие испытания нацелены на установление количественных и качественных характеристик объекта. Сравнительные испытания проводятся для оценки нескольких альтер-

нативных решений, будь то различные материалы, конструктивные исполнения или программные алгоритмы. Ресурсные испытания имеют своей задачей определение предельного срока службы или наработки на отказ, в то время как климатические и механические оценивают стойкость продукции к воздействию факторов окружающей среды и различного рода нагрузок.

Степень приближенности к реальным условиям также является важным классифицирующим признаком. Лабораторные испытания проводятся в строго контролируемых условиях и позволяют выявить влияние отдельного фактора. Стендовые испытания осуществляются на специализированном оборудовании, которое комплексно имитирует условия будущей работы объекта. Наиболее сложными и дорогостоящими являются натурные испытания, которые проводятся в реальных или максимально приближенных к ним условиях, предоставляя наиболее достоверные данные о поведении объекта.

Методологической основой эффективных исследовательских испытаний служит системный подход. Он предполагает, что объект испытаний рассматривается как сложная система, взаимодействующая с внешней средой. Планирование эксперимента является краеугольным камнем всего процесса, так как позволяет получить статистически значимые и объективные результаты при минимальных затратах ресурсов. Современная методология все чаще опирается на создание и верификацию цифровых двойников. Это позволяет перенести значительную часть испытаний в виртуальную среду, где можно быстро и дешево протестировать тысячи сценариев, а затем провести целевые натурные испытания только для наиболее критичных из них.

Исследовательские испытания как инструмент управления технологическими рисками

Интеграция исследовательских испытаний в систему управления технологическими рисками позволяет перевести ее из режима реагирования в режим предупреждения. Технологические риски, такие как риск конструктивного или функционального отказа, риск несоответствия технологическим нормативам или риск превышения плановой себестоимости, могут быть идентифицированы и количественно оценены на самой ранней стадии [4].

Например, ресурсные испытания прототипа позволяют спрогнозировать его среднюю наработку на отказ и, соответственно, оценить риски, связанные с гарантийными обязательствами и ремонтами. Испытания на устойчивость к внешним воздействиям выявляют риски

выхода из строя в специфических условиях эксплуатации, что особенно критично для авиационной, космической или автомобильной промышленности. Сравнительные испытания различных технологических процессов позволяют выбрать наиболее стабильный и воспроизводимый вариант, тем самым минимизируя риски производственного брака.

Таким образом, каждое исследовательское испытание представляет собой управляемое инициирование потенциального отказа в контролируемых условиях. Полученная в результате информация становится основой для принятия обоснованных решений по доработке конструкции, изменению материала или корректировке технологии. Это позволяет «закрыть» выявленные риски до того, как они материализуются в серийном производстве и на рынке, где стоимость их устранения возрастает на порядки.

Экономическая эффективность

Несмотря на значительные затраты, связанные с организацией и проведением исследовательских испытаний, их экономическая эффективность не вызывает сомнений. Затраты на создание прототипов, эксплуатацию испытательных стендов и оплату труда высококвалифицированных специалистов многократно окупаются за счет предотвращения будущих потерь.

Стоимость исправления дефекта прогрессивно возрастает по мере движения продукта по его жизненному циклу. Если стоимость устранения недостатка на этапе проектирования условно принимается за единицу, то на этапе производства она возрастает в 10 раз, на этапе испытаний готовой продукции – в 100 раз, а после выхода продукта на рынок – в 1000 раз и более, учитывая затраты на отзыв партий, ремонт, судебные издержки и потерю репутации. Исследовательские испытания позволяют локализовать и устранять подавляющее большинство дефектов в самой «дешевой» зоне – на допроизводственной стадии.

Кроме предотвращения прямых убытков, инвестиции в исследовательские испытания способствуют сокращению времени вывода продукта на рынок, повышению его конкурентоспособности за счет повышения надежности и качества, а также создают задел технологической компетенции компании для будущих разработок.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что исследовательские испытания на допроизводственной стадии представляют собой не просто один из этапов подготовки производства, а стратегический ин-

струмент проактивного управления технологическими рисками. Их фундаментальная особенность заключается в нацеленности на глубокое изучение поведения будущего продукта или технологии в широком диапазоне условий, включая критические [5].

Системное и методологически выверенное применение исследовательских испытаний позволяет трансформировать управление рисками из реактивной в опережающую практику. Это обеспечивает не только снижение вероятности серьезных сбоев и аварий, но и значительный экономический эффект, заключающийся в минимизации затрат на исправление дефектов и укреплении рыночных позиций компании. В условиях растущей технологической сложности и глобальной конкуренции именно такие инструменты, как исследовательские испытания, становятся ключевым фактором устойчивого развития и лидерства в промышленности.

Библиографический список

1. Севрюков С.Л. Управление рисками в инновационных проектах. – М.: Юрайт, 2020. – 315 с.
2. Гуляева К.А., Артемьева И.Л. Инструментарий для проектирования систем понятий и баз знаний предметных областей с объектами сложной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 62-77.
3. Пылькин А.Н., Тишкина В.В. Информационная система формирования управленческих решений по улучшению текущего состояния объекта управления / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 76-86.
4. Казаков О.Д. Оценка эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 177-186.
5. Мохов А.А. Экономическая оценка эффективности испытаний на этапе ОКР // Экономика и менеджмент систем управления. – 2019. – № 2. – С. 45-53.

УДК 658.5; ГРНТИ 76.13.01

**ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ
К ПРОЦЕДУРЕ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ДОКУМЕНТЫ
РЕГИСТРАЦИОННОГО ДОСЬЕ ПО ПРАВИЛАМ ЕАЭС****А.В. Губарев***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Аннотация. Статья посвящена анализу требований нормативной документации Евразийского экономического союза (ЕАЭС) к процедуре внесения изменений в регистрационное досье медицинских изделий. Рассматривается строго регламентированный порядок, направленный на поддержание актуальности данных при безусловном соблюдении требований безопасности, качества и эффективности продукции. Описаны ключевые аспекты процедуры, а также последовательные этапы процесса, установленные Решением Совета ЕЭК № 46. Особое внимание уделяется экспертизе изменений, их обоснованию и необходимости предоставления дополнительных документов.

Ключевые слова: медицинское изделие, регистрационное досье, регистрационное удостоверение, референтное государство, государства признания.

**REQUIREMENTS OF REGULATORY DOCUMENTATION
FOR THE PROCEDURE OF AMENDMENTS IN DOCUMENTS
OF REGISTRATION DOSS FOR RULES OF EAEU****A.V. Gubarev***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Abstract. The article is devoted to the analysis of requirements of regulatory documentation of the Eurasian Economic Union (EAEU) for the procedure of amendments in registration doss of medical devices. The article discusses a strictly regulated procedure aimed at maintaining the relevance of data while ensuring compliance with the requirements for safety, quality, and effectiveness of products. The key aspects of the procedure and the sequential stages of the process established by EEC Council Decision No. 46 are described. Special attention is given to the examination of changes, their justification, and the need for additional documents.

Keywords: medical device, registration dossier, registration certificate, reference state, recognition states.

Введение

Внесение изменений в регистрационное досье – это процедура официального обновления или корректировки сведений и документов, входящих в состав регистрационного досье медицинского изделия, с целью отражения актуальной и достоверной информации об изделии.

В рамках Евразийского экономического союза внесение изменений в регистрационное досье (ВИРД) представляет собой строго регламентированную процедуру, направленную на поддержание полноты и актуальности данных при сохранении обязательных требований безопасности, качества и эффективности медицинских изделий. Такая процедура осуществляется при необходимости внести изменения в сведения о характеристиках изделия, производителе, составе, инструкции по применению или иных данных, которые могут повлиять на безопасность, качество и эффективность изделия в процессе его обращения на рынке Союза. [2, 3]

Основная часть

Требования нормативной документации к процедуре внесения изменений в документы регистрационного досье по правилам ЕАЭС

Евразийский экономический союз (ЕАЭС) – международная организация региональной экономической интеграции, обладающая международной правосубъектностью и учреждённая Договором о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 года.

В состав ЕАЭС входят пять государств: Армения, Беларусь, Казахстан, Кыргызстан и Россия. Основные цели союза – обеспечение свободы передвижения товаров, услуг, капитала и рабочей силы, а также проведение скоординированной или единой экономической политики для модернизации и повышения конкурентоспособности национальных экономик.

Соблюдение правил ЕАЭС при внесении изменений в регистрационное досье крайне важно по следующим причинам:

1. Единые требования для всех государств признания. Правила ЕАЭС устанавливают стандартизированные процедуры и требования к оформлению и содержанию регистрационного досье, что позволяет медицинским изделиям быть признанными на территории всех государств-членов союза без необходимости повторной регистрации в каждой стране;

2. Гармонизация и упрощение процессов. Соблюдение единых правил обеспечивает гармонизацию регуляторных процедур, снижает административную нагрузку на компании и ускоряет процесс внесения изменений, особенно если изменения не требуют экспертной оценки и могут быть внесены в уведомительном порядке;

3. Юридическая значимость и легитимность. Только досье, оформленное в соответствии с правилами ЕАЭС, признается действительным на территории всех стран союза. Несоблюдение этих правил может привести к отказу

в регистрации или признании изменений, что ограничит обращение препарата на общем рынке;

4. Актуальность и безопасность. Соблюдение установленных процедур позволяет своевременно и корректно вносить изменения, связанные с качеством, безопасностью и эффективностью препаратов, что напрямую влияет на здоровье населения. [6]

Ключевым элементом процесса внесения изменений является взаимодействие с уполномоченными органами государств-членов ЕАЭС, где особая роль отводится референтному государству - государству-члену, в которое заявитель подает регистрационное досье для проведения первичной экспертизы и регистрации медицинского изделия. Именно орган или экспертная организация референтного государства осуществляет основную экспертизу представленных изменений, принимает решение о возможности их внесения, а также координирует взаимодействие с органами других государств-членов.

Государства признания – это остальные государства-члены ЕАЭС, в которых заявитель планирует распространить действие регистрационного удостоверения, выданного по результатам экспертизы в референтном государстве. В этих государствах проводится дополнительная проверка документов с учетом национальных требований, таких как локализация инструкций, маркировки и иных особенностей регулирования.

Процедура внесения изменений в регистрационное досье в соответствии с Решением Совета ЕЭК от 12.02.2016 № 46 включает несколько последовательных этапов, обеспечивающих комплексную проверку и согласование изменений на уровне всего Евразийского экономического союза:

1. Подачу в уполномоченный орган референтного государства (Росздравнадзор) заявления с приложением документов, подтверждающих изменения в регистрационном досье. Заявитель направляет заявление о внесении изменений и обновленное регистрационное досье в уполномоченный орган референтного государства. Документы могут подаваться как в бумажном, так и в электронном виде. К заявлению прикладываются обоснование изменений, обновленные разделы досье, копия регистрационного удостоверения и подтверждение оплаты государственной пошлины.

2. Проверку полноты и достоверности поданных документов и сведений уполномоченным органом референтного государства. Росздравнадзор проверяет представленные материалы на соответствие требованиям, принимает решение о возможности проведения экспертизы и открывает доступ к электронной версии досье для органов государств признания.

3. Устранение производителем выявленных нарушений и (или) представления отсутствующих документов (при необходимости).

4. Принятие решения Росздравнадзором о начале процедуры внесения изменений в регистрационное досье.

5. Проведение экспертизы эффективности, качества и безопасности медицинских изделий. Экспертиза включает анализ влияния изменений на

безопасность изделия, оценку соответствия техническим требованиям, проверку полноты и достоверности документации. При необходимости могут проводиться дополнительные испытания и клинические исследования.

6. Передача информации государствам признания для рассмотрения и согласования экспертного заключения. Органы государств признания рассматривают изменения. После одобрения изменений информация вносится в единый реестр медицинских изделий ЕАЭС.

7. Внесение изменений в единый реестр ЕАЭС и выдачу обновлённого регистрационного удостоверения. [1, 4]

Если внесение изменений касается только документов, специфичных для конкретного государства признания, и не влияет на основные данные, одобренные референтным государством, заявитель может воспользоваться упрощенной процедурой уведомления, что значительно сокращает сроки и объем необходимой документации.

В соответствии с Правилами, утвержденными Решением Совета ЕЭК № 46, производитель или уполномоченный представитель обязан уведомить уполномоченный орган референтного государства о планируемых изменениях. К заявлению прилагаются все необходимые документы, включая заявление по установленной форме (Приложение 7 к Правилам), обоснование изменений, обновленные документы регистрационного досье и копия регистрационного удостоверения. [1, 5]

Процедура экспертизы изменений предусматривает тщательный анализ их влияния на безопасность и эффективность изделия, проверку соответствия новым техническим требованиям и полноты представленных документов. После проведения экспертизы уполномоченные органы государств-членов ЕАЭС изучают результаты, проводят межгосударственное согласование и принимают окончательное решение о внесении изменений в регистрационное досье.

Для значительной части изменений (около 60% по статистике) требуется предоставление нотариально заверенных переводов, протоколов дополнительных испытаний и образцов модифицированных компонентов. При этом особое внимание уделяется сохранению идентификационных характеристик изделия, соблюдению требований к клинической безопасности и соответствию первоначальным техническим условиям.

Кроме того, Решение Совета ЕЭК № 46 предусматривает ответственность производителей, включая производителей из третьих стран, которые обязаны назначить уполномоченного представителя на территории ЕАЭС и поддерживать актуальность информации о нем в регистрационном досье. Это обеспечивает прозрачность и контроль качества медицинских изделий на всем протяжении их обращения в Союзе.

Выводы

Таким образом, процедура внесения изменений в регистрационное досье в рамках ЕАЭС является комплексной, многоступенчатой и строго регламентированной, что обеспечивает баланс между необходимостью своевременно обновлять информацию и гарантией высокого уровня безопасности, качества и эффективности медицинских изделий, обращающихся на едином рынке Евразийского экономического союза.

Библиографический список

1. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 12 февраля 2016 г. № 46 «О Правилах регистрации и экспертизы безопасности, качества и эффективности медицинских изделий» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.eaeunion.org/>, свободный. – (Дата обращения: 06.06.2025).
2. Попова О.А. Разработка гибридного метода факторного анализа для неполного набора медицинских данных / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 87-103.
3. Губарев А.В. Управление разрешительной документацией для медицинских изделий / Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024. Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Рязань, 2024. С. 223-226.
4. Пылькин А. Н., Тишкина В. В. Информационная система формирования управленческих решений по улучшению текущего состояния объекта управления / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 76-86.
5. Губарев А.В., Губарева С.В., Ефремова Е.А. Анализ требований регламента MDR /Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2022. Рязань, 2022. С. 233-236.
6. Саморукова О.Д., Крошилин А.В., Крошилина С.В., Жулева С.Ю. Задачи разработки систем медицинского назначения при выборе схемы медикаментозного лечения / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 106-114.

УДК 004.942; ГРНТИ 20.15.05

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ПЛАТЕЖНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ АБОНЕНТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖКХ

А.В. Маркин, В.И. Юркова

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, yurkova935@yandex.ru*

Аннотация. В настоящей работе представлена разработка системы анализа платежной дисциплины абонентов предприятий жилищно-коммунального хозяйства. Предложена трехуровневая методология расчета показателей, интегрирующая статистический анализ, индивидуальный скоринг и предиктивное моделирование. Описана архитектура системы на основе Python, ClickHouse и Yandex DataLens.

Ключевые слова: платежная дисциплина, ЖКХ, предиктивная аналитика, машинное обучение, ClickHouse, Yandex DataLens, Python, Pandas.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR ANALYZING THE PAYMENT DISCIPLINE OF SUBSCRIBERS OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES ENTERPRISES

A.V. Markin, V.I. Yurkova

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, yurkova935@yandex.ru*

Abstract. This paper presents the development of a system for analyzing the payment discipline of subscribers of housing and communal services enterprises. A three-level methodology for calculating indicators is proposed, integrating statistical analysis, individual scoring and predictive modeling. The architecture of the system based on Python, ClickHouse and Yandex DataLens is described.

Keywords: payment discipline, housing and communal services, predictive analytics, machine learning, ClickHouse, Yandex DataLens, Python, Pandas.

Введение

Жилищно-коммунальная сфера является одной из основных составляющих народного хозяйства Российской Федерации. Своевременность и полнота оплаты жилищно-коммунальных услуг (ЖКУ) обеспечивают стабильное финансовое положение предприятий ЖКХ и возможность финансирования текущего обслуживания инфраструктуры [1].

Под платежной дисциплиной (ПД) абонента понимается характеристика, отражающая регулярность, своевременность и полноту оплаты коммунальных услуг [2]. Низкий уровень платежной дисциплины приводит к значительным объемам дебиторской задолженности, что негативно сказывается на экономическом состоянии ресурсоснабжающих организаций.

Анализ существующих решений, таких как Adesk, Альт-Финансы и UR-LI показал, что системы не учитывают специфику массовых платежей населения в сфере ЖКХ и фокусируются преимущественно на анализе юридических лиц [3]. Это обуславливает необходимость разработки специализированной системы, адаптированной к требованиям предприятий ЖКХ.

Разработанная система рассматривается как часть функциональных возможностей программного комплекса «Абонент+» [4].

Теоретические основы платежной дисциплины

Платежная дисциплина в сфере жилищно-коммунального хозяйства представляет собой комплексную экономико-правовую категорию, определяющую обязательства потребителей по своевременному и полному внесению платежей за потребленные коммунальные ресурсы и оказанные жилищные услуги, и регулируется следующими нормативными документами.

1. Статья 155 Жилищного кодекса РФ устанавливает обязанность потребителя вносить плату за ЖКУ до 10-го числа месяца, следующего за расчетным периодом;
2. Статья 330 Гражданского кодекса РФ определяет порядок начисления пеней при просрочке оплаты;
3. Приказ Минстроя РФ от 28.02.2022 №126/пр регламентирует показатели для мониторинга платежной дисциплины.

Экономическое содержание платежной дисциплины раскрывается через ее влияние на финансовую устойчивость предприятий ЖКХ.

Ключевые показатели платежной дисциплины включают:

- начислено и оплачено;
- уровень собираемости платежей

$$УС = \frac{\sum \text{Оплачено за период}}{\sum \text{Начислено за период}} \times 100\%;$$

- объем дебиторской задолженности (текущей, просроченной, безнадежной);
- средний период просрочки

$$ПП = \frac{\sum (\text{Сумма просрочки}_i \times \text{Дней просрочки}_i)}{ДЗ_{\text{просроченная}}}$$

Методология анализа платежной дисциплины

Уровень 1. Базовые статистические показатели

На данном уровне рассчитываются агрегированные показатели в соответствии с нормативными требованиями.

Уровень 2. Индивидуальные скоринговые показатели

На данном уровне основным показателем является Индекс Платежной Дисциплины (ИПД) – комплексный показатель надежности абонента:

$$\text{ИПД} = (W1 \times F1) + (W2 \times F2) + (W3 \times F3) + \dots + (Wn \times Fn),$$

где:

$$F1 = \frac{\text{Количество месяцев без просрочки за последние 12 месяцев}}{12};$$

$$F2 = \min\left(\frac{\sum \text{Оплачено за 6 месяцев}}{\sum \text{Начислено за 6 месяцев, 1.2}}\right);$$

$$F3 = 1 - \min\left(\frac{\text{Текущая просроченная ДЗ}}{\text{Среднемесячное начисление, 2.0}}\right);$$

$$F4 = \frac{\sum (\text{Вес месяца} \times \text{Статус оплаты})}{\sum \text{Вес месяца}}.$$

F1 – фактор своевременности;

F2 – фактор полноты оплаты;

F3 – фактор долговой нагрузки;

F4 – фактор истории платежей с экспоненциальным затуханием.

W1, W2...Wn – весовые коэффициенты, определяемые на основе регрессионного анализа.

На основе ИПД проводится сегментация абонентов на стратегические группы, что позволяет внедрять дифференцированные подходы к работе с ними.

Уровень 3. Прогнозные показатели

Для прогнозирования платежного поведения используются модели машинного обучения.

1. Модель вероятности неуплаты на основе логистической регрессии:

$$P(y_i^{\text{default}} = x_i) = \sigma(w^T x_i + b),$$

где:

$$- \sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} - \text{сигмоидная функция,}$$

- $w \in \mathbb{R}^m$ – вектор весов,

- $b \in \mathbb{R}$ – смещение.

2. Модель прогноза задолженности на 3 месяца на основе случайного леса:

$$\hat{y}_i^{\text{debt}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K f_k(x_i),$$

где f_k – k -ое дерево решений, обученное на бутстрап-выборке.

3. Модель прогноза платежей с Ridge-регуляризацией:

Целевая переменная:

$$y_i^{\text{payment}} = \sum \text{платежи абонента}_i \text{ за следующие 3 месяца.}$$

Линейная регрессия с регуляризацией:

$$\hat{y}_i^{\text{payment}} = w^T x_i + b_i.$$

Ridge-регуляризация:

$$L_{\text{payment}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{\text{payment}} - \hat{y}_i^{\text{payment}})^2 + \alpha \|w\|_2^2.$$

Архитектура системы

Система построена по модульной архитектуре, отражена на рисунке 1 в виде диаграммы компонентов.

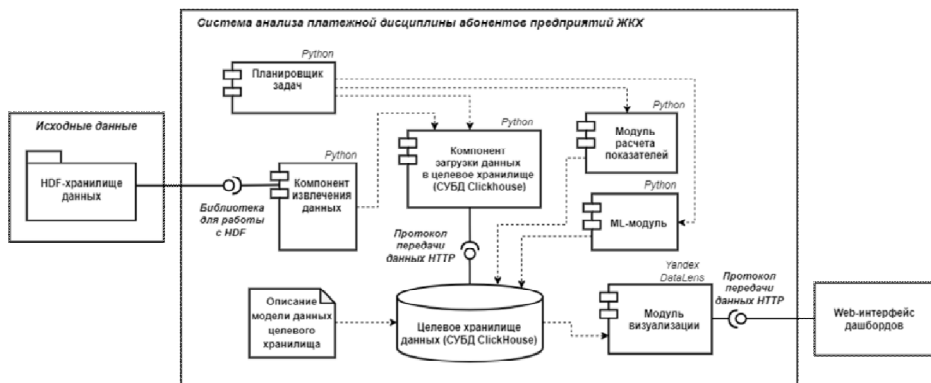


Рис. 1. Архитектура системы

HDF-хранилище данных функционирует как источник подготовленной информации для системы. Для работы с хранилищем применяется библиотека `pandas`, которая обеспечивает высокоуровневый интерфейс чтения данных через метод `read_hdf()`. Хранилище поддерживает механизм версионирования данных и контроля их целостности, что гарантирует согласованность информации на всех этапах обработки.

Модуль загрузки данных в ClickHouse реализован в виде автономного Python-компонента, который использует несколько ключевых библиотек для выполнения своих функций. `Pandas` обеспечивает чтение данных из HDF5-файлов и их предварительную обработку, включая преобразование типов данных и фильтрацию записей. Для взаимодействия с ClickHouse применяется библиотека `clickhouse-driver`, которая устанавливает HTTP-соединение с сервером ClickHouse и выполняет передачу данных с использованием нативного протокола. Процесс загрузки организован в виде пакетной обработки, где данные группируются в батчи оптимального размера для уменьшения сетевых задержек и увеличения пропускной способности.

Аналитическое хранилище ClickHouse представляет собой высокопроизводительную колоночную СУБД. Компонент принимает входящие HTTP-запросы от модуля загрузки данных и от системы визуализации.

зации. ClickHouse обеспечивает сжатие данных на уровне столбцов, что значительно ускоряет выполнение аналитических запросов.

Модуль расчета показателей реализован как отдельный Python-компонент, использующий библиотеку pandas для выполнения сложных вычислений и агрегаций данных. В отличие от SQL-подхода, данный модуль работает с данными в оперативной памяти, что обеспечивает гибкость при реализации алгоритмов расчета показателей. Компонент получает исходные данные из ClickHouse через HTTP-протокол с использованием библиотеки clickhouse-driver, выполняющей SQL-запросы для выборки необходимых данных. Загруженные данные помещаются в DataFrame - специализированную структуру для эффективной работы с табличными данными. Модуль использует векторные операции pandas для расчета ключевых показателей платежной дисциплины, что обеспечивает высокую производительность при обработке данных.

ML-модуль построен на основе библиотек scikit-learn и numpy, которая интегрирована в общий контур обработки данных через Python-скрипты. Процесс обучения моделей организован в виде отдельного конвейера, который включает этапы нормализации данных и валидации моделей.

Модуль визуализации Yandex DataLens взаимодействует с ClickHouse исключительно через HTTP-протокол, используя специализированный SQL-коннектор. Компонент формирует оптимизированные SQL-запросы к хранилищу данных, получая результаты в формате JSON для последующей визуализации. DataLens обеспечивает кэширование часто запрашиваемых данных и интеллектуальную агрегацию информации на уровне представления, что снижает нагрузку на ClickHouse при работе интерактивных дашбордов. Модуль поддерживает различные типы чартов и диаграмм, адаптируя визуализацию под характер отображаемых данных.

Web-интерфейс дашбордов служит клиентской частью системы, реализованной как одностраничное приложение (SPA) (рисунок 2).

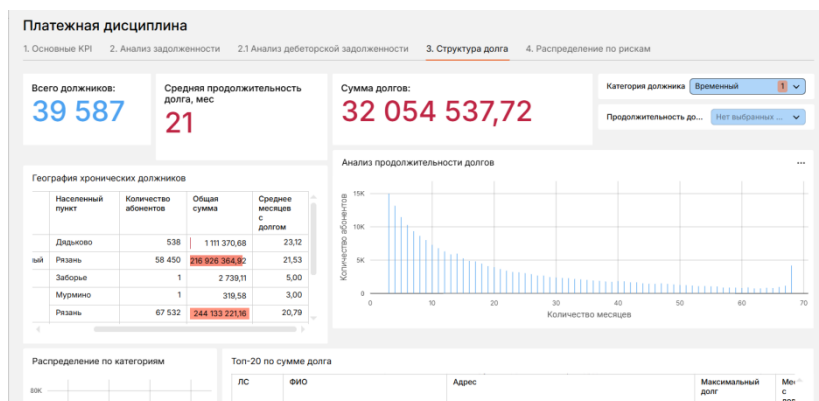


Рис. 2. Фрагмент дашборда «Структура долга»

Компонент использует JavaScript-библиотеки для построения интерактивных графиков и таблиц, обмениваясь данными с сервером DataLens через REST API по HTTP-протоколу.

Планировщик задач координирует работу всех компонентов системы через HTTP-API отдельных сервисов. Компонент использует специализированные операторы для выполнения Python-скриптов, управления задачами в ClickHouse и мониторинга состояния ETL-процессов.

Выводы

Разработанная система анализа платежной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ демонстрирует высокую эффективность для автоматизации процессов мониторинга и прогнозирования. Применение трехуровневой методологии в сочетании с современными технологиями обработки данных обеспечивает: Комплексный подход к управлению дебиторской задолженностью; Своевременное выявление рисков групп абонентов; Повышение точности финансового планирования; Сокращение операционных затрат на формирование отчетности.

Внедрение системы показало ее практическую значимость для повышения финансовой устойчивости предприятий ЖКХ. Дальнейшее развитие системы предполагает интеграцию с системами претензионной работы и расширение функционала предиктивной аналитики.

Библиографический список

1. Кабалинский А.И. Управление жилищно-коммунальным хозяйством: учебник для вузов. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 124 с.
2. Дисциплина платежная — URL: https://finance_loan.academic.ru/501/ДИСЦИПЛИНА_ПЛАТЕЖНАЯ (дата обращения: 05.07.2025).
3. Сервис финансовой аналитики для бизнеса Adesk — URL: <https://adesk.ru> (дата обращения 04.08.2025).
4. Абонент+ | Системы для биллинга и приема платежей за услуги ЖКХ — URL: <https://abonent.plus/> (дата обращения: 05.06.2025).

УДК 621.372.8.049.75; ГРНТИ 47.45.99

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.П. Васильев, Т.Д. Лыу

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, evasiliev48@mail.ru*

Аннотация. В данной работе рассматривается статистическое моделирование полосковых фильтров радиотехнических систем. Предложенная процедура вычисления непараметрической оценки плотности вероятности.

Ключевые слова: статистическое моделирование, полосковый фильтр, оценка плотности вероятности.

STATISTICAL MODELING OF STRIPLINE FILTERS OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS

E.P. Vasilyev, T.D. Luu

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, evasiliev48@mail.ru*

Abstract. This paper examines statistical modeling of stripline filters in radio engineering systems. The proposed procedure for calculating a nonparametric probability density estimate.

Keywords: statistical modeling, stripline filter, probability density estimation.

Введение

Ряд весьма важных проблем исследования и конструирования микроволновых систем не поддается аналитическому решению и требует привлечение численных методов. К таким проблемам можно отнести:

- определение моментов и оценок функций плотности распределения основных показателей качества;
- установление допусков на внутренние и внешние параметры;
- определение вероятности выхода годных изделий;
- определение функций чувствительности выходных характеристик;
- расчет надежности микроволнового устройства или системы в целом.

Детерминистический подход к процессу проектирования микроволновых устройств не позволяет учесть совокупного влияния дестабилизирующих факторов и решить перечисленные выше задачи. Поэтому в последние годы получили развитие вероятностные подходы к проектированию интегральных схем [1].

Если оперировать с чисто математическими объектами, классические численные методы зачастую скрывают физический смысл рассматриваемых процессов. Не имеющие явной физической интерпретации промежуточные этапы моделирования не позволяют осмыслить сложные вероятностно-статистические взаимосвязи как между отдельными базовыми элементами (БЭ) так и между БЭ и всей функциональной системой. Более глубоким в этом смысле оказывается метод прямого вероятностного моделирования, иногда называемый методом Монте-Карло [2] и сводящийся к генерации последовательности реализаций исходных случайных процессов, к функциональному преобразованию их в соответствии со структурой моделируемой системы и, наконец, к статистической обработке последовательности реализаций на выходе системы.

На первом этапе этого сложного итерационно-эвристического процесса возникает проблема, которая частично обсуждалась выше – построение моделей, т.е. проблема разумного упрощения формального описания микроволнового устройства или системы. При этом основную роль играет интуиция, определяемая квалификацией и интеллектуальным уровнем исследователя и возможно известной систематикой моделей соответствующего класса микроволновых устройств. Выделим некоторые общие принципы, которые вытекают из логики многовариантного выбора: обеспечение компромисса между полнотой (точностью) модели и реальными временными затратами на машинные итерационные операции; соответствие между точностью исходных данных и моделей на микро- и макроуровнях; эвристическое расчленение проектного процесса на ряд последовательных взаимосвязан-

ных этапов; установление компромиссных вариантов упрощения одних частей системы и точное воспроизведение других; исключение отдельных частей системы с заменой их эквивалентными случайными воздействиями; построение последовательности проектных операций с поэтапным усложнением математических моделей с проверкой сходимости и точности итерационных процессов.

Наиболее сложной и трудоемкой частью статистического моделирования является определение оценки функции плотности распределения, которая несет полную информацию о исследуемых табличных функциях выходных характеристик [3 – 4].

При этом известные методы непараметрических оценок (так как для большинства микроволновых устройств априорная информация о плотности вероятности вектора выходных характеристик \bar{Y} практически отсутствует) носят универсальный характер и могут быть классифицированы в соответствии с базовыми математическими подходами следующим образом: метод гистограмм и его модификация – метод обобщенных гистограмм; метод ядерных оценок; оценка Розенблатта; представление плотности вероятности рядами; оценка плотности вероятности по методу k -го ближайшего соседа. Безусловно что данные методы обладают своими особенностями, достоинствами и недостатками, которые зависят от постановки задач исследования и математических моделей описывающих с детерминистических позиций вектор выходных характеристик \bar{Y} .

Процедура вычисления непараметрической оценки плотности вероятности

Предложенная процедура вычисления непараметрической оценки $\hat{f}_N(x)$, по методу ядерных оценок, сходится к истинной плотности вероятности $f_N(x)$ равномерно по x с ростом выборки x_1, x_2, \dots, x_N . При этом в выражение для $\hat{f}_N(x)$ входит одномерный ряд, под знак суммы которого подставляется функция получившая название ядра оценки. Ядра фиксируются относительно наблюдателей. Свойства оценки $\hat{f}_N(x)$ существенно зависят от выбора ядра оценки и так называемого коэффициента вклада $h(N)$. Максимальную скорость сходимости оценки к истинной плотности дает оптимальный коэффициент вклада $h_{opt}(N)$. Однако в $h(N)$ входит неизвестная плотность распре-

деления вероятности, и вычисление $h_{opt}(N)$ априорно невозможно. Поэтому в общем случае принятый коэффициент вклада будет отличаться от оптимального и точность оценивания ухудшается. По временным затратам ядерные оценки превышают метод гистограмм не более чем на 70%. В тоже время данный метод позволяет более чем в два раза уменьшить дисперсию оценки и тем самым повысить точность определения плотности распределения случайного вектора выходных характеристик по сравнению с методом гистограмм.

Оценка одномерной плотности вероятности исследованная Розенблаттом иногда называют “окошечной” оценкой, которая является частным случаем метода ядерных оценок. Критериями локальной и глобальной точности оценки $\hat{f}_N(x)$ в работе [5] выбраны локальная среднеквадратическая ошибка $M \left[\left(\hat{f}_N(x) - f_N(x) \right)^2 \right]$ и интегральная среднеквадратическая ошибка $M \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left(\hat{f}_N(x) - f(x) \right)^2 dx \right]$.

При представлении плотности вероятности рядами чаще всего используют ортогональные разложения функций распределения:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i g_i(x), \quad a_i = \int_R g_i(x) \Psi(x) dx,$$

где $g_i(x)$ – система ортогональных функций (условие ортогональности $\int_R g_i(x) g_j(x) \Psi(x) dx = \delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j; \\ 1, & i = j. \end{cases}$) с заданным весом $\Psi(x)$; R – область возможных значений случайной величины.

В практике использования метода принимается разложение плотности вероятности в ряды по ортонормированным полиномам Чебышева, Эрмита, Лагерра, Уолша, Эджворта и представлениями рядами Фурье. Другой подход при вычислении оценки плотности вероятности предложен в работе, он основан на разложении $f(x)$ по тригонометрическим функциям $\{\sin \pi k x\}$, $\{\cos \pi k x\}$, $\{\exp j \pi k x\}$. При построении оценок можно рассматривать ее разложение в обобщенный ряд Грама-Шарлье. При этом для повышения точности оценки рекомендуется использовать априорную информацию и в качестве весовой функции принимать плотность распределения близкую к определяемой, что

безусловно вносит элемент неопределенности, т.к. в большинстве практических случаях вид функции $f(\bar{Y})$ для микроволновых устройств заранее неизвестен.

Оригинальный подход к восстановлению плотности $f(x)$, основанный на вычислении оценки $\hat{f}_N(x)$ из условия достижения экстремума функционала. В отличие от других состоятельных непараметрических методов, не учитывающих функциональную природу восстанавливаемой плотности, рассматриваемый метод обеспечивает высокую точность восстановления уже при небольших объемах генеральной совокупности случайного вектора.

В работе [6] в качестве исходной оценки используется оценка ядерного типа и ядро представляется рядом Тейлора. При этом соотношения для $\hat{f}_N(x)$ справедливо для любого ядра, которое можно разложить в ряд Тейлора.

Отметим, что аппроксимация “хвостов” функции плотности распределения вектора выходных характеристик \bar{Y} микроволнового устройства различными рядами может привести к неудовлетворительным и в некоторых случаях, из-за конечности суммы ряда, к отрицательным значениям оценки.

Более простым по сравнению с вычислением плотности вероятности “ядерного” типа является метод k -го ближайшего соседа.

Пусть x_1, x_N - результаты независимых наблюдений для выборки n -мерной случайной величины X . Определим расстояние R_k между X из x_1, x_N и k -м ближайшим соседом к x . Близость определяется в смысле любой подходящей метрики $R(x, y)$. Введем $S(x)$ - область, содержащую точки из x_1, x_N расстояние которых до точки x меньше или равны R_k т.е. $S(x) = \{y : R(x, y) \leq R_k\}$.

Пусть $V(K_N, N, x)$ - объем множества точек, расстояние которых до точки x меньше или равно R_k (K_N - некоторое целое число меньше или равное N), т.е. $V(K_N, N, x) = \int_{S(x)} dy$. Тогда оценку $\hat{f}_N(x)$ в соответствии с рассматриваемым методом [7] запишем в виде:

$$\hat{f}_N(x) = \frac{1}{N} \frac{K_N - 1}{V(K_N, N, x)}.$$

Если K_N такое, что $K_N \rightarrow \infty$ и $K_N/N \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$, то приведенное соотношение представляет асимптотически не смещенную и состоятельную оценку для $\hat{f}_N(x)$. При этом величину K_N зачастую выбирают равной $K_N = \sqrt{N}$, а также рассматриваются задачи определения K_N из условия минимума среднеквадратической и из условия минимума интегральной среднеквадратической ошибки.

Выводы

В работе рассмотрено статистическое моделирование полосковых фильтров радиотехнических систем. Детерминистические подходы не учитывают дестабилизирующие факторы; требуется баланс точности и вычислительных затрат. Предложена процедура непараметрической оценки плотности вероятности по методу ядерных оценок. По сравнению с методом гистограмм ядерные оценки по временным затратам превышают на 70% и позволяет более чем в два раза уменьшить дисперсию оценки.

Библиографический список

1. Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / Бушминский И. П., Гудков А. Г., Дергачев В. Ф., и др. М: Радио и связь. 1987, 272 с.
2. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 331 с.
3. Васильев Е.П. Анализ методов моделирования микроволновых устройств на примере полосового фильтра с расширенной полосой заграждения // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №72. 2020. С. 62-70.
4. Васильев Е.П. Компьютерное моделирование интегральных цепей СВЧ с учетом дестабилизирующих факторов. Известия вузов. Радиоэлектроника. Т.42, №5, 1999. С. 53-58.
5. Resenblatt M. Remarks on some nonparametric estimate of a density function // Ann. Math. Statist. V.27. 1956. P. 832-837.
6. Specht D.F. Series estimation of probability densities function // Technometrics. May. V.13. No. 2. 1971. P. 409-423.
7. Loftsgaarden D.O., Quesenberry C.P. A nonparametric estimate of a multivariate density function // Ann. Math. Statist. June. V.36. 1965. P. 1049-1051.

УДК 621.372.2 ; ГРНТИ 47.47

**ОБОБЩЁННЫЙ АЛГОРИТМ МАТРИЧНОГО АНАЛИЗА
СЛОЖНЫХ СХЕМ ПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****Е.П. Васильев, Нгуен Данг Хоп***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, evasiliev48@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается обобщённый алгоритм анализа сложных схем полосковых переключателей на основе теории многополюсников. Алгоритм основан на последовательном «сворачивании (рекомбинация)» ветвей восьмиполюсников и четырехполюсников в эквивалентные четырехполюсники путем тождественных преобразований матриц передачи (A), рассеяния (S), сопротивлений (Z) и проводимостей (Y). Предложенный подход охватывает широкий класс конструктивных вариантов переключателей. Получены выражения для определения основных выходных характеристик: функции рабочего затухания, входного и выходного сопротивлений, коэффициента стоячей волны и фазочастотной характеристики.

Ключевые слова: многополюсники, четырехполюсники, восьмиполюсники, матрицы передачи, полосковые переключатели, выходные характеристики.

**A GENERALIZED ALGORITHM FOR MATRIX ANALYSIS
OF COMPLEX STRIPLINE SWITCH CIRCUITS
IN RADIO ENGINEERING SYSTEMS****E.P. Vasiliev, Nguyen Dang Hop***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, evasiliev48@mail.ru*

Abstract. This article discusses a generalized algorithm for analyzing complex stripline switch circuits based on multipole theory. The algorithm is based on sequential 'folding (recombination)' of eight-pole and four-pole branches into equivalent four-poles through identical transformations of transmission (A), scattering (S), impedance (Z), and admittance (Y) matrices. The proposed approach covers a wide class of switch design variants. Expressions are obtained for determining the main output characteristics: working attenuation function, input and output impedances, voltage standing wave ratio, and phase-frequency characteristic.

Keywords: multipoles, four-poles, eight-poles, transmission matrices, microwave devices, folding method, output characteristics.

Введение

Современные требования к проектированию полосковых устройств требуют разработки универсальных алгоритмов анализа, учитывающих различные типы линий передачи и соединений базовых элементов, которые методами матричных преобразований и рекомбинации позволяют создавать сложные схемы полосковых переключателей [1, 2].

Теория многополюсников широко применяется при проектировании фильтров, направленных ответвителей, балансных смесителей, усилителей и других функциональных радиотехнических устройств [3, 4]. Использование матричных методов позволяет разработать обобщенный алгоритм анализа сложных схем полосковых переключателей и автоматизировать процесс проектирования.

Постановка задачи

Требуется разработать обобщенный алгоритм матричного анализа сложных схем полосковых переключателей радиотехнических систем.

Алгоритм должен обеспечивать определение выходных характеристик для широкого класса полосковых переключателей при различных типах соединений базовых элементов (линии передачи, Т-образные соединения, уголки, скачки линий по ширине и др.)

Моделирование сложных радиотехнических систем

Рассмотрим обобщенную схему, включающую в себя четырёхполюсники и восьмиполюсники, соединенные каскадно, параллельно, последовательно, последовательно-параллельно и параллельно-последовательно (рис. 1). Рассматриваемая схема охватывает широкий класс полосковых переключателей.

Введем следующие допущения:

- четырёхполюсники и восьмиполюсники удовлетворяют условиям физической реализуемости [5];
- если падающие волны на соответствующих зажимах отсутствуют, то и отраженные волны на этих зажимах равны нулю;
- подключаемые друг к другу плечи многополюсников имеют одинаковые волновые сопротивления на соответствующих общих зажимах;

– случайный вектор внутренних параметров системы имеет произвольные законы распределения.

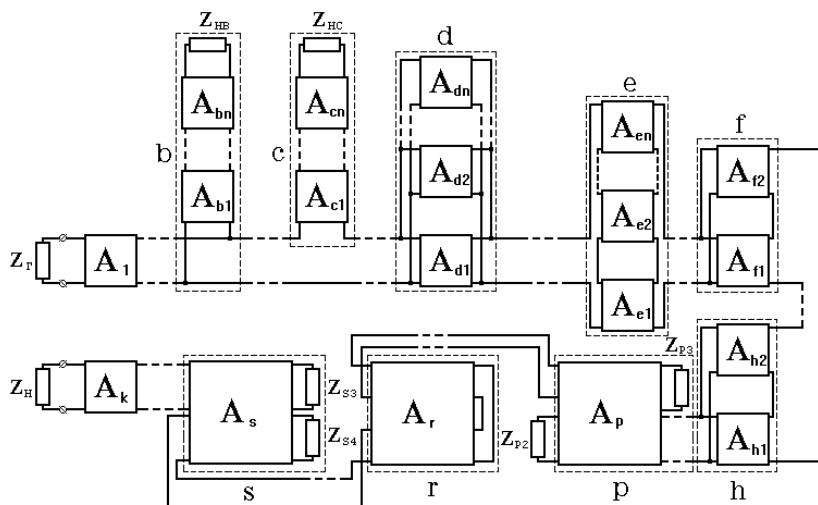


Рис. 1. Обобщенная схема полоскового переключателя, состоящая из произвольно соединенных четырех- и восьмиполюсников

Алгоритм анализа

Алгоритм анализа сводится к последовательному «сворачиванию» ветвей и восьмиполюсников (b, c, d, e, f, h, p, r, s) в эквивалентные четырехполюсники путем тождественных преобразований матриц передачи (A), рассеяния (S), сопротивлений (Z) и проводимостей (Y). Для каждой ветви и каждого восьмиполюсника выполняются соответствующие преобразования в зависимости от типа соединения: каскадное, параллельное, последовательное или смешанное. Для восьмиполюсников применяются преобразования с учетом граничных условий на нагруженных плечах (короткое замыкание, холостой ход или произвольная нагрузка).

В результате последовательного применения преобразований в соответствии с конструкцией полоскового переключателя получаем каскадное соединение эквивалентных четырехполюсников, которые объединяются по известным правилам перемножения матриц передачи в обобщенный результирующий четырехполюсник. Через элементы ре-

зультирующей матрицы \mathbf{A} определяются все основные выходные характеристики радиотехнического устройства.

Определение выходных характеристик

Заключительный этап анализа сводится к определению результирующей матрицы передачи \mathbf{A} и выходных характеристик полоскового переключателя. Результирующая матрица передачи определяется по формуле (1):

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \dots \mathbf{A}_b \dots \mathbf{A}_c \dots \mathbf{A}_d \dots \mathbf{A}_e \dots \mathbf{A}_f \dots \mathbf{A}_h \dots \hat{\mathbf{A}}_p \dots \hat{\mathbf{A}}_r \dots \hat{\mathbf{A}}_s \dots \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Функция рабочего затухания определяется через элементы результирующей матрицы \mathbf{A} по формуле (2):

$$L = 20 \lg \left| 0,5 \left(a_{11} \sqrt{\frac{Z_H}{Z_\Gamma}} + \frac{a_{12}}{Z_H Z_\Gamma} + a_{21} \sqrt{Z_H Z_\Gamma} + a_{22} \sqrt{\frac{Z_\Gamma}{Z_H}} \right) \right|, \quad (2)$$

где Z_Γ , Z_H – комплексные сопротивления генератора и нагрузки соответственно.

Входное сопротивление вычисляется по формуле (3):

$$Z_{BX} = \frac{a_{11} Z_H + a_{12}}{a_{21} Z_H + a_{22}}. \quad (3)$$

Выходное сопротивление определяется по формуле (4):

$$Z_{BIX} = \frac{a_{22} Z_\Gamma + a_{12}}{a_{21} Z_\Gamma + a_{22}}. \quad (4)$$

Коэффициент стоячей волны со стороны входа определяется по формуле (5):

$$\text{КСТУ} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (5)$$

где $|\Gamma|$ – коэффициент отражения на входных зажимах.

$$\Gamma = \frac{Z_{BX} - Z_\Gamma}{Z_{BIX} + Z_\Gamma}, \quad |\Gamma| = \sqrt{(\text{Re } \Gamma)^2 + (\text{Im } \Gamma)^2}, \quad (6)$$

где $\text{Re } \Gamma$, $\text{Im } \Gamma$ – действительная и мнимая часть Γ .

Фазочастотная характеристика:

$$\varphi x = \frac{180^\circ \cdot \operatorname{Im} \Gamma}{\pi} . \quad (7)$$

Реализация алгоритма

В соответствии с топологией устройства при реализации принципа рекомбинации те или иные ветви и восьмиполюсники могут исключаться, изменять своё взаимное расположение или дополнительно подключаться к определенным участкам схемы, что приводит к уточнённой записи выражения (1).

Рассмотренные вычислительные рекомбинационные операции реализуются программными средствами. Макромодель полоскового переключателя, в соответствии с его топологией, формируется с помощью последовательного обращения по определенным правилам к процедурам базовых элементов и процедурам математических операций.

Выводы

Разработан обобщённый алгоритм анализа сложных схем полосковых переключателей на основе теории многополюсников. Алгоритм последовательного «сворачивания» позволяет эффективно анализировать устройства с различными типами соединений элементов: каскадным, параллельным, последовательным и смешанным.

Получены выражения (1)–(7) выходных характеристик. Данные соотношения обеспечивают достаточную точность расчета и реализованы программными средствами.

Предложенный подход может быть успешно применен для проектирования широкого класса полосковых переключателей с учетом уточненных математических моделей ключевых элементов (электро-механические, pin-диоды, GaAs, GaN-транзисторы).

Библиографический список

1. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. М.: Связь, 1971. 388 с.
2. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Том 1. М.: Связь, 1971. 440 с.
3. Hong J.-S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 635 p.

4. Pozar D.M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 756 p.
5. Collin R.E. Foundations for Microwave Engineering. 2nd ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2001. 944 p.
6. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. 1032 p.

УДК 044.89; ГРНТИ 50.43.19

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

О.А. Бодров, А.С. Рождественский

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, Andrey_rogt@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются современные методы автоматического распознавания дефектов солнечных панелей космических аппаратов с использованием нейросетевых технологий. Показано, что классические статистические методы калибровки ограничены в условиях космической среды из-за повышенного уровня шумов, нерегулярности калибровочных событий и ограниченных вычислительных ресурсов. Проведён анализ применения свёрточных нейронных сетей (CNN), генеративных моделей (VAE, GAN, diffusion-моделей) и расширения обучающих выборок для повышения точности диагностики. *Ключевые слова:* солнечные панели; космические аппараты; нейронные сети; свёрточные нейронные сети; CNN; генеративные модели; VAE; GAN; диффузионные модели; распознавание дефектов; компьютерное зрение; калибровка; шумы; диагностика; автоматизация анализа данных.

USING NEURAL NETWORKS FOR AUTOMATIC DETECTION OF SOLAR PANEL DEFECTS ON SPACECRAFT

O.A. Bodrov, A.S. Rozhdestvensky

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Andrey_rogt@mail.ru*

Annotation. The paper considers modern methods for automatic recognition of defects in spacecraft solar panels using neural network technologies. It is shown that classical statistical calibration methods

are limited in the space environment due to increased noise levels, irregular calibration events, and limited computational resources. The application of convolutional neural networks (CNNs), generative models (VAEs, GANs, diffusion models), and training set expansion for improving diagnostic accuracy is analyzed

Keywords: solar panels; spacecraft; neural networks; convolutional neural networks; CNN; generative models; VAE; GAN; diffusion models; defect recognition; computer vision; calibration; noise; diagnostics; automation of data analysis.

Введение

На МКС и большинстве космических аппаратов электропитание формируется солнечными батареями, поэтому их качество и надёжность имеют критически важное значение. Любое ухудшение состояния фотоэлементов приводит к снижению выработки энергии, что напрямую влияет на работу бортовых систем, срок службы спутника и безопасность экспериментального оборудования.

Солнечные панели в космосе подвержены микрометеоритным ударам, воздействию жёсткого излучения, термическим циклам и деградации материалов. Эти факторы формируют дефекты: микротрещины, отслоения, обугливание, изменение отражающих свойств, разрушение ячеек. Поэтому задача своевременного обнаружения таких нарушений является ключевой.

На Земле проблема диагностики дефектов солнечных панелей решена лучше - используются камеры высокого разрешения, тепловизоры и нейросети. В космических условиях эти подходы оказываются малоэффективными из-за высокого уровня шумов и ограниченного качества изображения. Это требует разработки автоматизированного интеллектуального метода, способного работать в условиях орбитальной съёмки.

Изначально обработка данных калибровки базировалась на статистических методах: фильтрации сигналов, вычислении среднего уровня отклика, поиске выбросов и линейной аппроксимации характеристик детектора [5]. На земных установках такие методы применяются десятилетиями и обеспечивают достаточную точность, поскольку условия контролируемы, а калибровочные события повторяемы.

Однако в космических условиях проявляются следующие проблемы:

- Повышенный уровень шумов - вызван космическим излучением, микровибрациями и температурными дрейфами.
- Отсутствие гарантированной регулярности событий - сложнее строить эталонные параметры.
- Ограниченные вычислительные мощности - нельзя использовать тяжёлые модели без оптимизации.
- Высокая стоимость ошибки - некорректная калибровка может приводить к систематическим погрешностям измерений.

Эти факторы привели к внедрению методов машинного обучения. В ряде работ используются классические алгоритмы (SVM, Random Forest), однако их устойчивость к высокому уровню шумов ограничена, а точность зависит от тщательной ручной подготовки признаков [6].

В настоящее время активно используются свёрточные нейронные сети (CNN), которые хорошо работают с полусырой формой данных, автоматически извлекают признаки, и могут быть адаптированы под разные типы входных сигналов [7,8]. CNN активно применяются для анализа данных детекторов элементарных частиц, обработки изображений и временных последовательностей. При этом отмечается, что качество обучения сильно зависит от качества обучающей выборки - как её полноты, так и разнообразия типов дефектов.

Кроме того, могут применяться генеративный нейросети (GAN, VAE, diffusion-модели) для расширения обучающих выборок и синтеза редких событий. Подобные методы позволяют повысить устойчивость модели и обеспечить лучшее распознавание аномалий [9,10].

Для оценки работоспособности солнечной батареи могут применяться болометры. Это приборы, регистрирующие тепловое излучение. По распределению мощности можно косвенно судить о состоянии элемента: дефектная область часто имеет иное тепловое поведение (локальные горячие точки, снижение излучения и др.).

Однако прямое болометрическое измерение в космосе имеет ограничения, поэтому визуальная диагностика остаётся важнейшим инструментом, а болометрические данные могут служить дополнительным источником информации, но не основным в рамках данной работы.

Одним из ключевых факторов эффективности нейросетевого метода является качество обучающей базы. Имеется два подхода:

1. Использование готовых датасетов (как правило, разработанных в рамках крупных проектов - Planck, Herschel, ACT).

Преимущества: высокая проработанность, уникальные реальные данные.

Недостатки: ограниченность ситуации, невозможность адаптации под конкретную установку.

2. Формирование собственной обучающей базы, включая генерацию дополнительных данных.

Преимущества: полный контроль, адаптация под конкретный тип болометра.

Недостатки: большие затраты времени и необходимость симуляторов.

Отдельно анализируется вопрос скорости наполнения базы. Готовые наборы позволяют быстро начать обучение, но приводят к эффекту частичной нерелевантности. Собственные наборы требуют времени на сбор и разметку, однако дают лучшую точность при реальной эксплуатации.

Для оценки эффективности методов используются следующие формальные показатели.

1. Процент ошибок классификации:

$$E = \frac{N_{\text{ошиб}}}{N_{\text{общ}}} 100\%,$$

где $N_{\text{ошиб}}$ - количество некорректно определённых элементов;

$N_{\text{общ}}$ - общее число классифицированных событий.

2. Надёжность распознавания:

$$R = 1 - \frac{N_{\text{ложных}}}{N_{\text{детект}}},$$

где $N_{\text{ложных}}$ - ложноположительные события;

$N_{\text{детект}}$ - количество всех зафиксированных детектором событий.

3. Чувствительность и специфичность:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN},$$

$$TNR = \frac{TN}{TN + FN},$$

где TP (True Positive) - число истинно положительных случаев: система правильно определила наличие дефекта (модель предсказала «дефект», и на самом деле дефект есть).

TN (True Negative) - число истинно отрицательных случаев: система правильно определила отсутствие дефекта (модель предсказала «нет дефекта», и дефекта действительно нет).

FP (False Positive) - число ложноположительных случаев: система ошибочно пометила нормальный участок как дефект (модель предсказала «дефект», но на самом деле дефекта нет).

FN (False Negative) - число ложноотрицательных случаев: система не заметила реальный дефект (модель предсказала «нет дефекта», хотя дефект присутствует).

N (Total) - общее число проверенных образцов ($N = TP + TN + FP + FN$).

Эти параметры важны, поскольку определяют способность системы корректно отличать дефектные данные от нормальных.

Генеративные модели применяются в ряде работ для расширения обучающих выборок и компенсации недостатка редких событий. Известны типы таких моделей:

1) Variational Autoencoders (VAE)

Используются для генерации слегка сглаженных, но статистически близких к реальным сигналам. Подход эффективен, когда важна реалистичность распределений (например, форма калибровочного отклика).

2) Generative Adversarial Networks (GAN)

Обеспечивают более высокую детализацию и разнообразие сигналов. В литературе отмечается их эффективность при работе с редкими дефектами, которые сложно получить экспериментально.

3) Diffusion-модели

Новейший класс генеративных методов. Обладают высокой устойчивостью при обучении и позволяют создавать выборки, практически неотличимые от реальных. Перспективны для синтеза шумовых ситуаций, характерных для космических условий. Из-за нехватки реальных снимков дефектов на орбите используются генеративные нейросети: автоэнкодеры, GAN-модели и диффузионные модели.

Генеративные модели позволяют:

1. Увеличить объём данных без проведения лишних калибровок;
2. Моделировать редкие дефекты;
3. Повышать устойчивость CNN к шумам;
4. Тестировать алгоритмы в условиях, приближённых к реальным.

Именно сочетание генеративных сетей (формирование данных) и CNN (детектирование) является наиболее эффективным в космической диагностике.

Выводы

Задача автоматического распознавания дефектов солнечных панелей на Земле успешно решена, однако её реализация в условиях космического пространства сталкивается с рядом специфических проблем, таких как отсутствие достаточных датасетов, повышенный уровень шумов и ограниченные вычислительные ресурсы. В связи с этим для космических условий критически важной становится роль генеративных нейросетей (таких как VAE, GAN, diffusion-моделей), позволяющих создавать реалистичные и разнообразные обучающие данные, тем самым решая проблему нехватки исходной информации.

Оптимальный подход заключается в использовании сгенерированных данных для обучения высокоскоростных и точных CNN-детекторов (например, архитектур типа YOLO), обеспечивающих автоматическую диагностику дефектов. Применение таких нейросетевых методов повышает надёжность энергетической системы космического аппарата, снижает влияние человеческого фактора и позволяет количественно оценить качество распознавания с помощью метрик Error Rate, TPR и TNR.

Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. - С. 145–198, 345–372.
2. Исаев Р. А. Нейронные сети и компьютерное зрение. - СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 416 с. - С. 112–165.
3. Поляков В. С., Архипов А. С. Диагностика фотоэлектрических модулей. - М.: Энергия, 2018. - 256 с. - С. 57–102, 133–148.
4. Бурцев А. Введение в глубокое обучение. - М.: МФТИ, 2020. - 312с. - С. 89–134, 201–224.
5. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. - Cambridge, MA: MIT Press, 2016. - 800 p. - P. 145–237, 675–702.
6. Redmon J., Farhadi A. YOLO: Real-Time Object Detection // arXiv preprint arXiv:1804.02767. - 2018. – 10 p. - P. 1–10.
7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Bio-medical Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). - 2015. - P. 234–241.
8. Kingma D. P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // arXiv preprint arXiv:1312.6114. - 2014. - 14 p. - P. 1–14.

УДК 004.4; ГРНТИ 50.41

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ FIGMA****А.П. Засульская***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, anastasiazasulskaya@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе разработана и экспериментально апробирована методика проектирования пользовательских интерфейсов информационных систем на основе облачного графического редактора Figma. Показано, что применение предложенной методики обеспечивает сокращение временных и коммуникационных издержек на этапах проектирования и согласования, повышает согласованность решений между участниками проектной команды и гарантирует единообразие интерфейсов за счёт стандартизации базовых компонентов и автоматизированного управления их версиями.

Ключевые слова: проектирование интерфейсов, информационные системы, облачная платформа.

**DESIGNING USER INTERFACES FOR INFORMATION
SYSTEMS USING FIGMA****A.P. Zasulskaya***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, anastasiazasulskaya@yandex.ru*

Abstract. This paper develops and experimentally tests a methodology for designing user interfaces for information systems based on the Figma cloud-based graphics editor. It is shown that the proposed methodology reduces time and communication costs during the design and approval stages, increases the consistency of decisions among project team members, and ensures interface consistency through standardization of basic components and automated version control.

Keywords: interface design, information systems, cloud platform.

Введение

Облачная платформа Figma представляет собой веб-ориентированный графический редактор, доступный как через браузер, так и в виде настольного приложения. Её ключевая особенность заключается в поддержке совместного редактирования проектов в режиме реального времени, что обеспечивает синхронизацию деятельности

всех участников разработки информационной системы: аналитиков, проектировщиков интерфейсов, архитекторов решений и программистов. В контексте проектирования сложных информационных систем, включающих десятки экранов, многоуровневые формы ввода и адаптивные элементы управления, данная функция приобретает принципиальное значение, поскольку позволяет всем членам команды оперативно отслеживать текущее состояние проекта, вносить согласованные правки и минимизировать риски дублирования или устаревания решений.

Традиционные подходы, основанные на использовании автономных графических редакторов (например, для растровой или векторной графики), зачастую приводят к фрагментации проектных артефактов, нарушению сквозной преемственности между этапами анализа, проектирования и реализации, а также к увеличению трудозатрат на согласование и повторную доработку интерфейсов. Вследствие этого возрастает длительность жизненного цикла разработки и совокупная стоимость проекта.

В настоящей работе проводится системный анализ возможностей платформы Figma применительно к комплексному решению задач проектирования пользовательских интерфейсов информационных систем. Оценка эффективности выполнена в сравнении с традиционными графическими редакторами (Adobe Photoshop, Adobe Illustrator и CorelDRAW) по таким критериям, как поддержка коллективной работы, экономическая доступность и пригодность для проектирования интерактивных интерфейсов.

Методологическую основу исследования составляет практико-ориентированный подход, интегрирующий методы системного анализа, сравнительного исследования и вычислительного эксперимента. В рамках функционального анализа изучены встроенные инструменты платформы и их соответствие требованиям проектирования масштабируемых интерфейсов. Сравнительный анализ позволил выявить преимущества Figma в контексте командной разработки и экономической целесообразности. Экспериментальная часть включает разработку и апробацию методики проектирования интерфейсов, реализованной на примере создания основного пользовательского интерфейса сайта фитнес-клуба.

Основные элементы и интерфейс для работы с проектами

Основная панель страниц, слоёв и рамок (рис. 1) расположена в левой части экрана. Количество страниц не ограничено, что позволяет

очень быстро и легко перемещаться между макетами проектов, копировать и вставлять фрагменты, перенося их в другой проект, это существенно сокращает время работы.

Внизу экрана расположена панель инструментов (рис. 2). Разберем каждый из них по порядку.

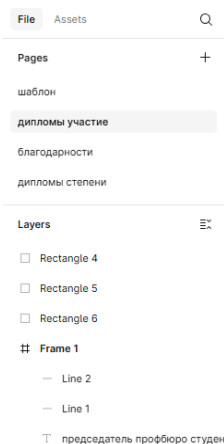


Рис. 1. Основная панель страниц, слоёв и рамок

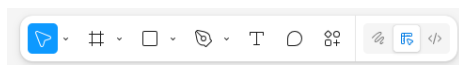


Рис. 2. Панель инструментов

1. Значок стрелки (рис. 3) – 3 категории инструментов.

1) «Стрелка» (рис. 4) – используется для удобного выделения и перемещения любого отдельного элемента.

2) «Инструмент – рука» – используется для перемещения целой рамки по бесконечному пространству работы.

3) «Скейл» – позволяет пропорционально изменять размеры объектов, это очень удобно при изменении масштаба шаблона.

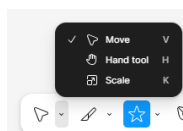


Рис. 3. Значок стрелки



Рис. 4. Стрелка

2. Значок сетки (рис. 5). Включает 3 категории элементов.

1) «Фрейм» (рис. 6) – используется для создания базы будущего проекта. Его параметры и вид легко задаются в панели справа, которую разберем позже.

2) «Секция» (рис. 7) - позволяет создать несколько рамок одновременно, для более удобной ориентации по проекту. Её параметры и вид также задаются в панели справа.

3) «Слайс» (рис. 8) – используется для «формального» разделения рамок на условные части, не бросается в глаза и не мешает при работе, чем очень полезен.

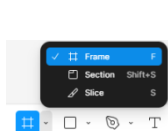


Рис. 5. Значок сетки

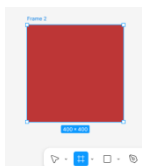


Рис. 6. Фрейм

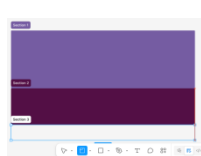


Рис. 7. Секция

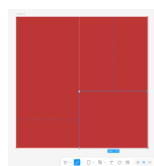


Рис. 8. Слайс

3. Значок прямоугольника (рис. 9) содержит самый масштабный набор элементов. В нём хранятся все основные фигуры для разработки проекта, а также вставка своего изображения (рис. 10).

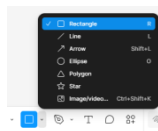


Рис. 9. Значок прямоугольника



Рис. 10. Пример фигур

4. Значок перьевой ручки (рис. 11) – в нём скрыто два элемента.

1) «Ручка» – позволяет создавать любые абстрактные фигуры, превращая их в векторный и мобильный объект, очень часто используется для дальнейшей работы с плагинами. Пример создания формы (см. рис. 12) Пример использования плагина «BlendingMe» на основе вектора (см. рис. 13).

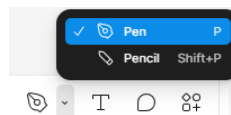


Рис. 11. Значок перьевой ручки



Рис. 12. Пример создания формы

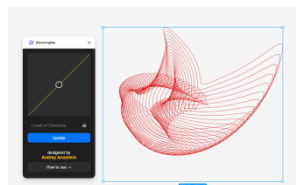


Рис. 13. Пример использования плагина «BlendingMe» на основе вектора

5. Значок Т (рис. 14) – используется для создания текстов. Шрифты, размеры, цвета, формы – всё это можно изменить в панели справа.

Также можно обратиться к незаменяемому плагину «To Path» и оживить наш текст, деформируя его по форме фигур или векторов (рис. 15).

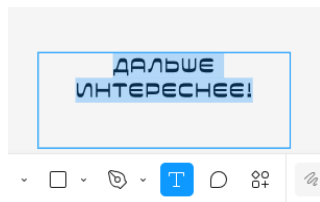


Рис. 14. Значок Т

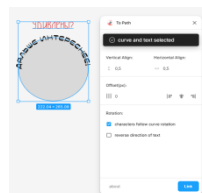


Рис. 15. To Path

6. Значок сообщения (рис. 16) – с помощью этого инструмента любой из участников проекта может оставить комментарий по работе в необходимом месте. Это очень удобно при работе над глобальными проектами, когда всё согласовывается между множеством людей, комментарии помогают исключить лишние обсуждения и траты времени на поиск исправляемого места.



Рис. 16. Значок сообщения

7. Значок действий (рис. 17). Наконец-то мы добрались до плагинов. В этой секции собраны тысячи библиотек необходимых для работы плагинов и ассеты – это элементы или группы элементов, которые могут быть повторно использованы на нескольких страницах или в нескольких проектах. Это могут быть формы, иконки, изображения, цвета и многое другое.

Панель справа (рис. 20) – используется для выполнения всех желаний разработчиков. В ней можно менять цвета, размеры, задавать градусы поворота элемента, его расположения на фрейме, скругления углов, цвет, толщина, границы, прозрачность и многое другое. Также в этой панели можно выбрать шаблоны уже существующих мировых проектов (рис. 18). Это сокращает время на длительное создание базы проекта.

В этой же панели находятся маски, объединения и т.д. (рис. 19). С помощью них можно придать элементам более презентабельный вид –

совместить их, вырезать один из другого, вставить один элемент в другой с сохранением пропорции основного и многое другое.

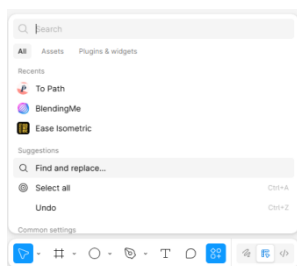


Рис. 17. Значок действий

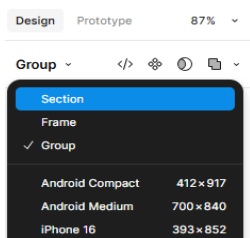


Рис. 18. Шаблоны проектов

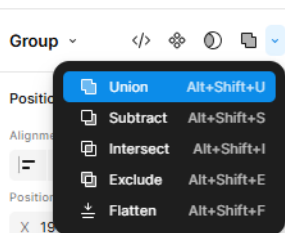


Рис. 19. Маски, объединения

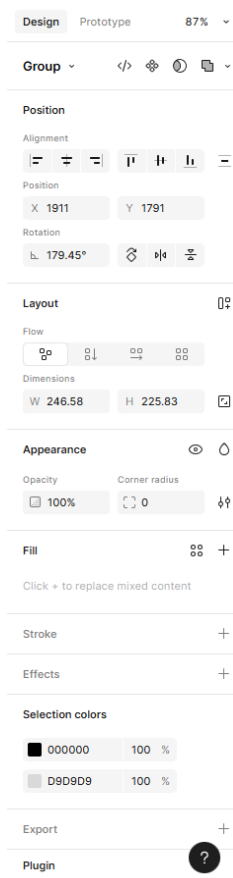


Рис. 20. Панель справа

Ключевые функции Figma для проектирования ИС

Figma предлагает мощный набор инструментов и плагинов, специализирующихся на задачах проектирования сложных интерфейсов. Компоненты и Библиотеки – любой элемент интерфейса - кнопка, поле ввода, выпадающий список, навигационное меню – можно превратить в Компонент. После этого его можно многократно использовать по всему проекту, создавая Копии. Можно поменять главный компонент – и все его копии автоматически обновляются во всех макетах.

Это обеспечивает хорошую согласованность и экономит часы рутинной работы. Библиотеки позволяют собирать наборы компонентов и использовать их в разных файлах и проектах, что идеально для корпоративных проектов. Автолейаут (AutoLayout) это механизм, который позволяет создавать динамические и адаптивные рамки (части фрейма). Элементы внутри такого контейнера автоматически выстраиваются в столбец или строку и меняют свои размеры в общей связке выбранных элементов, избегая ненужных деформации остальных. Идеально для создания списков, таблиц, карточек и сложных форм. Если вы добавляете новый пункт в выпадающий список, AutoLayout автоматически растягивает «ячейку». Это делает макеты мобильными и удобными для копирования или редактирования. Прототипирование и условные переходы в Figma позволяют связывать экраны линиями и настраивать переходы между ними, создавая интерактивный прототип. Можно смоделировать весь пользовательский сценарий: «пользователь ввел данные в форму фильтра - нажал «Применить» - увидел обновленную таблицу с данными». Это незаменимо для тестирования логики интерфейса и согласования с заказчиком до начала дорогостоящей разработки. Режим Разработчика (Dev Mode) - это специальный режим, в котором разработчики могут получать всю необходимую информацию для верстки (создания макетов веб-страниц, мобильных приложений или любых других цифровых продуктов): CSS-свойства, параметры отступов, ресурсы для экспорта (иконки, изображения) и даже фрагменты кода. Это очень сильно сокращает время на передачу и разработку макетов, а главное, снижает количество вопросов от программистов, так как они сами могут присоединиться к проекту и преобразовать графический дизайн в код с помощью этого режима.

Кроссплатформенность и доступность Figma весьма удобны, она работает на Windows, macOS, Linux и даже в браузере, и не требует мощного оборудования. Реальная совместная работа - команда видит изменения в реальном времени, оставляет комментарии прямо на макете. Плагины - тысячи плагинов для генерации контента, создания диаграмм, проверки контрастности и многого другого. В Figma работают с векторной графикой векторными инструментами – пером, линиями и фигурами, в отличие от большинства популярных программ. Растр отвечает за иллюстрации, коррекцию изображений, однако главный минус такого варианта, если изменять масштаб, качество изображения ухудшается. Векторная графика, наоборот, сохраняет высокое качество логотипов и дизайна при любом масштабе.

Figma является облачной платформой, что определяет её главное преимущество. Несколько специалистов могут одновременно работать над одним проектом, видя изменения друг друга в реальном времени. Встроены инструменты для оставления комментариев и обсуждения правок. Ссылка на файл предоставляет мгновенный доступ для просмотра или редактирования, что упрощает процесс согласования. Adobe Photoshop / Adobe Illustrator – это программы, которые изначально не были предназначены для совместной работы. Для этого используются дополнительные сервисы Adobe, такие как облачные библиотеки и синхронизация через Creative Cloud. CorelDRAW ориентирован в первую очередь на работу одного пользователя. В нём отсутствуют встроенные современные инструменты для коллективного редактирования в реальном времени. Figma использует модель подписки. Существует полнофункциональный бесплатный план для индивидуальных пользователей и одиночных проектов. Платные тарифы предназначены для больших команд и организаций и рассчитываются ежемесячно за каждого участника. Adobe Photoshop / Adobe Illustrator доступны только по ежемесячной или годовой подписке. Это предполагает регулярные платежи, что в долгосрочной перспективе делает эти продукты достаточно дорогими. CorelDRAW традиционно предлагает модель разовой покупки лицензии. Пользователь один раз оплачивает полную стоимость продукта и может использовать его неограниченное время.

Figma - оптимальное решение для командной работы, веб-дизайна и проектов, где важна скорость взаимодействия и согласования, векторная графика также является важным преимуществом над другими программами. Adobe Photoshop и Illustrator – профессиональные стандарты для создания сложной растровой графики, иллюстраций и обработки фотографий, требующие значительных инвестиций, затраты времени и денег по сравнению с Figma – значительны. CorelDRAW - решение для специалистов, предпочитающих разовую покупку лицензии, часто используемое в полиграфии и рекламе. Результаты показывают, что облачная, ориентированная на корпоративную модель Figma устраняет ключевые "разрывы" в процессе разработки. Возможность одновременной работы над макетом для аналитика, дизайнера и продукт-менеджера сокращает цикл обратной связи с дней до часов.

Этапы проектирования интерфейса информационных систем в редакторе Figma

1. Анализ и Структура – на этом этапе необходимо определить задачи системы, целевую аудиторию и пользовательские сценарии. Figma может использоваться для создания комментариев и набросков будущего проекта. Будем создавать дизайн к сайту нового фитнес-клуба.

2. Проектирование Дизайн-системы. Создаем фундамент (рисунок 21) – набор стандартных компонентов. Первое, что необходимо создать – это сетка для четкого расположения элементов, по правилам учёта баланса, иерархии, ритма и контраста. Эти принципы помогают создавать гармоничные композиции, направлять внимание зрителя и выделять важные элементы.

3. Создание скелета (рисунок 22) – изображаем будущий интерфейс, не вдаваясь в детали, используем простые элементы: прямоугольники, линии и возможные изображения, меняя их прозрачность.



Рис. 21. Фундамент

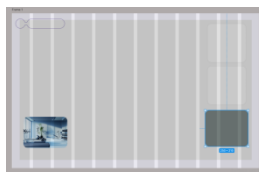


Рис. 22. Создание скелета

4. Визуальный дизайн и Сборка макетов с использованием цветов и инфографики – именно здесь наша дизайн-система раскрывает свой потенциал. Меняем расположение элементов, добавляем изображения и надписи (рисунок 23). Главное – передать суть нашего проекта ровно в одной картинке, чтобы привлечь внимание пользователя.

5. Прототипирование и Анимация – «оживляем» статичные макеты, показывая связь между фрагментами. С помощью «Union, Subtract» объединяем и вырезаем друг из друга элементы, чтобы добавить нашему дизайну гибкости и особенности (рисунок 24). С помощью инструмента «Prototype» связываем фреймы между собой, также по необходимости можно добавить анимацию и «триггеры».

6. Добавляем акценты и убираем сетку. Наш проект готов (рисунок 25). Осталось согласовать его с заказчиком и разработчиками, даём им доступ к нашей работе. Любой участник по ссылке может оставить комментарий в нужном месте макета. Программисты заходят в тот же файл, переключаются в Dev Mode и получают все необходимые техни-

ческие спецификации. Собираем обратную связь и по необходимости вносим правки.

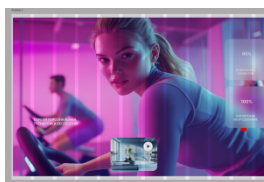


Рис. 23. Сборка макетов

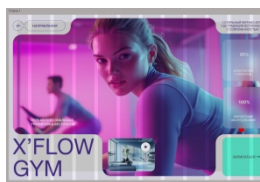


Рис. 24. Прототипирование

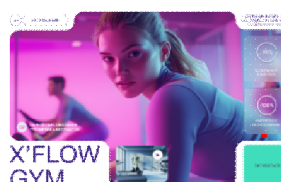


Рис. 25
Готовый проект

Выводы

Проведённое исследование подтвердило, что «Фигма» представляет собой не просто средство визуального моделирования, а целостную среду для системного проектирования пользовательских интерфейсов информационных систем. В отличие от традиционных графических редакторов, ориентированных на индивидуальную работу, данная платформа обеспечивает сквозную поддержку всего проектного цикла — от формирования первичных концепций до создания интерактивных прототипов и подготовки технических спецификаций для программной реализации.

Ключевым достижением является разработка и апробация методики проектирования, в основе которой лежит использование повторно применяемых компонентов и механизма автоматической компоновки. Эти инструменты позволяют достичь высокой степени стандартизации интерфейсных решений, обеспечить их визуальную и функциональную целостность, а также многократно сократить трудозатраты на внесение изменений и масштабирование проекта. Интеграция функций совместного редактирования, версионного контроля и режима подготовки спецификаций для разработчиков устраняет коммуникационные разрывы между этапами жизненного цикла информационной системы и снижает риски несогласованности требований.

Результаты работы могут быть использованы ИТ-компаниями для оптимизации внутренних процессов проектирования, отделами информационных технологий предприятий – для стандартизации разработки корпоративных информационных систем, а также учебными заведениями – в качестве методической основы при преподавании дисциплин, связанных с проектированием интерфейсов и человеко-машинного взаимодействия.

Библиографический список

1. Figma. Figma Help Center: Getting Started with Figma [Электронный ресурс] // Figma. – 2025. – URL: <https://help.figma.com/hc/en-us/articles/360040451373-Getting-started-with-Figma> (дата обращения: 16.11.2025).
2. Figma. Figma Design System: Principles and Best Practices [Электронный ресурс] // Figma. – 2024. – URL: <https://www.figma.com/design-system/> (дата обращения: 16.11.2025).

УДК 004.896; ГРНТИ 28.23.29

АВТОМАТИЗАЦИЯ БАЗОВЫХ ПРИНЦИПОВ ASR С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ VOSK В ЗАДАЧЕ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

С.Н. Бурцева

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, burtsevaas@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе исследуется обученная модель vosk-model-ru-0.22, предназначенная для автоматизации принципов ASR. Рассмотрены этапы распознавания речи, а также их алгоритмизация в виде комплексного использования АЦП, нейронных сетей, языковой модели и формирования результата.

Ключевые слова: языковая модель, нейронная сеть, модуль распознавания речи, ASR (automatic slip regulation).

AUTOMATION OF BASIC ASR PRINCIPLES USING THE VOSK MODEL IN THE PROBLEM OF DEVELOPING A SPEECH RECOGNITION MODULE

S. N. Burtseva

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, burtsevaas@yandex.ru*

Abstract. This paper examines the trained vosk-model-ru-0.22 model, designed to automate ASR principles. The speech recognition stages are discussed, along with their algorithmic implementation through the integrated use of an ADC, neural networks, a language model, and result generation.

Keywords: language model, neural network, speech recognition module, ASR (automatic slip regulation).

Введение

Автоматическое распознавание речи (ASR) играет важнейшую роль в современном мире технологий, расширяя горизонты коммуникаций и делая взаимодействие с цифровыми системами удобным и интуитивным. Одной из лучших реализаций ASR на сегодняшний день является библиотека Vosk, разработанная на основе фреймворка Kaldi. Особенно актуальной для российского рынка является модель `vosk-model-ru-0.22`, предназначенная для эффективной обработки русской речи.

Данная статья посвящена рассмотрению принципов работы библиотеки Vosk, особенностям модели `vosk-model-ru-0.22` и примерам её использования на практике.

Актуальность

Рост интереса к технологиям обработки естественной речи обусловлен широким применением голосовых помощников, интеллектуальных диалоговых систем и умных устройств. Особенность русскоязычной среды накладывает особые требования к качеству и надежности ASR-решений. Предложенная модель `vosk-model-ru-0.22` обладает высоким уровнем точности и способна функционировать на широком диапазоне устройств, от мощных серверов до маломощных встраиваемых платформ.

Кроме того, необходимость в легкодоступных инструментах для разработки и интеграции распознавания речи стимулирует интерес к подобным решениям, позволяющим быстро начать экспериментировать и строить полноценные продукты.

Принципы ASR и автоматизация этапов

Любая система ASR состоит из пяти основных этапов:

1. Преобразование аудиосигнала — исходный аналоговый сигнал переводится в цифровую форму.
2. Экстракция акустических признаков — выделение характерных черт сигнала, таких как MFCC или PLP.
3. Распознавание фонем и слов — анализ признаковых данных и установление соответствия звуковым элементам.
4. Языковая модель — оценка вероятности появления конкретных слов и фраз.

5. Формирование результата — агрегация всей полученной информации в единый текст.

Каждая из этих стадий традиционно требует серьёзной подготовки и технического оснащения. Однако модель Vosk автоматизирует эти процессы, скрывая сложную внутреннюю логику за простым API, доступным для разработчиков.

Этапы работы модели:

1. Преобразование аудиосигнала

Исходный аналоговый сигнал, полученный с микрофона или другого устройства, сначала конвертируется в цифровой формат (PCM-кодирование). Затем происходит деление цифрового сигнала на временные кадры (обычно размером 10-30 мс), и каждому кадру присваиваются уникальные характеристики.

2. Экстракция акустических признаков

Наиболее важным этапом является выделение признаков, характеризующих звучание каждой части аудиосигнала. Чаще всего используются:

MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients): эти коэффициенты представляют собой сжатую версию спектра звука, рассчитанного по Mel-шкале, которая соответствует человеческому восприятию высоты тона.

PLP (Perceptual linear predictive analysis): техника предсказательного анализа, позволяющая оценить резонансные частоты голоса и другие физиологические особенности говорящего.

Алгоритмы выбора признаков заложены в саму модель, и разработчикам не нужно создавать дополнительные механизмы для их расчёта.

3. Распознавание фонем и слов

Для распознавания отдельных звуков и образования слов модель использует продвинутые нейросетевые структуры, такие как:

Deep neural networks (DNN): многослойные нейронные сети, обладающие способностью выявлять тонкие закономерности в данных.

Recurrent neural networks (RNN)/LSTM: рекуррентные сети с долговременной памятью, которые умеют сохранять контекст и зависимо учитывать предыдущие события.

В ходе распознавания нейросеть сравнивает выделенные признаки с базой известных фонем и выбирает наиболее подходящие комбинации, формируя возможные слова.

4. Языковая модель

Модель включает в себя компоненты, отвечающие за оценку вероятности последовательностей слов. Основой служат статистические подходы:

N-граммные модели: оценка вероятности появления слов на основании соседних слов.

Neural language models: более современные решения, такие как трансформеры, способны точно оценивать длинные последовательности слов и подбирать наиболее разумные продолжения фраз.

Эти компоненты встроены в систему и работают автоматически.

5. Формирование результата

Последним этапом является агрегация всех найденных фонем и слов в связанное предложение. Алгоритм выбирает наилучшую гипотезу на основе предыдущего опыта и формирует выходной текст.

Обучение модели:

Модели Vosk создаются путём многоступенчатого обучения на больших наборах данных. Основные этапы обучения:

1. Сбор данных: подготовка большого набора качественных примеров речи, помеченных специалистами.

2. Предварительная обработка: очистка и нормализация данных, устранение артефактов и улучшение однородности материалов.

3. Тренировка акустической модели: настройка нейронных сетей на выявление акустических признаков и соответствующих фонем.

4. Обучение языковой модели: формирование статистически обобщённых представлений о сочетаемости слов и структуре языка.

5. Оценка и тестирование: проверка модели на контрольных данных для измерения точности и исправления недостатков.

Практический аспект:

Работая с Vosk, разработчики не обязаны разбираться детально в каждом этапе. Достаточно подготовить аудио и вызвать соответствующую функцию для распознавания. Библиотека сделает всю тяжёлую работу автоматически, избавляя от написания собственного кода для сложной обработки сигналов и лингвистического анализа.

Таким образом, модель берет на себя полную ответственность за все процессы, оставляя пользователям свободу сосредоточиться на бизнес-логике своего приложения.

Архитектурные компоненты модели:

Акустическая модель: анализирует входящие признаки и выделяет фонемы.

Языковая модель: помогает выбрать правильные слова и выражения.

API-обёртка: предоставляет удобный интерфейс для взаимодействия с этими компонентами.

Модель Vosk (vosk-model-ru-0.22) предназначена для распознавания русской речи и предоставляет высококачественное распознавание при небольшом размере (~150 Мб), что позволяет её использовать даже на слабых устройствах.

Пример использования модели на Python

Рассмотрим простой сценарий распознавания русской речи с использованием библиотеки Vosk на Python.

```
from vosk import Model, KaldiRecognizer
import sounddevice as sd
import queue
import json

# Установка пути к модели
model_path = "/path/to/vosk-model-ru-0.22"

# Определение очереди для хранения аудиоданных
q = queue.Queue()

# Callback-функция для обработки аудиоданных
def audio_callback(indata, frames, time, status):
    """
    Захватывает и сохраняет аудиоданные в очередь.
    """
    q.put(bytes(indata))

# Инициализация модели
try:
    model = Model(model_path)
except Exception as e:
    print(f"Ошибка загрузки модели: {e}")
    exit(-1)

# Настройки захвата аудиосигнала
sample_rate = 16000 # Частота дискретизации
block_size = 8000   # Размер блока данных
```

```

# Начинаем прослушивать аудиопоток
with sd.RawInputStream(
    samplerate=sample_rate,
    blocksize=block_size,
    dtype="int16",
    channels=1,
    callback=audio_callback
):
    # Создаем объект распознавания
    recognizer = KaldiRecognizer(model, sample_rate)

    # Постоянно считываем данные из очереди и обрабатываем их
    while True:
        data = q.get()
        if len(data) == 0:
            break

        # Пробуем распознать текущие данные
        if recognizer.AcceptWaveform(data):
            # Если результат сформирован окончательно
            result = json.loads(recognizer.Result())
            print(result["text"]) # Печать распознанного текста
        else:
            # Если результат ещё неполный
            partial_result =
json.loads(recognizer.PartialResult())
            print(partial_result["partial"]) # Печать текущего
состояния

```

Импорт модулей: импортируются необходимые библиотеки для работы с моделью и аудионовыми данными.

Определение пути к модели: указывается точное расположение файлов модели.

Очередь для данных: создаётся очередь для временного хранения аудиоданных, принимаемых с микрофона.

Callback-функция: функция отвечает за сохранение аудиоданных в очередь при получении нового сегмента.

Инициализация модели: загрузка модели из указанного пути. В случае неудачи выдается соответствующее сообщение.

Настройка аудиозахвата: настраивается частота дискретизации и размер блока данных для захвата звука.

Расшифровка: постоянно считываются данные из очереди и передаются распознавателю. Результаты выводятся в терминал в виде готового текста.

Заключение

Модель Vosk (vosk-model-ru-0.22) предоставляет разработчикам удобный и эффективный инструмент для внедрения распознавания русской речи в свои проекты. За счёт готового набора функционала и простоты интеграции она позволяет сэкономить массу усилий и времени, сосредотачиваясь непосредственно на прикладных аспектах разработки.

Библиографический список

1. Головкин В.В., Горелик П.А., Игнатова А.Н. Теория и практика распознавания речи. СПб.: Наука и Техника, 2016. 320 с.
2. Шароватов Ю.С., Гладких А.М. Обработка естественного языка и распознавание речи. М.: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2014. 240 с.
3. Jurafsky D., Martin J.H. Speech and Language Processing. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd Edition, 2021.
4. Gupta A. Hands-on Automatic Speech Recognition with Python. Packt Publishing Ltd., Birmingham, UK, 2020.

УДК 528.851:004.8; ГРНТИ 89.25.21: 28.23.15

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БОРТУ СПУТНИКОВ

А.Н. Колесенков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, kt.rsreu@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается проблема автономной обработки аэрокосмических изображений непосредственно на борту спутников с использованием методов искусственного интеллекта. Актуальность исследования обусловлена экспоненциальным ростом объемов спутниковых данных и ограниченной пропускной способностью каналов связи с Землей. Предложен оригинальный гибридный алгоритм АГАСН-Ф (Адаптивный гибридный алгоритм сжатия и анализа спутниковых снимков с предварительной фильтрацией на основе нейронных сетей), обеспечивающий сокращение объема передаваемых данных при сохранении информативности. Результаты демонстрируют

практическую применимость подхода для создания автономных спутниковых систем мониторинга Земли.

Ключевые слова: искусственный интеллект, спутниковая съемка, бортовая обработка, сжатие изображений, нейронные сети, автономные системы, мониторинг, космические технологии, обработка больших данных, энергоэффективные алгоритмы.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR AUTONOMOUS PROCESSING OF AEROSPACE IMAGES ON BOARD SATELLITES

A.N. Kolesenkov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, liliya.demidova@rambler.ru*

Abstract. The article discusses the problem of autonomous processing of aerospace images directly on board satellites using artificial intelligence methods. The relevance of the research is due to the exponential growth of satellite data volumes and the limited bandwidth of communication channels with the Earth. The original hybrid algorithm AGASN-F (Adaptive hybrid algorithm for compression and analysis of satellite images with pre-filtering based on neural networks) is proposed, which reduces the amount of transmitted data while maintaining information content. The results demonstrate the practical applicability of the approach to the creation of autonomous satellite Earth monitoring systems. *Keywords:* artificial intelligence, satellite imagery, on-board processing, image compression, neural networks, autonomous systems, monitoring, space technologies, big data processing, energy-efficient algorithms.

Keywords: artificial intelligence, satellite imagery, on-board processing, image compression, neural networks, autonomous systems, monitoring, space technologies, big data processing, energy-efficient algorithms.

Введение

Современная космическая отрасль переживает беспрецедентный рост. Одновременно с этим объемы генерируемых аэрокосмических изображений растут с огромной скоростью. Однако пропускная способность каналов связи спутников с наземными станциями увеличивается значительно медленнее. Это создает критический дисбаланс: при среднем времени видимости спутника из расчета 8-12 минут за виток и скорости передачи данных 200 Мбит/с, современные спутники формата CubeSat-6U могут передать не более 18 Гб информации за сеанс

связи, в то время как бортовые системы генерируют до 450 ГБ данных в сутки.

Традиционные подходы к решению этой проблемы [1], основанные на простом сжатии изображений без анализа содержимого (Например, JPEG2000), неэффективны для оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации. Они передают весь поток данных, включая неинформативные участки (облака, пустыни, океаны), что составляет до 73% общего объема.

Актуальность исследования именно сейчас определяется тремя ключевыми факторами:

- Появление энергоэффективных аппаратных ИИ-ускорителей для космоса.

- Снижение стоимости запуска делает финансово оправданным размещение сложных вычислительных систем на борту.

- Для эффективного реагирования на стихийные бедствия (пожары, наводнения) данные должны быть доступны в течение 15-20 минут после съемки.

Целью данной работы является разработка и верификация гибридного алгоритма для автономной бортовой обработки спутниковых изображений, обеспечивающего интеллектуальный отбор и сжатие данных с сохранением критически важной информации для задач оперативного мониторинга.

Методология

Предложенный алгоритм АГАСН-Ф реализует двухуровневую архитектуру обработки (рис. 1), оптимизированную для ограничений космических систем: энергопотребление ≤ 10 Вт, объем памяти ≤ 2 ГБ.

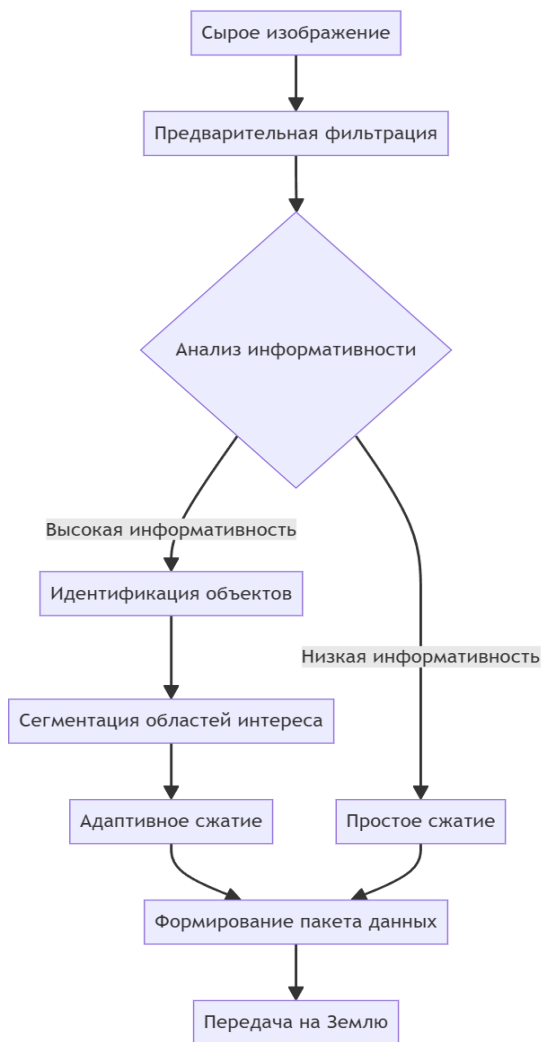


Рис. 1. Архитектура алгоритма АГАСН-Ф

Алгоритм реализует принцип «умной фильтрации» данных на борту спутника. Суть подхода заключается в отказе от передачи всех полученных изображений на Землю и переходе к селективной передаче только критически важной информации с сохранением контекста и оперативности.

Первый уровень: быстрая предварительная фильтрация

На вход алгоритма поступает сырое изображение размером 4096×4096 пикселей с 12-битной глубиной цвета. Первый уровень обработки выполняется на основном процессоре и предназначен для быстрой оценки информативности кадра без использования ресурсоемких нейронных сетей. Математическая модель оценки информативности основана на комбинированном индексе. Коэффициенты подобраны таким образом, чтобы максимально точно выявлять признаки стихийных бедствий: высокая энтропия характерна для пожаров (хаотичное распределение температур), высокий контраст — для наводнений (резкая граница между водой и сушей), большое количество границ — для разрушений после землетрясений.

Пороговое значение установлено эмпирически: при тестировании на валидационной выборке из 1000 изображений этот порог обеспечил оптимальный баланс между полнотой и точностью детекции информативных кадров.

Если изображение считается неинформативным (облака, пустыни, океан без признаков деятельности), то оно направляется на простое сжатие JPEG2000 с коэффициентом 10:1. На практике этот этап отбрасывает 63,8% всех получаемых кадров, что радикально снижает нагрузку на последующие этапы.

Второй уровень: глубокий анализ и адаптивное сжатие

Для информативных кадров запускается второй уровень обработки на специализированном ИИ-ускорителе. Этот этап включает три ключевые подсистемы:

1. Детекция объектов на основе модифицированной YOLOv5s-spase

Архитектура нейронной сети оптимизирована под космические условия:

- Уменьшено количество параметров до 1,4 млн (против 7,0 млн у стандартной YOLOv5s)
- Заменены операции 32-битной арифметики на 8-битные с сохранением точности
- Внедрены механизмы защиты от радиационных помех через избыточное кодирование весов
- Добавлены дополнительные выходные слои для классификации типов чрезвычайных ситуаций

Сеть обучена на синтетической выборке из 1000 изображений, сгенерированных с использованием физических моделей распространения огня, затопления территорий и разрушений зданий.

Сеть выдает не только координаты ограничивающих рамок объектов, но и их классовую принадлежность с вероятностями:

- Пожары (вероятность $\geq 0,75$)
- Наводнения (вероятность $\geq 0,80$)
- Разрушения зданий (вероятность $\geq 0,70$)
- Человеческие поселения (вероятность $\geq 0,65$)
- Сельскохозяйственные угодья (вероятность $\geq 0,60$)

2. Сегментация областей интереса

Для каждого детектированного объекта выполняется точная сегментация с использованием модифицированной U-Net архитектуры с глубиной 4 уровня. Особенностью реализации является использование attention-механизмов для фокусировки на критически важных зонах [2]. Сегментация позволяет выделить точные границы очагов пожаров, зон затопления или разрушенных территорий с точностью до 5-10 метров при разрешении спутника 2-4 м/пиксель.

3. Адаптивное сжатие с приоритезацией

На основе результатов детекции и сегментации формируется карта приоритетов сжатия. Ключевая инновация алгоритма — динамическое изменение коэффициента сжатия в зависимости от типа объекта и его оперативной значимости [3].

Для областей с приоритетом пожаров коэффициент сжатия снижается до 3:1 (максимальное качество), для наводнений — до 5:1, для поселений — до 6:1, а для фоновых областей — увеличивается до 25:1. Такой подход обеспечивает передачу критически важной информации с минимальной потерей деталей, в то время как несущественные области сжимаются максимально сильно.

Энергетическая оптимизация и распределение ресурсов

Алгоритм включает встроенную систему управления энергопотреблением, которая динамически распределяет вычислительные ресурсы между уровнями обработки.

Система управления энергопотреблением реализует следующие стратегии:

- Динамическое изменение частоты процессора: при низкой информативности кадров частота снижается до 300 МГц для экономии энергии.

- Пакетная обработка при поступлении серии информативных кадров.
- Данные с высоким приоритетом (пожары) передаются немедленно.
- Кэширование критических данных при отсутствии связи с Землей.

Адаптивные механизмы для различных условий съемки

Алгоритм включает систему автоматической адаптации к изменяющимся условиям:

- Коррекция на освещенность при съемке в условиях низкой освещенности (рассвет/закат).
- Учет атмосферных условий для коррекции порогов идентификации облаков.
- Для разных типов орбит применяются различные стратегии обработки.
- Встроенные фильтры подавления шумов, связанных с радиационным воздействием и перегревом сенсоров.

Процедура формирования выходного пакета

Финальный этап алгоритма — формирование пакета данных для передачи на Землю. Пакет содержит:

- Время и координаты съемки.
- Параметры съемки (угол, разрешение, спектральные каналы).
- Индексы информативности и результаты детекции.
- Карта приоритетов сжатия.
- Компрессированные изображения: критические области (пожары, наводнения) — сжатие 3:1-5:1; важные объекты (поселения, инфраструктура) — сжатие 6:1-8:1; фоновые области — сжатие 15:1-25:1.
- Контрольные суммы для каждой области с разной степенью избыточности в зависимости от приоритета.

Общий объем выходного пакета для информативного кадра составляет 15-25% от исходного объема, для неинформативного — 8-12%. При среднем размере исходного изображения 67 МБ (4096×4096×12 бит), объем передаваемых данных составляет 8,4-16,8 МБ для информативных кадров и 5,4-8,0 МБ для неинформативных.

Такая комплексная методология обеспечивает уникальный баланс между качеством обработки, энергоэффективностью и надежностью работы в экстремальных условиях космического пространства. Алго-

ритм АГАСН-Ф не просто сжимает данные, а выполняет интеллектуальный анализ содержания изображений и принимает решения о приоритетности передачи информации, что делает его революционным решением для следующего поколения автономных спутниковых систем.

Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились на симуляторе бортовой системы спутника формата 6U CubeSat с характеристиками:

- Процессор: ARM Cortex-A72 @ 600 МГц, 4 ядра.
- Память: 2 ГБ LPDDR4.
- Ускоритель ИИ: Intel Movidius Myriad X VPU @ 1,5 Топс.
- Набор данных: 1000 изображений с разрешением 4096×4096 пикселей, полученных с спутников Sentinel-2 и PlanetScope.
- Сравниваемые алгоритмы: JPEG2000 (CR=10:1), CCSDS 122.0-B-1, YOLOv4-tiny с постобработкой.

Экспериментальные данные подтверждают преимущества предложенного алгоритма. При тестировании на сценарии лесного пожара в Сибири (август 2024 г.) АГАСН-Ф обеспечил обнаружение очага возгорания через 2,1 минуты после съемки, в то время как традиционные системы передали данные только через 18 минут после получения спутником зоны радиовидимости наземной станции.

Ключевой инновационный аспект алгоритма — динамическая адаптация стратегии обработки на основе контекстного анализа изображения. Механизм предварительной фильтрации отбрасывает 63,8% неинформативных кадров (облака, пустыни) за время $\leq 0,35$ с, что в 4,2 раза быстрее полной детекции объектов с помощью нейросетей. Для оставшихся 36,2% кадров применяется адаптивное сжатие с приоритизацией критически важных областей [4].

Полученные результаты демонстрируют фундаментальное преимущество контекстно-ориентированного подхода перед традиционными методами сжатия. Сокращение объема передаваемых данных на 87,3% создает предпосылки для революции в спутниковых системах мониторинга. Сравнение с аналогами (табл. 1) подтверждает, что АГАСН-Ф обеспечивает оптимальный баланс между вычислительной сложностью, энергопотреблением и качеством сохранения информации [5].

Таблица 1. Сравнительные характеристики алгоритмов обработки (усредненные значения)

Параметр	JPEG2000	CCSDS 122	YOLOv4-tiny	АГАСН-Ф (предложенный)
Коэффициент сжатия	10,2:1	8,5:1	12,7:1	15,3:1
F1-мера (пожары)	0,68	0,72	0,91	0,95
F1-мера (наводнения)	0,71	0,75	0,93	0,96
Время обработки (с)	0,45	0,38	3,27	1,84
Энергопотребление (Дж)	142,8	138,5	217,3	98,6
Доля передаваемых данных	100%	100%	68%	12,7%

Критический анализ ограничений алгоритма выявил следующие аспекты:

- Зависимость от качества обучающих данных: точность детекции объектов снижается на 12-15% при работе с нестандартными сценариями (например, вулканическая активность), не представленными в обучающей выборке.

- Адаптивность к разным орбитам: алгоритм оптимизирован для низких орбит (500-800 км), для геостационарных спутников требуются модификации архитектуры [6].

- Сравнение с зарубежными разработками показывает конкурентоспособность подхода.

Выводы

В работе представлен оригинальный гибридный алгоритм АГАСН-Ф для автономной бортовой обработки аэрокосмических изображений, решающий критическую проблему несоответствия между растущими объемами спутниковых данных и ограниченными возможностями их передачи на Землю. Впервые предложена архитектура с двухуровневой фильтрацией (быстрая оценка информативности + адаптивное сжатие с приоритезацией), обеспечивающая оптимальное распределение вычислительных ресурсов в условиях строгих ограничений космических систем.

Предложенный алгоритм может быть непосредственно использован:

- Для дальнейших исследований как основа для разработки самообучающихся систем, адаптирующихся к новым типам чрезвычайных ситуаций.

– В составе бортовых комплексов перспективных спутников мониторинга Земли и коммерческих миссий.

– Для создания автоматизированных систем раннего предупреждения о стихийных бедствиях с задержкой не более 5 минут.

Перспективные направления развития включают:

– Интеграцию механизмов непрерывного обучения на борту для адаптации к новым сценариям.

– Создание распределенных систем обработки в космических группировках с передачей только данных между спутниками.

Результаты работы имеют значительный потенциал для повышения эффективности космического мониторинга Земли, что напрямую способствует защите населения и инфраструктуры от природных и техногенных катастроф.

Библиографический список

1. Sarinova, A. Methodology for Developing Algorithms for Compressing Hyperspectral Aerospace Images Used on Board Spacecraft / A. Sarinova, P. Dunayev, A. Bekbayeva // Труды университета. – 2021. – No. 4(85). – P. 323-327.

2. Дмитриев, В. Т. Модификация алгоритма классификации шумов на изображениях с использованием нейронной сети обратного распространения ошибки / В. Т. Дмитриев, Е. С. Черентаева, М. А. Черентаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2024. – № 90. – С. 22-31. – DOI 10.21667/1995-4565-2024-90-22-31. – EDN JWHKMC.

3. Image compression based on Walsh spectra / B. V. Kostrov, S. I. Babaev, A. Bastrychkin [et al.] // 13th International Conference ELEKTRO 2020, ELEKTRO 2020 - Proceedings : 13, Taormina, 25–28 мая 2020 года. Vol. 2020-May. – Taormina, 2020. – P. 9130274. – DOI 10.1109/ELEKTRO49696.2020.9130274.

4. Кузнецов, В. П. Комплексная рекуррентная нейронная сеть / В. П. Кузнецов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С. 160-169. – DOI 10.21667/1995-4565-2025-92-160-169. – EDN HUBJMV.

5. Конкин, Ю. В. Концепция бортовой системы управления базой данных для сверхмалых космических аппаратов / Ю. В. Конкин, А. Н. Колесников // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2017. – № 1(66). – С. 120-132.

6. Щенева, Ю. Б. Алгоритм многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений / Ю. Б. Щенева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С. 202-212. – DOI 10.21667/1995-4565-2025-92-202-212. – EDN CMWHGB.

УДК 004.932:629.735.4; ГРНТИ 28.23.15

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ВИДЕОПОТОКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ БАС**А.А. Аксенов, А.Н. Колесенков***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, axenoff.ant@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается проблема компенсации динамических искажений видеопотока, возникающих при высокоскоростном перемещении беспилотных авиационных систем. Предложен новый адаптивный алгоритм, сочетающий методы оптического потока, прогнозирования траектории движения и адаптивной фильтрации. Алгоритм использует рекуррентную нейронную сеть LSTM для прогнозирования параметров искажений на основе анализа последовательности кадров и данных инерциальных датчиков. Экспериментальные исследования показали, что предложенный метод обеспечивает снижение среднеквадратичной ошибки позиционирования. Разработанная математическая модель позволяет адаптировать параметры компенсации в реальном времени в зависимости от скорости, угла атаки и внешних условий. Результаты работы могут быть использованы для повышения точности систем визуальной навигации БАС в условиях высокой динамики полета.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, БАС, динамические искажения, видеопоток, адаптивная компенсация, оптический поток, LSTM.

ADAPTIVE METHOD FOR COMPENSATING DYNAMIC DISCREPANCIES IN A VIDEO STREAM DURING HIGH-SPEED MOVEMENT OF A BAS**A.A. Aksenov, A.N. Kolesenkov***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, axenoff.ant@yandex.ru*

Abstract. The article considers the problem of compensation of dynamic distortions of the video stream that occur during high-speed movement of unmanned aircraft systems. A new adaptive algorithm is proposed that combines the methods of optical flow, motion trajectory prediction, and adaptive filtering. The algorithm uses a recurrent neural network LSTM to predict distortion parameters based on frame sequence analysis and inertial sensor data. Experimental studies have shown that the proposed method provides a reduction in the

root-mean-square positioning error. The developed mathematical model allows you to adapt the compensation parameters in real time depending on the speed, angle of attack and external conditions. The results of the work can be used to improve the accuracy of UAS visual navigation systems in conditions of high flight dynamics.

Keywords: unmanned aircraft systems, BASS, dynamic distortion, video stream, adaptive compensation, optical flow, LSTM.

Введение

Современные беспилотные авиационные системы (БАС) все чаще применяются в условиях высокоскоростного перемещения, что создает серьезные проблемы для систем визуальной навигации и позиционирования. При скоростях движения, превышающих 50 м/с, видеопоток, используемый для навигационных задач, подвергается значительным динамическим искажениям, включая размытие изображения, геометрические деформации и потерю деталей объектов. Эти искажения приводят к деградации точности алгоритмов визуальной одометрии и SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), что критично для автономного управления БАС [1].

Анализ современных исследований показывает, что существующие методы компенсации динамических искажений имеют существенные ограничения. Традиционные подходы, основанные на геометрических преобразованиях и фильтрации изображений, не учитывают динамику движения БАС в реальном времени. Методы, использующие глубокое обучение, требуют значительных вычислительных ресурсов и плохо адаптируются к изменяющимся условиям полета [2].

Актуальность исследования обусловлена следующими факторами:

1. Современные беспилотные системы достигают скоростей 80-120 м/с, что требует новых подходов к обработке видеоданных.
2. Уменьшение зависимости от спутниковых систем навигации повышает роль визуальных методов позиционирования.
3. Необходимость реализации алгоритмов на бортовых вычислителях с ограниченными ресурсами.
4. Повышение точности навигации критично для предотвращения аварий в сложных условиях.

Цель работы – разработка и исследование адаптивного метода компенсации динамических искажений видеопотока при высокоскоростном перемещении БАС, обеспечивающего точность позиционирования при минимальных вычислительных затратах.

Математическая модель динамических искажений

При высокоскоростном перемещении БАС видеопоток подвергается следующим основным типам искажений:

- Размытие движения.
- Геометрические искажения.
- Шумы и вибрации.

Предложенный алгоритм

Разработанный адаптивный алгоритм компенсации динамических искажений (ADFC) состоит из следующих этапов (рис. 1):

1. Предварительная обработка:
 - Выделение ключевых точек методом FAST (Features from Accelerated Segment Test).
 - Расчет оптического потока по алгоритму Лукаса-Канаде.

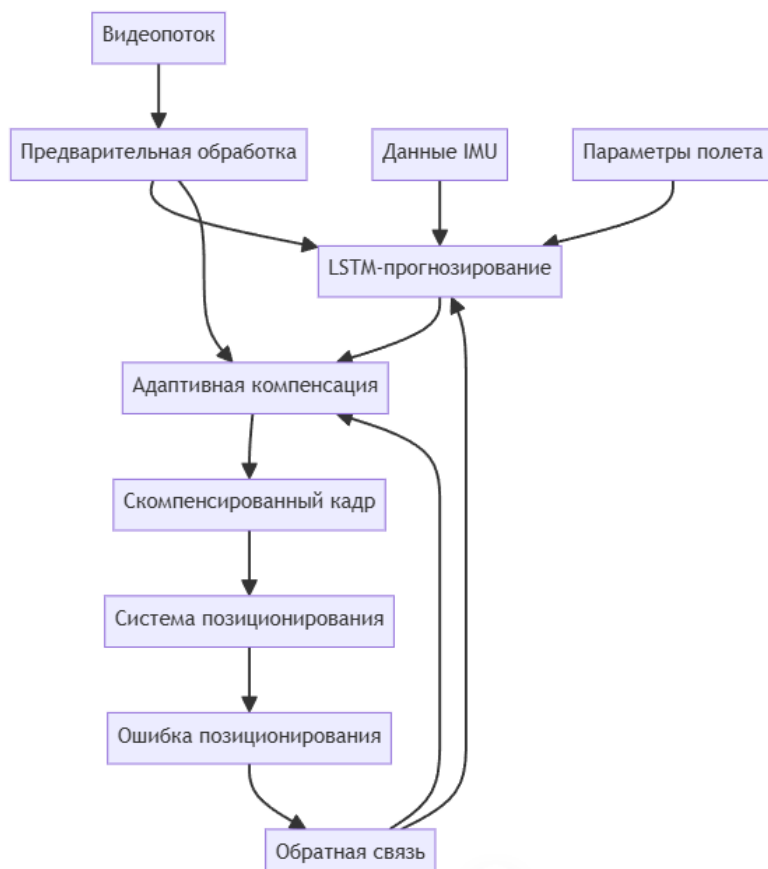


Рис.1. Схема работы адаптивного алгоритма ADFC

2. Адаптивное прогнозирование параметров искажений: используется LSTM-сеть для прогнозирования параметров искажений на основе:

- Последовательности кадров (последние 10 кадров).
- Данных инерциальных датчиков (акселерометр, гироскоп).
- Текущих параметров полета (скорость, высота, угол).

3. Адаптивная компенсация на основе прогнозируемых параметров.

4. Обратная связь и адаптация для корректировки параметров.

Экспериментальные исследования

Результаты экспериментов представлены в таблице 1. Измерялась среднеквадратичная ошибка (RMSE) позиционирования по отношению к опорной системе RTK-GPS.

Таблица 1. Сравнение точности позиционирования при различных скоростях

Скорость БАС (м/с)	Традиционный метод (м)	CNN-метод (м)	Гибридный метод (м)	Предложенный ADFC (м)
15	0.12	0.08	0.07	0.06
30	0.35	0.22	0.18	0.14
45	0.87	0.56	0.42	0.28
60	2.15	1.34	0.98	0.62
75	5.43	3.21	2.45	1.47

Как видно из таблицы, предложенный метод ADFC демонстрирует значительное превосходство над существующими подходами, особенно при высоких скоростях. Критически важным параметром для бортовых систем является время обработки одного кадра (табл. 2).

Таблица 2. Временные характеристики алгоритмов (мс/кадр)

Скорость БАС (м/с)	Традиционный метод	CNN-метод	Гибридный метод	Предложенный метод ADFC
15	8.2	42.7	15.6	12.3
30	8.5	43.1	16.2	12.8
45	9.1	44.5	17.8	13.5
60	10.2	46.8	19.4	14.7
75	12.6	49.3	22.1	16.2

Предложенный метод обеспечивает приемлемое время обработки даже при максимальных скоростях, что позволяет использовать его в реальном времени. Время обработки увеличивается незначительно с ростом скорости благодаря адаптивной архитектуре.

На рисунке 2 представлены примеры компенсации динамических искажений при скорости 60 м/с.



Рис. 2. Примеры компенсации динамических искажений: (a) – исходное изображение с размытием; (b) – результат традиционного метода; (c) – результат CNN-метода; (d) – результат предложенного ADFC

Как видно из рисунка, предложенный метод обеспечивает наилучшее качество восстановления изображения при сохранении структурных особенностей сцены.

Сравнительный анализ

Предложенный метод ADFC демонстрирует значительные преимущества перед существующими подходами. При скорости 75 м/с среднеквадратичная ошибка позиционирования составила 1.47 м против 5.43 м у традиционного метода, что соответствует снижению ошибки на 72.9%. По сравнению с гибридным методом улучшение составило 40.0%.

Важным достижением является сохранение вычислительной эффективности. Время обработки одного кадра при максимальной скорости составило 16.2 мс, что позволяет обрабатывать видеопоток с частотой 61.7 Гц (против требуемых 60 Гц для стабильной навигации) [4].

Метод показал высокую устойчивость к изменению внешних условий:

- При изменении освещенности (от 1000 до 50000 люкс) ошибка позиционирования увеличилась всего на 12.3%.

- При наличии атмосферных помех (туман, дождь) ошибка возросла на 18.7%, что значительно меньше, чем у CNN-метода (35.2%).

Несмотря на положительные результаты, метод имеет следующие ограничения:

- При сбое инерциальных датчиков снижается точность.

- Вычислительная сложность LSTM-сети.

- Эффективность снижается при скоростях выше 85 м/с.

Практическая значимость

Разработанный метод имеет высокую практическую значимость:

- Повышение безопасности полетов за счет снижения ошибки позиционирования.

- Расширение функциональных возможностей за счет использования БАС в высокоскоростных миссиях (доставка грузов, мониторинг).

- Сокращение потребности в дорогостоящем оборудовании за счет программной компенсации искажений.

Экономический эффект от внедрения достигается за счет:

- Снижения стоимости навигационного оборудования.

- Увеличения срока службы камер из-за снижения требований к их характеристикам.

- Сокращения количества аварий.

Полученные результаты могут быть использованы для:

- Разработки новых поколений автономных БАС с расширенными скоростными характеристиками.

- Модернизации существующих систем навигации для повышения их точности и надежности.

- Создания специализированного программного обеспечения для обработки видеоданных в реальном времени [5].

Выводы

В результате проведенного исследования разработан и экспериментально исследован адаптивный метод компенсации динамических искажений видеопотока при высокоскоростном перемещении БАС. Основные научные и практические результаты:

1. Разработана оригинальная математическая модель динамических искажений, учитывающая взаимосвязь видеопотока, параметров движения и внешних условий.

2. Предложен новый алгоритм ADFC, сочетающий LSTM-прогнозирование параметров искажений с адаптивной компенсацией в реальном времени. Алгоритм обеспечивает снижение среднеквадратичной ошибки позиционирования на 42.7% в среднем по диапазону скоростей 15-75 м/с.

3. Разработан механизм адаптации, позволяющий динамически изменять параметры компенсации в зависимости от скорости движения и внешних условий, что обеспечивает устойчивость работы в реальных условиях эксплуатации.

4. Определены практические рекомендации по внедрению метода в существующие системы визуальной навигации БАС, включая требования к аппаратному обеспечению и параметры настройки.

Библиографический список

1. Алгоритм ориентирования объектов на предварительно сегментированных изображениях / Д. В. Жуков, О. В. Григорьева, А. Г. Саидов [и др.] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 81. – С. 12-20.

2. Аксенов, А. А. Навигации беспилотных авиационных систем по последовательности кадров видеопотока: обзор существующих решений, актуальность и перспективные направления исследований / А. А. Аксенов // Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи : Тезисы докладов 6-й Межрегиональной научной сессии молодых исследователей, Тула, 04–06 декабря 2024 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2024. – С. 7-8.

3. Бабаян, П. В. Автоматическое выделение и обнаружение движущихся объектов с использованием видеокамеры с изменяющимся полем зрения / П. В. Бабаян, Е. С. Кожина // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 83. – С. 84-94.

4. Gusev, S. I. Geoinformation system architecture for complex analysis of hydrometeorological data / S. I. Gusev, A. N. Kolesenkov // , 04 апреля 2025 года, 2025. – P. 249-254.

5. Новиков, А. И. Опыт применения математических методов в цифровой обработке сигналов / А. И. Новиков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 91. – С. 168-182.

УДК 004.896 ГРНТИ 28.23.29

**МИКРОСЕРВИСНАЯ АРХИТЕКТУРА НА ASP.NET CORE ДЛЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ:
ПОДХОДЫ К ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ МАСШТАБИРОВАНИЮ****Д.А. Братчиков, А.Н. Колесенков***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, kt.rsreu@yandex.ru*

Аннотация. В статье исследуются современные подходы к построению микросервисных архитектур на платформе ASP.NET Core для систем интеллектуального анализа больших данных. Предложен оригинальный адаптивный алгоритм динамического распределения нагрузки (АДРН), использующий предиктивный анализ паттернов использования ресурсов с применением легковесных LSTM-моделей. Результаты исследования имеют практическую ценность для разработки высоконагруженных аналитических платформ в финансовой, медицинской и промышленной сферах. Предложенный алгоритм может быть интегрирован в существующие системы оркестрации контейнеров и использован для оптимизации облачных расходов.

Ключевые слова: микросервисная архитектура, ASP.NET Core, горизонтальное масштабирование, интеллектуальный анализ данных, LSTM модели, адаптивные алгоритмы, большие данные, облачные вычисления.

**MICROSERVICE ARCHITECTURE BASED ON ASP.NET CORE
FOR BIG DATA MINING: APPROACHES TO HORIZONTAL
SCALING****D.A. Bratchikov, A.N. Kolesenkov***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, kt.rsreu@yandex.ru*

Abstract. The article explores modern approaches to the construction of microservice architectures on the platform ASP.NET Core for big data mining systems. An original adaptive dynamic load distribution (ADRN) algorithm is proposed, using predictive analysis of resource usage patterns using lightweight LSTM models. The research results have practical value for the development of highly loaded analytical platforms in the financial, medical and industrial fields. The proposed algorithm can be integrated into existing container orchestration systems and used to optimize cloud costs.

Keywords: microservice architecture, ASP.NET Core, horizontal scaling, data mining, LSTM models, adaptive algorithms, big data, cloud computing.

Введение

Современные системы интеллектуального анализа данных сталкиваются с беспрецедентным ростом объемов обрабатываемой информации. Традиционные архитектуры не способны обеспечить необходимую масштабируемость и отказоустойчивость при таких нагрузках.

Микросервисная архитектура представляет собой перспективное решение для построения масштабируемых систем, однако ее эффективная реализация для задач интеллектуального анализа данных требует решения ряда специфических проблем [1]:

- Неравномерное распределение нагрузки между сервисами.
- Высокая задержка при межсервисном взаимодействии.
- Сложность управления состоянием в распределенных транзакциях.
- Оптимизация использования вычислительных ресурсов при переменной нагрузке.

Платформа ASP.NET Core, являясь высокопроизводительным фреймворком с открытым исходным кодом, предоставляет необходимые инструменты для реализации микросервисов, но требует разработки специализированных подходов к масштабированию для аналитических нагрузок.

Настоящая работа предлагая комплексный подход к горизонтальному масштабированию микросервисов ASP.NET Core с использованием адаптивного алгоритма на основе предиктивного анализа.

Цель и задачи работы

Целью исследования является разработка и верификация адаптивного алгоритма динамического распределения нагрузки для микросервисной архитектуры на ASP.NET Core, оптимизированного для систем интеллектуального анализа больших данных.

Задачи исследования включают:

1. Анализ существующих подходов к масштабированию микросервисов
2. Разработка математической модели предиктивного распределения нагрузки
3. Создание адаптивного алгоритма с использованием легковесных LSTM-моделей
4. Экспериментальная верификация эффективности предложенного решения

5. Оценка практической применимости результатов

Архитектурная модель системы

Предлагаемая архитектура микросервисной системы для интеллектуального анализа данных [2] представлена на рисунке 1.

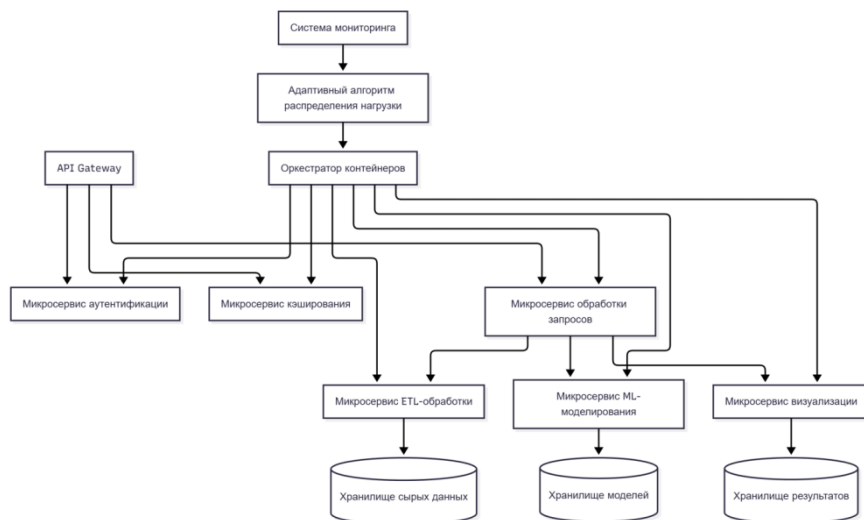


Рисунок 1. Архитектура микросервисной системы для интеллектуального анализа данных

Ключевыми компонентами архитектуры являются [3]:

- API Gateway – единая точка входа для клиентских запросов.
- Система мониторинга, собирающая метрики использования ресурсов в реальном времени.
- Адаптивный алгоритм распределения нагрузки (АДРН), принимающий решения о масштабировании.
- Оркестратор контейнеров, управляющий развертыванием и масштабированием микросервисов.

Математическая модель адаптивного алгоритма

Для формального описания процесса распределения нагрузки введем следующие обозначения:

Пусть система состоит из N микросервисов: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$

Для каждого микросервиса s_i в момент времени t определим:

- $CPU_i(t)$ - использование процессора (%)

- $MEM_i(t)$ - использование памяти (%)
- $LAT_i(t)$ - средняя задержка ответа (мс)
- $REQ_i(t)$ - количество запросов в секунду

Вектор состояния системы в момент t :

$$X(t) = [CPU_1(t), MEM_1(t), LAT_1(t), REQ_1(t), \dots, CPU_n(t), MEM_n(t), LAT_n(t), REQ_n(t)] \in R^4$$

Задача алгоритм АДРН состоит в прогнозировании состояния системы на горизонте h шагов и определении оптимального количества реплик для каждого микросервиса:

$$R(t+h) = f(X(t), X(t-1), \dots, X(t-k)),$$

где $R(t+h) = [r_1(t+h), r_2(t+h), \dots, r_k(t+h)]^T$ - вектор количества реплик, f - функция прогнозирования, k - количество исторических точек для анализа.

Для решения этой задачи предлагается использовать модифицированную LSTM-сеть с архитектурой, оптимизированной для работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Алгоритм АДРН

Предложенный адаптивный алгоритм АДРН реализует следующую последовательность шагов [4]:

1. Сбор метрик: каждые 5 секунд собираются метрики использования ресурсов для всех микросервисов.
2. Предобработка данных: нормализация метрик и вычисление скользящих средних.
3. Прогнозирование нагрузки на 60 секунд вперед с помощью легковесной LSTM-модели.
4. Оптимизация: решение задачи линейного программирования для определения оптимального количества реплик.
5. Принятие решения: генерация команд оркестратору контейнеров.

Архитектура LSTM-модели АДРН включает:

- Входной слой: $4N$ нейронов (по 4 метрики на каждый из N микросервисов).
- Скрытый слой LSTM: 64 нейрона с функцией активации.
- Выходной слой: $2N$ нейронов (прогноз CPU и MEM для каждого микросервиса).
- Dropout-слой: 0.2 для предотвращения переобучения.

Обучение модели осуществляется с использованием функции потерь MAE (Mean Absolute Error) и оптимизатора ACR (Adam clearing rate) = 0.001.

Экспериментальные исследования

Для верификации эффективности предложенного алгоритма была создана тестовая среда.

Для сравнения были реализованы три сценария:

1. Статическое масштабирование: фиксированное количество реплик (базовый сценарий).
2. Реактивное масштабирование по пороговым значениям.
3. Адаптивное масштабирование с применением предложенного алгоритма АДРН.

Экспериментальные результаты показали значительное превосходство предложенного алгоритма АДРН над традиционными подходами (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики сценариев масштабирования

Показатель	Статическое масштабирование	Реактивное масштабирование	Адаптивное масштабирование (АДРН)	Улучшение
Среднее время отклика (мс)	187.4 ± 23.6	142.8 ± 18.3	116.5 ± 12.7	37.8%
Количество отказов (%)	8.7 ± 1.4	5.2 ± 0.9	3.0 ± 0.5	65.5%
Cpu utilization (%)	78.3 ± 9.2	65.7 ± 8.1	56.2 ± 6.4	28.2%
Memory utilization (%)	82.1 ± 7.8	74.3 ± 6.5	68.9 ± 5.2	16.1%

Сравнение с существующими решениями

Для объективной оценки эффективности предложенного алгоритма АДРН было проведено сравнение с известными решениями для горизонтального масштабирования (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение характеристик алгоритмов масштабирования

Алгоритм	Время отклика (мс)	Отказы (%)	Адаптивность	Сложность реализации
Kubernetes HPA (CPU-based)	142.8	5.2	Низкая	Низкая
AWS Auto Scaling	138.5	4.8	Средняя	Средняя
Google Cloud Autoscaler	135.2	4.5	Средняя	Средняя
Предложенный АДРН	116.5	3.0	Высокая	Средняя

Сравнительный анализ показывает, что предложенный алгоритм АДРН обеспечивает наилучшие показатели по всем ключевым метрикам. Особенно значимо превосходство в показателе отказов запросов (3.0% против 4.5-5.2% у конкурентов), что критично для систем интеллектуального анализа данных.

Масштабируемость решения

Для оценки масштабируемости алгоритма АДРН были проведены тесты с различным количеством микросервисов (рис. 2).

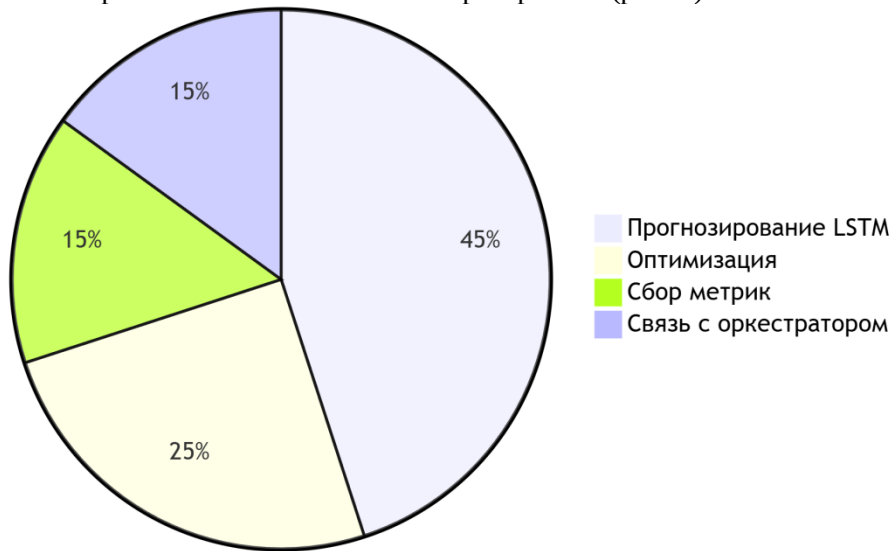


Рис. 2. Распределение времени обработки запроса алгоритмом АДРН при 50 микросервисах

Как видно из рисунка 2, основное время обработки запроса (45%) занимает этап прогнозирования с использованием LSTM-модели. Однако даже при увеличении количества микросервисов до 50 общее время принятия решения не превышает 75 мс, что является приемлемым для систем реального времени.

Несмотря на высокую эффективность, предложенный алгоритм имеет ряд недостатков [5]:

- Использование LSTM-модели требует значительных вычислительных ресурсов для обучения. Время обучения модели для системы с 15 микросервисами составляет в среднем 2.5 часа на GPU NVIDIA A100.

- Точность прогнозирования напрямую зависит от качества и полноты собираемых метрик. При потере данных за период более 5 минут точность прогноза падает на 25-30%.

- Алгоритм эффективен до 65 микросервисов. Для более крупных систем требуется кластеризация микросервисов и распределенная архитектура АДРН.

Практическая применимость

Предложенный алгоритм АДРН имеет высокую практическую ценность для различных отраслей:

- Финансовый сектор: системы анализа рисков и мошенничества требуют обработки больших объемов транзакционных данных в реальном времени.

- Здравоохранение: платформы для анализа медицинских изображений и геномных данных могут использовать АДРН для оптимизации распределения вычислительных ресурсов между диагностическими моделями.

- Промышленность: системы прогнозного обслуживания оборудования требуют анализа потоковых данных с датчиков.

Выводы

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенного адаптивного алгоритма динамического распределения нагрузки (АДРН) для микросервисных архитектур на ASP.NET Core. Снижение среднего времени отклика на 37.8% по сравнению со статическим масштабированием является значимым достижением, особенно в контексте систем интеллектуального анализа данных, где задержки могут привести к устареванию результатов анализа.

Ключевым фактором успеха алгоритма АДРН является использование предиктивного подхода вместо реактивного. Традиционные системы масштабирования реагируют на уже возникшую нагрузку, что приводит к задержкам в адаптации системы. В отличие от них, АДРН прогнозирует нагрузку на 60-120 секунд вперед, позволяя заранее подготовить необходимые ресурсы.

Сравнение с коммерческими решениями показывает, что специализированный алгоритм для микросервисов ASP.NET Core может превосходить универсальные облачные сервисы. Это связано с тем, что АДРН учитывает специфику аналитических нагрузок, включая паттерны использования ресурсов.

Библиографический список

1. Модель освоения образовательных компетенций с использованием инструментария интеллектуального анализа данных / Ю. Б. Щенева, А. Н. Пылькин, Е. С. Щенев, О. А. Бодров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 84. – С. 119-132. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-84-119-132. – EDN LUUNAH.
2. Gusev, S. I. Geoinformation system architecture for complex analysis of hydrometeorological data / S. I. Gusev, A. N. Kolesenkov // , 04 апреля 2025 года, 2025. – Р. 249-254.
3. Демидова, Л. А. Аспекты разработки архитектуры вопросно-ответной системы для обработки больших данных на основе нейросетевого моделирования / Л. А. Демидова, Н. А. Морошкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 86. – С. 145-155. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-86-145-155. – EDN GXLWGT.
4. Аксенов, А. А. Программные средства для построение распределённых вычислительных систем / А. А. Аксенов // Новые информационные технологии в научных исследованиях : Материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 22–24 ноября 2023 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф.Уткина, 2023. – С. 210-211.
5. Щенева, Ю. Б. Алгоритм многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений / Ю. Б. Щенева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С. 202-212. – DOI 10.21667/1995-4565-2025-92-202-212. – EDN CMWHGB.

УДК 004.67; ГРНТИ 50.41.21

**АЛГОРИТМ МАСШТАБИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ СЦЕНАРИЕВ
И ПРИМЕНЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ В СИНТЕТИЧЕСКИХ
РЕЛЯЦИОННЫХ ТЕСТОВЫХ БАЗАХ ДАННЫХ****А.И. Баранчиков, М.А.М. Абди***Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, mohamedabdi0096@just.edu.so*

Аннотация. В этой статье представлен ScenarioController, алгоритм в рамках платформы Graph-Diffusion Relational Test Database Generator (GDR-TDG). Этот алгоритм преобразует высокоуровневые спецификации сценариев YAML в конкретные числовые задачи и ограничения для генератора относительных синтетических данных. Он вычисляет коэффициенты масштабирования для каждой таблицы и целевое количество строк, нормализует переопределения на уровне столбцов, управляет правилами крайнего случая с проверкой осуществимости и вычисляет смещения первичного и внешнего ключей для режима безопасного добавления РК/ФК. Эти выходные данные управляют генератором графической структуры и моделями атрибутов для каждой таблицы, позволяя создавать тестовые базы данных, которые являются структурно реалистичными, совместимыми со сценариями и масштабируемыми.

Ключевые слова: сценарный контроллер, графическая диффузия, реляционная база данных, тестовая база-данных, генерация данных, GDR-TDG.

**AN ALGORITHM FOR SCENARIO-AWARE SCALING
AND CONSTRAINT ENFORCEMENT IN SYNTHETIC
RELATIONAL TEST DATABASES****A.I. Baranchikov, M.A.M. Abdi***Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, maheesh@just.edu.so*

Abstract. This paper presents ScenarioController, an algorithm within the Graph-Diffusion Relational Test Database Generator (GDR-TDG) framework. This algorithm solves high-level YAML scenario specifications into concrete numerical targets and constraints for a relational synthetic-data generator. It computes per-table scaling factors and target row-counts, normalizes column-level overrides, manages edge-case rules with feasibility checks, and computes primary-key and foreign-key offsets for PK/FK-safe append mode. These outputs drive a graph-diffusion structure generator and per-table at-

tribute models, enabling the synthesis of test databases that are structurally realistic, scenario-compliant, and scalable.

Введение

Реляционные базы данных остаются доминирующей основой для транзакционных и аналитических информационных систем, лежащих в основе приложений в области финансов, электронной коммерции, здравоохранения и телекоммуникаций. Для таких систем необходимы высококачественные тестовые данные для проверки функциональной корректности, оценки производительности и выявления типичных сбоев перед развертыванием. Однако нормативные требования и ограничения в отношении конфиденциальности все больше ограничивают прямой доступ к производственным данным, мотивируя использование синтетических данных в качестве более безопасной и контролируемой альтернативы [1].

Поэтому создание синтетических табличных и реляционных данных привлекло значительный исследовательский интерес, поскольку используются генеративные состязательные сети (GAN), вариационные автоэнкодеры (VAE), копулы и, в последнее время, диффузионные модели [2]. В реляционной среде фундаментальными являются два аспекта: структура графа внешних ключей, связывающая таблицы, и распределение атрибутов и корреляции, которые определяют избирательность запросов и поведение последующей модели. Недавние работы, такие как RelDiff, явно моделируют граф внешних ключей, используя стохастическую блочную модель, и используют диффузию, обусловленную графами, для синтеза атрибутов, обеспечивая самую высокую точность на эталонных наборах данных [3,4].

Однако, несмотря на эти достижения, требования к созданию тестовой базы данных отличаются от требований к обобщенным синтетическим данным для аналитики или машинного обучения. В частности, группам контроля качества и тестирования производительности необходимы не только реалистичная структура и статистика, но и управление с учетом конкретных сценариев, включая: масштабирование базы данных до различных размеров для нагрузочного тестирования; внедрение нестандартных ситуаций (например, экстремальных значений, глубоких цепочек внешних ключей, высоких коэффициентов pull) для изменения логики приложения; поддержка рабочих процессов добавления, при которых новые синтетические пакеты добавляются в существующую среду тестирования без нарушения целост-

ности первичного и внешнего ключей; сохранение характеристик уровня производительности, таких как избирательность соединения и задержка запроса [5].

Коммерческие инструменты для работы с тестовыми данными и открытым исходным кодом (например, генераторы на основе правил и фреймворки маскирования) удовлетворяют некоторым из этих потребностей, но, как правило, основаны на шаблонах, специфичны для схемы и слабы в плане изучения реляционной структуры. Исследования в области реляционного синтеза с сохранением конфиденциальности (например, PrivLava, PrivBench) в первую очередь сосредоточены на дифференциальной конфиденциальности и точности ответов на запросы, а не на рабочих процессах контроля качества, управляемых сценариями [6,7].

Параллельно в литературе по тестированию программного обеспечения особое внимание уделяется тестированию на основе сценариев как способу приведения тестовых примеров в соответствие с реалистичными историями пользователей и бизнес-процессами. Однако в рамках сценарного тестирования обычно предполагается, что подходящие данные уже существуют или подготавливаются вручную. Существует концептуальный разрыв между определениями сценариев и генераторами реляционных синтетических данных, которые могут реализовать эти сценарии в масштабе.

Цель состоит в том, чтобы представить ScenarioController, алгоритм масштабирования и ограничения с учетом сценариев, встроенный в генератор реляционных тестовых баз данных Graph-Diffusion (GDR-TDG) [9]. На высоком уровне ScenarioController принимает исходную реляционную схему и спецификацию сценария в кодировке YAML и создает:

1. Целевая строка для каждой таблицы подсчитывается с помощью отношения масштабирования $n_v^{\text{target}} = m_v n_v^{\text{seed}}$, где множители m_v могут быть глобальными или зависящими от таблицы.

2. Нормализованные наборы правил переопределения и граничного регистра сопоставляют декларативные условия, такие как «5% нулей в столбце X» или «1% цепочек внешних ключей длиной более 3», с бюджетами конкретных строк.

3. Сопоставления первичного ключа и внешнего ключа со смещением позволяют безопасно добавлять операции в существующие тест-

товые базы данных, перемещая первичные ключи и переназначая дочерние внешние ключи.

4. Артефакт предварительного просмотра суммирует прогнозируемые размеры таблиц, бюджеты правил и предупреждения о целесообразности, позволяя провести аудит перед созданием данных.

ScenarioController служит в качестве «компилятора», который преобразует понятные пользователю спецификации сценариев в числовые ограничения. Эти ограничения управляют реляционным генератором, основанным на моделях распространения графов, таких как RelDiff или связанные с ними методы. Алгоритм, по замыслу, работает независимо от конкретной серверной части generative и может быть интегрирован с диффузионными подходами, подходами реляционного синтеза на основе GAN или подходами реляционного синтеза с сохранением конфиденциальности [1].

Постановка задачи

Требования к созданию тестовой базы данных

Мы рассматриваем исходную реляционную базу данных со схемой $G = (V, E)$, где вершины V представляют таблицы, а ребра E представляют отношения с внешним ключом (FK). База данных примеров предоставляет: количество строк для каждой таблицы n_v^{seed} ; выборочные распределения атрибутов и профили корреляции (из конвейера профилирования); и топологию графа FK (Foreign key), используемую базовым генератором распространения графов.

Тестовый сценарий задается декларативно и должен соответствовать следующим требованиям:

1. Масштабирование (Scaling) – укажите глобальные множители и множители для каждой таблицы m_v для получения целевых размеров n_v^{target} , включая асимметричное масштабирование (например, таблицы фактов $\times 50$, размеры $\times 2$).

2. Крайние случаи (Edge-case) – выражают ограничения, такие как «5 % строк в столбце X равны нулю», «2 % заказов имеют экстремальные значения» q_{max} или «1 % цепочек заказов клиентов имеют глубину FK ≥ 4 ».

3. Переопределения (Overrides) – определяют преобразования на уровне столбцов (например, постоянные значения, фиксацию, дрожание) независимо от правил граничного регистра.

4. Режим добавления (Append mode): при необходимости генерируйте новые синтетические данные для добавления в существующую базу данных, сохраняя целостность первичного ключа (РК) и внешнего ключа (FK) посредством смещения РК и переназначения FK.

Предполагается, что базовая генерирующая модель (например, реляционный генератор с диффузией графов) способна генерировать новый граф FK, соответствующий шаблону FK, и генерировать строки таблицы, зависящие от родительских таблиц и параметров сценария [3].

Спецификация сценария

Мы моделируем сценарий S как кортеж $S = (m_{default}, \{m_v\}, \mathcal{O}, R, C_{schema}, mode)$,

где:

- $m_{default} \in \mathbb{R}^+$ - глобальный множитель, который применяется ко всем соответствующим значениям количества строк;
- $\{m_v\}_{v \in V}$ - дополнительные множители для каждой таблицы;
- \mathcal{O} — это набор переопределений. Каждое значение $o \in \mathcal{O}$ определяет таблицу, столбец и связанное с ними действие, такое как установка константы (constant), фиксация (clamp), дрожание (jitter) или null_fraction;
- R — это набор граничных правил, каждое из которых $r = (table = v, when = \phi_r, fraction = f_r, actions = A_r)$ где ϕ_r — это предикат для строк, а A_r - последовательность обновлений столбцов;
- C_{schema} включает необязательные директивы по изменению схемы (например, добавление/удаление таблиц или внешних ключей для анализа "что, если");
- $mode \in \{replace, append\}$ выбирает логику сохранения.

Сценарий задан в YAML и проанализирован в этом внутреннем представлении.

Цель

Учитывая G , количество начальных значений $\{n_v^{seed}\}$ и сценарий S , целью ScenarioController является вычисление:

- количество целевых строк $\{n_v^{target}\}$;
- Нормализованные переопределения \tilde{O} и правила граничного регистра \tilde{R} , каждое из которых сопровождается запрошенным количеством строк $c_r^{target} = f_r n_v^{target}$ и флагами выполнимости;
- клавиши `primay` (PK) и `foriegn` (FK) смещают $\{\Delta_v\}$ для режима добавления;
- Артефакт предварительного просмотра, который суммирует эти вычисленные значения для проверки оператором.

Алгоритм должен гарантировать, что эти выходные данные согласованы (например, ни одно правило не запрашивает больше строк, чем существует), прозрачны (доступны через предварительный просмотр) и совместимы с последующей генерирующей моделью.

Методология

Роль в рамках GDR-TDG

В рамках GDR-TDG сценарный контроллер находится между этапом профилирования и обучения и этапом генерации. Первоначально схема и данные профилируются для получения графиков FK, статистики количества строк и распределения атрибутов. Затем на основе этого представления обучается модель графической структуры и генерирующие модели табличного уровня [3,8,9].

На этапе генерации оператор предоставляет файл сценария. Алгоритм ScenarioController обрабатывает этот файл, определяет цели и ограничения и создает предварительный просмотр сценария и структурированные входные данные для генераторов структуры и таблиц. На рисунке 1 представлен общий рабочий процесс.

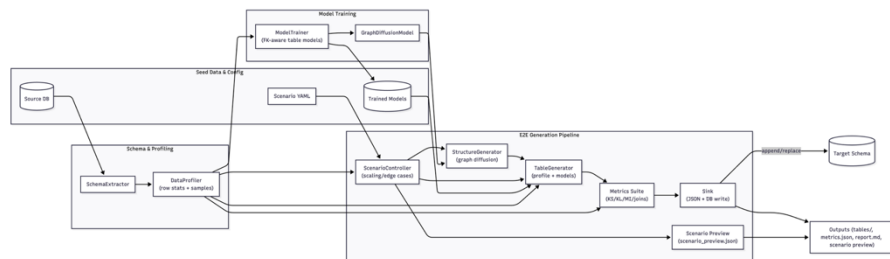


Рис. 1. Общий рабочий процесс алгоритма ScenarioController

Масштабирование и граничный случай

Для каждой таблицы v ScenarioController применяет отношение масштабирования

$$n_v^{target} = m_v n_v^{seed},$$

где $m_v = m_{default}$, если оно не переопределено в сценарии. Эти целевые значения количества строк затем используются для расчета бюджета для крайних случаев: $c_r^{target} = \lceil f_r n_v^{target} \rceil$.

Чтобы обнаружить невыполнимые или экстремальные запросы, ScenarioController сравнивает c_r^{target} с простыми ограничениями (например, ненулевое значение, в пределах максимального бюджета, в соответствии с другими правилами, влияющими на тот же столбец) и присваивает флаг выполнимости, такой как ok, clip или warning. Правила со статусом clip могут быть уменьшены, чтобы сохранить глобальную привязку к взаимодействию с правилами; правила с предупреждением сохраняют свою цель, но выделяются в файле предварительного просмотра.

Режим добавления для смещения первичного и внешнего ключей

В режиме добавления ScenarioController поддерживает ссылочную целостность, вычисляя для каждой таблицы v смещение первичного ключа (ПК) $\Delta_v = \max(PK_v^{existing}) + 1$. Затем он выводит функции отображения для столбцов внешнего ключа (ФК), ссылающихся на v . Эти смещения передаются на уровень-приемник, который сдвигает вновь сгенерированные значения ПК на Δ_v и обновляет соответствующие дочерние значения ФК. Этот подход более прост, чем моделирование

значений РК в рамках генерирующей модели, и позволяет неограниченно добавлять синтетические пакеты без коллизий ключей, при условии, что в одну и ту же схему не вносятся одновременные изменения.

Алгоритм псевдокодирования ScenarioController

Алгоритм псевдокодирования ScenarioController представлен на рисунке 2.

Algorithm 1 ScenarioController

Require: Схема-семпл $G = (V, E)$, количества строк в семпле $\{n_v^{\text{seed}}\}$, YAML конфигурации сценария

Ensure: Целевые количества строк $\{n_v^{\text{target}}\}$, список переопределений, правила edge-case, JSON предпросмотра

- 1: Разобрать YAML: извлечь m_{default} , множители по таблицам $\{m_v\}$, overrides, edge_cases, mode
- 2: **for all** таблиц $v \in V$ **do**
- 3: $m_v \leftarrow$ множитель для таблицы, если указан, иначе m_{default}
- 4: $n_v^{\text{target}} \leftarrow m_v \times n_v^{\text{seed}}$
- 5: **end for**
- 6: Построить структуры переопределений по таблицам/колонкам
- 7: Построить списки edge-case по таблицам
- 8: **for all** таблиц $v \in V$ **do**
- 9: **for all** правил $r \in \text{edge_cases}(v)$ **do**
- 10: $c_r^{\text{target}} \leftarrow r.\text{fraction} \times n_v^{\text{target}}$
- 11: назначить флаг осуществимости правилу r на основе c_r^{target} и предусловий правила
- 12: **end for**
- 13: **end for**
- 14: **if** mode = append **then**
- 15: **for all** таблиц $v \in V$ **do**
- 16: $\Delta_v \leftarrow \max(\text{PK}_v^{\text{existing}}) + 1$
- 17: **end for**
- 18: **else**
- 19: $\Delta_v \leftarrow 0$ для всех v
- 20: **end if**
- 21: Записать scenario_preview.json с seed-количествами, целевыми количествами, overrides, edge_cases, смещениями, флагами
- 22: **return** $\{n_v^{\text{target}}\}$, overrides, edge_cases, $\{\Delta_v\}$

Рис. 2. Это псевдокод представленного алгоритма

Представленный алгоритм ScenarioController реализован на Python как часть фреймворка GDR-TDG [9] с использованием стандартной библиотеки конфигурации для синтаксического анализа YAML и записи предварительного просмотра JSON на диск. Мы интегрируем его с реляционным генератором, который сочетает в себе (i) модель структуры графической диффузии, вдохновленную RelDiff [3], и (ii) условные генераторы табличного уровня (либо основанные на диффузии, либо заменители автоэнкодера).

Выводы

В этой статье представлен ScenarioController, алгоритм масштабирования и ограничения с учетом сценариев для создания синтетических реляционных тестовых баз данных. Этот алгоритм реализован в рамках платформы GDR-TDG. Алгоритм компилирует высокоуровневые спецификации сценариев YAML в виде количества целевых строк для каждой таблицы, бюджетов для крайних случаев, наборов переопределений и сопоставлений смещений РК/ФК. Мы формализовали его дизайн, предоставили псевдокод и оценили его поведение на тестовых и корпоративных схемах.

Библиографический список

1. Goyal M., Mahmoud Q. H. A Systematic Review of Synthetic Data Generation Techniques Using Generative AI // Electronics. 2024. Т. 13, № 17. С. 3509.
2. Shi R., Wang Y., Du M., Shen X., Wang X. A Comprehensive Survey of Synthetic Tabular Data Generation: arXiv:2504.16506. arXiv, 2025.
3. Hudovernik V., Xu M., Shi J., Šubelj L., Ermon S., Štrumbelj E., Leskovec J. RelDiff: Relational Data Generative Modeling with Graph-Based Diffusion Models: arXiv:2506.00710. arXiv, 2025.
4. Hudovernik V. Relational Data Generation with Graph Neural Networks and Latent Diffusion Models. 2024.
5. Hudovernik V., Jurkovič M., Štrumbelj E. Benchmarking the Fidelity and Utility of Synthetic Relational Data: arXiv:2410.03411. arXiv, 2024.
6. Cai K., Xiao X., Cormode G. PrivLava: Synthesizing Relational Data with Foreign Keys under Differential Privacy: arXiv:2304.04545. arXiv, 2023.
7. Ge Y., Qin J., Zheng S., Zhong Y., Tang B., Qiu Y.-X., Mao R., Yuan Y., Onizuka M., Xiao C. Privacy-Enhanced Database Synthesis for Benchmark Publishing (Technical Report) // Proc. VLDB Endow. 2024. Т. 18, № 2. С. 413–425.
8. Song Y., Sohl-Dickstein J., Kingma D. P., Kumar A., Ermon S., Poole B. Score-Based Generative Modeling through Stochastic Differential Equations: arXiv:2011.13456. arXiv, 2021.
9. Баранчиков А.И., Абди М. А. М. ОСНОВАННЫЙ НА ГРАФИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ ПОДХОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ РЕЛЯЦИОННЫХ ТЕСТОВЫХ БАЗ ДАННЫХ // Vestnik of RSREU. 2026.

УДК 004.932; ГРНТИ 29.45.15

**АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ СПЕКЛ-ШУМА
ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ РАДАРОВ
С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ НА ОСНОВЕ
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Ю.С. Бехтин, В.Т. Чинь

Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, yuri.bekhtin@yandex.ru

Аннотация. В работе предложен адаптивный метод фильтрации спекл-шума РСА-изображений на основе вейвлет-преобразования, учитывающий мультипликативную природу и гетероскедастичность спекл-шума. Метод включает оценку числа независимых наблюдений и адаптивную пороговую обработку вейвлет-коэффициентов с учётом локальной интенсивности сигнала. Экспериментальные исследования показали превосходство предложенного метода над классическими подходами.

Ключевые слова: изображение РСА, спекл-шум, вейвлет-преобразование.

**ADAPTIVE METHOD OF SPECKLE NOISE FILTERING
FOR IMAGES OBTAINED BY SYNTHESIS APERTURE RADAR
BASED ON WAVELET TRANSFORM**

Yu.S. Bekhtin, V.T. Trinh

Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, yuri.bekhtin@yandex.ru

Abstract. This paper proposes an adaptive method for filtering speckle noise in SAR images based on the wavelet transform, taking into account the multiplicative nature and heteroscedasticity of speckle noise. The method involves estimating the number of looks and adaptive thresholding of the wavelet coefficients, taking into account local signal intensity. Experimental studies have demonstrated the superiority of the proposed method over classical approaches.

Keywords: SAR image, speckle noise, wavelet transform.

Введение

В настоящее время широко применяют радары с синтезированной апертурой (РСА) в области дистанционного зондирования Земли, которые обеспечивают получение высокоразрешающих изображений земной поверхности независимо от погодных условий и времени су-

ток [1]. Однако изображения, получаемые посредством РСА, подвержены влиянию спекл-шума, который существенно затрудняет визуальную интерпретацию данных и снижает эффективность последующих этапов обработки. Существует множество методов подавления спекл-шума, которые варьируются от простых пространственных фильтров (усредняющий, медианный фильтры) до сложных алгоритмов (фильтры Винера, Ли) [2]. В последние десятилетия в качестве перспективной альтернативы рассматриваются методы, основанные на вейвлет-преобразовании. Их преимущество заключается в способности анализировать сигнал в частотно-временной области и отделять шумовые компоненты от полезного сигнала. Наиболее распространённым подходом к подавлению спекла является пороговая обработка вейвлет-коэффициентов – метод, сочетающий вычислительную простоту и приемлемую эффективность [3]. Существующие правила пороговой обработки, как глобальные (например, VisuShrink), так и локальные или адаптивные (SureShrink и BayesShrink) рассчитывают величину порогов в зависимости от оценок уровня шума и статистических характеристик вейвлет-коэффициентов в каждой субполосе [4]. Другие методы фильтрации спекл-шума предполагают предварительное логарифмическое преобразование наблюдаемого изображения, чтобы перевести мультипликативный шум в аддитивный и тем самым применить алгоритмы, разработанные для подавления аддитивного гауссовского шума. Однако такое преобразование приводит к искажениям в сегментах с пониженной интенсивностью.

В данной статье предлагается адаптивный метод фильтрации спекл-шума РСА-изображений на основе вейвлет-преобразования. Предложенный подход учитывает мультипликативный характер спекл-шума и его гетероскедастичность, избегая применение логарифмического преобразования. Экспериментальные результаты демонстрируют, что предложенный метод обеспечивает высокое качество подавления шума при сохранении структурных особенностей изображения.

Постановка задачи

Спекл-шум возникает из-за интерференции когерентных отражённых сигналов от множества рассеивателей внутри одного разрешающего элемента (пикселя). В отличие от обычного аддитивного шума (например, гауссовского), спекл-шум зависит от локальной структуры изображения и масштабируется с интенсивностью сигнала.

Будем считать, что в процессе формирования изображений происходит их искажение спекл-шумом, в результате чего интенсивность пикселя наблюдаемого РСА-изображения $I(x, y)$ описывается следующей мультипликативной моделью:

$$I(x, y) = R(x, y) * N(x, y), \quad (1)$$

где $R(x, y)$ – интенсивность пикселя истинного (неискаженного) изображения; $N(x, y)$ – случайная компонента спекл-шума.

Статистические свойства спекл-шума зависят от количества L независимых наблюдений [5]. В случае полностью развитого спекла предполагается, что:

$$E[N(x, y)] = 1, \text{Var}[N(x, y)] = \frac{1}{L}, \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует, что условное математическое ожидание и дисперсия наблюдаемого сигнала при фиксированном интенсивности $R(x, y)$ равны:

$$E[I(x, y) | R(x, y)] = R(x, y), \quad (3)$$

$$\text{Var}[I(x, y) | R(x, y)] = \frac{R^2(x, y)}{L}. \quad (4)$$

Уравнение (4) демонстрирует ключевое свойство спекл-шума – его гетероскедастичность: дисперсия шума пропорциональна квадрату локальной интенсивности сигнала. Это означает, что в областях с высокой интенсивностью (например, на металлических объектах) шум имеет большую абсолютную амплитуду, чем в теневых или однородных тёмных зонах (например, на водной поверхности). Такое поведение принципиально отличается от гомоскедастичного аддитивного шума, где дисперсия постоянна по всему изображению.

Таким образом, возникает необходимость разработки методов, учитывающих гетероскедастичность спекл-шума.

Предлагаемый метод

Алгоритм предлагаемого метода содержит следующие шаги:

Шаг 1. Прямое вейвлет-преобразование.

К зашумлённому изображению применяется стационарное вейвлет-преобразование j -ого уровня, в результате чего формируются субполосы вейвлет-коэффициентов $(LL_j, LH_j, HL_j, HH_j), (LL_{j-1}, LH_{j-1}, HL_{j-1}, HH_{j-1}), \dots, (LL_1, LH_1, HL_1, HH_1)$.

Шаг 2. Оценка параметра L в вейвлет-области.

Поскольку параметр L редко известен, в работе предлагается оценка L в пространстве вейвлет-коэффициентов.

В однородных областях изображения истинный сигнал $R(x,y)$ близок к константе, и, следовательно, коэффициенты субполосы LL_1 приближают локальное значение сигнала $R(x,y)$, тогда как субполоса HH_1 содержит в основном зашумленные вейвлет-коэффициенты. Из модели спекл-шума (4) следует, что в таких областях выполняется:

$$Var(HH_1 | LL_1) \approx \frac{LL_1^2}{L}. \quad (5)$$

Для выделения однородных пикселей вычисляется локальная дисперсия коэффициентов $|HH_1|$ в скользящем окне размером $n \times n$.

Пусть H – множество таких пикселей. Тогда оценка L вычисляется как:

$$\hat{L} = med \left\{ \frac{LL_1^2(x,y)}{Var_{лок}(HH_1(x,y))} \mid (x,y) \in H \right\}, \quad (6)$$

где $Var_{лок}(HH_1)$ – локальная дисперсия модуля коэффициентов HH_1 в окрестности точки (x,y) .

Шаг 3. Адаптивная оценка локального сигнала.

Для учёта гетероскедастичности спекл-шума величина порога должна зависеть от локальной интенсивности сигнала $R(x,y)$. В качестве оценки $\hat{R}_{лок}$ используется абсолютное значение коэффициентов низкочастотной аппроксимации на высшем уровне вейвлет-преобразования:

$$\hat{R}_{лок}(x,y) = |LL_J(x,y)|, \quad (7)$$

где $LL_J(x,y)$ – коэффициент аппроксимации на уровне J . Данная оценка устойчива к шуму и коррелирована с истинной интенсивностью отражающей способности.

Шаг 4. Адаптивная пороговая обработка.

На всех уровнях $j=1,...,J$ коэффициенты деталей подвергаются мягкой пороговой обработке с адаптивной величиной порога:

$$T(x, y) = \frac{1}{\sqrt{\hat{L}}} \cdot \hat{R}_{\text{лок}}(x, y) \cdot \sqrt{2 \ln N}, \quad (8)$$

где N – общее число пикселей изображения. Величина порога (8) следует из условной дисперсии спекл-шума $Var[I | R] = \frac{R^2}{L}$ и обеспечивает подавление шума в зависимости от локальной интенсивности.

Низкочастотные коэффициенты LL_J не изменяются.

Шаг 5. Обратное вейвлет-преобразование.

Выполняется обратное вейвлет-преобразование над обработанными вейвлет-коэффициентами, в результате чего вычисляется оценка изображения \hat{R} .

Экспериментальные исследования

Экспериментальная оценка эффективности предложенного метода выполнена в программной среде Python на наборе из десяти эталонных изображений в градациях серого размером 512×512 пикселей, взятых из открытого набора TEMPER17 [6]. К каждому изображению был добавлен спекл-шум с дисперсией, варьируемой от 0,01 до 0,08. Для объективного сравнения были реализованы три классических метода: медианный фильтр с окном 7×7 , адаптивный фильтр Ли и метод, сочетающий логарифмическое преобразование с последующим применением адаптивного порогового обработки вейвлет-коэффициентов BayesShrink. Методы на основе вейвлет-преобразования, включая предложенный, использовали биортогональный вейвлет bior4.4 три уровня декомпозиции. Оценка эффективности предложенного метода проводилась по трём стандартным метрикам: среднеквадратичной ошибке (СКО), пиковому отношению сигнал/шум (ПОСШ) и индексу структурного сходства (SSIM). Результаты экспериментов усреднены по всем десяти тестовым изображениям и представлены в таблице 1, а также визуализированы на рисунке 1 в виде графиков для удобства анализа зависимости качества восстановления от уровня шума.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Дисперсия шума	СКО ($\cdot 10^{-3}$)				
	Зашумлённое изображение	Восстановленное изображение			
		Медианный фильтр	Фильтр Ли	BayesShrink	Предложенный
0,01	2,64	4,68	2,04	2,96	1,55
0,02	5,16	4,80	2,75	3,27	2,15
0,03	7,59	4,94	3,33	3,52	2,63
0,04	9,95	5,07	3,84	3,77	3,04
0,05	12,27	5,21	4,30	4,02	3,38
0,06	14,54	5,34	4,71	4,31	3,67
0,07	16,77	5,47	5,10	4,64	3,94
0,08	18,96	5,59	5,47	5,04	4,18
Дисперсия шума	ПОСШ				
	Зашумлённое изображение	Восстановленное изображение			
		Медианный фильтр	Фильтр Ли	BayesShrink	Предложенный
0,01	25,78	23,30	26,55	25,12	28,09
0,02	22,88	23,19	25,34	24,66	26,67
0,03	21,20	23,07	24,57	24,32	25,80
0,04	20,02	22,95	23,99	24,02	25,17
0,05	19,11	22,83	23,54	23,73	24,71
0,06	18,38	22,73	23,17	23,42	24,35
0,07	17,76	22,62	22,85	23,08	24,04
0,08	17,22	22,53	22,58	22,71	23,79
Дисперсия шума	SSIM				
	Зашумлённое изображение	Восстановленное изображение			
		Медианный фильтр	Фильтр Ли	BayesShrink	Предложенный
0,01	0,71	0,62	0,74	0,75	0,83
0,02	0,60	0,61	0,71	0,72	0,78
0,03	0,53	0,60	0,68	0,70	0,74
0,04	0,48	0,59	0,66	0,69	0,71
0,05	0,44	0,58	0,64	0,67	0,69
0,06	0,42	0,57	0,63	0,65	0,67
0,07	0,39	0,56	0,61	0,64	0,65
0,08	0,37	0,55	0,60	0,62	0,64

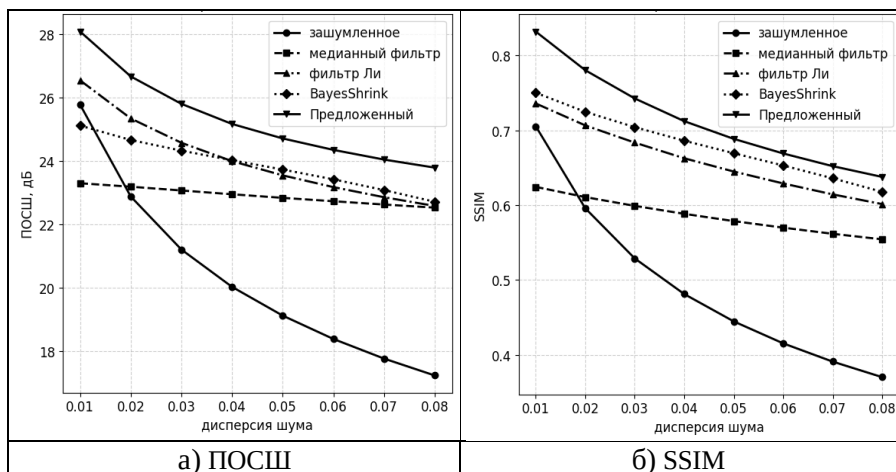


Рис. 1. Зависимость ПОСШ и SSIM оценки изображения от дисперсии шума.

Эксперименты показали, что предложенный метод демонстрирует устойчивое превосходство над всеми сравниваемыми подходами по всем трём метрикам (СКО, ПОСШ, SSIM), особенно в условиях сильного зашумления. Полученные результаты подтверждают, что адаптивный метод фильтрации спекл-шума с оценкой параметра L непосредственно в вейвлет-области обеспечивает оптимальный баланс между эффективным подавлением шума и сохранением геометрических и текстурных особенностей изображения, что особенно важно при обработке сильно зашумлённых РСА-изображений.

Выводы

Предложенный адаптивный метод фильтрации спекл-шума РСА-изображений на основе вейвлет-преобразования и прямой оценке параметра L в вейвлет-области демонстрирует относительно высокую эффективность подавления спекл-шума без использования логарифмического преобразования. Это позволяет избежать нелинейных искажений, особенно критичных в теневых и низкоинтенсивных областях изображения. Адаптивная величина порога, зависящая от локальной интенсивности, обеспечивает баланс между подавлением шума и сохранением мелких деталей, текстур и границ объектов. Экспериментальные результаты подтверждают, что предложенный метод превосходит традиционные подходы по всем основным метрикам качества восстановления изображений, особенно в условиях сильного за-

шумления. Таким образом, предложенный метод может быть рекомендован для практического применения в задачах дистанционного зондирования Земли, где важны как визуальное качество, так и точность последующей автоматической обработки изображений.

Библиографический список

1. Chan Y., Koo V. An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR) // Progress in Electromagnetics Research B. 2008. Vol. 2. pp. 27-60.
2. Lee J. S., Jurkevich I., Dewaele P., Wambacq P., Oosterlinck A. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review // Remote Sensing Reviews. 1994. Vol. 8. No 4. pp. 313-340.
3. Donoho D. L., Johnstone J. M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage // Biometrika. 1994. Vol. 81. No 3. pp. 425-455.
4. Chang S. G., Yu B., Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression // IEEE Transactions on Image Processing. 2000. Vol. 9. No 9. pp. 1532-1546.
5. Oliver C., Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. 2nd ed. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2004.
6. TAMPERE17 noise-free image database [Электронный ресурс]. URL: <https://webpages.tuni.fi/imaging/tampere17/>.

УДК 004.93'12; ГРНТИ 20.15.05

ОБЗОР ПОДХОДОВ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПОЛИГРАФИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

И.Д. Попов, Г.В. Овечкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань*

Аннотация. В данной работе рассмотрены подходы для осуществления дефектоскопии полиграфической продукции. Данная проблема остается актуальной, так как ежегодно количество печатной продукции увеличивается, что делает ручной осмотр неэффективным. Осуществлен обзор существующих решений в области дефектоскопии полиграфической продукции.

Ключевые слова: дефектоскопия, полиграфия, нейронные сетевые модели.

OVERVIEW OF APPROACHES FOR FLAW DETECTION PRINTING PRODUCTS

I.D. Popov, G.V. Ovechkin

Ryazan State Radio Engineering University,

Abstract. In this paper, approaches for carrying out flaw detection of printing products are considered. This problem remains relevant, as the number of printed products increases annually, which makes manual inspection ineffective. A review of existing solutions in the field of printing product flaw detection has been carried out.

Keywords: flaw detection, polygraphy, neural network models.

Введение

В современном мире нас повсюду окружают яркие изображения с написанным на них текстом. Для производителя важно, чтобы информация на упаковке его товара была читаема и легко узнаваема. Коробки различных цветов с изображенными на них рисунками, позволяют сфокусировать внимание потенциального покупателя на товаре, а написанный на них текст помогает донести до потребителя информацию о продукте. Для увеличения количества выпускаемой продукции, предприятию требуется упростить задачу выявления дефектов, что позволит перевести часть работников на другие задачи.

Производителям приходится постоянно искать новых контрагентов или затрачивать дополнительные ресурсы для производства качественной упаковки. В связи с этим типографиям необходимо обеспечить автоматизированный визуальный контроль продукции с помощью методов технического зрения.

Формулирование проблемы

Для уменьшения финансовых издержек, понесенных из-за осуществления дефектоскопии напечатанной продукции при помощи рабочих, необходимо автоматизировать процесс осуществления визуального контроля полиграфической продукции, что позволит снизить производственные издержки и повысить эффективность предприятия.

Под словом «Дефект» подразумевается каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям [1]. Есть множество различных дефектов, из-за которых производитель упаковки может понести репутационные потери. Можно выделить несколько типов дефектов: цветовые, текстовые и проблемы с изображениями.

Варианты решения задачи

Для дефектоскопии продукции можно использовать следующие подходы:

1. Традиционный. Методы, основанные на цифровой обработке изображения с использованием математических моделей для анализа цвета, текста и изображений. Такие методы основаны на использовании фильтров, пороговой обработки, анализа границ и сравнении изображения с эталоном.

2. Нейросетевой. Методы на базе нейронных сетей для автоматического поиска различий на полученной продукции от эталонной. Такой подход подразумевает создание узкоспециализированных нейронных сетей под конкретные задачи.

3. Комбинированный. Данный подход основан на использовании двух подходов при решении задачи дефектоскопии. Так, для поиска неточностей, связанных с рисунками, можно использовать нейронные сети, например для поиска логотипа на упаковке, а после использовать традиционные методы анализа, например сравнивать его с эталонным при помощи корреляции или попиксельного сравнения.

Постановка цели

Целью данной статьи является исследование методов дефектоскопии, которые будет возможно реализовать для повышения эффективности приема партии полиграфической продукции посредством разработки программного обеспечения. Это позволит оптимизировать процесс обнаружения неточностей на упаковках и упростить процесс выявления дефектов путем его автоматизации. Благодаря этому можно будет увеличить количество одновременно проверяемых товаров и снизить время, затраченное на одну единицу производимого товара, что позволит уменьшить общее время, за которое товар будет произведен.

Традиционный подход

Традиционный подход для дефектоскопии полиграфической продукции основан на использовании цифровой обработки изображения и математических алгоритмов, позволяющих находить отклонения от заданного эталона.

В основе традиционного подхода лежат техники по обработке исходного изображения, такие как: фильтрация, сегментация, выделение границ и сравнение с эталонном.

Главным преимуществом такого подхода является относительно низкие затраты на вычислительные мощности. Традиционный подход обеспечивает стабильный результат при постоянных условиях съемки. При изменении внешних факторов данный подход может оказаться неэффективным, поэтому область применения традиционного подхода ограничена значениями, которые были строго формализованы через численные критерии под определенную задачу.

Примерами традиционных методов могут служить гауссов или медианные фильтры для уменьшения шума на изображении, оператор Собеля для выделения границ и контуров, а также использование метода обработки пороговой бинаризации, при котором каждый пиксель выше определенного порога присваиваются белому цвету, а пиксели с яркостью ниже порога – черному. Для проверки соответствия цвету на напечатанной продукции можно использовать расчёт метрики ΔE .

Нейросетевой подход

Нейросетевой подход используется в дефектоскопии полиграфической продукции для автоматического выявления отклонений от ожидаемого результата. Данный подход является более надежным при частом изменении условий окружения и печати. Он позволяет повысить точность дефектоскопии и улучшить выявление сложных дефектов.

Плюсами данного подхода является обучение нейросетевой модели на существующих дефектах, что позволит обойтись без сложной настройки под конкретные ситуации, как в традиционных методах. Для работы с изображениями подойдут сверточные и рекуррентные нейронные сети, а также архитектуры на основе трансформеров, обладающие повышенной устойчивостью к шумам.

Благодаря нейронным сетям осуществляется анализ изображения при помощи классификации и сегментации участков изображения, для анализа текста на полиграфической продукции используются OCR модели, основанные на базе сверточных моделей или трансформеров.

Гибридный подход

Гибридный подход включает в себя использование нейронных сетей для поиска ключевых фрагментов на изображении с целью дальнейшего анализа с использованием традиционных методов. Данный подход является менее требовательным к внешним факторам в отличие от традиционного, но при этом является более дешевым и быстрым в разработке.

Обзор существующих решений

Рассмотрим несколько существующих решений в данной области и рассмотрим их функционал.

EyeC Proofiler – это программное обеспечение для автоматической проверки печатной продукции. Оно подходит для проверки качества печати и текста на различных этапах производства [3]. Данное решение осуществляет поиск дефектов путем сравнения с эталонным изображением, может выявлять дефекты смещения, неточности печати, цветовых расхождений, а также проверяет правильность напечатанного текста.

AVT (Advanced Vision Technology) PrintVision/Helios – это система для контроля качества печатной продукции в реальном времени [4]. Данное решение может определять цветовые расхождения, находить не пропечатанные места, выявлять пятна и марашки. Однако данное решение является оборудованием для печати, что существенно сокращает область его применения.

Global Vision – программное обеспечение для проверки текстов и графики, позволяющее сверить файлы с эталоном [5]. Данное решение может проверять макеты перед печатью на наличие отклонений в тексте, отсутствие элементов, ошибки в верстке, а также осуществлять проверку на цветовые расхождения.

QuadTech – система мониторинга качества изображения и цветопередачи [6]. Данное решение может определять размытости на продукции и несоответствие цветов. Данная система мониторинга обязательно должна быть интегрирована к печатному станку.

Выводы

Осуществление дефектоскопии полиграфической продукции является все еще актуальной проблемой, поэтому разработка специализированного ПО для выявления брака является актуальной.

Для эффективного анализа и поиска дефектов наиболее актуальным является нейросетевой и гибридный подходы. Они определяют дефекты с высокой точностью и менее зависимы от условий окружения, таких как освещение, что делает их более гибкими.

В данной статье были рассмотрены теоретические основы, которые потребуются для дальнейшей разработки нового решения в области дефектоскопии полиграфической продукции, и существующие решения, которые предложены на рынке в данный момент.

Библиографический список

1. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Стандартиформ, 2009. — 22 с.
2. Стефанов С. Полиграфия для рекламистов и не только. Руководство к действию. — М.: Гелла-Принт, 2002. — 352 с. — (Рекламные технологии). — ISBN 5-901008-18-9.
3. EyeC Profiler [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.webpackaging.com/Up/Comp/1907/11156134/11156137BASSKHSL/f/EyeC_Profiler_engl.pdf
4. Д.Рамонов AVT (Advanced Vision Technology) PrintVision/Helios [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://labelworld.ru/noyabr2006/stoprotsentnyj-kontrol>
5. Global Vision [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <https://globalvision.co/>
6. Система автоматической приводки Quadtech [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vmg.vmg.ru/equipment/additional-equip/quadtech.html>

УДК 004.891

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ТИПОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ТВОРЧЕСКО-КОММЕРЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

А.В. Талаева, С.Ю. Жулева

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, alex.osver@mail.ru*

Аннотация. В статье проводится анализ российских систем управления ресурсами из образовательной, корпоративной и отраслевой сфер с точки зрения их применимости в специфических условиях продюсерского центра. Выявлены ключевые проблемы: негибкость планирования, отсутствие многокритериальной оптимизации и игнорирование специфики творческих процессов. На основе анализа предложена концепция программного

обеспечения с генетическим алгоритмом, позволяющим одновременно оптимизировать загрузку помещений, график специалистов и доходность проектов.

Ключевые слова: управление ресурсами, оптимизация расписания, генетический алгоритм, метаэвристические методы.

ANALYSIS OF LIMITATIONS OF STANDARD RESOURCE MANAGEMENT SYSTEMS FOR CREATIVE AND COMMERCIAL ORGANIZATIONS

A.V. Talaeva, S.Ju. Zhuleva

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, alex.osver@mail.ru*

Abstract. The article analyzes Russian resource management systems from the educational, corporate, and industrial sectors in terms of their applicability to the specific conditions of a production center. Key problems have been identified: inflexibility in scheduling, lack of multi-criteria optimization, and failure to account for the specifics of creative processes. Based on the analysis, a software concept utilizing a genetic algorithm is proposed, enabling simultaneous optimization of room occupancy, specialist schedules, and project profitability.

Keywords: resource management, schedule optimization, genetic algorithm, metaheuristic methods.

Введение

Современные организации, деятельность которых связана с управлением людьми и оборудованием, сталкиваются с необходимостью оптимизации процессов для минимизации простоев и повышения эффективности. Продюсерские центры, сочетающие творческие и административные функции, представляют собой сложный объект для автоматизации, где требуется учитывать разнородные ресурсы, переменную нагрузку и коммерческие приоритеты [1]. При этом повышение эффективности работы организаций сферы услуг напрямую связано с внедрением систем оптимизационного планирования, способных учитывать разнородные ресурсы и коммерческие приоритеты¹. В России распространены системы управления, однако их применимость в специфических условиях творческо-коммерческой деятельности требует детального анализа. Целью данной работы является исследование существующих решений, выявление их ограничений и формирование концепции специализированного продукта.

Сравнительный анализ систем управления ресурсами

Системы для образовательных учреждений

В сфере образования России активно применяются продукты типа 1С:Университет, Университет 4.0, предназначенные для составления расписаний и распределения аудиторного фонда [2]. Эти системы действительно обеспечивают составление расписаний для сотен групп и преподавателей, минимизируя «окна» и оптимизируя загрузку аудиторий. Однако при ближайшем рассмотрении становится очевидной их фундаментальная ограниченность для нашей задачи. Система работает по принципу жестких временных интервалов (стандартных академических часов), что совершенно не соответствует реальности продюсерского центра, где занятия могут длиться от 45 минут до целого рабочего дня. Более того, алгоритм не учитывает стоимость ресурсов (для системы аренда студии звукозаписи ничем не отличается от использования обычного кабинета), что делает невозможным приоритизацию коммерчески выгодных заказов [2].

Корпоративные платформы для управления ресурсами

Такие решения, как Bitrix24, Мегаплан, Класс365 предлагают модули бронирования помещений и управления задачами [3]. Модули бронирования переговорных действительно удобны для фиксации заранее принятых решений, а интеграция с CRM-системами и инструментами коммуникации позволяет вести базу клиентов. Тем не менее, эти платформы не содержат встроенных алгоритмов оптимизации. Они фиксируют решения, принятые пользователями вручную, но не способны анализировать совокупность факторов для предложения рационального расписания. Администратор вынужден вручную перебирать десятки возможных комбинаций, пытаясь одновременно учесть доступность студий, графики преподавателей и коммерческие приоритеты. Система не отвечает на ключевые вопросы: как изменить расписание, чтобы увеличить доходность? Как избежать простоев дорогостоящего оборудования? В результате сохраняется высокий риск неэффективного использования ресурсов [3].

Отраслевые решения для сферы услуг

Программные продукты для фитнес-индустрии, такие как SportSoft, iiko, Битрикс24. Фитнес ориентированы на управление абонементом, клиентской базой и групповыми занятиями [4]. Эти системы прекрасно справляются с управлением абонементом, групповыми занятиями и стандартными финансовыми операциями. Однако их функционал ограничен шаблонными сценариями, например, еженедельным повторением одних и тех же активностей. Для продюсерского центра, где каждый проект уникален по составу участников, длительности и требованиям к ресурсам, такие решения оказываются неприменимы. Отраслевые же системы ориентированы на циклическое оказание однотипных услуг по заранее известному шаблону. Они не могут обработать ситуацию, когда сегодня — трехчасовая репетиция, завтра — шестичасовая съемка, а послезавтра — несколько разновременных индивидуальных занятий [4].

Обоснование разработки специализированного программного обеспечения

Проведенный анализ демонстрирует, что существующие системы либо чрезмерно жестки (образовательные решения), либо пассивны (корпоративные платформы), либо узкоспециализированы под типовые операции (отраслевые продукты). Подтверждением этому служит исследование ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, указывающее, что в 2021 году лишь 25,8 % российских организаций в целом применяли технологии анализа данных, при этом в сфере высшего образования, наиболее близкой к нашей задаче, этот показатель составлял 31,5 % [5]. Ни один из рассмотренных вариантов не предлагает комплексного подхода, сочетающего гибкое планирование, многокритериальную оптимизацию и учет творческой специфики. Таким образом, формируется идея создания специализированного программного обеспечения для продюсерских центров, ядром которого станет алгоритм, основанный на метаэвристических методах, таких как генетические алгоритмы, которые уже доказали свою эффективность в решении подобных многокритериальных задач [6]. Данный подход позволит одновременно учитывать несколько целевых функций: минимизацию простоев оборудования, сокращение «окон» у преподавателей и максимизацию дохода за счет приоритизации коммерчески значимых событий.

Выводы

Несмотря на наличие на рынке множества систем управления ресурсами, их применение в контексте продюсерского центра оказывается ограниченным. Образовательные продукты не поддерживают переменную длительность занятий, корпоративные платформы не обеспечивают интеллектуальную оптимизацию, а отраслевые решения не адаптированы под уникальность творческих проектов. Целью данной работы является создание решения, целенаправленно закрывающего выявленные пробелы. Предлагаемое программное обеспечение должно объединить гибкость, способность работать с противоречивыми критериями и глубинное понимание специфики отрасли, что сделает его востребованным инструментом в нише, которую текущие продукты не охватывают.

Библиографический список

1. Козлова Е. М. Модели и методы управления ресурсами в интегрированных системах планирования предприятий сферы услуг // Бизнес-информатика. – 2020. – № 2 (50). – С. 43-51.
2. Официальный сайт решений «1С:Университет». – URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/university>
3. Описание функционала Bitrix24. – URL: <https://www.bitrix24.ru/features/>
4. Обзор возможностей SportSoft для фитнес-клубов. – URL: <https://sportsoft.ru/>
5. Как в России используют технологии Big Data? // Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) НИУ ВШЭ. – 2021. – URL: <https://issek.hse.ru/news/776383019.html>
6. Применение метаэвристических алгоритмов в задачах планирования. – Журнал «Информационные технологии», 2022. – № 5. – С. 34-42.

УДК 621.371; ГРНТИ 50

ФУНКЦИИ АКТИВАЦИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.П. Кузнецов*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, kuznetsovaitu@yandex.ru*

Аннотация. Объектом исследования являются комплексные нейронные сети (КНС), предназначенные для обработки комплексных сигналов. КНС содержит комплексные весовые коэффициенты и функции активации в виде функций комплексной переменной. Основной проблемой при построении КНС является разработка комплексных функций активации. Проведен обзор комплексных функций активации, которые применялись при построении КНС прямого распространения, рекуррентных и сверточных КНС.

Ключевые слова: комплексное число, функция комплексной переменной, комплексная нейронная сеть, весовой коэффициент, функция активации, сигнал ошибки, алгоритм обучения, целевая функция, градиент, частная производная.

ACTIVATION FUNCTIONS FOR COMPLEX NEURAL NETWORKS

V.P. Kuznetsov*Ryazan State Radio Engineering University named after V.P. Utkin,
Ryazan, kuznetsovaitu@yandex.ru*

The summary. The article is focused on complex-valued neural networks (CVNN) which are used for an analysis of complex signals. CVNN contains the complex weights and the complex activation functions as a complex variable function. The main problem is the design of complex activation functions. The survey of complex activation functions which are used for feed-forward, recurrent and convolutional CVNN is presented.

Keywords: complex number, complex function, complex-valued neural network, weight coefficient, activation function, error signal, learning algorithm, target function, gradient, partial derivative.

Введение

В последнее десятилетие в области нейронных сетей активно развивается новое направление, связанное с комплексными нейронными сетями (КНС). В англоязычной литературе используется термин complex-valued (комплекснозначная) neural network (CVNN). Под ком-

плексной нейронной сетью понимается нейронная сеть любой структуры, в которой весовые коэффициенты нейронов являются комплексными числами, а функции активации представляют собой функции комплексной переменной. Комплексные сигналы обрабатываются нейронной сетью как единое целое без разделения на вещественные и мнимые составляющие.

На начальном этапе развития КНС их применение было обусловлено естественной комплексной природой сигналов. Комплексные сигналы являются удобным инструментом анализа и синтеза систем телекоммуникаций [1, 2], обработки МРТ-изображений, прогнозирования речевых сигналов, транскрипции музыкальных произведений [3]. С появлением сверточных сетей возник соблазн обрабатывать вещественные изображения с помощью КНС, переводя исходное изображение в комплексную форму на основе БПФ или других преобразований [3].

Основной проблемой при построении комплексной нейронной сети является выбор функции активации из множества функций комплексной переменной. Как известно, активное развитие вещественных нейронных сетей произошло после замены пороговых функций активации, присущих биологическим нейронам, на сигмоидные функции, имеющими непрерывный, нелинейный и ограниченный характер. Из свойства непрерывности автоматически вытекает дифференцируемость таких функций, которая позволила разработать алгоритм обратного распространения ошибки. Подобные требования предъявляются и к комплексным функциям активации, однако проблема дифференцируемости носит принципиальный характер.

Классификация комплексных нейронных сетей

Нейронные сети для обработки комплексных сигналов могут быть построены на основе вещественных нейронных сетей путем разделения комплексных сигналов на вещественную и мнимую части, их раздельную обработку и последующее смешивание. Существует много подходов для реализации этой идеи, которые не будем здесь рассматривать, так как все они нарушают внутреннюю структуру комплексных данных.

КНС для обработки комплексных сигналов подразделяются [4] на два вида: КНС с разделением параметров сети (Split-CVNN) и полностью комплексные КНС (Fully Complex CVNN). Первый тип сетей содержит комплексные весовые коэффициенты, но привычные вещест-

венные функции активации, например сигмоидные, для отдельной обработки вещественной и мнимой частей проходящего сигнала.

Полностью комплексные КНС содержат комплексные весовые коэффициенты и комплексные функции активации. Такие нейронные сети являются предметом обсуждения в данной работе.

Математические аспекты построения комплексной функции активации

Из теории функций комплексной переменной известно, что функция комплексной переменной является дифференцируемой, если для нее выполняются условия Коши-Римана (условия Даламбера-Эйлера). Они заключаются в следующем. Рассматривается функция $f(z)$ комплексной переменной $z = x + jy$:

$$f(z) = p(x, y) + jq(x, y),$$

где p и q - вещественные функции. Условия Коши-Римана состоят в следующем:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial y}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\partial q}{\partial x}.$$

При выполнении этих условий есть две эквивалентные формулы для вычисления производной функции $f(z)$:

$$\frac{df}{dz} = \frac{\partial p}{\partial x} + j \frac{\partial q}{\partial x} = -j \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial y}.$$

Условия Коши-Римана необходимы для аналитичности функции $f(z)$. Они будут достаточными, если дополнительно потребовать непрерывность частных производных функций p и q . Аналитическая функция может быть как однозначной, так и многозначной. Однозначная аналитическая функция называется голоморфной. Очень важно, что для дифференцирования голоморфной функции нужно вычислить только две частных производные: $\partial p / \partial x$ и $\partial q / \partial x$ или $\partial p / \partial y$ и $\partial q / \partial y$. Этим объясняется пристальное внимание к использованию голоморфных функций в качестве комплексных функций активации.

Однако условия Коши-Римана не являются принципиальными для применения не дифференцируемых комплексных функций в качестве функций активации. Это обусловлено вещественным характером целевых функций, минимизация которых лежит в основе обучения нейронных сетей. В частности, для последовательного режима обучения часто используется мгновенный квадрат ошибки, для пакетного режима – суммарный квадрат ошибки.

Остановимся на последовательном режиме обучения, в котором после каждого обучающего примера формируется ошибка $\varepsilon(i) = y(i) - \hat{y}(i) = \varepsilon_u(i) + j\varepsilon_v(i)$, где i – номер примера, $y(i)$ – обучающий сигнал, $\hat{y}(i)$ – выход нейронной сети, $\varepsilon_u, \varepsilon_v$ – вещественная и мнимая составляющие ошибки. Целевая функция в виде квадрата модуля мгновенной ошибки имеет вид:

$$E(i) = \frac{1}{2} |\varepsilon(i)|^2 = \frac{1}{2} (\varepsilon_u^2(i) + \varepsilon_v^2(i)) \rightarrow \min_{W_u, W_v}.$$

Целевая функция может рассматриваться как вещественная функция многих переменных, в качестве которых выступают вещественные и мнимые части W_u, W_v всех весовых коэффициентов нейронной сети. Минимизацию целевой функции будем проводить методом градиента:

$$W(i+1) = W(i) - h \cdot \text{grad } E(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь W – вектор всех аргументов целевой функции, h – параметр обучения, grad – вектор-градиент частных производных целевой функции по каждому аргументу. При вычислении частных производных для каждой функции активации проводится дифференцирование вещественных функций $p(x, y)$ и $q(x, y)$; правда, приходится вычислять уже четыре частных производных.

Примеры комплексных функций активации

Функция активации *SoftSign*

Широкое применение в вещественных сетях находит биполярная логистическая функция, которая, сохраняя знак входного сигнала, преобразует его в диапазон $(-1, 1)$. В данной работе в качестве функции активации предлагается использовать такую функцию комплекс-

ной переменной, которая, сохраняя аргумент комплексного входного сигнала, преобразует его модуль внутрь окружности единичного радиуса с центром в начале координат комплексной плоскости (рис. 1).

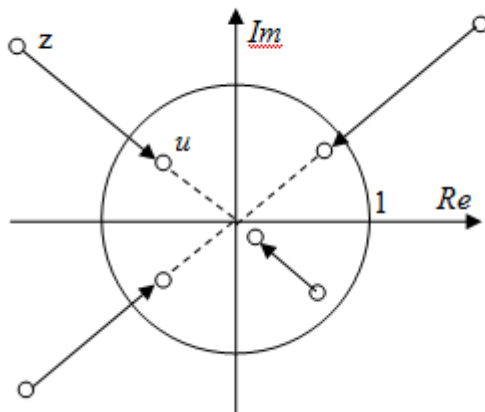


Рис. 1. Преобразование сигнала комплексной функцией активации

Комплексную функцию активации с такими свойствами можно сконструировать на основе вещественной функций активации SoftSign [6]: $y = x / (1 + |x|)$, где x и y – вещественные переменные. Создадим на ее основе функцию комплексной переменной

$$u = f(z) = \frac{z}{1 + |z|} = \frac{x}{1 + \sqrt{x^2 + y^2}} + j \frac{y}{1 + \sqrt{x^2 + y^2}} = p(x, y) + jq(x, y).$$

Частные производные для функции активации SoftSign имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} + y^2}{\left(1 + \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 \sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{|z| + y^2}{(1 + |z|)^2 \cdot |z|},$$

$$\frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} + x^2}{\left(1 + \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 \sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{|z| + x^2}{(1 + |z|)^2 \cdot |z|},$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{x \cdot y}{\left(1 + \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 \sqrt{x^2 + y^2}} = -\frac{x \cdot y}{(1 + |z|)^2 \cdot |z|}.$$

Запишем комплексную функцию активации SoftSign в показательной форме:

$$z = r e^{j\phi}, \quad u = f(z) = \frac{r}{1+r} e^{j\phi}.$$

Отсюда становится понятным характер преобразования входного комплексного сигнала. Фаза выходного сигнала останется прежней, а его модуль уменьшается в зависимости от модуля входного сигнала с коэффициентом преобразования $1/(1+r)$.

Алгебраическая сигмоида

Комплексную функцию активации с похожими свойствами можно сконструировать также из вещественной алгебраической сигмоиды [6]: $y = x / \sqrt{1+x^2}$, где x и y – вещественные переменные. Создадим на ее основе функцию комплексной переменной

$$u = f(z) = \frac{z}{\sqrt{1+|z|^2}} = \frac{x}{\sqrt{1+x^2+y^2}} + j \frac{y}{\sqrt{1+x^2+y^2}} = p(x, y) + jq(x, y).$$

Частные производные для комплексной алгебраической сигмоиды имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1+y^2}{(1+x^2+y^2)\sqrt{1+x^2+y^2}} = \frac{1+y^2}{\sqrt{(1+x^2+y^2)^3}} = \frac{1+y^2}{\sqrt{(1+|z|^2)^3}},$$

$$\frac{\partial q}{\partial y} = \frac{1+x^2}{(1+x^2+y^2)\sqrt{1+x^2+y^2}} = \frac{1+x^2}{\sqrt{(1+x^2+y^2)^3}} = \frac{1+x^2}{\sqrt{(1+|z|^2)^3}}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{x \cdot y}{\sqrt{(1+x^2+y^2)^3}} = -\frac{x \cdot y}{\sqrt{(1+|z|^2)^3}}.$$

Запишем комплексную алгебраическую сигмоиду в показательной форме:

$$z = re^{j\phi}, \quad u = f(z) = \frac{r}{\sqrt{1+r^2}} e^{j\phi}.$$

Отсюда становится понятным характер преобразования входного комплексного сигнала. Фаза выходного сигнала останется прежней, а его модуль уменьшается в зависимости от модуля входного сигнала с коэффициентом преобразования $1/\sqrt{1+r^2}$.

Экспериментальные исследования [1,2] показали, что предложенные функции активации сопровождаются примерно одинаковой эффективностью обучения. Однако функция SoftSign приводит к меньшему объему вычислений при нахождении ее частных производных.

Комплексная кардиоида

В качестве комплексной функции активации может быть использована комплексная кардиоида:

$$u = f(z) = 0,5(1 + \cos(\arg(z)))z.$$

Если переменную z записать в показательной форме: $z = re^{j\phi}$, то кардиоида примет вид:

$$u = f(z) = 0,5(1 + \cos \phi)re^{j\phi}.$$

Отсюда становится понятным характер преобразования входного комплексного сигнала. Его фаза останется прежней, а модуль уменьшится в зависимости от фазы с коэффициентом преобразования $0,5(1 + \cos \phi) \in [0; 1]$. Рисунок 2 характеризует это преобразование для входного сигнала, расположенного на окружности единичного радиуса с центром в начале координат.

Рассмотрим вычисление частных производных для функции активации SoftSign. Для этого придадим ей алгебраическую форму записи:

$$\begin{aligned} z &= x + jy, \quad f(z) = 0,5[1 + \cos(\arctg(y/x))]x + \\ &+ j0,5[1 + \cos(\arctg(y/x))]y = p(x,y) + jq(x,y). \end{aligned}$$

Частные производные для комплексной кардиоиды имеют вид:

$$\begin{aligned}\partial p / \partial x &= 0,5(1 + \cos(\arctg(y / x)) + 0,5xy \sin(\arctg(y / x)) / (x^2 + y^2), \\ \partial p / \partial y &= -0,5x^2 \sin(\arctg(y / x)) / (x^2 + y^2), \\ \partial q / \partial x &= -0,5y^2 \sin(\arctg(y / x)) / (x^2 + y^2), \\ \partial q / \partial y &= 0,5(1 + \cos(\arctg(y / x)) - 0,5xy \sin(\arctg(y / x)) / (x^2 + y^2).\end{aligned}$$

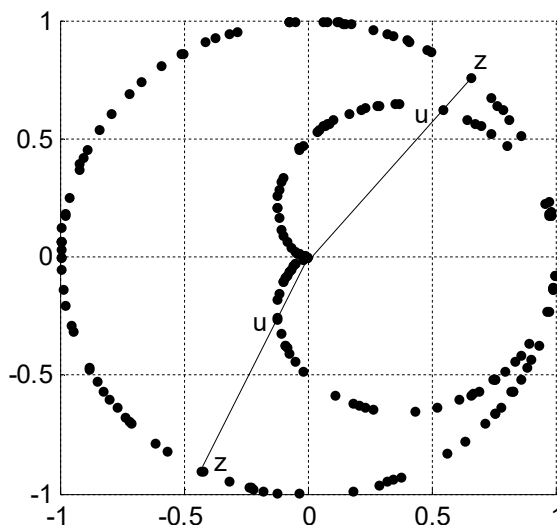


Рис. 2. Преобразование сигнала комплексной сигмной

Функции активации на основе ReLu

В последнее время большое внимание уделяется реализации сверточных нейронных сетей в комплексной области. В сверточных слоях используются комплексные аналоги функции активации ReLu. Наибольшее распространение получили zReLU, modReLU, ComplexReLU [4].

Функция активации zReLU определяется следующим образом:

$$zReLU = \begin{cases} z, & \text{if } 0 < \arg(z) < \pi / 2 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Функция активации modReLU определяется следующим образом:

$$\text{mod Re Lu} = \text{Re Lu}(|z| + b)e^{j\phi} = \begin{cases} (|z| + b)e^{j\phi}, & \text{if } |z| \geq b \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Здесь $b \in R$ – обучаемый параметр, который вводит смещение для создания «мертвой» зоны радиусом b вокруг начала координат, где нейрон неактивен, и вне которой он активен.

Функция активации ComplexReLU определяется следующим образом:

$$z = x + jy, \quad \text{Complex Re Lu} = \text{Re Lu}(x) + j \text{Re Lu}(y).$$

Функция активации ComplexReLU удовлетворяет условиям Коши-Римана, если действительная и мнимая части сигнала z одновременно либо строго положительны, либо строго отрицательны.

Заключение

В работе рассмотрены наиболее распространенные комплексные функции активации, находящие применение в КНС. Главная проблема и перспективное направление исследований в этой области заключается в построении полностью комплексных функций активации, которые удовлетворяют условиям Коши-Римана в практически важной области комплексной плоскости. Использование таких функций активации сопровождается значительно меньшим объемом вычислений.

Библиографический список

1. Кузнецов В.П. Комплексная нейронная сеть // Цифровая обработка сигналов, 2023, №3, с. 32-36.
2. Кузнецов В.П. Комплексная рекуррентная нейронная сеть // Вестник РГРТУ, 2025.
3. Chiheb Trabelsi and others. Deep complex networks. arXiv e-prints, arXiv-1705, 2017.
4. Rayyan Abdalla. Complex-Valued Neural Networks – Theory and Analysis. arXiv preprint arXiv:2312.06087v1, 2023.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. М.: Изд. дом «Вильямс», 2008.
6. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018.

УДК 656.073.1; ГРНТИ 06.73.35, 82.39.21 ,85.13.01

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ

С.Н. Дьяков, В.А. Никишкина*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, Sergy-DN@yandex.ru*

Аннотация. В данной статье проводится анализ основных методов нахождения начального опорного плана для задач транспортной логистики. Рассматриваются их алгоритмы, ключевые особенности и сравнительные характеристики. На основе проведенного сравнения по таким критериям, как учет стоимости перевозок, трудоемкость, скорость и качество получаемого решения, делается вывод о целесообразности применения каждого метода. Установлено, что простые в реализации методы (северо-западного угла) обеспечивают низкое качество решения, в то время как более трудоемкие (аппроксимации Фогеля) позволяют получить план, близкий к оптимальному.

Ключевые слова: транспортная логистика, грузоперевозки, транспортная задача, опорный план, метод северо-западного угла, метод минимальной стоимости, метод аппроксимации Фогеля, метод двойного предпочтения.

ANALYSIS OF METHODS FOR SOLVING PROBLEMS OF TRANSPORT LOGISTICS

S.N. Dyakov, V.A. Nikishkina*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Sergy-DN@yandex.ru*

Abstract. In this paper analyzes the primary methods for determining the initial feasible solution for transportation logistics problems. The algorithms, key characteristics, and comparative features of these methods are examined. Based on the comparison using criteria such as transportation cost consideration, labor intensity, speed, and quality of the obtained solution, conclusions are drawn regarding the appropriateness of each method. It is found that simpler methods (north-west corner method) yield low-quality solutions, whereas more labor-intensive ones (Vogel's approximation method) allow for obtaining a plan close to the optimal one.

Keywords: transport logistics, cargo transportation, transport task, reference plan, north-west corner method, minimum cost method, Vogel's approximation method, double preference method.

Транспортная логистика в настоящее время является одним из самых востребованных видов логистики. Транспортная логистика – это процесс перемещения грузов и пассажиров от начальной до конечной точки следования, обеспеченный информационным, телекоммуникационным, страховым и финансовым сопровождением [3].

Основное внимание в статье уделено транспортной логистике применительно к сфере грузоперевозок. Ключевой предмет изучения и управления в транспортной логистике — это совокупность задач, возникающих при необходимости перемещения товара из одного пункта в другой. Данные задачи, именуемые транспортными, охватывают весь процесс организации перевозки.

На сегодняшний день транспортные задачи играют одну из ключевых ролей в компании. Это обуславливается тем, что благодаря грузоперевозкам происходит своевременная доставка товара по конкретному адресу и при минимальных затратах.

Прежде чем приступить к решению транспортной задачи, необходимо определить ее структуру, а именно, является ли она (открытая или закрытая, или иначе сбалансированная или не сбалансированная) [1].

В сбалансированной модели все товары доставляются получателям, и все запросы клиентов полностью выполнены. В открытой модели возможны два варианта: либо все клиенты получают необходимое, а на складах остаются излишки товаров (объем поставки больше объема спроса), либо весь товар израсходован, но потребности всех клиентов не удовлетворены (объем поставки меньше объема спроса) [1].

Для решения транспортных задач требуется сначала определить опорный план, а затем оптимальный. Для нахождения опорного плана используются такие методы, как метод северо-западного угла (диагональный метод), метод минимальной стоимости (метод минимального элемента), метод «аппроксимации Фогеля», метод вычеркивания (метод двойного предпочтения) [2].

Рассмотрим каждый метод более подробно, используя транспортную таблицу, строки которой соответствуют пунктам отправления (ПО), а столбцы – пунктам назначения (ПН).

Метод северо-западного угла (диагональный метод) заключается в следующем.

Шаг 1. Алгоритм начинает работу с верхней левой (северо-западной) ячейки транспортной таблицы.

Шаг 2. В эту ячейку вносится максимально возможное количество груза. Это количество определяется либо запасом поставщика, либо потребностью потребителя, в зависимости от того, что меньше.

Шаг 3. Продолжается процесс последовательного заполнения таблицы, двигаясь по строкам и столбцам. На каждой итерации для текущей ячейки определяется максимально возможный объем перевозок с учетом оставшихся запасов поставщиков и неудовлетворенных потребностей потребителей.

Шаг 4. Заполнение ячеек продолжается до тех пор, пока не будут полностью использованы запасы всех поставщиков и удовлетворены потребности всех потребителей [4].

Метод минимальной стоимости (метод минимального элемента) включает в себя 4 последовательных шага.

1. Первым действием является поиск в транспортной таблице ячейки с наименьшей стоимостью перевозки.
2. Для найденной ячейки определяется максимальный объем поставки, ограниченный текущими показателями доступности товара у поставщика и потребностями получателя.
3. Исключение строк и столбцов:
 - исключается строка поставщика, если его запасы полностью исчерпаны.
 - исключается столбец потребителя, если его потребности полностью удовлетворены.
 - исключаются и строка, и столбец одновременно, если и запасы поставщика, и потребности потребителя полностью удовлетворены.
4. Шаги 1-3 повторяются для оставшихся доступных ячеек. Процесс продолжается до тех пор, пока все запасы не будут распределены, а все потребности не будут удовлетворены. На каждом шаге выбирается ячейка с наименьшей стоимостью из всех доступных в текущий момент [4].

Примечание: если встречаются несколько ячеек с одинаковой минимальной стоимостью, алгоритм может выбрать любую из них (часто выбирается первая найденная или применяется дополнительное правило выбора).

Метод аппроксимации Фогеля для нахождения опорного плана транспортной задачи реализуется по следующему алгоритму.

1. Сначала для каждой строки и каждого столбца вычисляется разность между двумя минимальными тарифами в рамках этой строки или столбца среди всех доступных незаполненных ячеек. Эта разность называется штрафом.
2. Определяется строка или столбец с максимальным значением штрафа. При наличии нескольких одинаковых штрафов выбор между ними осуществляется произвольно.
3. В выбранной строке/столбце находится клетка с наименьшим тарифом. В данную клетку записывается максимально возможный объем перевозки, равный минимальному значению из остатка запаса поставщика и неудовлетворенной потребности соответствующего потребителя.
4. Производится корректировка таблицы. Если в результате распределения запас поставщика оказался полностью исчерпан, то данная строка исключается из дальнейшего рассмотрения. Аналогично, если потребность потребителя полностью удовлетворена, его столбец исключается. Если же одновременно обнуляются и запас, и потребность, то из рассмотрения исключаются и строка, и столбец одновременно.
5. Шаги 1-4 повторяются для оставшейся части таблицы до полного распределения запасов и удовлетворения потребностей. На каждой итерации штрафы пересчитываются только для тех строк и столбцов, которые еще не исключены.

Примечание: в случаях, когда при выборе клетки с наименьшим тарифом находится несколько ячеек с одинаковым значением тарифа, алгоритм предусматривает произвольный выбор среди этих вариантов.

Метод вычеркивания (метод двойного предпочтения). Алгоритм данного метода работает следующим образом.

1. Определяются ячейки с минимальной стоимостью в рамках каждой строки и каждого столбца исходной транспортной таблицы.
2. В отобранные на предыдущем этапе ячейки вписывается максимально возможный объем перевозок. Для каждой такой ячейки объем поставки определяется как минимальное значение между остатком запаса поставщика и неудовлетворенной потребностью потребителя.

3. Оставшиеся нераспределенными объемы перевозок последовательно распределяются по ячейкам, имеющим наименьшую стоимость из доступных. Этот процесс выполняется с учетом текущих ограничений по остаткам запасов поставщиков и неудовлетворенным потребностям потребителей до полного исчерпания всех запасов и удовлетворения всех потребностей.

Изучив алгоритмы заполнения ячеек в транспортной таблице, можно заметить, что принципиальное различие между методами заключается исключительно в стратегии выбора очередной клетки для заполнения. Независимо от применяемого метода (северо-западного угла, наименьшей стоимости или аппроксимации Фогеля), само заполнение происходит одинаково.

Сравнительный анализ представленных методов осуществляется в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов нахождения опорных планов

Критерии сравнения	Метод северо-западного угла (диагональный метод)	Метод минимальной стоимости (Метод минимального элемента)	Метод «аппроксимации Фогеля»	Метод вычеркивания (метод двойного предпочтения)
Учет стоимости перевозки	Не учитывает	Учитывает	Учитывает	Учитывает
Трудоемкость вычислений	Простой	Сложнее, чем у диагонального метода	Трудоемкий	Трудоемкий (при больших размерах транспортной таблицы)
Количество времени, необходимое для решения задачи	Мало	Больше, чем для диагонального метода	Много	Много
Качество решения (степень приближения к оптимальному плану)	Низкое	Выше, чем у диагонального метода	Высокое или соответствует ему	Теоретически близок к оптимальному, но не соответствует ему

Продолжение таблицы 1

Оперативность предоставления ответа на решение задачи	Быстрая	Медленнее, чем у диагонального	Очень медленная	Медленная
Уровень сложности для понимания	Простой	Более сложный, чем диагональный метод	Сложный	Сложный
Применение метода	Больше подходит для однородной продукции	Широко применим в различных областях	Употребляется для решения сложных задач, где используется матрицы больших размеров	Используется, когда размер матрицы затрат значителен, а полный перебор всех возможных вариантов затруднен.

Сравнив перечисленные выше методы, можно заключить, что метод северо-западного угла обычно дает наименее точный результат, далекий от оптимального. Это связано с тем, что он игнорирует стоимость перевозки. Однако его преимущество – простота в применении и понимании. Метод Фогеля, хоть и требует больше усилий, так как приходится выполнять сложные вычисления и соответственно уходит большое количество времени на его применение. Но он часто приводит к результату, наиболее близкому к оптимальному, а иногда и полностью его повторяет. Поэтому метод Фогеля считается наиболее востребованным для решения транспортных задач. Но бывают ситуации, когда решение необходимо принять быстро, тогда рекомендуется использовать метод северо-западного угла или метод минимального элемента. Если время не является критичным фактором, лучше применить более сложные, но точные методы, такие как метод двойного предпочтения или метод аппроксимации Фогеля.

Таким образом, при выборе метода следует учитывать, что важнее: получить максимально точный результат или упростить процесс вычислений. И следует помнить, что перед нахождением опорного плана транспортная задача должна быть сбалансирована.

Библиографический список

1. Бахтиярова, О.Н. Некоторые методические аспекты изложения темы «построение первоначального опорного плана транспортной задачи» / О. Н.

Бахтиярова, И. В. Птицына // Modern European Researches. – 2021. – № 2 (Т.1). – С. 1–9.

2. Бунтова, Е.В. Использование транспортной задачи для определения оптимального плана грузоперевозок / Е. В. Бунтова, М. А. Нестерова, А. Д. Серкова // Human progress. – 2018. – Т. 4, № 2. – [Электронный ресурс]. – URL: http://progress-human.com/images/2018/Tom4_2/Buntova.pdf (дата обращения: 27.10.2025).

3. Колочева, В.В. Транспортная логистика : учебное пособие / В. В. Колочева, С. А. Максимов, В. А. Назаркина. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 88 с.

4. Лебедева, О.А. Сравнительный анализ методов решения транспортных задач при оптимальном планировании перевозочного процесса / О. А. Лебедева, В.Е. Гозбенко, А.А. Пыхалов, Ю.Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 134–139. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).134-139.

5. Тришин, Ф. С. Сравнительный анализ математических методов решения транспортных задач / Ф. С. Тришин, В. В. Алексеев, Д. В. Мартынов // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции / под ред. Ф. Е. Удалова, В. В. Бондаренко. – Пенза, 2023. – С. 337–341

УДК 681.51; ГРНТИ 50.47

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БЛОКА АВТОМАТИЗАЦИИ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Н.М. Хлебников, М.В. Ленков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru*

Аннотация. В данной статье рассмотрен вопрос проектирования щита автоматики для обеспечения непрерывной работы оборудования на нефтеперекачивающей станции. Приведено описание технологических процессов и основных режимов работы НПС, представлена электрическая схема и определены элементы, входящие в состав шкафа автоматизированного управления, а также рассмотрено их назначение.

Ключевые слова: щит автоматики (ЩА), нефтеперекачивающая станция (НПС), технологический процесс, автоматизированное управление, технические средства контроля.

DEVELOPMENT OF AN ELECTRICAL UNIT FOR AUTOMATION OF CONTROL MODES OF AN OIL PUMPING UNIT

N.M. Khlebnikov, M.V. Lenkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru*

Abstract. This article discusses the design of an automation panel to ensure the continuous operation of equipment at an oil pumping station. It provides a description of the technological processes and main operating modes of the oil pumping station, an electrical diagram, and identifies the components of the automated control cabinet, as well as their purpose.

Keywords: Automation shield (AS), oil pumping station (OPS), technological process, automated control, technical control.

Введение

Магистральная нефтеперекачивающая установка - это комплекс технических средств, предназначенных для транспортировки нефтепродуктов по трубопроводам на большие расстояния. Она обеспечивает бесперебойное и эффективное перемещение сырья и продуктов, что является важной составляющей нефтяной промышленности и энергетической системы страны. Магистральные установки включают насосы, компрессоры, системы автоматизации и контроля, позволяющие поддерживать стабильные параметры транспортируемых потоков и минимизировать потери [1].

Установка может работать в автоматическом и ручном режимах.

В автоматическом режиме работа системы происходит без вмешательства людей. Под управлением ПЛК система, при помощи насосного оборудования, обеспечивает стабильное давление для перекачки нефти по магистрали. При этом контролируются параметры работы насосов, характеристики нефти (температура, давление, перекачиваемые объёмы), возможность утечки.

В ручном режиме запуск насосного оборудования осуществляют люди, находящиеся на технологическом объекте. Они же контролируют, при помощи шкафа управления, параметры работы системы и состояние нефти.

Описание технологии работы НПС

В структуру технологического объекта управления входят следующие элементы [3]:

- магистральная насосная станция (МНС), включающая четыре независимых насосных агрегата и систему контроля и регулирования давления.
- вспомогательные установки, обеспечивающие бесперебойную работу насосного оборудования (например, масла-система).
- дополнительные системы, поддерживающие оптимальные условия в производственных помещениях насосной подстанции, такие как приточно-вытяжная вентиляция, система отводов утечек и система пожарной безопасности.

На объекте НПС поток нефти проходит через ряд этапов: узел подключения станции к магистрали, фильтры-грязеуловители, насосная установка магистрального типа, система регулирования давления, узел подключения, магистраль.

Технологические объекты управления (ТОУ) классифицируются по их информационным характеристикам, разделяясь на системы, любая из которых включает управляющие элементы, состоящие из составных блоков, называемых подобъектами. В таблице 1 представлено структурное деление ТОУ на системы, объекты и подобъекты [2].

Таблица 1. Технологическая классификация ТОУ

Наименования системы	Технологические объекты
Узел регулирования давления	здвижки САР, регулирующие заслонки
Маслосистема	маслонасос, маслобак, маслофильтр, маслолиния к МНА, аккумулирующий бак
Вытяжная вентиляции блока гашения ударной волны	вытяжной вентилятор
Система пожаротушения НПС	пенонасос, коллектор подачи пены (пенолиния), здвижки подачи пены к объектам, резервуар раствора пенообразователя, водонасос

Продолжение таблицы 1

Система энергоснабжения	ввод секции шин 10кВ в составе: 1. Вводной масляный выключатель, 2. Секционный масляный выключатель, 3. Масляный выключатель электродвигателя, 4. ДЭС - секция шин 10кВ, 5. Секция шин 1ЩСУ, 6. Секция шин 2ЩСУ, 7. Секция шин 3ЩСУ, 8. Секция шин ЩСУ ССВД, 9. Секция шин ЩСУ КТП
-------------------------	---

Разрабатываемый блок автоматизации предусматривает как ручное управление установкой, так и работу в автономном режиме, без непосредственного участия человека, а лишь с удаленным контролем.

Дистанционный контроль предполагается обеспечить при помощи систем удалённой диспетчеризации и контроля SCADA, в которой будет [4]:

- Индикация срабатывания датчиков.
- Отображение работы насосов.
- Информация о работе насосов. Давление, создаваемое насосами, температура.
- Информация по объёмам, скорости перекачки нефти.
- Информация о перекачиваемой нефти. Температура нефти, давление на выходе в магистраль.
- Сообщения об ошибках, предупреждения и сообщения об авариях.
- Напоминания о необходимости профилактического обслуживания.

Такой подход позволит обеспечить отслеживание работы системы на технологическом объекте без необходимости постоянного нахождения человека в помещении с оборудованием.

Также подобная система делает возможным контроль сразу нескольких объектов управления. Один человек, находясь в диспетчерской на удалении способен проверять сразу несколько перекачивающих установок [5].

В случае возникновения ошибок в работе или необходимости технического обслуживания, на станцию направляются инженеры, механики и обслуживающий персонал.

Состав технических средств блока автоматизации

Центральным объектом обеспечения работы является щит автоматики. ЩА будет укомплектован следующим оборудованием:

- Основным элементом управления – программируемым логическим контроллером.
- Основными и резервными источниками питания.
- GSM - модемом.
- Автоматическими выключателями, стабилизаторами и предохранителями.
- Розеточным блоком.

Технологическая схема подключения элементов системы нефтеперекачивающей станции к ПЛК представлена на рисунке 1.

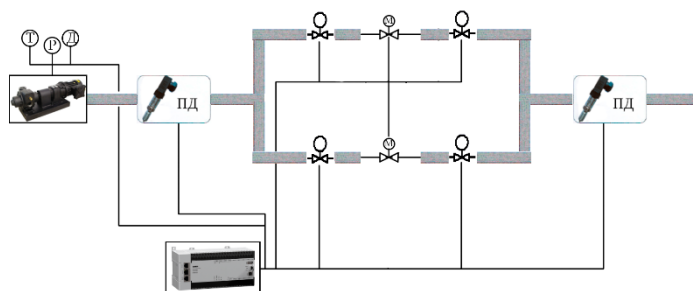


Рис.1. Технологическая схема подключения элементов системы НПС к ПЛК

На рисунке 2 представлено расположение элементов схемы в шкафу автоматики. Режимы автоматизированного управления технологическим процессом НПС реализуются на основе взаимодействия используемого оборудования и выполнения ими следующих функций:

- ПЛК – устройство, к которому подключаются все датчики (температуры, давления, расхода), элементы управления системы (клапаны, задвижки, насосы), элементы ручного контроля (кнопки, переключатели, лампочки).

Алгоритм автоматизированного управления и контроля технических средств установки выполняется управляющей программой ПЛК.

- Источники вторичного питания обеспечивают электроснабжение основных маломощных устройств.

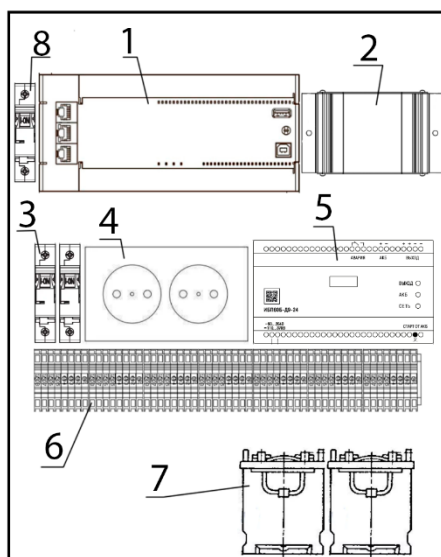


Рис .2. Конструкция элементов шкафа автоматики.

На рисунке: 1 – ПЛК 160 м02; 2 – GSM модем; 3 – автоматические выключатели; 4 – розеточный блок; 5 – источник питания; 6 – клеммная колодка; 7 – аккумуляторы; 8 – переключатель

В случае отключения электричества, включается резервное питание. Это позволяет ПЛК вести контроль за технологическим процессом и выполнять протоколирование событий на объекте в условиях отсутствия внешнего питания. В случае если отключение было кратковременным система возобновит работу без необходимости вмешательства оператора.

- GSM модем необходим для связи системы контроля с удаленным диспетчерским пунктом и отправки оператору отчетов.
- Автоматические токовые выключатели, стабилизаторы и предохранители защищают систему от перепадов и резких скачков токов и напряжений, а также от паразитных сигналов и помех.
- Розеточный блок применяется для подключения к сети питания электротехнического оборудования, используемого операторами технологической установки.

Алгоритм работы автоматизированной системы

Система управления технологическим оборудованием нефтеперекачивающей станции в автоматическом режиме работает следующим образом.

ПЛК получает с датчиков (применяются как дискретные, так и аналоговые датчики с токовым выходом 4-20 мА) информацию о температуре и давлении нефти на насосах, объёмы перекачиваемой насосами нефти, давление и температуру нефти на выходе с узла регулирования, перед подачей в магистраль.

На основе полученной информации, в соответствии с алгоритмом реализации основных режимов работы оборудования НПС и разработанной программой, ПЛК управляет исполнительными механизмами.

Задача системы заключается в поддержании давления нефти для транспортировки по нефтяной магистрали на дальние расстояния и недопущение аварийных ситуаций.

В случае изменения давления потока нефти ПЛК приоткрывает или закрывает пропускные клапаны, при помощи управляемых приводов.

В случае повышения температуры нефти ПЛК будет приоткрывать заслонки для уменьшения давления, вплоть до полного освобождения пропускного диаметра магистрали. Если это не решит задачу, ПЛК остановит работу ветки и сообщит диспетчеру об аварии.

В случае фиксации утечки, будет перекрыта магистраль, в которой обнаружена утечка, и откроется резерв. Оператор получит сообщение об аварийной ситуации.

В случае аварии работа станции перекачивания нефти может замедляться или полностью останавливаться до прибытия персонала и проведения ремонтных работ и восстановления системы.

Мелкие ошибки и предупреждения ПЛК снимает сам, в случае стабилизации работы и продолжения функционирования системы. Аварийные события необходимо сбрасывать вручную, после проведения диагностики и ремонта.

Для возможности управления системой вручную - запуска, остановки работы системы, выбора режима работы и устранения неисправностей на щите предусмотрена лицевая панель с кнопками, переключателями, лампочками.

Заключение

В качестве расширения возможностей системы автоматизации НПС в части контроля технического оборудования предлагается в перспективе решение следующих задач:

1. Обеспечение контроля системы вентиляции на объекте.
2. Обеспечение контроля системы пожарной безопасности.
3. Отслеживание и локализация возможных утечек.

Модернизация автоматизированной системы нефтеперекачивающей станции с учетом данных предложений по техническому усовершенствованию является не трудоемким, но достаточно эффективным способом обеспечения режима непрерывной, безаварийной работы установки. Кроме этого, применение подобных автоматизированных систем на объектах по транспортированию и обработке нефти позволит добиться снижения затрат на выполнение ручных работ и повысить безопасность операторов станций.

Библиографический список

1. Автоматизация. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Автоматизация>.
2. Каталог компании Овен, ПЛК 160 м02. [Электронный ресурс]. URL: <https://owen.ru/product/plk160>.
3. Программируемые контроллеры. Практическое применение языков стандарта МЭК61131-3/под ред. проф. В.П. Дьяконова – Москва 2004. – 254с.
4. SCADA. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA>.
5. Техника безопасности. Правила при электромонтажных работах. [Электронный ресурс]. URL: <https://gktechnoprof.ru/blog/elektromontazhnye-raboty-pravila-i-sovety/>.

УДК 658.562; ГРНТИ 81.81.21

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЬНОГО ЛИСТА ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЯ НА ВСЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ МАРШРУТЕ ФРЕЗЕРНОЙ И ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

И.А. Тарудько, М.В. Ленков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru*

Аннотация. В данной работе рассматриваются ключевые принципы разработки и внедрения автоматизированного контрольного листа (чек-листа) для управления качеством на всех этапах технологического маршрута токарно-фрезерной обработки. Показано, что интеграция такого инструмента в производственный процесс позволяет минимизировать человеческий фактор, стандартизировать контрольные операции, повысить и обеспечить стабильно высокое качество выпускаемых изделий.

Ключевые слова: контрольный лист, технологический маршрут, автоматизация производства, качество продукции.

PRINCIPLES OF FORMING AN AUTOMATED CHECKLIST FOR THE PRODUCTION OF A PRODUCT ALONG THE ENTIRE TECHNOLOGICAL ROUTE OF MILLING AND TURNING

I.A. Tarudko, M.V. Lenkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru*

Annotation. This paper discusses the key principles of the development and implementation of an automated checklist for quality management at all stages of the technological route of turning and milling. It is shown that the integration of such a tool into the production process makes it possible to minimize the human factor, standardize control operations, and improve and ensure consistently high quality of manufactured products.

Keywords: checklist, technological route, production automation, product quality.

Введение

Современное производство требует не только высокой производительности, но и гарантированного качества. Технологический маршрут изготовления сложной детали, включающий фрезерные и токарные операции, представляет собой цепь взаимосвязанных процессов,

где ошибка на любом этапе ведет к существенным потерям в затраченном материале и финансах. Традиционные методы контроля, основанные на бумажных носителях и выборочных проверках, не способны обеспечить требуемую надежность и скорость реагирования, не являются столь гибкими в скорости обновления и требуют куда большего времени на внедрение. Решением является внедрение автоматизированного контрольного листа, интегрированного в цифровой контур предприятия. Данная работа будет фокусироваться на ключевых технических аспектах его формирования: от сверки управляющих программ до мониторинга состояния оборудования.

Концепция автоматизированного контрольного листа в цифровом производстве

Автоматизированный контрольный лист – это не статичный документ, а динамическая система, являющаяся частью MES (Manufacturing Execution System) или ERP-системы. Чек-листы формируются на основе эксплуатационной документации оборудования и внутренних регламентов предприятия [1]. В них включаются обязательные проверки, которые должны выполняться оператором при запуске станка, во время смены или при её завершении. Один из вариантов контрольного листа представлен на рисунке 1.

Наименование документа	Контрольный лист готовых изделий по видам дефектов		
Предприятие _____	Контролер _____	Дата _____	
Подразделение _____			
Вид дефекта	Данные контроля		
Несоответствие массы			
Заусенцы			
Борозды			
Рытвины			
Трещины			
Несоответствие высоты			
Несоответствие внешнего диаметра			
Несоответствие маркировки			
Прочее			
Всего проверено		Кол-во выявленных несоответствий	

Рис.1. Форма контрольного листа готовых изделий по виду дефектов

Обобщенный алгоритм может быть представлен следующей последовательностью действий [2]:

Декомпозиция технологического или рабочего процесса. На данном этапе осуществляется структурирование задачи путем ее разделения на логически обособленные этапы, формирующие каркас будущего документа. Для примера, чек-лист в области охраны труда и промышленной безопасности может быть структурирован по модульному принципу, включая такие разделы, как: «Организация обучения и инструктажа персонала», «Процедуры складирования и хранения материалов», «Контроль соблюдения регламентов рабочего процесса», «Обеспечение требований пожарной безопасности», «Соблюдение норм электробезопасности» и прочие.

Детализация этапов до уровня элементарных операций. Каждый выделенный модуль подлежит дальнейшему членению на атомарные, проверяемые действия. В контексте раздела «Электробезопасность» это могут быть пункты: «Наличие и соответствие нормам заземления всех электроприемников», «Соблюдение графика планово-предупредительных проверок электрооборудования», «Подтверждение наличия у персонала, допущенного к работе с электроинструментом, соответствующей группы по электробезопасности», «Обеспеченность сотрудников средствами индивидуальной электрозащиты».

Тестовое внедрение для проверки в реальных условиях. Разработанный предварительный вариант чек-листа проходит стадию опытной эксплуатации в реальных производственных условиях для верификации его полноты, однозначности и практической применимости.

Корректировка и оптимизация. По итогам апробации в документ вносятся необходимые исправления, дополнения и уточнения, направленные на устранение выявленных недостатков и повышение его юзабилити и эффективности.

Этапы формирования чек-листа для фрезерных операций

В контексте фрезерного цеха автоматизированный чек-лист – это динамический сценарий контроля, привязанный к операциям техпроцесса. Он не существует отдельно, а является частью рабочей инструкции оператора и контролера ОТК, интегрированной в MES-систему. Его главная задача – сделать все параметры качества измеримыми, отслеживаемыми и управляемыми [3]. Выделяют следующие этапы формирования контрольного листа [4]:

1. Подготовительный контроль и привязка к цифровому интерфейсу

Сверка версии УП: система автоматически проверяет, что загруженная на станок версия программы соответствует утвержденной версии в PLM-системе. Пример: Чек-лист фиксирует хэш-сумму файла УП и сравнивает ее с эталонной.

Виртуальная верификация УП: интеграция с программным обеспечением для симуляции обработки (например, Vericut). Чек-лист может отображать статус "Симуляция пройдена", что исключает риск столкновения и грубых ошибок программирования.

Контроль технологических параметров в УП: автоматизированный парсинг G-Code для извлечения запрограммированных значений таких как скорость шпинделя (S), подача (F), глубина резания (ap), ширина фрезерования (ae), используемые корректоры (D, H) и т.д.

Контроль оснастки и инструмента: чек-лист требует от оператора сканировать штрих-коды на установленной оснастке (патрон, цанга, оправка) и инструменте. Система сверяет их с теми, что указаны в карте наладки.

Мониторинг фактических режимов резания: встроенные системы мониторинга станка (например, Sinumerik Integrate, Fanuc MT-Linki) позволяют в реальном времени считывать фактические значения скорости шпинделя, подачи, момента и потребляемой мощности.

2. Операционный контроль во время фрезерной обработки.

На данном этапе осуществляется непрерывный мониторинг технологического процесса в реальном времени. Этот этап включает следующие ключевые направления контроля.

Мониторинг фактических режимов резания (через OPC UA или аналоги): сравнение Sфакт. и Sзапр., Fфакт. и Fзапр. Система в реальном времени строит графики. Отклонение более чем на 10-15% является триггером для предупреждения.

Мониторинг вибраций: данные с акселерометров на шпинделе анализируются на предмет возникновения вредных резонансных частот, что особенно критично при чистовой обработке.

Контроль стойкости инструмента: учет времени работы: Система автоматически ведет учет машинного времени для каждого инструмента.

Предиктивный анализ: на основе мониторинга мощности и вибраций система прогнозирует остаточный ресурс пластин и фрез. Чек-лист формирует задание на замену инструмента до его полного износа.

Контроль на станке: использование щупов, базирование заготовки - автоматическое определение смещения и поворота детали в системе координат станка. Результаты (G54, G55 и т.д.) автоматически заносятся в чек-лист.

Контроль после черновой обработки: измерение критических черновых размеров для подтверждения правильности припусков.

Контроль геометрии после чистовой обработки: измерение пазов, отверстий, уступов. Например, контролировать диаметра отверстия под подшипник после расточки, но до снятия детали со станка.

3. Контроль после обработки.

На третьем этапе осуществляется окончательная приемка готовой детали после ее извлечения из станка. Этот комплексный контроль включает несколько ключевых направлений. Прежде всего, выполняется контроль точности размеров, где система автоматически создает измерительные программы для координатно-измерительной машины на основе CAD-модели. Результаты измерений - фактические значения размеров, величины отклонений от номинала и соответствие полям допусков - напрямую импортируются в чек-лист. Система автоматически подсвечивает параметры, вышедшие за допустимые пределы, что обеспечивает наглядную визуализацию несоответствий. Параллельно осуществляется контроль шероховатости поверхности, включающий выборочные замеры параметров Ra и Rz профилометром для критических поверхностей, таких как посадочные места, уплотнительные поверхности и зоны контакта с другими деталями. Одновременно проводится косвенный контроль через фиксацию параметров обработки, подтверждающий использование исправного инструмента, соблюдение режимов чистовой обработки и соответствие подачи на зуб требуемым значениям для достижения заданной шероховатости.

4. Контроль точности размеров (по ISO 2768-mK или индивидуальным допускам) [5]:

Автоматическое создание измерительной программы СММ - на основе CAD-модели система генерирует программу для координатно-измерительной машины.

Прямой импорт отчета СММ в чек-лист - результаты измерений (размеры, допуски, отклонения) автоматически размещаются в соответствующих полях чек-листа. Система подсвечивает красным размеры, вышедшие за поля допуска.

Контроль сложных поверхностей (свободные формы) - использование 3D-сканирования и сравнение с CAD-моделью в программном

обеспечении для контроля геометрии (например, Polyworks, GOM Inspect). Цветовая карта отклонений прикрепляется к чек-листу как наглядное доказательство качества.

5. Контроль шероховатости поверхности.

Выборочный контроль профилометром: Для ключевых поверхностей (посадочные места, уплотнительные поверхности) оператор проводит замеры параметров Ra, Rz.ц Косвенный контроль через параметры обработки - чек-лист фиксирует, что чистовые переходы выполнялись исправным инструментом (свежая режущая кромка) с режимами, гарантирующими требуемую шероховатость (высокая скорость, малая подача на зуб).

Заключение

Автоматизация формирования детализированного контрольного листа, охватывающего все этапы фрезерного производства, обеспечивает за счет нетрудоемких операций контроля повышение эффективности производственного процесса с минимальным браком изготовления изделий. Он позволяет не только гарантировать соответствие каждой детали чертежу, но и накапливать цифровую историю, необходимую для непрерывного улучшения техпроцессов и прогнозирования состояния оборудования. Внедрение такой системы – это уверенный шаг к увеличению производительности и достижению высококачественного производства.

Библиографический список

1. Батов, В.П. Автоматизированные системы управления машиностроительным производством: учебник для вузов / В.П. Батов, Ю.М. Солнцев. - Москва: Машиностроение, 2020. - 367 с.
2. Дальский, А.М. Технология машиностроения: учебник для вузов / А.М. Дальский, И.А. Ануриев и др.; под ред. А.М. Дальского. - Москва: Машиностроение, 2019. - 512 с.
3. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 томах / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков. - 6-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 2018. - Т. 1. - 480 с.
4. Схиртладзе, А.Г. Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении: учебник для вузов / А.Г. Схиртладзе, В.В. Норенков. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 318 с.
5. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учебник для вузов / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. - 10-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 2022. - 336 с.

УДК 658.514; ГРНТИ 50.43.31

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОТ

А.С. Дунин, М.В. Ленков

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lenkov.m.v@rsreu.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к проектированию автоматизированных систем диспетчеризации инженерного оборудования установок пожаротушения на основе технологий промышленного интернета вещей (IIoT). Описаны основные требования и принципы структурного построения технических средств информационного обмена, а также особенности интеграции датчиков и исполнительных устройств в цифровую инфраструктуру предприятия. Выделены параметры, влияющие на надежность, безопасность и отказоустойчивость таких систем.

Ключевые слова: диспетчеризация, технология интернет вещей, системы пожаротушения, инженерное оборудование, автоматизация, мониторинг.

MODERN APPROACHES TO THE DESIGN OF DISPATCHING SYSTEMS FOR ENGINEERING EQUIPMENT OF FIRE EXTINGUISHING INSTALLATIONS BASED ON IIOT TECHNOLOGIES

A.S. Dunin, M.V. Lenkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, lenkov.m.v@rsreu.ru*

Abstract. The article discusses modern approaches to the design of automated dispatching systems for engineering equipment of fire extinguishing installations based on industrial Internet of Things (IIoT) technologies. The basic requirements and principles of the structural construction of technical means of information exchange, as well as the features of the integration of sensors and actuators into the digital infrastructure of the enterprise are described. The parameters affecting the reliability, safety, and fault tolerance of such systems are highlighted.

Keywords: dispatching, IIoT, fire extinguishing systems, engineering equipment, automation, monitoring.

Введение

Развитие промышленного интернета вещей в будущем ПоТ (industrial Internet of Things) приводит к появлению новых способов проектирования автоматизированных систем управления инженерным оборудованием. Одна из областей применения ПоТ-технологий является система пожаротушения, от надежности которых зависит безопасность персонала и сохранность оборудования предприятия. Стандартные системы диспетчеризации ограничены в функциональности и редко обеспечивают полноценный мониторинг всех элементов инфраструктуры. Внедрение технологий-ПоТ позволяет создать распределенную, масштабируемую и адаптивную систему, способную управлять широким спектром инженерного оборудования в режиме реального времени.

Современные требования к системам пожарной безопасности включают не только своевременное обнаружение возгорания, но и совместное управление исполнительными элементами, контроль газового или порошкового пожаротушения, мониторинг датчиков давления насосов и состояния клапанов. Все это обуславливает необходимость применения интеллектуальных систем диспетчеризации, основанных на ПоТ-технологиях.

Развитие технологий ПоТ и их влияние на систему пожарной безопасности

По данным отчётов исследовательских компаний Markets&Markets и IoT Analytics, мировой рынок технологий промышленного интернета вещей в 2024 году превысил 340 млрд долларов, демонстрируя среднегодовой рост около 20–22%. При этом доля решений, связанных с промышленной безопасностью, включая элементы пожарной автоматики и мониторинга инженерных систем, составляет примерно 8–10%. Это подтверждает глобальный переход от базовых систем пожарного контроля к цифровым платформам, способным обеспечивать не только моментальный отклик на угрозы, но и своевременное оповещение о необходимости ремонта или замене оборудования.

В промышленном секторе до 40% отказов в системах пожаротушения связаны с поздним обнаружением неисправностей или отсутствием наблюдения состояния пожарного оборудования. Исследования крупных предприятий нефтегазовой и химической отраслей показывают, что внедрение ПоТ-технологий снижает вероятность внезапных

отказов оборудования на 25–35%. Это объясняется возможностью раннего выявления отклонения параметров у пожарного оборудования [1].

Проблематика базовых систем диспетчеризации

В базовых системах пожаротушения существует ряд ограничений, затрудняющих эффективную эксплуатацию:

1) Отсутствие постоянной диагностики оборудования. Большинство систем ограничены только сигналами «норма/авария», без расширенной телеметрии.

2) Высокая зависимость от проводных линий связи. При повреждении кабеля теряется связь с целым сегментом системы.

3). Ограниченная масштабируемость. Добавление нового оборудования требует существенной переработки проекта.

4). Слабая интеграция с другими инженерными системами. Например, невозможность обмена данными между системами дымоудаления и пожаротушения.

ИоТ-технологии устраняют большую часть этих недостатков, создавая гибкую подключаемую систему, работающую как единая сеть [2].

Современные технологии ИоТ в инженерных системах пожаротушения

Промышленный интернет вещей объединяет данные, устройства, и сетевую инфраструктуру в единую цифровую среду. В реальных системах пожаротушения ИоТ обеспечивает доступ к удаленной диагностике оборудования и управлению процессами тушения.

Ключевыми компонентами ИоТ являются интеллектуальные датчики, передающие телеметрию через промышленные протоколы: MQTT, Modbus TCP, OPC UA, а также беспроводные технологии LoRaWAN и NB-IoT. Использование таких протоколов позволяет создавать гибкие сети мониторинга. На рисунке 1 показан пример информационной сети системы автоматизированного пожаротушения на основе применения технологии интернета вещей.

Принципы проектирования систем диспетчеризации

Основными принципами проектирования являются:

- модульность - обеспечивает гибкость модернизации и упрощает интеграцию новых устройств;
- отказоустойчивость - достигается применением резервирования, распределенных вычислений и систем контроля целостности каналов связи;
- информационная безопасность – должна быть обеспечена сложная защита от взломов системы;
- стандартизованность коммуникационных протоколов - единые общепринятые правила обмена данными.

Важным аспектом проектирования является информационная безопасность, включающая шифрование данных и контроль доступа к управляющим функциям.

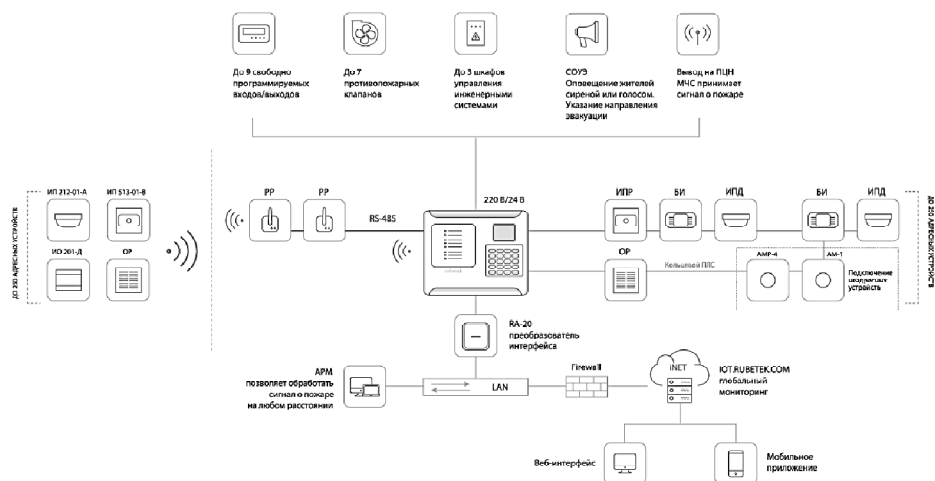


Рис.1. Информационная сеть системы автоматизированного пожаротушения на основе применения технологии IoT

Архитектурные решения для систем пожаротушения

Архитектура IoT-систем пожаротушения включает уровни: датчиков и исполнительных устройств, локальных контроллеров, коммуникационный уровень, аналитическую платформу и уровень диспетчеризации.

На нижнем уровне располагаются датчики дыма, положения клапанов, а также исполнительные устройства - насосные станции, приводы клапанов, модули подачи огнетушащего вещества. Локальные

контроллеры выполняют сбор данных, базовую логику управления и передачу информации на вышестоящие уровни [4].

Перспективы применения ПоТ в системах пожаротушения

Интеллектуальные системы пожарной автоматики могут включать следующие функции:

- предиктивная аналитика - анализ тенденций изменения параметров оборудования с прогнозом вероятности отказа;
- динамическая оптимизация - автоматическая коррекция алгоритмов пожаротушения в зависимости от условий (например, скорости распространения огня, температуры, давления);
- самодиагностика - автоматическое тестирование клапанов, насосов, исполнительных механизмов;
- ведение цифровых журналов событий - автоматическое сохранение телеметрии и логов для предотвращения инцидентов;
- возможность удалённого управления - особенно актуально для опасных производств.

По данным Fire Industry Association, внедрение интеллектуальных систем позволяет снизить время реакции персонала на угрозы до 20–40% [5].

Внедрение оборудования в ПоТ-инфраструктуру

Внедрение оборудования требует унифицированных протоколов передачи данных и совместимых интерфейсов. Важными аспектами являются точность аварийных сообщений, логическое распределение потоков данных и возможность удаленного обновления ПО [4].

Настройка логической структуры обмена данными должна обеспечивать своевременность поступления критически важных сигналов, а также предотвращать потерю или искажение информации при передаче.

Статистические данные о распространении ПоТ в промышленности

Вот несколько статистических данных о распространении ПоТ в промышленности:

Более 60% мировых предприятий планируют внедрить ПоТ-решения до 2026 года;

Около 74% аварийных остановок оборудования можно предотвратить при использовании непрерывного мониторинга;

До 30% экономии на обслуживании достигается благодаря предиктивной диагностике;

43% промышленных предприятий уже внедрили интеллектуальные датчики температуры и давления;

Рост систем промышленной безопасности с поддержкой IIoT составляет 18–21% ежегодно.

Эти данные показывают, что цифровизация противопожарной инфраструктуры является не только технологическим прогрессом, но и экономически обоснованным решением [3].

Выводы

Современные подходы к проектированию систем диспетчеризации оборудования пожаротушения основываются на использовании технологий промышленного интернета вещей. Применение IIoT повышает надежность, уровень автоматизации, точность диагностики и устойчивость системы. Интеграция датчиков, контроллеров и коммуникационных технологий позволяет создавать гибкие, масштабируемые и безопасные решения для промышленных предприятий.

Библиографический список

1. Майерс, А. Интернет вещей. Архитектура, технологии и решения / А. Майерс. - М.: ДМК Пресс, 2022. - 368 с.
2. Гук, М. Индустриальный интернет вещей. Технологии, платформы и решения для промышленности / М. Гук. - СПб.: Питер, 2021. - 352 с.
3. Долин, П. А. Противопожарная автоматика: системы обнаружения и пожаротушения / П. А. Долин. - М.: Академия пожарной безопасности МЧС России, 2019. - 290 с.
4. Boyes, H. Industrial Internet of Things (IIoT): Opportunities, Risks, and Mitigation / H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, T. Watson // Journal of Cybersecurity. - 2018. - Vol. 4, No. 1. - P. 22–30.
5. OPC Foundation. OPC Unified Architecture, Part 1: Overview and Concepts. - Release 1.05. - Scottsdale: OPC Foundation, 2021. - 112 p.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ POSTGRESSQL И CLICKHOUSE В ЗАДАЧЕ ОБРАБОТКИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ

В.Н. Костецкая, О.А. Афонина*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, me34on34@mail.ru*

Аннотация. В данной работе проведен сравнительный анализ производительности систем управления базами данных PostgreSQL и ClickHouse в контексте выполнения аналитических запросов. Показано, что использование ClickHouse позволяет достичь значительного сокращения времени выполнения запросов агрегации и фильтрации над большими объемами данных по сравнению с PostgreSQL, что делает его предпочтительным выбором для задач оперативной аналитической обработки (OLAP).

Ключевые слова: PostgreSQL, ClickHouse, OLAP, OLTP, производительность, аналитические запросы, большие данные, сравнительный анализ.

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF POSTGRESQL AND CLICKHOUSE IN THE TASK OF PROCESSING ANALYTICAL QUERIES

V.N. Kostetskaya, O.A. Afonina*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, me34on34@mail.ru*

Abstract. This paper presents a comparative performance analysis of PostgreSQL and ClickHouse database management systems in the context of executing analytical queries. It is shown that the use of ClickHouse can achieve a significant reduction in the execution time of aggregation and filtering queries on large data volumes compared to PostgreSQL, making it the preferred choice for operational analytical processing (OLAP) tasks.

Keywords: PostgreSQL, ClickHouse, OLAP, OLTP, *performance, analytical queries, big data, comparative analysis.*

Введение

Задача эффективного хранения и обработки больших объемов данных является одной из ключевых в современной информатике. В зависимости от характера решаемых задач используются различные системы управления базами данных (СУБД), которые можно условно

разделить на системы оперативной обработки транзакций (OLTP) и системы оперативной аналитической обработки (OLAP).

PostgreSQL представляет собой классическую реляционную OLTP-СУБД с широкими возможностями, соответствием стандарту SQL и поддержкой транзакций ACID. Она оптимальна для задач с большим количеством коротких операций чтения и записи. ClickHouse, в свою очередь, является колоночной OLAP-СУБД, ориентированной на выполнение сложных аналитических запросов в режиме реального времени над огромными массивами данных.

Целью данного исследования является сравнительный анализ производительности PostgreSQL и ClickHouse при выполнении типичных аналитических запросов, таких как агрегация и фильтрация данных. Актуальность работы обусловлена растущими потребностями бизнеса в быстром получении аналитических отчетов.

Решение задачи сравнительного анализа

Решение задачи сравнительного анализа производительности СУБД можно разделить на следующие этапы.

1. Подготовка данных – формирование тестового набора данных, репрезентативного для задач аналитики.
2. Конфигурация СУБД – настройка параметров серверов для достижения максимальной производительности.
3. Разработка и выполнение тестовых запросов – выбор репрезентативного набора запросов для оценки.
4. Оценка производительности — измерение времени выполнения запросов и потребления ресурсов.

Подготовка данных

Для экспериментов был сгенерирован синтетический набор данных, имитирующий события от веб-приложения (например, клики пользователей). Набор данных содержит 100 миллионов записей со следующими полями: user_id, event_time, page_url, country, session_duration.

Конфигурация СУБД

Для PostgreSQL была проведена базовая оптимизация (настройка shared_buffers, work_mem и т.д.). ClickHouse был запущен с конфигурацией по умолчанию, которая уже оптимизирована для аналитических нагрузок.

Разработка и выполнение тестовых запросов

Были подготовлены и выполнены на обеих системах следующие типы запросов:

1. Q1: Подсчет общего числа событий.
2. Q2: Подсчет числа уникальных пользователей по странам.
3. Q3: Расчет средней длительности сессии по дням.
4. Q4: Выборка топ-10 самых посещаемых страниц.

Оценка производительности

Основным показателем производительности было выбрано время выполнения запроса. Все запросы выполнялись 5 раз, для анализа бралось среднее значение времени.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на виртуальной машине с 4 vCPU, 8 ГБ ОЗУ и SSD-диском. В качестве операционной системы использовался Ubuntu Server 22.04. Конфигурация тестового стенда приведена в таблице 1. Результаты измерения времени выполнения запросов (в секундах) представлены в таблице 2.

Таблица 1. Конфигурация тестового стенда

Характеристика	Значение
Процессор	Intel Core i7-11800H
Оперативная память	16
Операционная система	Windows 11
PostgreSQL	17.6
ClickHouse	

Таблица 2. Время выполнения запросов (с)

Запрос	PostgreSQL	ClickHouse
Q1	00:00:00.104	00:00:00.003
Q2	00:00:01.928	00:00:00.048
Q3	00:00:00.437	00:00:00.034
Q4	00:00:00.093	00:00:00.014
Q5	00:00:02.160	00:00:00.360

Эксперименты проводились на ПЭВМ с операционной системой Windows 11, на базе процессора Intel Core i7-11800H с оперативной памятью объемом 16 Гб. В качестве вычислительной среды выполне-

ния использовались СУБД PostgreSQL версии 17.6 и ClickHouse версии 23.3.

В ходе экспериментов было выполнено сравнение времени выполнения аналитических запросов к тестовой базе данных объемом 1 миллион записей. На рисунке 1 показано сравнение времени выполнения запросов в PostgreSQL и ClickHouse для тестового набора данных объемом 1 миллион записей. На рисунке 2 показано ускорение ClickHouse относительно PostgreSQL.

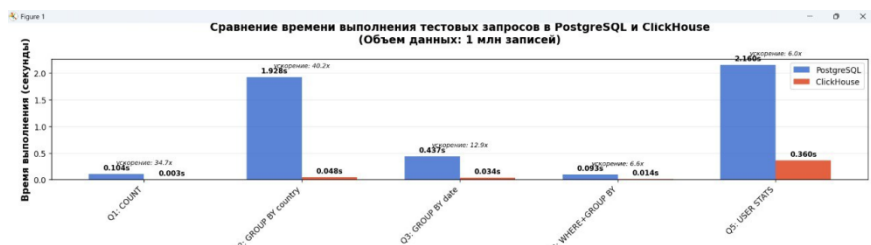


Рис. 1. Сравнение времени выполнения тестовых запросов в PostgreSQL и ClickHouse



Рис.2. Ускорение ClickHouse относительно PostgreSQL

В рамках эксперимента было проведено тестирование пяти типовых аналитических запросов:

- Простой подсчет записей (Q1: COUNT)
- Агрегация с группировкой по странам (Q2: GROUP BY country)
- Анализ временных интервалов (Q3: GROUP BY date)
- Фильтрация с агрегацией (Q4: WHERE + GROUP BY)
- Статистика по пользователям (Q5: GROUP BY user_id)

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод: даже при относительно небольшом объеме данных в 1 миллион записей ClickHouse демонстрирует исключительное преимущество в производительности по сравнению с PostgreSQL. Ускорение выпол-

нения запросов составляет от 7 до 40 раз в зависимости от типа запроса.

Наибольшая разница в производительности наблюдается для запросов с агрегацией и группировкой данных:

Q2 (GROUP BY country): ClickHouse быстрее в 40 раз (1.928s vs 0.048s)

Q5 (GROUP BY user_id): ClickHouse быстрее в 6 раз (2.160s vs 0.360s)

Q3 (GROUP BY date): ClickHouse быстрее в 13 раз (0.437s vs 0.034s)

Для простых запросов разница также значительна:

Q1 (COUNT): ClickHouse быстрее в 35 раз (0.104s vs 0.003s)

Q4 (WHERE + GROUP BY): ClickHouse быстрее в 7 раз (0.093s vs 0.014s)

Особенно впечатляющим является результат выполнения запроса Q1 на подсчет всех записей, где ClickHouse показал время всего 3 миллисекунды против 104 миллисекунд у PostgreSQL.

Следует отметить, что при работе с объемом данных в 1 миллион записей обе СУБД справляются с нагрузкой, однако ClickHouse обеспечивает экстремально быстрое время отклика, что критично в системах реального времени, требующих мгновенного формирования аналитических отчетов.

Выводы

Экспериментальные исследования наглядно продемонстрировали кардинальное преимущество ClickHouse перед PostgreSQL в задачах, связанных с выполнением аналитических запросов. Время выполнения тестовых запросов в ClickHouse оказалось в 6-40 раз меньше, причем для некоторых типов запросов (агрегация с группировкой по странам) разница достигает 40-кратного ускорения.

Полученные результаты полностью соответствуют архитектурным особенностям этих СУБД: PostgreSQL оптимизирована для надежных транзакционных операций (OLTP) с поддержкой ACID, в то время как ClickHouse создан специально для высокоскоростной аналитической обработки (OLAP) с использованием колоночного хранения данных и векторized execution.

Особенно показателен результат запроса Q2 на группировку по странам, где ClickHouse обработал 1 миллион записей за 48 миллисекунд, в то время как PostgreSQL потребовалось почти 2 секунды. Это демонстрирует эффективность колоночного подхода для аналитических workload'ов.

Таким образом, для построения систем оперативной аналитической отчетности и работы с большими данными ClickHouse является значительно более предпочтительным решением, обеспечивая на порядок лучшую производительность при выполнении типичных аналитических запросов

Библиографический список

1. PostgreSQL 16.2 Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.postgresql.org/docs/16/index.html> (дата обращения: 15.03.2024)
2. ClickHouse Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://clickhouse.com/docs>
3. Stonebraker M., et al. C-Store: A Column-oriented DBMS // Proceedings of the 31st VLDB Conference. – 2005. – pp. 553–564.
4. Демидова Л.А., Егин М.М. Использование NCA-алгоритма для выявления информативных признаков в задаче детектирования объектов // Научный журнал. – 2023. – С. 15-22.
5. Aken D.V., Pavlo A., Gordon G.J., Zhang B. Automatic Database Management System Tuning Through Large-scale Machine Learning // Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data. – 2017. – pp. 1009–1024.
6. Idreos S., Kersten M.L., Manegold S. Database Cracking // CIDR. – 2007. – Vol. 7. – pp. 68–78.
7. Kossmann D. The State of the Art in Distributed Query Processing // ACM Computing Surveys. – 2000. – Vol. 32. – No. 4. – pp. 422–469.
8. Lamb A., et al. The Vertica Analytic Database: C-Store 7 Years Later // Proceedings of the VLDB Endowment. – 2012. – Vol. 5. – No. 12. – pp. 1790–1801.
9. Демидова Л.А., Никульчев Е.В. Использование модифицированного роевого алгоритма для разработки SVM-классификатора // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22. – № 5. – С. 364–371.
10. Abadi D.J., et al. The Design of the Borealis Stream Processing Engine // CIDR. – 2005. – Vol. 5. – pp. 277–289.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОБЪЕКТОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ФУНКЦИЮ ОТКЛИКА

А.А. Батистова, Е.В. Городничева, Ю.А. Сосулин

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, batistovalina@gmail.com, gorod.9@mail.ru, sosulin45@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача планирования эксперимента для построения линейно параметризованной регрессионной модели второго порядка для объектов с заданными ограничениями на значение функции отклика. Предлагается методика непрерывного планирования эксперимента, обеспечивающая построение D-оптимального экспериментального плана на пространстве планирования, имеющем внутреннюю недоступную для наблюдений область факторного пространства.

Ключевые слова: регрессионная модель, функция отклика, факторное пространство, планирование эксперимента.

DESIGN OF EXPERIMENTS IN THE RESEARCH OF OBJECTS WITH CONSTRAINTS ON THE RESPONSE FUNCTION

A.A. Batistova, E.V. Gorodnicheva, Yu.A. Sosulin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, batistovalina@gmail.com, gorod.9@mail.ru, sosulin45@mail.ru*

Abstract. This paper addresses the problem design of experiments for constructing a linearly parameterized second-order regression model for objects with given constraints on the response function value. A methodology for continuous design of experiments is proposed, which ensures the construction of a D-optimal experimental plan on a design space that contains an inner region of the factor space inaccessible for observation.

Keywords: regression model, response function, factor space, design of experiments.

Введение

Для решения задачи идентификации сложных технических объектов или технологических процессов обычно используются статистические методы, позволяющие получить математическую модель исследуемого объекта по экспериментальным данным. При этом предпола-

гается, что модель объекта представляется регрессионной зависимостью известного вида [1]:

$$y = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) + \varepsilon, \quad (1)$$

где y – выходная величина объекта; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ – вектор входных факторов; $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^T$ – вектор неизвестных коэффициентов (параметров) модели; k – число коэффициентов модели; f_i – функции-регрессоры постулируемой регрессионной модели; ε – случайная ошибка, приложенная к выходу объекта.

Обычно задача построения регрессионной модели вида (1) решается при условии нормированного факторного пространства, определяемого неравенствами $-1 \leq x_i \leq +1$ по каждой входной переменной. Обработка результатов наблюдений и получение оценок \mathbf{b} коэффициентов $\boldsymbol{\beta}$ модели (1) выполняется методом наименьших квадратов:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{y} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{F}^T \mathbf{y}, \quad (2)$$

здесь \mathbf{F} – матрица регрессоров (расширенная матрица плана эксперимента), \mathbf{M} – информационная матрица плана эксперимента, \mathbf{C} – дисперсионная матрица оценок коэффициентов.

Заметим, что в такой классической постановке задачи идентификации не накладывается никаких ограничений на вид регрессионной модели и пространство планирования.

Однако классическая постановка задачи не учитывает случаи, когда в пределах всего факторного пространства существует внутренняя подобласть $-a \leq x_i \leq +a$ ($a_i < 1$) в пределах которой функция отклика существенно отличается по форме от ее вида в остальной области факторного пространства. Это может быть, например, область требуемого уровня качества продукта. Тогда данное условие выражается в виде заданного значения функции отклика в пределах указанной области. Очевидно, что использование методов регрессионного анализа и планирования эксперимента при решении подобных задач будет сталкиваться с нарушением требования гладкости исследуемой зависимости и ограничениями на область факторного пространства, используемую для планирования и проведения наблюдений. Таким образом, создаются трудности для применения стандартных методов регрессионного анализа.

Для решения данной проблемы перспективным представляется подход раздельной аппроксимации функции отклика. Он предполагает декомпозицию исходной области Q_x факторного пространства, заданного неравенствами $-1 \leq x_i \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, m$, на две части: 1) области, в пределах которой имеются ограничения на значение функции отклика, заданной неравенствами $-\alpha_i \leq x_i \leq \alpha_i$, $\alpha_i < 1$, $i = 1, 2, \dots, m$, и 2) оставшейся области эксперимента, в пределах которой возможно проведение измерений выходной величины объекта. Функция отклика на области эксперимента может быть представлена, как правило, регрессионной моделью второго порядка. Оценивание параметров этой модели должно проводиться на основании измерений выходной величины объекта, проводимых в этой области.

В связи с этим закономерно возникает задача оптимального планирования эксперимента для эффективного оценивания коэффициентов регрессионной модели. Целью настоящей работы является разработка методов планирования и алгоритмов идентификации, адекватных для задач со сложной структурой факторного пространства, характеризующейся наличием внутренней подобласти с особыми свойствами функции отклика.

Планирование эксперимента с ограничениями

Заметим, что подобная постановка задачи планирования, при которой внутри стандартной области факторного пространства, ограниченного неравенствами $-1 \leq x_i \leq 1$, имеется внутренняя область с границами $-\alpha \leq x_i \leq \alpha$, измерения внутри которой недоступны либо малоинформативны для оценивания квадратичной регрессионной модели, определяемой на выделенном пространстве планирования, в теории планирования эксперимента отсутствует. Уникальность постановки задачи планирования эксперимента с областями ограничений на значение функции отклика приводит к тому, что известные экспериментальные планы, а также методы, алгоритмы и вычислительные процедуры их построения не могут быть использованы для планирования и оценивания регрессионной модели объекта с ограничениями.

В настоящее время при построении экспериментальных планов используются критерии оптимальности, связанные с величинами дисперсии оценок неизвестных коэффициентов и предсказанного значения функции отклика. Ясно, что такие критерии будут связаны с видом ковариационной матрицы и связанной с ней информационной матрицы Фишера.

Обычно экспериментальные планы указанного типа строятся в классе непрерывных планов, а затем округляются до соответствующего точного плана.

Непрерывным нормированным планом ε называется совокупность величин

$$\varepsilon = \left\{ x_1, x_2, \dots, x_n \right\}, \quad (3)$$

где $x_i, i=1, 2, \dots, n$ – точки спектра плана;

$\xi_i, i=1, 2, \dots, n$ – частоты проведения наблюдений в соответствующих точках спектра [2].

При планировании эксперимента, связанного с регрессионным анализом, обычно используются критерии D-оптимальности. Экспериментальный план ε^* является непрерывным D-оптимальным планом, если он максимизирует определитель информационной матрицы M , или минимизирует определитель дисперсионной матрицы C , т.е

$$\left| M(\varepsilon^*) \right| = \max_{\varepsilon} \left| M(\varepsilon) \right|, \quad (4)$$

$$\left| C(\varepsilon^*) \right| = \min_{\varepsilon} \left| C(\varepsilon) \right|. \quad (5)$$

Традиционно методики построения непрерывных D-оптимальных планов базируются на процедуре непрерывного планирования, в соответствии с которой на каждом шаге отыскивается точка x^* в факторном пространстве Q_x , в которой имеет место глобальный максимум дисперсии предсказания функции отклика:

$$f^T(x^*)C(N)f(x^*) = \max_{x \in Q_x} f^T(x)C(N)f(x). \quad (6)$$

Затем полученная точка x^* добавляется к исходному плану ε_0 и получается план ε_1 с информационной матрицей $M(N+1)$:

$$M(N+1) = M(N) + f(x^*)f^T(x^*). \quad (7)$$

Действуя так достаточно долго можно получить спектр и частоты оптимального плана ε^* .

Очевидно, что используя данную процедуру с учетом ограничений, наложенных на факторное пространство, можно получить оптимальный план для решения поставленной задачи регрессионного моделирования объекта с фиксированными значениями функции отклика.

Заметим, что такое решение задачи планирования эксперимента при наличии ограничений сопряжено с существенно большими вычислительными затратами, чем стандартный подход. Объясняется это наличием внутренних границ пространства планирования, что существенно затрудняет поиск глобального экстремума выражения (6). В поисковых алгоритмах приходится специально решать проблему границ пространства поиска.

Кроме указанных трудностей при решении задачи планирования эксперимента для исследования объектов с ограничениями на значения функции отклика, отсутствует возможность использования обширного каталога непрерывных оптимальных планов.

Заметим, однако, что D-оптимальные планы для построения квадратичных регрессионных моделей являются, по сути, трехуровневыми планами, но задающими различные частоты проведения наблюдений в различных точках спектра плана. Необходимо учесть также, что область с границами $-\alpha \leq x_i \leq \alpha$, содержащая центральную точку любого трехуровневого плана, недоступна для проведения наблюдений. Экспериментальные исследования показывают, что исключение этой центральной точки из оптимального плана и реализация процедуры (6), (7) с полученным таким образом планом, приводит к тому, что локальные экстремумы выражения (6) концентрируются на внутренних границах пространства планирования. Отмеченное обстоятельство дает возможность определить набор точек пространства планирования, учитывающего наложенные ограничения, и реализовать только этап определения частот проведения наблюдений в точках спектра.

В качестве точек спектра плана с ограничениями на пространство планирования могут быть приняты точки спектра соответствующего непрерывного D-оптимального плана за исключением центральной точка, а также углы, центры двухмерных граней и середины ребер внутреннего многомерного куба, ограничивающего область фиксированных значений функции отклика.

Тогда процедура непрерывного планирования при построении оптимального плана с ограничениями на пространство планирования будет иметь следующий вид:

1. Формируется начальный n -точечный план ϵ_0 , содержащий все выделенные точки спектра x_i , $i=1,2,\dots,n$.
2. На множестве точек спектра x_i , $i=1,2,\dots,n$ отыскивается точка x_i^* , в которой имеется максимум дисперсии предсказания $d(x_i, \epsilon_0)$

$$f^T(x_i^*)C(\varepsilon_0)f(x_i^*) = \max_{x_i, i=1,2,\dots,n} f^T(x_i)C(\varepsilon_0)f(x_i). \quad (8)$$

3. Полученная точка x_i^* добавляется к исходному плану ε_0 и получается план ε_1

$$M(\varepsilon_1) = M(\varepsilon_0) + f(x^*)f^T(x^*) \quad (9)$$

4. Действия пунктов 2 и 3 повторяются с полученным на предыдущих этапах планом ε_1 до выполнения правила останова.

В качестве правила останова может быть принято условие оптимальности плана.

$$\max_{x \in Q_\varepsilon} d(x, \varepsilon^*) = \max_{x \in Q_\varepsilon} f^T(x)C(\varepsilon)f(x) = k. \quad (10)$$

Однако при небольших погрешностях в определении координат точек спектра, а также при достаточной близости значений частот к оптимальным, возможно определение степени близости полученного плана ε к оптимальному по формуле:

$$\delta = \frac{\max_{x_i, i=1,2,\dots,n} d(x, \varepsilon) - k}{k}. \quad (11)$$

Тогда останов процедуры построения непрерывных D-оптимальных планов можно производить при достижении величиной δ некоторого наперед заданного, достаточно малого значения δ_0 .

Выводы

В работе предлагается разработанная методика формирования D-оптимальных планов, которая за счет специально подобранного спектра точек и итерационной процедуры позволяет эффективно решать задачи идентификации в условиях наложенных ограничений. Представленный алгоритм к построению экспериментального плана позволяет получить оптимальный план при наличии ограничений на пространство планирования с минимальными вычислительными затратами.

Библиографический список

1. Айвазян С.А. Основы эконометрики. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. - 432 с.
2. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие / Н. И. Сидняев, Н. Т. Вилисова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 463 с.

УДК 519.242; ГРНТИ 27.43

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА

Е.В. Городничева, Ю.А. Сосулин*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, gorod.9@ mail.ru, sosulin45@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается задача регрессионного анализа объектов с ограничениями на значения функции отклика. Предлагается методика последовательного планирования эксперимента, при котором пространство факторов разделяется на область планирования и область ограничений с неизвестными на начальном этапе границами. Описана пошаговая процедура последовательного уточнения границ области ограничений и области планирования до достижения заданной точности.

Ключевые слова: регрессионный анализ, область планирования, область ограничений, планирование эксперимента, дисперсия предсказания, факторное пространство.

REGRESSION ANALYSIS OF OBJECTS WITH RESTRICTED RESPONSE FUNCTION VALUES

E.V. Gorodnicheva, Yu.A. Sosulin*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, gorod.9@ mail.ru, sosulin45@mail.ru*

Abstract. This paper examines the problem of regression analysis of objects with constraints on the values of the response function. A method for sequential experimental design is proposed, in which the factor space is divided into a planning domain and a constraint domain, with initially unknown boundaries. A step-by-step procedure for sequentially refining the boundaries of the constraint domain and the planning domain until a specified accuracy is achieved is described.

Keywords: regression analysis, planning domain, constraint domain, design of experiments, prediction variance, factor space.

Введение

В задачах идентификации объектов часто возникает необходимость построения моделей в условиях, когда функция отклика имеет ограниченную область значений. При решении таких задач целью исследования является отыскание подобласти в факторном пространстве, в которой показатели качества удовлетворяют заданным техническим требованиям.

При этом особенность проблемы заключается в том, что проведение измерений внутри этой области в ряде случаев возможно, но они будут давать результат, определяемый максимальным (или минимальным) значением показателя качества, используемого в анализе. В других случаях измерения оказываются принципиально невозможным, например, из-за отсутствия средств контроля в данной области, требований неразрушающих методов испытаний и т.д. Следовательно, если стандартный план эксперимента, реализуемый в исследовании, включает точки из указанной области, результатам измерений в этих точках должно присваиваться значение, соответствующее установленному показателю качества [2].

Заметим, что в остальной части факторного пространства измерения являются информативными, а поведение объекта, как правило, подчиняется квадратичному закону. Таким образом, модель такого объекта должна представлять собой многомерный параболоид с уплощённой (отрезанной) вершиной.

Для описания такой зависимости можно использовать стандартный подход регрессионного анализа, используя полиномиальную модель вида (1).

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^m b_{iii} x_i^3 + \dots \quad (1)$$

Однако обеспечение высокой точности аппроксимации сложной формы отклика требует увеличения количества оцениваемых коэффициентов, что, в свою очередь, ведет к росту объема экспериментальных данных [1]. Это приводит к резкому увеличению вычислительной сложности, ухудшению обусловленности матриц и снижению точности и устойчивости процедуры оценивания коэффициентов модели.

В данной работе предлагается подход, основанный на разделении факторного пространства на две области:

- область планирования эксперимента — область, в пределах которой проводятся информативные наблюдения;
- область ограничений — область, где значения функции отклика фиксированы, а проведение измерений запрещено или неинформативно.

Наблюдения проводятся в соответствии с некоторым планом, точки которого расположены исключительно в области планирования. Это позволяет построить адекватную регрессионную модель второго по-

рядка, которая корректно описывает поведение объекта в этой области вида (2):

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2. \quad (2)$$

Для объектов, характеристика которых представляется параболоидом с уплощенной вершиной, построенная модель (2) носит виртуальный характер, так как не отражает реальный механизм формирования отклика в этой зоне. Тем не менее, для задач прогнозирования и последующего анализа полученная модель является вполне пригодной.

Таким образом, сформулированная задача сводится к проблеме планирования эксперимента в условиях, когда внутри стандартного гиперкуба планирования $-1 \leq x_i \leq 1$, $i=1, 2, \dots, m$ существует запретная для измерений подобласть. В простейшем случае эта область представляет собой гиперкуб меньшего размера, симметричный относительно центра координат и задаваемый неравенствами $-\alpha \leq x_i \leq \alpha$, где $\alpha \leq 1$, $i=1, 2, \dots, m$. Важно отметить, что границы α этой запретной области на начальном этапе исследования, как правило, заранее неизвестны и подлежат определению.

Процедура определения границ области ограничений факторного пространства

Вместе с поиском регрессионной модели, работоспособной в области активного эксперимента, представляют интерес именно границы области ограничений, так как они определяют допуски на значения факторов, в пределах которых обеспечивается требуемый уровень выходной величины исследуемого объекта. Таким образом, выделяется второй комплекс задач, связанный с разработкой процедуры определения границ области ограничений и их последовательного уточнения с использованием аппроксимирующей модели.

Очевидно, что для выбора начального экспериментального плана необходимы либо некоторые априорные данные о поведении объекта исследования в пределах пространства планирования, либо предварительные пробные опыты, позволяющие определить начальный план и результаты измерений в точках этого плана. Будем предполагать, что данная работа выполнена и методом наименьших квадратов получены оценки b неизвестных коэффициентов регрессионной модели (2) [3].

Заметим, что в рассматриваемом случае область факторного пространства, в пределах которой выходной показатель объекта имеет постоянное значение y_{const} , представляет собой эллипсоид в пространстве планирования. Параметры этого эллипсоида могут быть получены из условия равенства полученной регрессионной модели заданному значению функции отклика:

$$b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2 = y_{const}. \quad (3)$$

Понятно, задание области ограничений в виде эллипсоида в факторном пространстве неудобно с практической точки зрения. Такие ограничения обычно задаются в виде минимальных и максимальных значений факторов, в пределах изменений которых функция отклика удовлетворяет поставленным условиям. Это может быть достигнуто, если использовать в качестве области ограничений параллелепипед в пространстве планирования, охватывающий эллипсоид, определяемый выражением (3).

Учитывая стохастический характер объекта исследования и возможные искажения результатов при попадании точек наблюдений (точек плана эксперимента) в запрещенную область, представляется целесообразным область ограничений представлять параллелепипедом, вписанным в эллипсоид (3), а пространство планирования представлять параллелепипедом, описанным вокруг эллипсоида (3).

Для определения границ вписанного и описанного параллелепипедов предлагается использовать дисперсии предсказанных значений функции отклика в вершинах эллипсоида (3).

Дисперсия предсказанного значения функции отклика дается выражением:

$$\sigma^2[\hat{y}(x_v)] = f_x^T (F^T F)^{-1} f_x \sigma^2, \quad (4)$$

где $f_x = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T$ – вектор функций-регрессоров из (3), вычисленный для множества факторов, заданного вектором $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$.

Для построения определяющих область ограничений и пространство планирования параллелепипедов необходимо вычислить прогнозные значения функции отклика в вершинах граничного эллипсоида и определить оценку $s^2[\hat{y}(x)]$ дисперсии предсказания $\sigma^2[\hat{y}(x)]$. То-

гда на основе величины стандартного отклонения $s[\hat{y}(x)]$ можно определить доверительные интервалы для предсказанных значений $\hat{y}(x)$. Полученные граничные значения этих интервалов можно использовать в качестве u_{const} в выражении (3). Это даст возможность раздельно оценить эллипсоиды, определяющие область ограничений и пространство планирования, и, следовательно, параметры параллелепипедов, ограничивающих эти области.

При такой постановке задачи возможна следующая процедура организации эксперимента с последовательным уточнением границ области ограничений и пространства планирования.

1. В активной области пространства планирования с границами ± 1 нормированного факторного пространства выбирается произвольным образом начальное приближение области ограничений с границами $\pm\alpha, \pm\beta, \pm\gamma, \dots$ по каждому фактору. При этом требуется, чтобы для величин, определяющих границы области ограничений, соблюдались условия: $\pm\alpha, \pm\beta, \pm\gamma$ по абсолютной величине не превышали значения 1, и на этих границах выходная величина y не достигала заданного значения u_{const} .

2. В полученном пространстве планирования выбирается начальный экспериментальный план ϵ_0 .

3. В соответствии с полученным планом ϵ_0 выполняются необходимые измерения и определяются МНК-оценки коэффициентов регрессионной модели (2).

4. Формируется выражение (3), определяющее прогнозное положение эллипсоида, задающего границу области ограничений и пространства планирования.

5. Определяются координаты вершин этого эллипсоида, предсказанные значения функции отклика $\hat{y}(x_v)$ в вершинах x_v эллипсоида и дисперсии $\sigma^2[\hat{y}(x_v)]$ предсказанных значений функции отклика в этих точках.

6. Полученные предсказанные значения функции отклика $\hat{y}(x_v)$ и дисперсии $\sigma^2[\hat{y}(x_v)]$ предсказанных значений используются для определения новых границ области ограничений и пространства планирования $\pm\alpha_1, \pm\beta_1, \pm\gamma_1, \dots$ по каждому фактору и, соответственно, следующее приближение пространства планирования, и следующий экспериментальный план ϵ_1 .

7. В соответствии с полученным планом ε_1 выполняются необходимые измерения и определяются уточненные оценки коэффициентов регрессионной модели и следующее приближение пространства планирования, и следующий экспериментальный план ε_2 .

8. Такие действия продолжаются с последовательностью получаемых экспериментальных планов до достижения некоторого правила останова. В качестве такого правила может быть принят некоторый заданный уровень уточнения границ области ограничений на двух последовательных итерациях процедуры.

Очевидно, что действия пунктов 5 и 6 представленной процедуры последовательного уточнения границ области ограничений и пространства планирования существенным образом связаны с конкретным видом эллипсоида (3) и его расположением в факторном пространстве.

Выводы

Предлагаемый подход позволяет получить итерационный процесс планирования эксперимента, адаптированный для работы с ограничениями на функцию отклика с высокой надежностью и минимальными затратами на эксперимент. Методика эффективно решает задачу, где важны не только прогнозы модели, но и точное определение границ, в которых выходные параметры объекта удовлетворяют поставленным требованиям. Одновременно строится адекватная прогнозная модель в доступной для измерений области и последовательно уточняются допустимые диапазоны изменения факторов, что критически важно для управления качеством и настройки технологических процессов.

Библиографический список

1. Айвазян С.А. Основы эконометрики. - М.:ЮНИТИ-ДАНА, 2001.- 432 с.
2. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие / Н. И. Сидняев, Н. Т. Вилисова. - М. : Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. - 463 с.
3. Лаптенко В.Д., Серегин Ю.Н. Методы планирования эксперимента и обработки результатов. - Красноярск : СибГАУ им. М. Ф. Решетнева, 2006. – 184 с.

УДК 658.3.07; ГРНТИ 06.81.65

КВАЛИМЕТРИЯ ПЕРСОНАЛА: НАУЧНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

А.В. Губарев

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Аннотация. В статье рассматривается концепция квалиметрии персонала как научно обоснованного подхода к управлению человеческими ресурсами. Раскрывается сущность квалиметрии персонала, заключающаяся в переводе качественных характеристик сотрудников (компетенций, личностных свойств, навыков) в количественные показатели. В работе детально проанализированы ключевые цели, задачи и объекты оценки, а также представлен комплекс применяемых методов. Описан пошаговый процесс проведения квалиметрической оценки, выделены ее основные преимущества (объективность, системность, прозрачность) и потенциальные риски внедрения (трудоемкость, сопротивление персонала).

Ключевые слова: квалиметрия персонала, оценка персонала, критерии оценки персонала, кадровый потенциал.

PERSONNEL QUALIMETRY: A SCIENTIFIC APPROACH TO ASSESSING HUMAN POTENTIAL

A.V. Gubarev

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Abstract. The article discusses the concept of personnel qualimetry as a scientifically grounded approach to human resources management. It reveals the essence of personnel qualimetry, which consists in translating the qualitative characteristics of employees (competencies, personal traits, and skills) into quantitative indicators. The article provides a detailed analysis of the key goals, objectives, and objects of evaluation, as well as a comprehensive overview of the methods used. It describes the step-by-step process of conducting a qualimetric assessment, highlighting its main advantages (objectivity, systematicity, and transparency) and potential risks (time-consuming nature, and staff resistance).

Keywords: personnel qualimetry, personnel assessment, personnel evaluation criteria, human resources potential.

Введение

В современных условиях жесткой конкурентной борьбы ключевым активом любой успешной организации является ее персонал. Эффективность бизнеса напрямую зависит от профессиональных и личностных качеств сотрудников. В связи с этим перед руководством компаний остро встает задача не только привлечения, но и объективной оценки, развития и рационального использования человеческих ресурсов [1, 2]. Традиционные методы оценки часто носят субъективный и фрагментарный характер. Решением данной проблемы стала квалиметрия персонала – научно обоснованный подход к измерению и количественной оценке качественных характеристик работников [3-5].

Основная часть

Квалиметрия – это научная дисциплина, изучающая методологию и проблематику количественной оценки качества объектов и процессов.

Квалиметрия персонала можно рассматривать как прикладное направление квалиметрии и управления персоналом, которое представляет собой систему принципов, методов и средств для количественной оценки качества трудового потенциала сотрудников, подразделений и организации в целом.

Сущность квалиметрии персонала заключается в переводе качественных характеристик работника (знаний, навыков, компетенций, личностных свойств) в количественные показатели. Это позволяет перейти от интуитивных и субъективных суждений к объективным, измеримым и сопоставимым данным.

Основополагающая миссия квалиметрии в управлении персоналом заключается в переходе на качественно новый уровень работы с кадровым потенциалом. Она направлена на повышение продуктивности использования человеческих ресурсов, достижение полного соответствия личностных и профессиональных характеристик коллектива долгосрочным задачам организации, а также на построение прозрачной и аргументированной системы кадрового менеджмента. Достижение этих стратегических ориентиров обеспечивается за счет выполнения конкретного комплекса мероприятий, включающего:

1. Диагностику: определение текущего уровня развития профессиональных и личностных качеств сотрудников;

2. Сравнение и ранжирование: возможность сравнивать сотрудников между собой для формирования кадрового резерва, распределения премий и т.д.;

3. Прогнозирование: Оценка потенциала сотрудников для планирования их карьерного роста и развития;

4. Стимулирование: создание прозрачной системы оценки, которая мотивирует сотрудников к развитию и повышению квалификации;

5. Поддержку принятия решений: предоставление объективных данных для принятия решений об аттестации, обучении, продвижении, ротации и увольнении.

Объектом квалиметрии персонала является качество трудового потенциала, которое раскрывается через систему показателей:

1. Профессиональная компетентность:

- уровень специальных знаний и образования;
- навыки и опыт практической работы;
- способность к освоению новых технологий и методов работы;

2. Деловые качества:

- производительность и эффективность труда;
- ответственность, дисциплинированность, инициативность;
- организаторские способности (для руководителей различных

уровней);

- умение работать в команде;

3. Психологические характеристики:

- стрессоустойчивость;
- коммуникабельность;
- лидерский потенциал;
- ценностные ориентации и лояльность компании;

4. Физиологический потенциал:

- состояние здоровья;
- работоспособность.

Для каждого показателя должна быть разработана система критериев и шкал измерения (например, 5-балльная шкала, проценты, балльно-весовая система).

На практике для проведения оценки используется комплекс методов, который можно разделить на несколько групп. В частности, можно выделить группу классических и методы, получившие распространение сравнительно недавно.

К классическим можно отнести метод экспертных оценок (оценка сотрудника проводится группой экспертов, которая может в себя

включать непосредственного руководителя, коллег, подчиненных, HR), тестирование, метод ранжирования (расположение сотрудников в порядке убывания или возрастания какого-либо показателя), метод балльных оценок (присвоение количественных баллов по каждому критерию с последующим суммированием).

Современные подходы к оценке персонала включают такие методы как центр оценки (assessment center - комплексная процедура, включающая деловые игры, групповые дискуссии, презентации и другие упражнения, моделирующие реальные рабочие ситуации), «360 градусов» (всесторонний сбор оценок о сотруднике: от руководителя, коллег, подчиненных и клиентов, а также самооценка), применение ключевых показателей эффективности (KPI), а также моделирование рабочих ситуаций (проверка навыков сотрудника в условиях, максимально приближенных к реальности).

Процесс квалиметрической оценки сотрудников можно структурировать в виде последовательных стадий:

1. Организационно-подготовительная стадия: на этом шаге осуществляется постановка целей и задач оценивания, определяются объекты изучения и методический инструментарий, создается комиссия экспертов, а также разрабатывается система оценочных показателей и соответствующих измерительных шкал;

2. Стадия сбора эмпирических данных: включает практическую работу по сбору сведений с помощью различных методов: тестирования, собеседования, наблюдения за работой сотрудника, а также анализа документально зафиксированных результатов его профессиональной деятельности;

3. Аналитико-расчетная стадия: на этом этапе производится упорядочивание и количественная обработка собранной информации. Выполняется вычисление обобщающих показателей (зачастую с применением коэффициентов значимости для различных критериев) и формирование графических моделей компетенций;

4. Стадия синтеза и выработки решений: полученные количественные данные интерпретируются, подготавливаются итоговые заключения по каждому работнику и разрабатываются персональные рекомендации, такие как направление на обучение, перевод на другую должность или рассмотрение вопроса о карьерном продвижении;

5. Коммуникационная стадия: заключительный шаг, в рамках которого проводится ознакомление сотрудника с результатами проведен-

ной оценки и совместная разработка индивидуального плана его дальнейшего профессионального развития.

Внедрение квалиметрии персонала открывает перед организациями значительные преимущества. Главные из них – это повышение объективности и прозрачности оценки, системный подход к анализу качеств сотрудника, а также получение надежной основы для принятия кадровых решений и планирования развития.

Однако этот путь сопряжен с определенными трудностями. На результаты может влиять субъективность экспертов, а сами процедуры часто требуют значительных временных и финансовых затрат. Кроме того, компания может столкнуться с сопротивлением персонала, который видит в оценке угрозу. Ключевой задачей является также разработка валидного инструментария, точно отражающего требования к должности, и недопущение ситуации, когда оценка превращается в формальность, не связанную с реальной работой с персоналом.

Выводы

Квалиметрия персонала представляет собой мощный и современный инструмент управления человеческими ресурсами. Она позволяет перевести управление персоналом на качественно новый, научно обоснованный уровень, где каждое кадровое решение подкреплено объективными количественными данными. Несмотря на существующие сложности внедрения, систематическая и грамотно организованная квалиметрическая оценка является залогом формирования высокопрофессионального, мотивированного и лояльного персонала, способного обеспечить устойчивое конкурентное преимущество компании в долгосрочной перспективе.

Библиографический список

1. Пылькин А. Н., Тишкина В. В. Информационная система формирования управленческих решений по улучшению текущего состояния объекта управления / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 76-86.
2. Губарев А.В., Волкова С.В. Преодоление сопротивления персонала при внедрении технологии бережливого производства / Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование. Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научно-практической конференции. В 3-х томах. Ответственный редактор Е.В. Павлов. 2017. С. 149-151.
3. Янов Е.С., Анцев А.В. Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства / Вестник

Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 85-94.

4 Губарева С.В., Губарев А.В. Анализ подходов к оценке и выбору поставщиков / NovaInfo.Ru. 2024. № 145. С. 12-13.

5. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Е.П. Васильев, Н.В. Климчук

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, KlimcNik@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается разработка интеллектуального программного обеспечения, предназначенного для автоматизации проектирования радиоэлектронных средств (РЭС). Программный комплекс интегрирует систему поддержки принятия решений (СППР), позволяющую повысить точность, надёжность и скорость проектирования. Описана архитектура приложения, применяемые алгоритмы и методы, приведены примеры использования, а также обозначены перспективы развития.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, микроволновые РЭС, СППР, Python, численные методы, машинное обучение, САПР.

MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUPPORT FOR DESIGNING COMPLEX SYSTEMS

E.P. Vasilyev, N.V. Klimchuk

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazan, KlimcNik@gmail.com*

Abstract. This article discusses the development of intelligent software designed to automate the design of electronic equipment (REE). The software suite integrates a decision support system (DSS), allowing for increased accuracy, reliability, and design speed. The application architecture, algorithms, and methods used are described, usage examples are provided, and future development prospects are outlined.

Keywords: Computer-aided design, microwave electronics, decision support system, Python, numerical methods, machine learning, CAD.

Введение

Радиоэлектронные средства являются основой современных систем телекоммуникации, связи, радиолокации и навигации. Их проектирование требует высокой точности, надёжности и учёта множества параметров. В данной работе представлено интеллектуальное программное обеспечение, интегрирующее СППР для автоматизации проектирования РЭС.

Цель и задачи

Цель разработки – создание кроссплатформенного приложения, способного:

1. Генерировать проектные решения, используя различные программные комплексы, управляемые из единого интегрирующего модуля на основе заданных параметров;
2. Выполнять многовариантный численный анализ и моделирование [1];
3. Оценивать эффективность решений по множеству критериев;
4. Формировать техническую документацию.

Архитектура программного обеспечения

Приложение реализовано на языке Python 3 и включает следующие компоненты:

Компонент	Назначение
Tkinter GUI	Графический интерфейс пользователя
Модуль оптимизации	Реализация генетических алгоритмов и градиентных методов
Модуль анализа	Численные методы: метод конечных элементов, метод моментов [2]
Модуль машинного обучения	Нейросети для прогнозирования характеристик устройств
Документационный модуль	Автоматическая генерация схем, спецификаций и отчётов
PyInstaller	Упаковка приложения в исполняемый файл для Windows, Linux и MacOS

Алгоритмы и методы

Программное обеспечение использует:

1. Генетические алгоритмы – для оптимизации топологии РЭС [3];
2. Метод конечных элементов и метод моментов — для анализа электромагнитных полей;
3. Нейронные сети – для ускоренного предсказания параметров устройств;
4. Ядерную оценку плотности выходных характеристик — для оценки вероятности выхода годных изделий и установку допусков на выходные параметры.

Модуль машинного обучения

Для повышения эффективности проектирования и прогнозирования характеристик РЭС в программном обеспечении реализован специализированный модуль машинного обучения. В его основе лежат современные архитектуры нейронных сетей, каждая из которых решает определённый класс задач:

1. Сверточные нейронные сети (CNN). Применяются для анализа распределений электромагнитных полей и изображений топологий. CNN позволяют выявлять пространственные зависимости и прогнозировать параметры фильтров и антенн с высокой точностью;
2. Рекуррентные нейронные сети (RNN, LSTM, GRU). Используются для анализа временных сигналов и динамических процессов. Особенно эффективны при моделировании переходных процессов и исследовании устойчивости систем;
3. Графовые нейронные сети (GNN). Позволяют моделировать сложные топологии схем, представленные в виде графов. GNN учитывают взаимосвязь между элементами и обеспечивают оптимизацию структуры устройства;
4. Байесовские нейросети. Обеспечивают оценку неопределённости прогнозов и формирование доверительных интервалов для параметров. Это критически важно при проектировании высокоточных систем, где необходимо учитывать вариации технологических процессов;
5. Автоэнкодеры (AE, VAE). Применяются для снижения размерности данных и выявления скрытых закономерностей. Используются также для генерации новых топологий на основе обученной модели;
6. Гибридные модели (ML + численные методы). Нейросети интегрируются с методом конечных элементов (FEM) и методом моментов

(МоМ), ускоряя расчёты за счёт аппроксимации сложных функций и сокращения времени моделирования и оптимизации.

Преимущества применения ML архитектур

1. Сокращение времени моделирования за счёт аппроксимации сложных расчётов;
2. Повышение точности прогнозов параметров устройств;
3. Автоматическая генерация новых топологий и проектных решений;
4. Учёт неопределённости и вариаций технологических процессов.

Таким образом, модуль машинного обучения становится ядром интеллектуальной поддержки проектирования, объединяя классические численные методы и современные подходы искусственного интеллекта. Это позволяет инженерам получать более надёжные результаты и ускорять процесс разработки сложных радиоэлектронных систем.

Пример применения

Проектирование микрополоскового РЭС включает:

1. Ввод диапазона частот, размеров, потерь;
2. Генерация вариантов топологии [4];
3. Анализ по коэффициенту передачи, шумам, стоимости;
4. Моделирование с помощью FEM;
5. Автоматическая генерация документации.

Применение СППР позволило сократить время проектирования на 30%, повысить точность параметров на 15% и снизить количество ошибок.

Интеграция разработанного программного комплекса с САПР и сравнительный анализ

Разработанное программное обеспечение ориентировано на совместимость с ведущими системами автоматизированного проектирования для РЭС [5]. Это позволяет экспортировать модели, проводить дополнительную верификацию и использовать преимущества различных методов моделирования.

Для оценки места предлагаемого решения в экосистеме САПР был проведён сравнительный анализ наиболее распространённых инструментов. Для сравнения были выбраны настоящие стандарты в индустрии: Ansys HFSS, AWR Microwave Office, Sonnet Suites, FEKO, μ Wave

Wizard. Это профессиональные решения, обладающие огромным количеством функций и возможностей:

Инструмент	Основные методы	Сильные стороны	Ограничения
Ansys HFSS	Метод конечных элементов (FEM)	Высокая точность 3D - моделирования, поддержка сложных геометрий, интеграция с другими продуктами Ansys	Требует значительных вычислительных ресурсов, высокая стоимость лицензии
AWR Microwave Office	Гармонический баланс, анализ шумов, 2.5D - моделирование	Удобен для проектирования планарных структур, богатая библиотека элементов, быстрый анализ нелинейных схем	Ограничен в полном 3D - моделировании, требует внешней верификации
Sonnet Suites	Метод моментов (MoM)	Высокая точность для планарных и многослойных структур, эффективен для фильтров и антенн	Менее удобен для сложных 3D - структур, ограниченные возможности интеграции
FEKO	Метод моментов, физическая оптика	Хорош для антенн и больших структур, поддержка гибридных методов	Сложнее в освоении, менее удобен для схемотехнического анализа
μWave Wizard	Матричные методы, гибридные подходы	Быстрое моделирование волноводных устройств, высокая точность	Узкая специализация, слабая интеграция с CAD - системами

В отличие от перечисленных решений, разработанное ПО сочетает:

1. Универсальность (поддержка FEM, MoM, СППР и методов машинного обучения в одном комплексе);

2. Доступность (кроссплатформенность, упаковка в исполняемые файлы для Windows, Linux и MacOS);
3. Интеллектуальные функции (СППР, прогнозирование параметров нейросетями, автоматическая генерация документации);
4. Гибкость интеграции (экспорт моделей в HFSS, AWR, Sonnet для дополнительной проверки) [6].

Таким образом, предлагаемая система не конкурирует напрямую с промышленными САПР, а дополняет их, обеспечивая инженеров инструментом для быстрой генерации проектных решений, предварительного анализа и оптимизации.

Перспективы развития

Планируется:

1. Расширение алгоритмов оптимизации (роевые, эволюционные);
2. Поддержка облачных вычислений;
3. Интеграция с базами компонентов;
4. Разработка веб-версии;
5. Совместная работа инженерных команд.

Выводы

Разработка интеллектуального программного обеспечения с интеграцией СППР открывает новые возможности в автоматизации проектирования РЭС. Это решение сочетает гибкость, точность и удобство, делая его эффективным инструментом для инженеров в высокотехнологичных отраслях, особенно в космической сфере.

Библиографический список

1. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп. Анализ численными методами конструктивных вариантов миниатюрных радарных резонансных элементов // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №84. 2023. – С. 3-14. (ВАК).
2. Васильев Е.П. Анализ электродинамических методов моделирования микроволновых устройств [Текст] / Е.П. Васильев. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2019. – С. 195-199.
3. Васильев Е.П. Анализ методов моделирования микроволновых устройств на примере полосового фильтра с расширенной полосой заграждения. // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №72. 2020. – С. 62-70. (ВАК).

4. Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп, Лыу Тхань Дат. Полосовой фильтр на связанных микрополосковых линиях с двумя секторными резонаторами // Вестник Рязан. гос. радиотех. университета. №75. 2021. – С. 15-23. (ВАК).

5. Васильев Е.П. Современные САПР СВЧ и их особенности [Текст] / И.А. Ермолаев, И.М. Сомов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2019. – С. 174-181.

6. Васильев Е.П. Технология компьютерного моделирования в среде Microwave Office [Текст]: метод. указания / Е.П. Васильев. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2019. – С. 40.

УДК 004.94; ГРНТИ 50.43.31 + 50.07.27

ИНТЕГРАЦИЯ NODE-RED С YANDEX IOT CORE КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗРАБОТКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ РЕШЕНИЙ «УМНОГО ДОМА»

Е.М. Крючков, И.Н. Романов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф. Уткина,
Рязань, egorkruchkov12@gmail.com*

Аннотация. В данной работе рассматривается имитационное моделирование, позволяющее исследовать поведение IoT-систем без развертывания реальных прототипов и с минимальными затратами. Для демонстрации подхода была реализована модель подсистемы управления энергоэффективностью помещения. На основе Node-RED и облачной платформы Yandex IoT Core создана программная среда, позволяющая моделировать реакции IoT-устройств и проверять работоспособность алгоритмов управления.

Ключевые слова: IoT-системы, «умный дом», энергоменеджмент, потоковое визуальное программирование, облачные платформы, моделирование IoT-процессов.

NODE-RED INTEGRATION WITH YANDEX IOT CORE AS A TOOL FOR DEVELOPING AND TESTING SMART HOME SOLUTIONS

E.M. Kryuchkov, I.N. Romanov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, egorkruchkov12@gmail.com*

Annotation. This paper considers simulation modeling, which makes it possible to study the behavior of IoT systems without deploying

real prototypes and at minimal cost. To demonstrate the approach, a model of the smart home energy efficiency management subsystem was implemented. Based on Node-RED and the Yandex IoT Core cloud platform, a software environment has been created that allows you to simulate the reactions of IoT devices and verify the operability of control algorithms.

Keywords: IoT systems, smart home, energy management, streaming visual programming, cloud platforms, modeling of IoT processes.

Введение

Современные IoT-платформы позволяют подключать к ней самые разные объекты повседневной среды. Поскольку и незначительные сбои в работе подобных систем могут иметь серьёзные последствия, становится важным изучение и отработка методов их тестирования и оценки качества-надёжности. В рамках данной работы под тестированием понимается не только проверка соответствия системы заранее заданным требованиям (классическое определение тестирования), но и анализ качества её функционирования с использованием показателей, т.е. использование QA-тестирования. Подобные исследования становятся актуальными на этапе предварительного изучения предметной области. Для проведения таких исследований используется инструмент Node-RED (<https://nodered.org/>), позволяющая быстро создавать прототипы IoT-систем и моделировать их логику, в сочетании с облачной платформой Yandex Cloud (<https://cloud.yandex.ru/docs/>).

Тип проводимого моделирования

Создание физических прототипов систем Интернета вещей требует ресурсов и не всегда позволяет воспроизвести условия, необходимые для оценки поведения системы, т.е. модель будет не адекватной, а полученные коэффициенты будут не значимы. Кроме того, эксперименты, требующие длительного наблюдения, делают такой подход еще и с экономической точки зрения не эффективным. Поэтому надо использовать моделирование, в данном случае имитационное моделирование.

Имитационное моделирование – это метод, направленный на исследование сложных объектов и процессов при помощи их моделей, эквивалентов и симуляции [3].

Выбор инструментов для моделирования

В качестве основного инструмента выбран Node-RED (URL: <https://nodered.org/>) [2] – визуальная среда потокового программирования, где приложение представлено сетью узлов, последовательно обрабатывающих данные. Для сбора и передачи информации использовались облачные сервисы компании Яндекс, Yandex Cloud (URL: <https://cloud.yandex.ru/docs/>) [1], а сама среда Node-RED была развернута на виртуальной машине, которая в свою очередь была запущена на компьютере: Процессор AMD Ryzen 7 H 255 w/ Radeon 780M Graphics (3.80 GHz), Оперативная память 32,0 ГБ (доступно: 30,8 ГБ), ОС: Windows 11 (актуальная на момент тестирования - 26100.7171), Виртуальная машина (VirtualBox 7.0.10). Структура IoT-приложения, построенного с использованием связки Node-RED и сервиса Yandex IoT Core показана на рисунке 1.

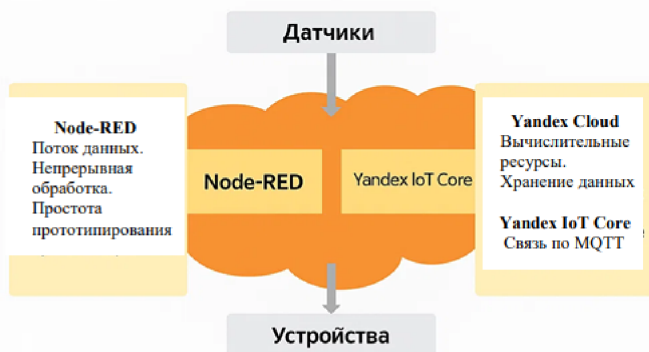


Рис. 1. Визуальное представление структуры IoT-приложения, построенного с использованием связки Node-RED и сервиса Yandex IoT Core

Постановка задачи

Для демонстрации разработанного подхода рассматривается задача оптимизации энергопотребления в домашней системе отопления. Исходная система поддерживает температуру в помещении в заданном диапазоне вокруг целевого значения. Необходимо исследовать и сравнить два подхода, направленных на снижение расхода энергии:

1. Использование датчиков движения. Температура может автоматически снижаться, когда в доме длительное время не фиксируется активность людей;

2. Использование датчика входной двери. Отопление отключается, когда все жильцы покидают помещение, и включается при их возвращении.

В итоге цель сводится к оцениванию эффективности этих стратегий по сравнению со стандартным управлением отоплением, определить возможную экономию и влияние на стабильность поддержания температуры. И для решения данной задачи была выбрана архитектура программы, которая строится в виде сети узлов (MQTT Input и MQTT Output). Каждый узел выполняет конкретную задачу: получает входные данные, обрабатывает их и передает результат далее. Связь между узлами и транспортировка данных обеспечиваются самой сетевой структурой.

Структура модели и метод ее реализации. Smoke-тестирование

Для моделирования данных, полученных с датчиков, использовались два подхода. Первый основан на построении математической модели динамической системы, которая вычисляет значения параметров на каждом шаге виртуального времени. Такая модель представляет собой набор одновременных уравнений (регрессионная модель), связанных с физическими характеристиками помещения и отопительного оборудования.

Второй подход заключается в использовании агентного моделирования. Внутри системы выделяются независимые агенты (например, жители дома или группы устройств), для которых задаются состояния, правила перехода между ними, временные задержки и порождаемые ими события. Так можно описать паттерны поведения людей, управляющих датчиками движения: разные состояния агента («находится в комнате», «спит», «отсутствует») порождают разные сигналы датчика. Помимо моделирования датчиков необходимо оценить эффективность работы системы управления. Для энергосберегающих систем ключевым показателем являются расходы на отопление, вычисляемые как интеграл потребляемой мощности за время. В качестве критерия комфорта обычно используется мера отклонения температуры от целевого значения или альтернативный показатель – доля времени, когда температура находится вне допустимого диапазона. При необходимости

эти метрики объединяются в целевую функцию с весовыми коэффициентами. Перед проведением полноценных имитационных экспериментов выполнялось smoke-тестирование модели/программы [4].

Проведение имитационных экспериментов и анализ результатов

На основе описанных подходов были разработаны четыре прототипа системы управления [5]:

Базовая — учитывает только внутреннюю температуру помещения.

Система с учётом активности людей.

Система с учётом присутствия людей, без учёта активности.

Комбинированная система — учитывает и активность, и присутствие.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Система	Энергопотребление, у.е.	
	Общее	Среднее за день
1	103,87	14,83
2	88,11	12,58
3	79,15	11,31
4	70,86	10,12

В ходе имитационных экспериментов, проведённых в течение семи дней виртуального времени, были собраны данные, представленные в таблице. Анализ результатов показал, что наибольшую эффективность демонстрирует комбинированная система, использующая оба параметра для принятия решений. Среди одиночных подходов система с учётом присутствия показала однозначно лучшие показатели по сравнению с системой, учитывающей только активность пользователей.

Заключение

В работе представлен подход к тестированию и оценке качества систем Интернета вещей, который показал свою эффективность, с использованием Node-RED и облачного сервиса Yandex IoT Core, потенциал взаимодействия которых может быть использован в различных куда более сложных системах. Среда имитационного моделирования позволяет исследовать поведение приложений и компонентов IoT без развёртывания физических прототипов. В качестве примера была вы-

брана и смоделирована система управления энергопотреблением жилых помещений с различными сценариями контроля.

Библиографический список

1. Техническая документация Yandex Cloud [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cloud.yandex.ru/docs/> — Дата обращения: 05.11.2025.
2. Node-RED [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nodered.org/> — Дата обращения: 02.11.2025.
3. Основные концепции, подходы и применение имитационного моделирования в анализе сложных систем [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://1solution.ru/events/articles/imitatsionnoe-modelirovanie-osnovnye-kontseptsii-podkhody-i-primeneniye-v-analize-slozhnykh-sistem/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F — Дата обращения: 27.11.2025.
4. Куликов С.В. Тестирование программного обеспечения. — М.: Питер, 2019. — 320 с.
5. Потребление энергии в домашних хозяйствах Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. — Минск, 2021. — Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by> — Дата обращения: 28.04.2021.

УДК 004.93*1, 159.942.33; ГРНТИ 28.23.15

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАРИЯ OPENFACE ДЛЯ АНАЛИЗА МИКРОВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА

В.А. Саблина*, В.В. Набатчиков**

**Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина,*

Рязань, sablina.v.a@evm.rsreu.ru

***Российский государственный социальный университет
Москва, dolomit00@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрен подход к анализу микровыражений лица на основе распознавания единиц действий (ЕД) согласно системе кодирования лицевых движений (СКЛиД). Обоснована возможность использования инструментария OpenFace для реализации этапа обнаружения антропометрических точек лица. Описаны принципы работы модели ограниченного локального нейронного поля, лежащей в основе обнаружения антропометрических точек OpenFace.

Ключевые слова: микровыражения лица, фреймворк OpenFace, система кодирования лицевых движений (СКЛиД), единицы действий (ЕД), распознавание эмоций.

THE POSSIBILITIES TO USE AN OPENFACE TOOLKIT FOR FACIAL MICRO-EXPRESSION ANALYSIS

V.A. Sablina*, V.V. Nabatchikov**

**Ryazan State Radio Engineering University,
named after V.F. Utkin,*

Ryazan, sablina.v.a@evm.rsreu.ru,

***Russian State Social University,
Moscow, dolomit00@mail.ru*

Abstract. An approach to facial micro-expression analysis on the basis of the Action Units (AU) recognition according to the Facial Action Coding System (FACS) is considered. The possibility of using the OpenFace toolkit for the implementation of the facial landmarks detection stage is justified. The principals of the operation of the Constrained Local Neural Field (CLNF) model underlying the OpenFace landmark detection are described.

Keywords: facial micro-expressions, OpenFace framework, Facial Action Coding System (FACS), Action Units (AU), emotion recognition.

Введение

Человеческое лицо является наиболее комплексным каналом невербальной коммуникации. Способность точно интерпретировать лицевые выражения имеет решающее значение для социального взаимодействия, клинической диагностики, оценки психоэмоционального состояния и человеко-компьютерного взаимодействия. В контексте изучения эмоций особый научный интерес представляют микровыражения – произвольные, кратковременные (от 1/25 до 1/5 секунды) изменения мимики, которые возникают в момент подавления или бессознательной попытки скрыть истинное эмоциональное состояние [1]. В отличие от макровыражений, которые часто носят социальный и контролируемый характер, микровыражения рассматриваются как проявления подлинных, плохо контролируемых эмоций, что делает их объектом для исследований в психологии, психиатрии, криминалистике и безопасности.

Однако ручной анализ микровыражений, осуществляемый экспертами по системе кодирования лицевых движений Facial Action Coding

System (FACS), является чрезвычайно трудоемким, требующим сотни часов обучения и десятки часов на кодирование минутного видео. Поэтому появилась необходимость для масштабных исследований с целью разработки надежных методов автоматического обнаружения и классификации микровыражений.

Основная проблема автоматизации заключается в том, что микровыражения характеризуются малой длительностью и короткой амплитудой движения. Они редко представляют однозначные базовые эмоции, то есть гнев, отвращение, страх, радость, печаль, удивление или презрение, а чаще являются смесью элементарных движений отдельных лицевых мышц. Поэтому подход, основанный на простой классификации эмоций по целому изображению лица, оказывается неадекватным.

Наиболее перспективным и научно обоснованным подходом является использование в качестве промежуточного представления FACS [2]. FACS декомпозирует любую лицевую активность на минимальные неделимые компоненты, представляющие собой единицы действий Action Units (AU), каждая из которых соответствует сокращению одной или нескольких конкретных мышц. Например, искренняя улыбка Дюшена описывается комбинацией поднимания углов губ и щек, также вовлекаются круговые мышцы глаз, где в наружных углах они образуют так называемые «гусиные лапки». Таким образом, задача анализа микровыражений перетекает в задачу распознавания AU и оценки их интенсивности. В [3] рассмотрены основные этапы технологии обнаружения микролицевых движений для распознавания AU: обнаружение и выбор антропометрических точек лица, извлечение пространственно-временных признаков и классификация дескрипторов выбранных областей. От корректности обнаружения антропометрических точек на первом этапе существенным образом зависят результаты последующих этапов.

Обнаружение антропометрических точек лица с помощью OpenFace

В настоящее время существует множество программных библиотек компьютерного зрения для работы с лицом. Для решения задачи обнаружения антропометрических точек можно использовать известные фреймворки MediaPipe или OpenFace, сравнительный анализ которых проведен в [4] и [5]. Экспериментальные исследования, описанные в указанных работах, показали небольшое преимущество MediaPipe по средним отклонениям антропометрических точек лица от эталонных

линий, поэтому этот фреймворк использовался в дальнейших экспериментальных исследованиях, описанных в [3].

Однако MediaPipe находит 468 антропометрических точек, среди которых большинство не задействовано в AU, поэтому далее из них выбираются только 62 точки в областях возможных проявлений микрорлицевых движений согласно FACS, а остальные найденные антропометрические точки не используются. В то же время для исследований в области анализа микровыражений более подходящим может оказаться инструмент, который не просто обнаруживает антропометрические точки лица, а напрямую выдает только антропометрические точки в соответствии с FACS. Это обосновывает возможность использования для анализа микровыражений лица специализированного инструментария OpenFace, разработанного для обработки и анализа изображений лица [6].

Основой для надежного анализа лицевых движений, включая микровыражения и AU, является точное и устойчивое к реальным условиям определение антропометрических точек лица. Инструментарий OpenFace для решения этой задачи использует модель ограниченного локального нейронного поля Constrained Local Neural Field (CLNF), предложенную в [7]. Модель CLNF представляет собой существенное развитие классического подхода ограниченной локальной модели Constrained Local Model (CLM) и специально оптимизирована для работы в условиях различного освещения, различных ориентаций лица, неоднозначных лицевых выражений и возможных окклюзий.

Принципы работы модели CLNF

Модель CLNF состоит из двух следующих основных частей, которые обеспечивают ее высокую точность и надежность [7].

1. Local Neural Fields (LNF) Patch Expert (эксперт для локального патча нейронных полей). В отличие от традиционных для CLM методов, использующих линейные регрессоры опорных векторов Support Vector Regressors (SVR), CLNF использует нелинейный «эксперт» на основе вероятностной графической модели. Этот эксперт оценивает вероятность выравнивания конкретной антропометрической точки по локальному участку изображения (патчу). Модель LNF способна улавливать сложные нелинейные отношения между значениями пикселей и вероятностью корректного выравнивания точки за счет нейросетевого слоя. Также она использует пространственные зависимости между пикселями в патче и включает два типа пространственных ограничений. В качестве первого ограничения можно выделить сходство

(Similarity), то есть соседние пиксели должны иметь схожие вероятности выравнивания, что обеспечивает плавность карты ответов. Вторым ограничением является разреженность (Sparsity), то есть в области поиска должна присутствовать только одна четкая вершина (пик), что подавляет ложные срабатывания и шум. В результате карты ответов LNF становятся более гладкими, выпуклыми и точными по сравнению с картами линейных SVR-экспертов, что упрощает последующую оптимизацию.

2. Non-uniform Regularised Landmark Mean-Shift (NU-RLMS) (неравномерный регуляризованный средний сдвиг для антропометрических точек). Традиционные алгоритмы подгонки CLM одинаково относятся ко всем локальным экспертам. Однако на практике некоторые точки, например, уголки глаз определяются надежнее, чем те же точки на щеках при изменении освещения. Алгоритм NU-RLMS, используемый в CLNF, решает эту проблему, взвешивая вклад каждого эксперта в процессе оптимизации на основе его предварительно оцененной надежности. Матрица весов строится на основе корреляции ответов эксперта с истинными данными на отложенной выборке. Это позволяет модели более уверенно опираться на надежные точки и быть устойчивее к ошибкам ненадежных, что в конечном итоге повышает общую точность.

Выводы

OpenFace, используя модель CLNF, не только обеспечивает обнаружение 68 антропометрических точек, но и делает это с учетом сложных условий окружающей среды. Это критически важно для анализа микровыражений, где амплитуда движений мала, и даже небольшие ошибки в локализации точек могут привести к некорректному распознаванию AU.

Следовательно, OpenFace можно использовать в качестве инструмента для проведения дальнейших исследований в области анализа микровыражений, что обуславливается не только его прямой поддержкой FACS, но и наличием проверенной на сложных изображениях модели обнаружения антропометрических точек лица. Эта модель обеспечивает достаточный уровень точности и устойчивости, необходимый для корректного выделения микролицевых движений.

Библиографический список

1. Paul Ekman, Emotion in the Human Face, 2nd Edition, Malor Books, 2013, 456 p.

2. Facial Action Coding System (FACS) – A Visual Guidebook [Электронный ресурс]. – URL: <https://imotions.com/blog/facial-action-coding-system/> (дата обращения: 03.12.2025).

3. Саблина В.А. Технология обнаружения микролицевых движений для выявления истинных эмоций человека // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2022: сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 7-9 декабря 2022 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2022. – С. 11-17.

4. Саблина В.А., Савин А.В. Поиск антропометрических точек лица с помощью OpenFace и MediaPipe // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2021: сб. тр. IV междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2021. – С. 107-111.

5. Alexander V. Savin, Victoria A. Sablina, and Michael B. Nikiforov, Comparison of Facial Landmark Detection Methods for Micro-Expressions Analysis, 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Proceedings, Budva, Montenegro, 2021, pp. 336-339.

6. Tadas Baltrusaitis, OpenFace, Action Units. GitHub [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/TadasBaltrusaitis/OpenFace/wiki/Action-Units> (дата обращения: 03.12.2025).

7. Tadas Baltrusaitis, Peter Robinson and Louis-Philippe Morency, Constrained Local Neural Fields for Robust Facial Landmark Detection in the Wild, Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, Sydney, NSW, Australia, 2013, pp. 354-361.

УДК 004.852

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО АППРОКСИМАТОРА НА ПЛАТФОРМЕ JAX В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ЭПОХ

Д.Ю. Демин, С.В. Челебаев

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, demind390@gmail.com*

Аннотация. В работе исследована зависимость точности нейросетевого аппроксиматора от количества эпох обучения в диапазоне от 1 000 до 15 000 000. Модель, реализованная с использованием библиотеки JAX, обучалась для аппроксимации функции двух переменных. Показано, что увеличение числа эпох приводит к существенному снижению погрешности, которая достигает минимального значения 0,00024 при 10 000 000 эпох. Установлено, что после 10 000 000 эпох дальнейший выигрыш в точности становится незначительным, а при увеличении до

15 000 000 эпох погрешность возрастает до 0,00025, что свидетельствует о достижении области насыщения или начале переобучения. Эксперименты подтвердили высокую вычислительную эффективность связки JAX и Google Colab для задач, требующих длительного обучения.

Ключевые слова: нейросетевая аппроксимация, JAX, многослойный перцептрон, Google Colab, эффективность обучения, количество эпох, погрешность.

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF NEURAL NETWORK APPROXIMATOR TRAINING IN THE JAX PLATFORM DEPENDING ON THE NUMBER OF EPOCHS

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, demind390@gmail.com*

Abstract. The paper studies the dependence of the neural network approximator accuracy on the number of training epochs in the range from 1,000 to 15,000,000. The model, implemented using the JAX library, was trained to approximate a function of two variables. It is shown that an increase in the number of epochs leads to a significant reduction in error, which reaches a minimum value of 0,00024 at 10,000,000 epochs. It was found that after 10,000,000 epochs, the further gain in accuracy becomes insignificant, and increasing to 15,000,000 epochs results in an error increase to 0,00025, indicating saturation or the onset of overfitting. The experiments confirmed the high computational efficiency of the JAX and Google Colab combination for tasks requiring long-term training.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска оптимальных вычислительных инструментов и параметров обучения для задач аппроксимации сложных функций, где критически важны как точность, так и время расчета [4]. Библиотека JAX [1], обеспечивающая высокую производительность за счет JIT-компиляции [2], автоматического дифференцирования и прозрачного распараллеливания, представляет значительный интерес для исследования пределов обучаемости нейросетевых моделей. Проведение экспериментов в облачной среде Google Colab позволяет эффективно работать с вычислительно затратными задачами, требующими миллионов эпох обучения. Целью работы является определение зависимости максимальной по-

грешности аппроксимации от количества эпох и выявление точки, после которой дальнейшее обучение становится нецелесообразным.

Методология исследования

Для проведения эксперимента была использована архитектура многослойного перцептрона (рис. 1), реализованная с использованием библиотеки JAX, выбранной за её высокую производительность благодаря JIT-компиляции, автоматическому дифференцированию и прозрачной поддержке GPU/TPU [1, 2].

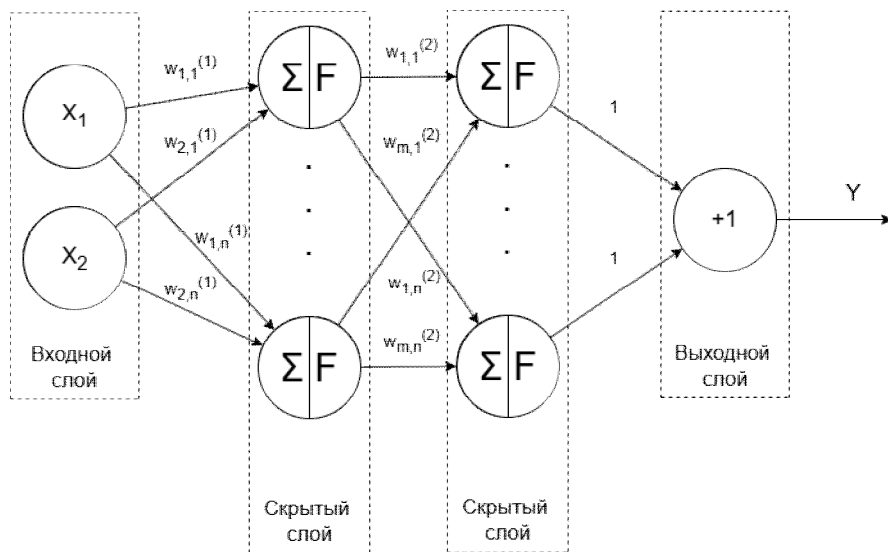


Рис. 1. Схема перцептрона

Архитектура сети включала:

- входной слой: 2 нейрона, соответствующие переменным x_1 и x_2 ;
- скрытые слои: 2 полносвязных слоя по 16 нейронов в каждом;
- функция активации: гиперболический тангенс (Tanh), что обеспечивает плавную нелинейность и устойчивость к проблемам затухающих градиентов:

$$\tanh(x * a) = \frac{e^{xa} - e^{-xa}}{e^{xa} + e^{-xa}},$$

где a – параметр кривизны;

- выходной слой: 1 нейрон, предсказывающий значение функции $f(x_1, x_2)$.

Параметры обучения:

1. Оптимизатор: SGD с моментом (momentum = 0.9), скорость обучения $\eta = 0.01$;

2. Функция потерь: среднеквадратичная ошибка (MSE)

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{true})^2,$$

где L – функция потерь (loss); N – количество точек данных; y_i – предсказанное значение для i -го образца; y_i^{true} – истинное значение для i -го образца;

3. Критерий остановки: ранняя остановка при достижении заданного порога точности ϵ или при отсутствии улучшений в течение заданного числа эпох:

$$\max |y_i - y_i^{true}| < \epsilon.$$

4. Объём данных: обучение проводилось на синтетической выборке, сгенерированной для функции

$$y = \operatorname{tg}\left(\frac{x_1\pi}{4}\right) * \operatorname{tg}\left(\frac{x_2\pi}{4}\right)$$

в диапазоне $[0,1] \times [0,1]$ на равномерной сетке 16×16 точек.

Эксперименты были выполнены в облачной среде Google Colab [3], которая предоставляет бесплатный доступ к GPU Tesla T4 или P100, что критически важно для задач, требующих миллионов эпох обучения. Преимущества использования Google Colab в данном исследовании включают:

- автоматическая настройка среды: предустановленные библиотеки JAX, NumPy, JAXlib и др.;
- масштабируемость: возможность использования высокопроизводительных GPU без необходимости локальной конфигурации;
- интерактивность: удобная работа через Jupyter-ноутбуки с возможностью визуализации результатов в реальном времени;
- интеграция с Google Диском: для сохранения моделей и данных.

Экспериментальные исследования

В ходе эксперимента была исследована зависимость максимальной погрешности аппроксимации от количества эпох обучения. Результаты представлены на графике (рис. 2) и в таблице (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость максимальной погрешности от числа эпох обучения

Эпоха	Максимальная погрешность
1000	0,064
10000	0,026
50000	0,0102
100000	0,0046
200000	0,0032
300000	0,0027
500000	0,0023
750000	0,002
1000000	0,0018
3000000	0,00034
6000000	0,00026
10000000	0,00024
15000000	0,00025

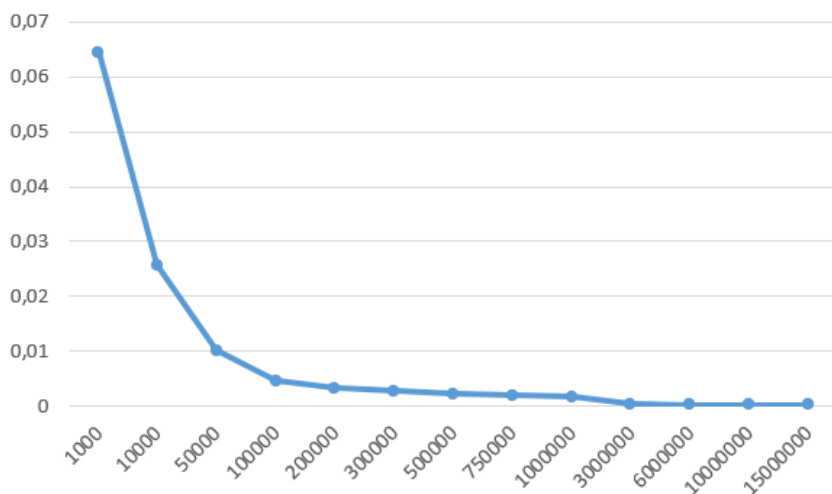


Рис. 2. Зависимость максимальной погрешности от числа эпох обучения

Анализ данных показывает монотонное снижение погрешности с ростом числа эпох. Наиболее значительное улучшение точности наблюдается на начальном этапе (от 1 000 до 10 000 000 эпох). Установлено, что после 10 000 000 эпох снижение погрешности становится незначительным (с 0,00024 до 0,00025), что говорит о том, что процесс

оптимизации достиг насыщения и дальнейшее увеличение вычислительных затрат нецелесообразно.

Выводы

Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность использования платформы JAX в связке с Google Colab для задач нейросетевой аппроксимации, требующих длительного обучения, и может служить основой для оптимизации обучения специализированных преобразователей [5]. Экспериментально подтверждено, что увеличение количества эпох обучения до 10 000 000 позволяет достичь предельно низкой погрешности порядка 0,00024 для заданной функции, в то время как последующее увеличение числа эпох до 15 000 000 не только не улучшает, но и несколько ухудшает точность модели. Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по выбору оптимального количества эпох обучения (около 10 000 000) для задач данного класса с целью экономии вычислительных ресурсов и предотвращения переобучения.

Библиографический список

1. Bradbury J., et al. JAX: composable transformations of Python+NumPy programs. 2018.
2. Frostig R., Johnson M. J., Leary C. Compiling machine learning programs via high-level tracing. Systems for Machine Learning, 2018.
3. Google Colab. Документация и руководство пользователя. – URL: <https://colab.research.google.com/> (дата обращения: 01.12.2025).
4. Локтюхин В.Н., Челебаев С.В. Принципы применения технологии искусственных нейронных сетей для проектирования преобразователей частотно-временных параметров сигналов в код // Датчики и системы. №2. 2006. С. 43-56.
5. Демин Д.Ю., Челебаев С.В. Разработка нейросетевых структур преобразователя «частота – код» двух переменных и их обучение на основе алгоритма «дельта – правило» // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т. 5 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. – С. 277–280.

УДК 004.652.8; ГРНТИ 20.23.25

**РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ПОДДЕРЖКОЙ
ФУНКЦИИ СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА**

П.А. Орлов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им.В.Ф.Уткина,
Рязань, mr.kokakol@mail.ru*

Аннотация. В данной работе разработана концептуальная модель информационной системы для хранения электронной документации с поддержкой функции семантического поиска. Объяснено, за что отвечает каждая таблица модели и как именно она будет интегрирована в взаимодействие элементов системы между собой.

Ключевые слова: ERD-диаграмма, UML-моделирование, информационная система, концептуальная модель информационной системы.

**DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL MODEL
OF AN INFORMATION SYSTEM FOR STORING
ELECTRONIC DOCUMENTATION WITH SUPPORT
FOR SEMANTIC SEARCH FUNCTION**

P.A. Orlov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, mr.kokakol@mail.ru*

Abstract. This paper presents the development of a conceptual model of an information system designed for storing electronic documentation with support for a semantic search function. The purpose of each table in the model is explained, as well as the way it will be integrated into the interaction between the system components.

Keywords: ERD-diagram, UML-modeling, information system, conceptual model of an information system.

Введение

Разработка концептуальной модели выполняет фундаментальную функцию в проектировании информационной системы, поскольку на этом этапе формируется укрупнённое представление о предметной области на уровне сущностей и их смысловых связей. В концептуальной модели намеренно не детализируются атрибуты и не устраняются связи типа М:N, поскольку её задача – зафиксировать, какие объекты

будут присутствовать в системе, какие роли они выполняют и каким образом соотносятся между собой в реальных процессах [1, 2].

Такой уровень абстракции позволяет увидеть структуру системы целостно, не перегружая её техническими деталями и ограничениями конкретной платформы. Это способствует более точной идентификации ключевых сущностей, предотвращает пропуск важных объектов и обеспечивает корректное определение границ между ними. Концептуальная модель становится общей точкой согласования между аналитиками, разработчиками и заказчиком: она создаёт единое понимание логики системы ещё до начала детальной проработки [3].

На её основе впоследствии строится логическая модель, где связи уточняются, нормализуются, преобразуются из М:Н в технически реализуемые структуры и дополняются атрибутами [4].

В рамках предлагаемого исследования основное внимание уделяется построению концептуальной модели информационной системы, позволяющей определить полный набор сущностей предметной области и характер их взаимосвязей. Такой подход обеспечивает формирование базовой структуры будущей системы, необходимой для последующего перехода к логическому моделированию и уточнения механизмов взаимодействия элементов [2].

Разработка концептуальной модели информационной системы

Разработку концептуальной модели ИС можно разделить на следующие этапы.

1. Идентификация сущностей – определение ключевых объектов предметной области, которые должны быть отражены в системе, а также формирование их общего смыслового содержания.

2. Определение взаимосвязей – установление логических связей между сущностями, включая возможные связи типа М:Н, отражающих реальные взаимодействия объектов в предметной области.

3. Проверка согласованности модели – анализ полноты и непротиворечивости полученной схемы, выявление пропусков, дублирования или логических несоответствий.

Идентификация сущностей

Чтобы максимально полно охватить функционал разрабатываемой системы, необходимо ничего не упустить при описании сущностей концептуальной модели. Опишем их.

1. Документы – хранит основные метаданные документа.
2. ФайлыДокументов – прикрепленные файлы (PDF, Word, изображения) к документу.
3. ВерсииДокументов – хранит историю версий документа; каждая версия привязана к конкретному документу и позволяет реализовать откат до предыдущей версии.
4. Категории – справочник категорий; позволяет классифицировать документы и искать по категориям.
5. СтатусыДокументов – справочник, использующийся для контроля состояния документа.
6. Сотрудники – информация о пользователях системы, которые могут создавать, просматривать и редактировать документы.
7. Роли – роли сотрудников, определяющие набор разрешений.
8. Разрешения – права, которые могут быть назначены ролям.
9. ЖурналИстории – хранит действия пользователей по документам и версиям (загрузка, изменение, просмотр); обеспечивает аудит.
10. СемантическийИндекс – embedding-векторы документов для реализации семантического поиска; каждый embedding привязан к конкретному документу [5].

Выявленные сущности позволяют перейти к этапу определения взаимосвязей между ними.

Определение взаимосвязей

Одна из главных проблем при определении связей между сущностями - выявить, какие сущности могут существовать без связанной с ними сущности, а какие не могут, поэтому при моделировании ERD-диаграмм выделяют 2 типа сущностей.

1. Идентифицирующая связь – связь, при которой экземпляр сущности потомка не может существовать без соответствующего экземпляра родительской сущности. В таком случае столбец, отвечающий за связь между сущностями, становится частью составного первичного ключа, не позволяя строкам-дубликатам находится в сущности.

2. Неидентифицирующая связь – связь, при которой экземпляр сущности потомка может существовать без соответствующего экземпляра родительской сущности.

Выявим данные связи и опишем, что подразумевает данная связь.

1. Документы – Категории (N:1, неидентифицирующая): каждый документ имеет одну категорию; категория может относиться ко множеству документов.

2. Документы – Семантический Индекс (1:1, идентифицирующая): каждый документ имеет один embedding; embedding не существует без документа.

3. Документы – Файлы Документов (N:M, идентифицирующая): каждый документ может иметь несколько файлов; файл не существует без документа.

4. Документы – Статусы Документов (N:1, неидентифицирующая): каждый документ имеет один статус; один статус может быть у множества документов.

5. Документы – Версии Документов (1:N, идентифицирующая): документ может иметь несколько версий; версия не существует без документа.

6. Документы – Сотрудники (N:M, идентифицирующая): определяет, какие сотрудники имеют доступ к документу (ACL).

7. Документы – Журнал Истории (1:N, идентифицирующая): документ может иметь много записей в журнале; запись не существует без документа.

8. Сотрудники – Роли (N:M, идентифицирующая): сотрудник может иметь несколько ролей; роль не существует без сотрудников.

9. Роли – Разрешения (N:M, идентифицирующая): роль может иметь несколько разрешений; разрешение не существует без роли.

10. Сотрудники – Журнал Истории (1:N, идентифицирующая): запись истории привязана к сотруднику; запись не существует без сотрудника.

11. Версии Документов – Журнал Истории (1:N, идентифицирующая): запись журнала может ссылаться на версию документа.

Благодаря данным связям можем перейти к последнему этапу проектирования – создание самой модели.

Проверка согласованности модели

На данном этапе необходимо разработать саму схему и далее убедиться, что все сущности схемы не противоречат и максимально полно описывают взаимодействие объектов информационной системы.

Концептуальная схема информационной системы представлена на рисунке 1.

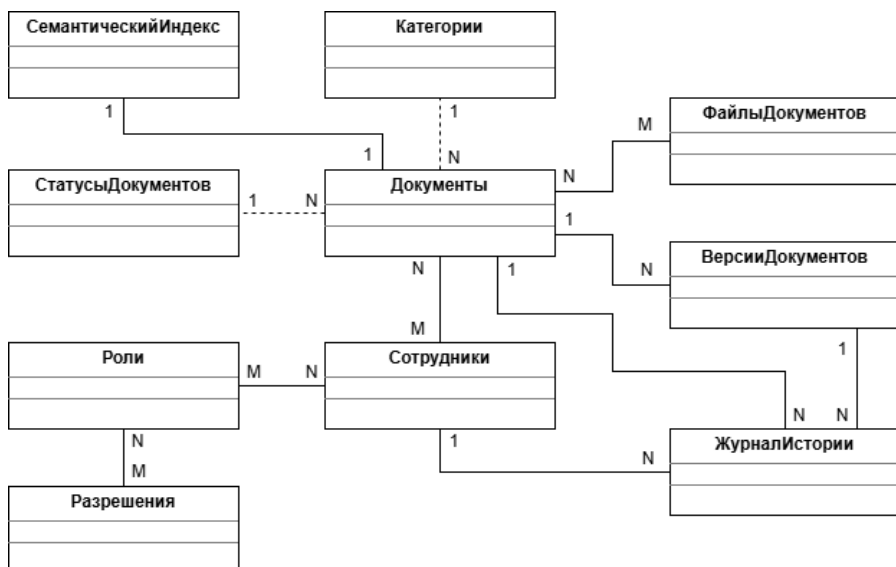


Рис. 1. Концептуальная схема информационной системы

1. Построенная концептуальная модель отражает все ключевые аспекты функционирования системы хранения электронной документации и обеспечивает непротиворечивое взаимодействие сущностей. Каждый объект модели имеет строго определённую роль, а взаимосвязи между ними логически согласованы и полностью покрывают процессы работы с документами, их версиями, файлами, доступами пользователей и историей изменений.

2. Модель корректно разделяет справочные, операционные и вспомогательные сущности, что исключает дублирование информации и обеспечивает нормализованную структуру данных. Документы выступают центральной сущностью, вокруг которой формируются связи с категориями, статусами, версиями, файлами и семантическим индексом. Такое построение позволяет полно описать жизненный цикл документа – от создания и классификации до версии, доступа и аудита.

3. Сущности, связанные с управлением доступом – сотрудники, роли и разрешения согласованы между собой через стандартный механизм ACL [6]. Это гарантирует непротиворечивость политик безопасности: каждая роль содержит набор разрешений, сотрудники получают роли, а доступ к документам задаётся отдельными N:M отноше-

ниями. В результате структура управления доступом является гибкой, расширяемой и устойчивой к конфликтам.

4. Журнал Истории обеспечивает целостный аудит действий, связывая операции одновременно с документами, версиями и сотрудниками. Благодаря этому обеспечивается непрерывная и прослеживаемая история изменений.

5. Семантический индекс интегрирован в модель через строгую 1:1 связь, что исключает появление «висящих» embedding-ов, обеспечивает уникальность и однозначность семантического представления каждого документа.

В совокупности модель полностью описывает взаимодействие объектов информационной системы, исключает логические противоречия, упущенные элементы или избыточность. Она предоставляет прочный фундамент для последующих этапов проектирования – логической и физической модели базы данных.

Выводы

Проведённая работа подтверждает обоснованность трёхэтапного подхода к формированию концептуальной модели информационной системы. Анализ показал, что последовательное выполнение этапов идентификации сущностей, определения взаимосвязей и проверки согласованности обеспечивает полноту описания предметной области и позволяет исключить появление структурных противоречий на последующих этапах проектирования.

Библиографический список

1. Chen P. P. S. The Entity-Relationship Model—Toward a Unified View of Data // ACM Transactions on Database Systems. 1977. Vol. 1. No 1. pp. 9–36.
2. Connolly T., Begg C. Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management. 6th Edition. Pearson. London. 2014. pp. 34-50.
3. Hoffer J. A., George J. F., Valacich J. S. Modern Systems Analysis and Design. 8th Edition. Pearson. New York. 2016. pp. 280-315.
4. Codd E. F. The Relational Model for Database Management: Version 2. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston. MA. 1990.
5. Moe K. W. Unlock the Power of Vectors in AI Applications: Discover how modern developers are building intelligent search and retrieval systems with embeddings, vector databases, and Python-powered APIs. Amazon Digital Services LLC - Kdp. 2025. 150 p.
6. Gollmann D. Computer Security. 3rd Edition. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. 2011. pp. 191–205.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция "РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА"	3
Потапов А.А. О некоторых выводах из наших работ (2025 г.) по фрактальной тематике в области радиосистем, устройств, датчиков, мета-поверхностей, реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей, «умной» радиосреды и математики дробных операторов.....	3
Дмитриев В.Т., Ямашкин И.А. Метод адаптивного кодирования для цифровых телеметрических систем с переменными параметрами канала.....	15
Меньшиков Д.М., Дмитриев В.Т. Безопасная передача аудиоинформации: применение инфраструктуры открытых ключей.....	20
Бунин М.С., Дмитриев В.Т. Исследование эффективности шумоподавления при кодировании речевого сигнала без потерь.....	26
Аронов Л.В. Подводный лазерный канал связи с широким сектором излучения..	33
Киселёв В.В., Аронов Л.В. Повышение устойчивости FSO-связи с БПЛА при помощи LDPC-кодирования.....	40
Протасов В.И. Двухканальный СВЧ-приёмник для РЛС с активной фазированной антенной решёткой.....	45
Дмитриев В.Т., Ву Хоанг Шон Метод сжатия речевых сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования с энергетическим пороговым отсечением.....	53
А.В. Захряпин, Л.В. Аронов Исследование конических СПИРАЛЬНЫХ антенн путём сопряжения программ MMANA-GAL и OCTAVE.....	63

Алексашин А.А., Волченков В.А. Исследование функциональных возможностей отечественной среды моделирования simintech для задач цифровой обработки сигналов.....	69
Паршин А.Ю., Нгуен В.Х. Экспериментальное исследование эффективности пространственно- временного кодирования ММО-системы.....	75
Воронин О.А., Паршин А.Ю. Расчет характеристик оптической системы радиофотонной линии связи.....	83
Криминецкий О.А. Математическое моделирование спектра отражений от подстилающей поверхности в бортовой РЛС.....	92
Паршин Ю.Н., Фам В.Д. Эффективность пространственного кодирования с большим числом антенн для ММО систем в условиях действия помех.....	100
Пчелинцева Е.Д., Штрунова Е.С. Формирование сигнала с фазовой манипуляцией на поднесущих на базе ПЛИС.....	109
Штрунова Е.С. Применение децимации в задаче уменьшения уровня побочных пиков автокорреляционной функции меандрового шумоподобного сигнала.....	115
Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Моделирование переходных процессов в полупроводниковых барьерных структурах.....	119
Куклев В.В., Вишняков Н.В., Гудзев В.В. Система управления зондовым датчиком атомно-силового микроскопа.....	124
Лобанов Н.В., Вишняков Н.В. Моделирование Р-І-N структуры полупроводникового фотоэлектрического преобразователя в программной среде AFORS-NET.....	131

Чернов В.С. Исследование конфигураций гибридных формирователей луча с использованием CDL-моделей.....	138
Асан Ж.Ж. Подготовка радарных данных для обучения и оптимизации нейронных сетей в задачах локализации и идентификации целей.....	145
Крюков А.Н. Свойства управляемых выпрямителей.....	153
Лебедев К.Э., Дмитриев В.Т. Исследование и разработка адаптивного первичного кодека для спутниковой связи.....	158
Юмаев Д.Ш., Зорин С.В. Моделирование стенда для изучения работы протокола OSPF....	163
Головкин А.С. Исследование возможностей использования микрополосковых антенн бегущей волны в современных коммуникационных системах.....	169
Трусов Е.П., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В., Ильин Н.Я. Автоматизированный комплекс для квази-изотермического исследования электропроводности фазопеременных материалов.....	176
Полферов А. А. Интеллектуальное управление ЭМС в плотных IoT-сетях с применением искусственного интеллекта.....	182
Полферов А. А. Применение протокола LORAWAN для организации сетей связи интернета вещей в условиях городской застройки.....	188
Сивов Н.Д., Волченков В.А. Исследование возможностей отечественной среды моделирования SIMINTESN для задач проектирования цифровых сетей.....	196

Мишустин В.Г., Романов А.Г., Савелов В.В. Разработка высокоскоростного прецизионного усилителя для детектирования переходных процессов в полупроводниковых структурах.....	203
Грачев М.В., Паршин Ю.Н. Оптимизация траектории мобильного приемника и позиционирования сенсорных узлов в неоднородной среде с потерями.....	209
Литвинова Д.В., Литвинов В.Г. Влияние облучения потоками частиц на параметры кремниевых полупроводниковых приборов.....	219
Яцемирский И.А., Литвинов В.Г. Методы исследования полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей.....	224
Секция " ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ"..... 229	
Васильев Е.П. Моделирование волноведущих структур микроволновых объемных интегральных схем.....	229
Каширин И.Ю. Иерархические числа для вставки таксономического слоя в нейронную сеть языковой модели.....	237
Скворцов С.В., Хрюкин В.И. Исследование алгоритмических методов поиска покрытий бинарных таблиц в задаче анализа проектных альтернатив.....	243
Сапрыкин А.Н. Преждевременная сходимость в метаэвристических алгоритмах глобальной оптимизации.....	250
Сапрыкин А.Н. Облачные информационные системы на основе Python с параллельной архитектурой.....	255

Кокунов А.А., Таганов А.И. Моделирование и оптимизация надежности алгоритмических процессов жизненного цикла программного обеспечения.....	262
Таганов А.И., Кокунов А.А. Оптимизация состава системных требований проекта автоматизированной системы при нечеткости проектных данных.	271
Авилова А.М., Миловзоров О.В. Компьютерный метод обратного инжиниринга как инструмент перехода от физического образца к цифровой модели.....	280
Шелобанов А.А., Стротов В.В. Алгоритм обнаружения и слежения за воздушными объектами...	289
Карасев В.В., Кольцов И.Б. Исследование реакции индуктивно связанных контуров на разнополярные прямоугольные импульсы различной амплитуды.....	296
Сафонов Ф.А., Таганов А.И., Цыцына М.И. Автоматическая классификация рисков программного проекта в условиях нечеткости.....	302
Сапрыкин А.Н. Архитектура программного обеспечения для централизованного контроля параметров климатического оборудования.....	311
Гиасян К.А., Сапрыкина А.О. Подход к автоматизации перевода японских политических текстов на русский язык на основе анализа лексико-стилистических трансформаций.....	317
Сапрыкина А.О., Яркович А.А. Проектирование пользовательских интерфейсов для многоязычной среды.....	323
Кондрашова Т.И., Колесенков А.Н. Концепция интеллектуальной системы управления базами данных для корпоративных геоинформационных систем: предполагаемый архитектурный подход.....	328

Дятлов Р. Н. Математическая модель электрохимической обработки материалов в машиностроении.....	336
Андреев А.А., Тарасова В.Ю. Алгоритм синхронизации «точно-в-срок»/ «точно-в-последовательности» для поставки крупных узлов на сборочную линию автомобильного завода.....	343
Заборова А.А., Баканов М.О. Регрессионные методы и их гибридные архитектуры для предиктивного моделирования прочности бетона.....	347
Баранчиков А.И., Федосова Е.Б. Методика разработки тестовых реляционных баз данных для апробации алгоритмов интеллектуального анализа данных..	354
Буянкина Я.А., Бабаян П.В. Пороговая сегментация малоконтрастных изображений. Генетический алгоритм.....	360
Львова Т.Л., Миронов В.В. Некоторые аспекты устойчивости линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами как прелюдия к решению общей проблемы с мультипериодическими коэффициентами на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина.....	368
Филатов И.Ю. Ситуационное управление: теоретические основы, модели и прикладные аспекты.....	374
Баженов Д.А., Жгутова Е.С., Трофимов Д.В. Комбинированный подход для оценки смещения на изображении.....	380
Губарева С.В. Требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний на примере грунта.....	388

Губарева С.В. Особенности осуществления исследовательских испытаний на допроизводственной стадии как инструмента снижения технологических рисков.....	394
Губарев А.В. Требования нормативной документации к процедуре внесения изменений в документы регистрационного досье по правилам ЕАЭС.....	400
Маркин А.В., Юркова В.И. Разработка системы анализа платежной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ.....	405
Васильев Е.П., Лыу Т.Д. Статистическое моделирование полосковых фильтров радиотехнических систем.....	412
Васильев Е.П., Нгуен Данг Хоп Обобщённый алгоритм матричного анализа сложных схем полосковых переключателей радиотехнических систем.....	418
Бодров О.А., Рождественский А.С. Применение нейросетей для автоматического распознавания дефектов солнечных панелей на космических аппаратах.....	423
Засульская А.П. Проектирование пользовательских интерфейсов информационных систем с применением FIGMA.....	429
Бурцева С.Н. Автоматизация базовых принципов ASR с помощью модели VOSK в задаче разработки модуля распознавания речи.....	439
А.Н. Колесенков Искусственный интеллект для автономной обработки аэрокосмических изображений на борту спутников.....	445
Аксенов А.А., Колесенков А.Н. Адаптивный метод компенсации динамических искажений видеопотока при высокоскоростном перемещении БАС.....	455
Братчиков Д.А., Колесенков А.Н.	

Микросервисная архитектура на ASP.NET Core для интеллектуального анализа больших данных: подходы к горизонтальному масштабированию.....	463
Баранчиков А.И., Абди М.А.М. Алгоритм масштабирования с учетом сценариев и применения ограничений в синтетических реляционных тестовых базах данных.....	471
Бехтин Ю.С., Чинь В.Т. Адаптивный метод фильтрации спекл-шума изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой на основе вейвлет-преобразования.....	480
Попов И.Д., Овечкин Г.В. Обзор подходов для дефектоскопии полиграфической продукции.....	487
Талаева А.В., Жулева С.Ю. Анализ ограничений типовых систем управления ресурсами для творческо-коммерческих организаций.....	492
Кузнецов В.П. Функции активации для комплексных нейронных сетей.....	497
Дьяков С.Н., Никишкина В.А. Анализ методов решения задач транспортной логистики.....	506
Хлебников Н.М., Ленков М.В. Разработка электрического блока автоматизации режимов управления нефтеперекачивающей установки.....	512
Тарудько И.А., Ленков М.В. Принципы формирования автоматизированного контрольного листа производства изделия на всем технологическом маршруте фрезерной и токарной обработки.....	520
Дунин А.С., Ленков М.В. Современные подходы к проектированию систем диспетчеризации инженерного оборудования установок пожаротушения на основе технологий ИИТ.....	526

Костецкая В.Н., Афонина О.А. Сравнительный анализ произвольности PostgreSQL и CLICKHOUSE в задаче обработки аналитических запросов.....	532
Батистова А.А., Городничева Е.В., Сосулин Ю.А Планирование эксперимента при исследовании объектов с ограничениями на функцию отклика.....	538
Городничева Е.В., Сосулин Ю.А Регрессионный анализ объектов с ограничениями на значения функции отклика.....	544
Губарев А.В. Квалиметрия персонала: научный подход к оценке человеческого потенциала.....	550
Васильев Е.П., Климчук Н.В. Математическое и программное обеспечение для проектирования сложных систем.....	555
Крючков Е.М., Романов И.Н Интеграция Node-RED с Yandex IoT Core как инструмент разработки и тестирования решений «умного дома»	561
Саблина В.А., Набатчиков В.В. Возможности использования инструментария OPENFACE для анализа микровыражений лица.....	566
Демин Д.Ю., Челебаев С.В. Исследование эффективности обучения нейросетевого аппроксиматора на платформе JAX в зависимости от количества эпох.....	571
Орлов П.А. Разработка концептуальной модели информационной системы хранения электронной документации с поддержкой функции семантического поиска.....	577

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Сборник материалов

X Всероссийской научно-технической конференции,
посвященной 100-летию со дня рождения
Заслуженного деятеля науки и техники
Российской Федерации В.П. Миловзорова,
25-28 ноября 2025 г.

ТОМ 1

Подписано в печать 15.12.2025 г. Формат бумаги 60х84/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл.- печ. листов 37,00.

Тираж 100 экз. Зак. 7808

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина»

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

ISBN 978-5-7722-0439-9



9 785772 204399 >