

На правах рукописи



ДЕМИДОВ Дмитрий Сергеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ
И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПороГОВЫХ
ДЕКОДЕРОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ
В ВЫСОКОДОСТОВЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ
ИНФОРМАЦИИ**

05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена на кафедре вычислительной и прикладной математики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВО «РГРТУ», РГРТУ).

Научный руководитель Овечкин Геннадий Владимирович,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры вычислительной и прикладной
математики ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический
университет», г. Рязань.

Официальные оппоненты: Егоров Сергей Иванович,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры вычислительной техники ФГБОУ ВО
«Юго-Западный государственный универси-
тет», г. Курск.

Назаров Лев Евгеньевич,
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник лаб. № 301 «Инструмен-
тальные и информационные методы исследо-
вания окружающей среды средствами дистан-
ционного зондирования» Фрязинского филиала
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», г. Воронеж

Защита состоится 3 марта 2017 г. в 12 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радио-
технический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет» и на офици-
альном сайте <http://www.rsreu.ru/ru/>.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
д.т.н, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных проблем, с которой сталкиваются при разработке систем передачи и хранения информации, является проблема обеспечения безошибочности передачи информации по каналам с шумом. Для решения данной проблемы обычно применяются методы помехоустойчивого кодирования, в разработке которых в последние десятилетия появились значительные успехи. Одними из наиболее эффективных алгоритмов с точки зрения соотношения эффективности и сложности реализации являются многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов (СОК), которые всего лишь с линейной вычислительной сложностью обеспечивают близкое к оптимальному декодирование даже очень длинных кодов. Материалы более двухсот научных работ в области многопорогового декодирования позволяют считать, что МПД для многих современных высокоскоростных систем передачи информации обеспечивает предельно возможный уровень энергетического выигрыша и обладает очень высоким быстродействием. Вместе с тем перед практическим использованием МПД в конкретных условиях, в частности в системах цифрового телевидения, при необходимости получения наилучших вероятностно-энергетических характеристик нужно проделать огромный объем работ.

Необходимо выбрать или построить применяемый самоортогональный код. Данный код должен быть в наименьшей степени подвержен эффекту размножения ошибок, проявляющегося в том, что при совершении декодером первой ошибки вероятность появления последующих ошибок существенно возрастает. Это значительно ухудшает характеристики итеративной схемы декодирования, к которой относится МПД. Отметим, что при построении «хорошего» в плане устойчивости к размножению ошибок самоортогонального кода необходимо выполнить ряд оптимизационных процедур, в частности выбрать наилучшую структуру кода с параллельным каскадированием. При этом требуется проведение компьютерного моделирования огромного объема, на выполнение которого могут потребоваться недели работы обычного персонального компьютера.

После построения кода необходимо настроить параметры декодера, для чего снова выполняется процедура оптимизации, в процессе которой настраиваются десятки, а в некоторых случаях даже сотни параметров МПД. Это также достаточно затратная с вычислительной точки зрения операция.

На заключительном этапе необходимо убедиться, что разработанный МПД отвечает предъявляемым требованиям, оценив его вероятностно-энергетические характеристики. В случае если целевая вероятность ошибки на бит является не очень малой (до 10^{-10}), то подобная оценка легко выполняется с помощью компьютерного моделирования за несколько часов работы персонального компьютера. Отметим, что известные аналитические оценки эффективности МПД являются сильно заниженными при большом уровне шума и слабо подходят для данной цели. В случае же если целевая вероят-

ность ошибки, как в современных и перспективных системах цифрового телевидения, очень мала (10^{-11} и менее), то процесс получения подобных оценок с приемлемой точностью может затянуться на недели, месяцы и даже годы работы компьютера. Все это делает задачу уменьшения времени получения оценок эффективности МПД актуальной. Данную задачу можно решать как за счет увеличения скорости работы компьютерных моделей МПД, так и за счет разработки более эффективных аналитических методов оценки его характеристик, что и будет выполнено в рамках диссертационной работы.

Кроме этого, в ряде систем передачи различного рода информации, особенно в системах цифрового телевидения, для повышения эффективности использования канала связи часто применяется так называемое адаптивное кодирование и модуляция, когда в зависимости от состояния канала используются код с одной или другой кодовой скоростью и модуляция большего или меньшего порядка. Для МПД вопросы его применения в подобных схемах раньше не решались. Еще одна сложность применения самоортогональных кодов в подобных системах связана с тем, что на практике они обладают не очень большим кодовым расстоянием и, следовательно, для них характерно наличие так называемой области насыщения вероятности ошибки. Это усложняет задачу получения очень малых вероятностей ошибки, требуемых в современных системах цифровой передачи информации. Следовательно, актуальной также является задача уменьшения вероятности ошибки при использовании самоортогональных кодов в области их субоптимального декодирования.

Степень разработанности темы. Помехоустойчивое кодирование как отдельное научное направление ведет свой отсчет с работы К. Шеннона, которая была опубликована в 1948 году. В этой работе анализировалась пропускная способность канала и делалось заключение, что если скорость передачи информации меньше пропускной способности канала, то существует возможность подобрать такие помехоустойчивые коды и алгоритмы их декодирования, которые позволят восстановить искаженную информацию со сколь угодно высокой точностью. Отметим, что К. Шеннон не предлагал конкретных кодов и алгоритмов их декодирования, а лишь доказал их существование. Однако именно после этой работы начались активные исследования в области помехоустойчивого кодирования. Стали предлагаться различные коды и алгоритмы их декодирования. Из наиболее ярких отечественных представителей этой области можно отметить В.А. Котельникова, Л.Е. Назарова, В.Д. Колесника, Э.Л. Блоха, С.И. Егорова, А.Н. Колмогорова, В.В. Зяблова, В.В. Золотарева и др. Среди зарубежных ученых большой вклад внесли работы Дж. Месси, Дж. Возенкрафта, А. Витерби, Р. Галлагера, У. Питерсона, Т. Кассами, Р. Блейхута и др.

За последние годы было разработано большое число помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования. Однако лишь некоторым из них удалось приблизиться к главной цели – обеспечению работы вблизи пропускной способности канала. Среди таких кодов можно выделить турбо- и турбоподобные коды, низкоплотностные коды (LDPC), полярные коды. Стоит отме-

тить, что даже самые последние варианты этих методов обладают относительно высокой вычислительной сложностью, что значительно осложняет их практическое применение в высокоскоростных системах передачи информации, к которым относятся и системы цифрового телевидения. В связи с этим возникает задача поиска более простых и более надежных при практической реализации методов кодирования/декодирования.

В процессе решения данной задачи исследователи также сталкиваются с проблемой получения оценок эффективности разрабатываемых ими методов за минимальное время. В случае большой вычислительной сложности алгоритма декодирования или необходимости проведения большого объема эксперимента традиционно наиболее сложные узлы модели системы передачи информации (кодер, декодер) реализовывались на интегральных схемах специального назначения (ASIC) или на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), обеспечивающих высокое быстродействие. Но данный подход, во-первых, требует проведения большого объема работ по реализации этих узлов на интегральных схемах и, во-вторых, плохо подходит, когда в процессе исследования нужно изменять алгоритм работы узла, например декодера. В этих случаях целесообразно реализовать модель в виде программы для ЭВМ, но при этом нужно обеспечить требуемое быстродействие. В последнее время для этого стали использовать вычислительные возможности графических процессоров (GPU), которые оснащаются тысячами ядер. В этой области известны работы таких специалистов, как J.R. Cavallaro, L. Sousa, G. Wang, G. Falcao, S. Kang. Вместе с тем в процессе реализации модели системы передачи информации с использованием GPU для получения наибольшей производительности всегда нужно решать задачи, связанные с необходимостью учитывать специфику, определяемую составляющими элементами модели, в особенности кодером и декодером. Для МПД подобные задачи ранее не решались.

Для уменьшения вероятности ошибки МПД в области его субоптимальной работы был предложен ряд подходов, основанных на каскадировании применяемых с МПД СОК с простыми для декодирования кодами, такими как коды с контролем четности или коды Хэмминга, а также с другими СОК. Подобные схемы за счет применения внешнего кода позволили уменьшить вероятность ошибки декодирования на 1..4 десятичных порядка, однако их применение приводит к необходимости использования дополнительных проверочных бит. Это уменьшает кодовую скорость применяемого кода, что не всегда допустимо.

Цель и задачи исследования. Цель диссертации заключается в разработке методов и алгоритмов повышения эффективности и исследования многополюсовых декодеров самоортогональных кодов в высокоскоростных системах передачи цифровой информации, позволяющих обеспечивать и оценивать вероятность ошибки декодирования порядка 10^{-11} и менее.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- разработать и исследовать схему кодирования, основанную на самоортогональных кодах, позволяющую уменьшить вероятность ошибки де-

кодирования в области субоптимальной работы декодеров самоортогональных кодов;

- разработать и исследовать метод имитационно-аналитической оценки эффективности МПД, обеспечивающий оценку низких целевых вероятностей ошибки с лучшей по сравнению с известными аналитическими методами точностью;

- разработать методику применения многопороговых декодеров в системах с адаптивным кодированием;

- разработать и реализовать модель цифровой системы передачи информации с многопороговым декодером, использующей ресурсы центрального и графического процессоров.

Методы исследований. В диссертационной работе используются теории вероятностей, математической статистики, математического и имитационного моделирования.

Научная новизна. В рамках диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты:

- обоснован новый метод оценки эффективности многопороговых декодеров как блоковых, так и сверточных самоортогональных кодов, отличающийся от известных сочетанием в себе элементов аналитического и имитационного моделирования;

- предложена новая методика применения многопороговых декодеров в системах с адаптивным кодированием;

- обоснован алгоритм оценивания уровня шума в канале, основанный, в отличие от известных, на анализе содержимого синдромного регистра многопорогового декодера;

- предложена каскадная схема кодирования, основанная на самоортогональных кодах, в которой в отличие от известных каскадных схем во внутреннем каскаде только для проверочных символов самоортогонального кода применяется безызбыточный код накопления;

- разработаны архитектура, алгоритм выбора параметров и создана программная модель системы передачи информации с многопороговым декодированием, использующая в отличие от известных при вычислениях ресурсы графического процессора.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в разработке новых методов и алгоритмов повышения и исследования эффективности МПД, позволяющих обеспечить и оценить вероятности ошибки декодирования порядка 10^{-11} и менее, новой методики использования многопороговых декодеров в системах адаптивного кодирования, позволяющей лучше использовать частотный ресурс канала, а также новой каскадной схемы кодирования, позволяющей существенно уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы декодера самоортогональных кодов.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых схем кодирования, основанных на самоортогональных кодах, обеспечивающих

улучшение их вероятностных характеристик на 4 и более порядков, а также в создании программных средств моделирования, позволяющих в десятки раз увеличить скорость моделирования по сравнению с известными. Использование программных средств позволит исследователям быстрее получать новые научные результаты и разрабатывать многопороговые декодеры, обеспечивающие получение большего энергетического выигрыша кодирования, что улучшит эффективность работы перспективных цифровых систем передачи и хранения информации. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда НИР, проводимых в РГРТУ: грант РФФИ 15-07-06348 «Разработка оптимальных алгоритмов декодирования для повышения достоверности передаваемой информации в современных системах передачи данных», грант РФФИ 14-07-00824 «Алгоритмы повышения энергетического выигрыша кодирования при использовании декодеров многопорогового типа», грант РФФИ 13-07-00391 «Разработка эффективных и быстродействующих декодеров помехоустойчивых кодов для перспективных сетей передачи данных», грант Президента Российской Федерации МД-639.2014.9 «Разработка адаптивных методов повышения достоверности передачи и хранения данных для систем с большим уровнем шума с применением многопороговых алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов».

На защиту выносятся следующие положения:

- каскадная схема кодирования, состоящая из внешнего самоортогонального кода и безызбыточного внутреннего кода накопления, позволяющая на 4 и более десятичных порядков уменьшить вероятность ошибки декодирования по сравнению с вероятностью ошибки декодирования, обеспечиваемой внешним самоортогональным кодом;
- комбинированный имитационно-аналитический метод оценки характеристик многопороговых декодеров, обеспечивающий получение оценок вероятности ошибки декодирования порядка 10^{-11} и менее до ста раз быстрее по сравнению с применением только компьютерного моделирования;
- модель системы передачи информации по радиоканалу с многопороговым декодированием, которая использует при работе вычислительные ресурсы графического процессора, и алгоритм выбора ее параметров, позволяющие в десятки раз увеличить скорость моделирования по сравнению с моделью, использующей для вычислений только центральный процессор.

Внедрение научных результатов диссертационной работы. Результаты работы внедрены в ООО НПП «Этра-Плюс» (г.Москва) при разработке аппаратуры систем передачи данных, не связанных с действующими стандартами; в АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» при разработке каналов передачи цифровой информации радиолокационных станций с целью обеспечения высокой достоверности хранения; в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по направлениям 09.04.04 – «Программная инженерия» и 09.04.03 – «Прикладная информатика» в рамках дисциплин «Сети ЭВМ», «Вычислительные системы, сети и телекоммуникации», «Цифровая обработка сигналов», «Компьютерное моде-

лирование»; в АО «Государственный Рязанский приборный завод» при реализации программ целевой подготовки по линии Центра развития персонала.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, тестированием разработанных программ моделирования, согласованием результатов диссертационной работы в частных случаях с ранее известными данными.

Апробация работы проведена в форме научных докладов по основным результатам диссертационной работы и дискуссий, которые проходили на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Интеллектуальные и информационные системы» (г. Тула, 2015 г.); 20-я юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 2015 г.); Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-28» (г. Саратов, 2015 г.); 18-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (г. Рязань, 2015 г.), Международная конференция по компьютерным технологиям в физических и инженерных приложениях – ICSTPEA (г. Санкт-Петербург, 2015 г.).

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертации получены автором лично.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в список ВАК РФ, 1 работа, индексируемая в базе Scopus, 4 тезисов докладов на конференциях различного уровня, 5 статей в сборниках научных трудов. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертационной работы с приложениями составляет 141 страницу. Работа содержит 56 рисунков, 9 таблиц, список используемой литературы состоит из 135 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, изложена степень разработанности темы, сформулированы цель диссертационной работы и решаемые задачи. Представлены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

В первой главе описана роль цифровых технологий в жизни современного общества. Особенно выделяется востребованность цифрового спутникового телевидения (ЦСТ). Перечислены основные стандарты цифровой передачи информации и приведены требования, выдвигаемые этими стандартами к скорости (до нескольких Гбит/с) и качеству передачи информации (вероят-

ность ошибки не более $10^{-11}..10^{-14}$) (см. таблицу 1). Отмечена важная роль использования методов помехоустойчивого кодирования в разработке оборудования для ЦСТ.

Таблица 1 – Вероятности ошибки для различных стандартов передачи информации для почти безошибочной передачи (Quasi Error Free)

Стандарт	Вероятность ошибки
DVB-S2X (ЦСТ)	$10^{-12}..10^{-14}$
DVB-S2 (ЦСТ)	$6.7 \cdot 10^{-11}$
DVB-S (ЦСТ)	$10^{-10}..10^{-11}$
DVB-C2 (кабельное телевидение)	$10^{-10}..10^{-11}$
ISDB-Tmm	$10^{-12}..10^{-14}$

Рассмотрена структурная схема системы передачи цифровой информации (СПЦИ). Описаны различные типы каналов передачи информации с пояснением природы возникновения ошибок в них. Перечислены наиболее важные характеристики помехоустойчивых кодов, к которым относятся средняя вероятность появления битовой ошибки (BER), энергетический выигрыш кодирования (ЭВК) и сложность реализации.

Описаны различные подходы к классификации помехоустойчивых кодов и выделены их основные параметры и характеристики, выполнен анализ известных алгоритмов коррекции ошибок, используемых в ЦСТ, обозначены основные проблемы их применения в современных высокоскоростных системах передачи цифровой информации. Предложено использование многопороговых декодеров (МПД) самоортогональных кодов (СОК) в таких системах, предоставляющих высокую исправляющую способность при низкой сложности реализации. Поставлены задачи, которые необходимо решить перед использованием МПД в составе высокоскоростных систем передачи цифровой информации, в том числе в системах цифрового телевидения.

Во второй главе выполнен анализ работы МПД и обозначена проблема получения оценок его эффективности с помощью моделирования. Ставится задача поиска альтернативных путей получения оценок эффективности МПД.

В частности, описан компьютерный эксперимент, в котором при использовании вычислительных ресурсов центрального процессора Intel Core i7 при загрузке всех его ядер оценка вероятности ошибки порядка 10^{-12} с погрешностью порядка 50 % будет получаться около 100 дней.

Отмечается, что известные аналитические оценки вероятности ошибки оптимального декодера (ОД) являются нижними оценками вероятности ошибки МПД, поскольку его решение при каждом изменении декодируемого символа всегда строго приближается к решению ОД. Вместе с тем данные оценки имеют приемлемую точность только для уровней шума в канале, когда МПД действительно способен работать как ОД. Типичное поведение графика зависимости вероятности ошибки для МПД можно условно разделить на три области. В первой области (при большом шуме) МПД практически не уменьшает канальную вероятность ошибки, т.е. он оказывается неэф-

фективным. Во второй области – области «падения» вероятности ошибки (так называемая область водопада – waterfall region) вероятность ошибки быстро приближается к вероятности ошибки ОД. В третьей области (области насыщения вероятности ошибки – error floor region) МПД работает почти как ОД. Отмечено, что для различных кодов и параметров декодера сильно различаются скорость уменьшения вероятности ошибки в области водопада и то, насколько МПД может приблизиться к характеристикам ОД. Оценить эти характеристики с достаточной точностью можно только при помощи компьютерного моделирования, однако при оценке отношения сигнал-шум (ОСШ), при котором МПД смогут обеспечить малые вероятности ошибки (порядка 10^{-12} и менее), использование компьютерного моделирования оказывается затруднительным (или вообще невозможным) из-за необходимости выполнения очень больших объемов эксперимента, которые могут потребовать месяцы или даже годы работы современных персональных компьютеров.

Данную проблему позволяет решить предлагаемый в работе комбинированный имитационно-аналитический метод оценки эффективности МПД. Опишем данный метод более подробно.

Эффективность работы МПД в канале с независимыми ошибками в основном определяется тем, насколько часто на вход декодера поступают блоки с большим для него числом ошибок. Другими словами, эффективность декодера зависит от распределения числа ошибок в принятых блоках. Отметим, что для канала с независимыми ошибками всегда можно подсчитать вероятность того, что в принятом из канала блоке будет заданное число ошибок. Данная вероятность определяется биномиальным распределением, определяемым формуле

$$P(X = k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}, \quad (1)$$

где n – длина кодового блока; p – вероятность ошибки в канале с независимыми ошибками; k – число ошибок в блоке.

Отметим, что для больших длин кода (тысячи, десятки тысяч битов) непосредственное использование формулы (1) оказывается практически невозможным из-за переполнения разрядной сетки ЭВМ при вычислениях. Поэтому вместо формулы (1) для интересующих нас длин блока и вероятностей ошибки можно использовать приближение Муавра – Лапласа

$$P(X = k) = \frac{e^{-\frac{x_k^2}{2}}}{\sqrt{2\pi np(1-p)}}, \quad (2)$$

$$\text{где } x_k = \frac{k - np}{\sqrt{np(1-p)}}.$$

Для примера на рис. 1 представлен график зависимости вероятности появления кодового блока с заданным числом ошибок от числа ошибок в нем для кода длиной 1000 бит и вероятностей ошибки 0.08 и 0.085. Важно, что для этих графиков области числа ошибок, в которых блоки имеют большую вероят-

ность, отличаются незначительно. Именно этот факт лежит в основе предлагаемого далее метода оценки вероятности ошибки декодирования МПД.

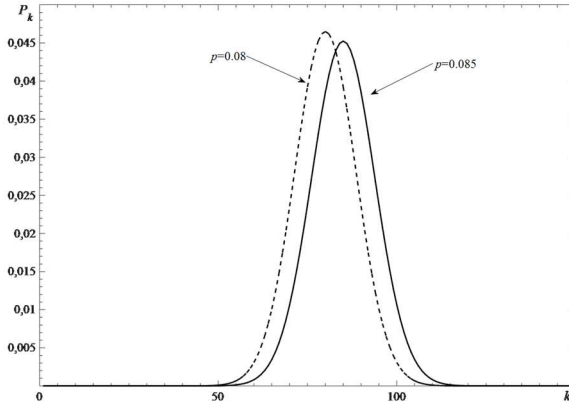


Рис. 1. Зависимость вероятности появления кодированного блока с заданным числом ошибок от числа ошибок в нем для кода длиной 1000 бит

Суть метода заключается в том, что можно выполнить компьютерное моделирование системы передачи информации с МПД для несколько меньшего ОСШ и при этом ОСШ получить оценки вероятности ошибки в принятом блоке после декодирования для каждого из полученного в процессе эксперимента числа канальных ошибок в блоке. Т.е. в результате этого эксперимента будут получены оценки $P_b^{(k)}$ для всех возможных k (если во время эксперимента не было блоков с k ошибками, то соответствующая оценка $P_b^{(k)} = 0$).

Далее для интересующего нас ОСШ (когда вероятность ошибки декодирования очень мала) с помощью выражения (2) можно вычислить вероятности появления на входе декодера блока с k ошибками P_k . После этого можно оценить вероятность ошибки МПД при этом шуме как

$$P_b = \sum_{k=0}^n P_k P_b^{(k)}. \quad (3)$$

Для примера на рис. 2 представлены зависимости вероятности ошибки декодирования МПД (кривые с пометкой simulate) и ее комбинированные оценки (кривые с пометкой estimate) в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при использовании двоичной фазовой модуляции (ФМ) от отношения сигнал-шум для кода с кодовой скоростью $R=1/2$, длиной кода $n=7210$ и кодовым расстоянием $d=11$ при использовании как жестких (кривые с пометкой hard), так и мягких (кривые с пометкой soft) решений демодулятора. При получении комбинированных оценок проводился компьютерный эксперимент, во время которого передавалось 1000, 10000 и 100000 кодовых блоков. ОСШ при наборе статистики для жестких решений демодулятора был равен 4.1 дБ, а для мягких – 3.2 дБ. Как и следовало ожидать, чем больше объем эксперимента

при получении оценок, тем они точнее. Отметим, что и для жестких, и для мягких решений демодулятора предложенный метод позволил получить хорошие оценки эффективности МПД при до 0.5 большем ОСШ, чем при получении оценок. При использовании мягких решений демодулятора точность полученных оценок меньше, но они все равно подходят для оценивания эффективности МПД при до 0.3 дБ большем уровне шума, чем при их получении.

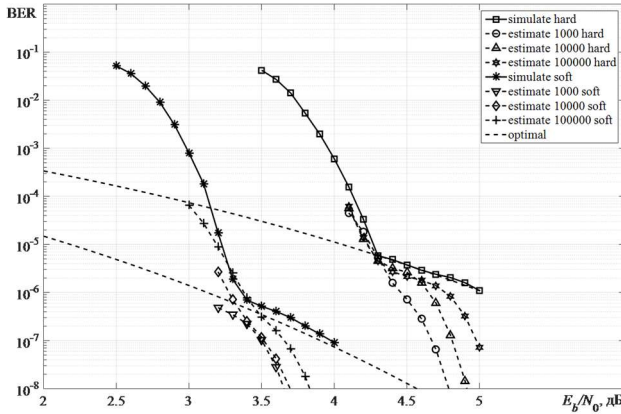


Рис. 2. Зависимости вероятности ошибки декодирования и ее оценки от ОСШ для кода с $R=1/2$ и $d=11$

На примере оценки характеристик МПД с 20 итерациями декодирования для длинного кода с $R=3/4$ и $d=17$ получены комбинированные оценки вероятности ошибки для ОСШ, при котором за приемлемое время не удастся получить оценки вероятности ошибки с помощью компьютерного моделирования (для оценки вероятности ошибки МПД на уровне 10^{-13} при использовании разработанного программного обеспечения потребовалось бы 1000 дней работы современного ПК на базе процессора Intel Core i7). Представленные результаты показывают, что при использовании предложенного имитационно-аналитического метода можно оценить данную вероятность с приемлемой точностью за сутки работы этого же ПК.

В третьей главе решается задача уменьшения вероятности ошибки декодирования для СОК в области их почти оптимального декодирования. Для решения этой задачи предлагается схема каскадирования СОК с безызбыточным внутренним кодом (рис. 3). В отличие от известных схем каскадирования СОК в качестве внутреннего применяется код накопления с кодовой скоростью 1. При этом кодированию кодом накопления подвергаются только проверочные биты СОК для того, чтобы код остался систематическим. Кроме того, между кодером СОК и кодером кода накопления установлен перемежитель для того, чтобы ошибки, возникающие в процессе декодирования каждого из составляющих кодов, для другого кода оказывались независимыми. За счет использования кода накопления удастся в несколько раз увеличить кодовое расстояние

самоортогонального кода, малое значение которого приводило к появлению области насыщения вероятности ошибки при достаточно высоких вероятностях ошибки декодирования. Для декодирования данного кода предложено использовать известные алгоритмы декодирования LDPC кодов, работающие с графом Таннера кода. При этом для СОК строится граф Таннера и к нему добавляется зигзагообразный граф Таннера кода-накопления.

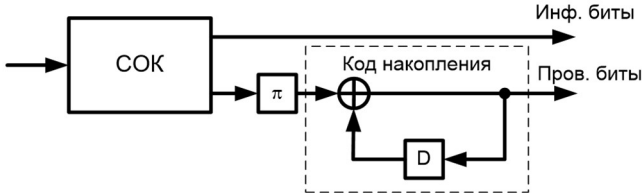


Рис. 3. Схема организации каскадирования СОК с кодом накопления

На рис. 4 представлены графики зависимости вероятности ошибки декодирования от ОСШ на бит в канале с АБГШ при использовании двоичной ФМ и демодулятора, формирующего мягкие решения. Кривой "SOC(R=5/10, d=11)" показаны характеристики min-sum декодера для СОК с кодовой скоростью 5/10, длиной 74544 бита и кодовым расстоянием 11 при использовании 20 итераций декодирования. Отметим, что субоптимальное декодирование в данном случае обеспечивается начиная с отношения сигнал-шум 2.3 дБ, при этом обеспечивается вероятность ошибки декодирования порядка 10^{-5} . Кривой "SOC(R=5/10, d=11), ACC" показаны характеристики min-sum декодера для предложенного каскадного кода, состоящего из внешнего СОК с кодовой скоростью 5/10 и кодовым расстоянием 11 и внутреннего кода накопления при использовании 20 итераций декодирования. При этом между внешним и внутренним кодами не использовался перемежитель.

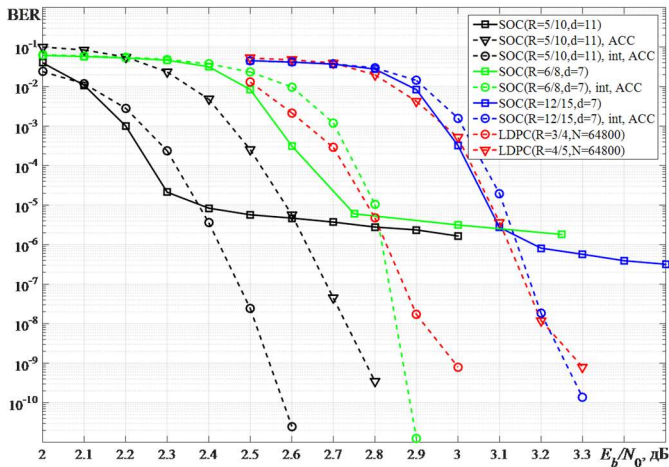


Рис. 4. Характеристики каскадной схемы кодирования

Из анализа данного графика следует, что с помощью предложенного кода удастся снизить вероятность ошибки декодирования как минимум на 4 порядка, но при этом в области вероятностей ошибки до 10^{-5} наблюдается проигрыш по энергетике порядка 0.3 дБ. При добавлении в предложенную каскадную схему между внешним и внутренним кодами псевдослучайного перемежителя получаются характеристики, представленные кривой "SOC($R=5/10$, $d=11$), int, ACC ". Улучшение по сравнению со схемой без перемежителя составило около 0.2 дБ.

Аналогичные результаты обеспечиваются и при использовании предложенной каскадной схемы с внешним СОК с большей кодовой скоростью. В частности, кривыми "SOC($R=6/8$, $d=7$)" и "SOC($R=6/8$, $d=7$), int, ACC" представлены характеристики min-sum декодера для СОК с кодовой скоростью 6/8, длиной 104768 битов и кодовым расстоянием 7 при 20 итерациях декодирования и основанной на этом СОК каскадной схеме с кодом накопления при использовании перемежителя. В данном случае за счет использования внутреннего кода накопления, который имеет кодовую скорость 1, также удастся уменьшить вероятность ошибки декодирования на 4 и более десятичных порядков. Кривыми "SOC($R=12/15$, $d=7$)" и "SOC($R=12/15$, $d=7$), int, ACC" на этом же рисунке представлены характеристики min-sum декодера для самоортогонального кода с кодовой скоростью $12/15=4/5$, длиной 36915 битов и кодовым расстоянием 7 при 20 итерациях декодирования и основанной на этом СОК каскадной схеме с кодом накопления при использовании перемежителя. В данном случае также удалось уменьшить ошибку в области субоптимального декодирования СОК на 4 десятичных порядка. Отметим, что платой за такое уменьшение вероятности ошибки является незначительное (примерно на 10 % в зависимости от параметров используемых кодов) увеличение вычислительной сложности декодера. Для сравнения на рис. 4 кривыми "LDPC($R=3/4$, $N=64800$)" и "LDPC($R=4/5$, $N=64800$)" показаны характеристики min-sum декодера LDPC кодов стандарта DVB-S2 с кодовой скоростью 3/4 и 4/5 и длиной 64800 битов. Отметим, что предложенная каскадная схема, основанная на самоортогональных кодах и коде накопления, показывает сравнимые с лучшими известными кодами вероятностно-энергетические характеристики. При этом предложенный каскадный код имеет меньшую сложность декодирования и, в отличие от LDPC, может быть реализован в сверточном варианте.

В третьей главе также предлагается методика применения МПД в системах адаптивного кодирования. Отмечается, что структура кодера СОК, имеющего по несколько информационных и проверочных ветвей, и его МПД дает возможность управлять долей вводимой избыточности путем простого подключения или отключения некоторых проверочных ветвей. Данная методика рассмотрена на примере использования блочного СОК с кодовой скоростью $R=4/12$ с кодовым расстоянием $d=17$ и длиной порядка $n=100000$ битов в системе адаптивного кодирования. Из такого кода можно построить коды с кодовыми скоростями 4/11, 4/10, 4/9, 4/8, 4/7, 4/6 и 4/5. Характеристики данных кодов в канале с АБГШ при использовании двоичной ФМ и мяг-

ких решений демодулятора представлены на рис. 5. При организации адаптивного кодирования для каждого из кодов были выделены диапазоны ОСШ на символ, в которых этот код обеспечивает требуемые характеристики и обладает минимальной избыточностью, и в результате были определены границы использования каждого из кодов. Отмечается, что МПД для всех кодов, начиная с некоторого ОСШ на символ, зависящего от кода, обеспечивает близкое к оптимальному декодирование.

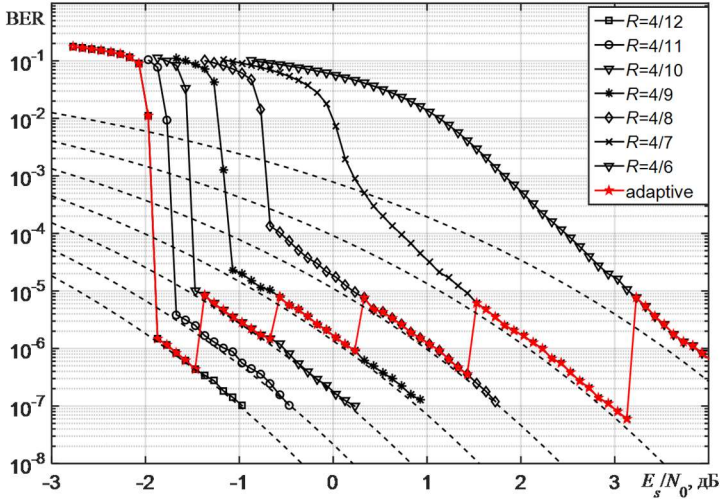


Рис. 5. Характеристики МПД для кодов с разной кодовой скоростью и характеристики адаптивного декодера

Для того, чтобы использовать схему адаптивного кодирования, нужно знать, какое ОСШ имеется в канале связи. Подобную информацию кодер от других устройств получить в некоторых случаях не может. В работе предложен алгоритм оценивания ОСШ МПД на основе анализа содержимого его синдромного регистра.

Запишем выражение, связывающее вероятность невыполнения проверки в синдроме с вероятностью появления ошибки в канале. Это выражение определяет вероятность наличия нечетного числа ошибок во всех элементах, участвующих в формировании проверки:

$$P_s = \sum_{i=0}^{\lfloor M/2 \rfloor} C_M^{2i+1} P_0^{2i+1} (1-P_0)^{M-(2i+1)}, \quad (4)$$

где M – размерность элемента синдрома, равная числу символов, участвующих в его формировании; P_0 – вероятность ошибки в гауссовском канале.

Отметим, что вероятность невыполнения проверки зависит от вероятности ошибки в канале. Следовательно, оценив P_s по принятому сообщению для каждой из ветвей синдрома, можно найти оценку вероятности ошибки в канале P_0 .

Также известно, что, например, для гауссовского канала при использовании двоичной ФМ между вероятностью ошибки P_0 и безразмерным отношением сигнал-шум SNR есть зависимость, определяемая выражением:

$$P_0 = Q(\sqrt{2SNR}), \quad (5)$$

где

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (6)$$

Тогда, зная оценку для P_0 , можно оценить SNR в канале связи. Далее можно получить символьное и битовое ОСШ в дБ.

Результаты моделирования показали, что данный метод позволяет оценивать вероятность ошибки и ОСШ с погрешностью около 1 % при длине синдрома порядка 70000 битов. Также показано, что чем меньше кодовое расстояние используемого кода, т.е. чем меньше размерность проверки, тем быстрее график оценки ошибки сходится к ее точному значению. Следовательно нужно оценивать уровень шума по синдромным ветвям с малой размерностью проверок.

В четвертой главе описывается разработанная модель системы передачи цифровой информации с МПД, использующая для ускорения работы вычислительные ресурсы графического процессора (GPU). Проводится анализ количества операций разного типа, необходимых для работы каждого из узлов СПЦИ в отдельности и всей системы в целом. При подсчете числа операций учитываются лишь элементарные арифметические операции и операции обращения к глобальной памяти.

Показано, что общее количество элементарных арифметических операций, выполняемых в процессе моделирования передачи одного информационного бита, оценивается сверху как

$$V_{total} = \frac{\sum_{j=1}^{n_r} \sum_{i=1}^{n_k} ((I+2)J_{ij} - 1)}{n_k} + 14 + \frac{50}{bps} + 9 \cdot 2^{bps} + bps + 2I, \quad (7)$$

где I – число итераций декодирования; bps – число бит на символ в передаваемом сообщении; n_k – количество информационных ветвей СОК; n_r – количество проверочных ветвей; J_{ij} – число отводов от i -й информационной к j -й проверочной ветви.

Общее число операций обращений к глобальной памяти оценивается сверху как

$$U_{total} = \frac{\sum_i \sum_j (2I+4)J_{ij}}{n_k} + \frac{4}{bps} + 2^{bps+1} + bps + 4I + 5. \quad (8)$$

Проводится анализ результатов моделирования, которые показывают, что узел декодера занимает более 93 % общих временных затрат, хотя доля элементарных арифметических операций, которая приходится на этот узел,

составляет около 60 %. Но доля операций обращения к памяти, которая требуется этому узлу значительно выше – более 85 %. Это позволяет сделать вывод о том, что именно большой объем операций обращения к глобальной памяти замедляет процесс моделирования. Следовательно, для увеличения скорости работы модели СПЦИ необходимо минимизировать количество обращений к глобальной памяти. Минимизация происходила за счет переноса некоторых массивов данных из глобальной в локальную память с учетом ограничений GPU. В результате этого число операций обращения к памяти удалось снизить до

$$U'_{total} = d(2+I) + \frac{4}{bps} + 2^{bps+1} + bps + 2I + 5. \quad (9)$$

Это позволило увеличить скорость моделирования в 2.5...3 раза. В итоге, например, при использовании графической карты GeForce GTX 1070 удалось увеличить скорость работы модели системы передачи цифровой информации по сравнению с начальной версией модели, использующей центральный процессор, до 50 раз.

В конце главы представлены результаты компьютерного эксперимента, которые показали, что с помощью разработанной модели СПЦИ с МПД удалось с погрешностью, не большей 50%, при достоверности 0.95 оценить вероятность ошибки декодирования МПД на уровне 10^{-12} за три дня работы ПК.

В заключениях подведены итоги всей диссертационной работы и перечислены основные результаты исследования.

В приложениях представлены копии актов внедрения диссертационной работы, использованные сокращения, копия свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенного исследования решена задача получения оценок эффективности многопороговых алгоритмов декодирования в цифровых системах передачи информации при низких целевых вероятностях ошибки, а также задача уменьшения вероятности ошибки декодирования в области субоптимального декодирования самоортогонального кода.

При этом получены следующие основные научные результаты:

- обоснован комбинированный имитационно-аналитический метод оценки вероятности ошибки МПД, позволяющий оценивать малые вероятности ошибки в сотни раз быстрее по сравнению с компьютерным моделированием;
- предложена каскадная схема кодирования, в которой совместно с внешним самоортогональным кодом применяется внутренний код накопления, которая позволяет уменьшить вероятность ошибки декодирования на 4 и более десятичных порядков по сравнению с вероятностью ошибки, обеспечиваемой внешним самоортогональным кодом в области его субоптимального декодирования;

- получена методика применения многопороговых декодеров в системах с адаптивным кодированием, позволяющая более эффективно использовать частотный ресурс изменяющегося во времени канала передачи информации по сравнению со случаем без использования адаптивного кодирования;
- предложен алгоритм оценивания уровня шума в канале передачи данных, основанный на анализе содержимого синдромного регистра многопорогового декодера;
- разработана и реализована в программных средствах модель системы передачи цифровых данных с МПД, использующая вычислительные ресурсы графического процессора (на примере GPU *GeForce GTX 1070*), а также предложены алгоритмы выбора параметров этой модели, позволяющие в десятки раз увеличить скорость моделирования по сравнению с моделью, использующей ресурсы центрального процессора (на примере CPU *Intel Core i7*);
- получены оценки вычислительной сложности модели системы передачи цифровой информации с МПД для варианта использования GPU и проведена модификация модели, которая позволила на 40 % снизить количество обращений к памяти и повысить скорость моделирования в 2.5..3 раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах

1. Демидов Д.С., Овечкин Г.В. Разработка модели системы передачи данных с многопороговым декодером самоортогональных кодов с применением технологии OPENCL // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 7-1. – С. 208-221.
2. Демидов Д.С. Разработка программных средств моделирования систем передачи данных с использованием помехоустойчивого кодирования // Известия ТулГУ. Технические науки - 2014. – № 9-2. – С. 28-35.
3. Демидов Д.С., Овечкин Г.В. Моделирование системы передачи данных с многопороговым декодером с использованием OpenCL // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-2. – С. 243-247.
4. Демидов Д.С., Овечкин Г.В. Комбинированный имитационно-аналитический метод оценки вероятности ошибки в системе передачи цифровых данных с многопороговым декодером // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 1. – С. 3-10.

Публикация, индексируемая в базе Scopus

5. Demidov D., Ovechkin G. Computer model for research of decoders for error-correction codes // Proc. of International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications. 2014. – P. 31-32.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

6. Демидов Д.С., Овечкин Г.В. Программа для моделирования работы системы цифровой передачи данных с многопороговым декодером с использованием ресурсов графического процессора. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201661528 от 19.05.2016.

Статьи в сборниках трудов и материалах конференций

7. Демидов Д.С. Обзор подходов к ускорению компьютерной модели системы передачи данных с помехоустойчивым декодированием // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвузовский сборник научных трудов / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань (РГРТУ), 2014. – С. 94- 96.
8. Демидов Д.С. Использование технологии OpenCL для ускорения модели декодера кода Хэмминга // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. – М.:Горячая линия – Телеком, 2015 – С. 60-63.
9. Демидов Д.С. Детали реализации модели многопорогового декодера с помощью OpenCL // Информационные технологии: межвузовский сборник научных трудов. – Рязань, 2016. – С. 35-40.
10. Демидов Д.С. Метод оценки вероятности ошибки многопорогового декодера для систем цифрового телевидения // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвузовский сборник научных трудов / под ред. А.Н. Пылькина. – М: Горячая линия-Телеком. – 2016. – С. 96-103.
11. Демидов Д.С. Моделирование работы системы передачи данных с использованием технологии OpenCL // Интеллектуальные и информационные системы: труды Всероссийской научно-технической конференции. – Тула, ТулГУ, 2015. – С. 84-87.
12. Демидов Д.С. Моделирование работы помехоустойчивых кодов при помощи техники GPGPU // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы 20-й юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ. – С. 287-288.
13. Демидов Д.С. Моделирование работы многопороговых декодеров с использованием технологии OpenCL // Материалы 18-й Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». – Рязань: РГРТУ, 2015. – С. 49-52.
14. Демидов Д.С. Повышение производительности моделирования системы передачи данных при помощи вычислительных ресурсов GPU // Материалы Международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-28". – Саратов, СГТУ, 2015. – С. 118-122.
15. Демидов Д.С. Применение многопороговых декодеров в системах адаптивного кодирования // Вестник науки и образования, Проблемы науки, 2016. – № 10 (22). [Электронный ресурс].

ДЕМИДОВ Дмитрий Сергеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ
В ВЫСОКОДОСТОВЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ
ИНФОРМАЦИИ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2016. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.