

На правах рукописи



Паршин Александр Юрьевич

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ
ФРАКТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ МЕТОДОМ
МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ**

Специальности:

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кошелев Виталий Иванович

Официальные оппоненты: Петров Евгений Петрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Вятский государственный
университет», заведующий кафедрой
радиоэлектронных средств, г. Киров

Потапов Александр Алексеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова
Российской Академии наук, главный
научный сотрудник, г. Москва

Ведущая организация: АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»,
г. Москва

Защита диссертации состоится 22 апреля 2016 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 390005, г.Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ауд. 235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте www.rsgeu.ru.

Автореферат разослан 26 февраля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обнаружение и идентификация сигналов, отраженных от объектов в результате зондирования поверхности, а также измерение координат неподвижных и подвижных наземных объектов на фоне подстилающей поверхности являются одними из актуальных и трудных задач современной радиотехники. При создании радиотехнических систем зондирования и обнаружения, к которым предъявляются повышенные требования по точности определения координат, производительности, а также более широкому кругу решаемых задач, возникает необходимость применения новых методов и алгоритмов обработки принимаемых сигналов для обеспечения максимальной автоматизации процесса обработки. Несмотря на то, что задача автоматического обнаружения квазидетерминированных, стохастических, в том числе пространственно-временных сигналов на фоне помех, хорошо исследована в теоретическом и методическом плане, ее практическое решение является весьма трудным. При статистическом описании сигналов протяженных целей и помех окружающего фона возникает существенная зависимость эффективности работы алгоритмов обнаружения от априорных данных и условий работы системы. При синтезе алгоритмов обработки сигналов в условиях априорной неопределенности используются параметрические методы, а также варианты математико-эвристического синтеза. Однако они не всегда позволяют решать задачу обнаружения малоконтрастных целей с достаточно высокой эффективностью.

Одним из наиболее востребованных направлений является цифровая обработка сигналов и изображений, которая в настоящее время приобретает все большее распространение. Это связано в первую очередь с постепенной заменой визуального наблюдения оператора различными способами автоматизированного машинного зрения. Такой подход позволяет исключить человеческий фактор в решении задач, требующих немедленного реагирования или возникающих в сложных условиях работы. Вместе с тем существующие автоматические алгоритмы не обеспечивают надежного различения объектов на фоне подстилающей поверхности в различных ситуациях, что не позволяет полностью заменить визуальное наблюдение автоматизированным. Поэтому возникает необходимость в разработке и реализации усовершенствованных методов обнаружения и классификации объектов на радиолокационном изображении.

Обработка цифровых изображений, в том числе полученных РЛС с синтезированной апертурой, включает в себя выделение каждого объекта на фоне подстилающей поверхности, а также отделение различных объектов друг от друга. Малый уровень принимаемого сигнала, многообразие естественных и искусственных помех и несовершенство алгоритмов и устройств машинного зрения затрудняют получение качества изображения, достаточного для решения задачи обнаружения объектов. Большинство известных на данный момент методов выделения границ объектов основаны на использовании радио-

яркостных характеристик изображения. Наиболее распространены методы выделения границ на основе радиояркостного контраста, полученные на основе методов Лапласа, Уоллеса и Кирша, а также алгоритм Кэнни. Однако в случае наблюдения малоконтрастных объектов на фоне подстилающей поверхности или одного объекта на фоне других объектов использование яркостных свойств затрудняет или делает совсем невозможным решение задачи обнаружения. Применение в этом случае яркостных методов выделения границ приводит к большому количеству ложных срабатываний или наоборот, пропуску объекта. Для устранения указанных недостатков часто используются дополнительные методы установки порогов.

Одним из новых направлений, особенно активно развивающихся последние десятилетия, как у нас в стране, так и за рубежом, является разработка методов обнаружения и распознавания объектов на фоне земной и морской поверхности на основе фрактальных характеристик объектов. Данный подход основан на принципе самоподобия и дробной меры природных процессов и объектов, а также связанных с ними сигналов. При этом исследуемые явления рассматриваются не как простая совокупность отдельных элементов с определенными характеристиками, а как некоторая структура, обладающая внутренними топологическими связями между элементами и характеризующая сложный объект в целом. Оценка сложности структуры основывается на фрактальной размерности, которая является основным количественным показателем фрактальных структур. Особенностью фрактальной размерности является дробный характер, что отличает ее от целой топологической размерности.

Степень разработанности темы. В области исследования и обработки фрактальных сигналов и изображений, а также выделения границ объектов известны работы многих исследователей как в России, так и за рубежом. Применение текстурных и фрактальных мер, а также эффектов скейлинга в радиолокации, радиофизике, радиотехнике и обработке многомерных сигналов было впервые предложено в ИРЭ АН СССР Потаповым А.А. еще в 1980 году и сейчас успешно развивается в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках фундаментального научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем». Профессором Потаповым А.А. предложен новый метод современной радиолокации – фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация. Кроме того, широко известны работы таких ученых как Кроновер Р.М., Шустер Г., Герман В.А., Русскин А.Б., Пашенко Р.Э., Лучиана де Лука, Паркер Т.С., Чжуа Л.О., Патриция Тоси, Привезенцев Д.Г., Даниель Риччио. В области обработки изображений широко известны исследователи Прэтт У., Гонсалес Р., Потапов А.А., Харалик Р.М., Собель И., Кэнни Д., Петров Е.П., Горячкин О.В., Еремеев В.В. Кроме того, исследованиям в области обработки радиолокационной информации и оценивания скорости движения объектов

посвящены труды таких известных ученых, как Бакут П.А., Сосулин Ю.Г., Бакулев П.А., Верба В.С., Волосюк В.К., Горяинов В.Т., Левин Б.Р., Гуськов, Ю.Н., Сколник М.

Однако, вопросы обработки фрактальных сигналов методами оптимальных статистических решений проработаны недостаточно. Обнаружение фрактальных объектов на фоне подстилающей поверхности, а также влияние скорости протяженных объектов на величину фрактальной меры не нашли должного отражения в рассмотренных работах. Кроме того, использование методов оптимальных статистических решений при текстурной обработке изображений по фрактальным текстурным признакам исследовано недостаточно.

Целью диссертации является разработка эффективных алгоритмов обнаружения неподвижных и движущихся объектов по радиолокационным данным, эффективных алгоритмов выделения границ на радиолокационных изображениях на основе фрактальных свойств отраженных сигналов, а также анализ эффективности полученных алгоритмов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- анализ существующих методов и алгоритмов обработки изображений и выделения границ объектов, выявить наиболее пригодные для достижения поставленной цели;
- разработка алгоритмов оценивания фрактальных размерностей сигналов и изображений, анализ погрешности оценивания с учетом смещения получаемых оценок,
- разработка моделей сигналов, отраженных от фрактальных объектов,
- разработка алгоритмов обнаружения и выделения границ фрактальных объектов на радиолокационных изображениях,
- исследование алгоритмов обработки изображений движущихся протяженных объектов, влияния скорости протяженных объектов на величину фрактальной меры.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- модифицирован алгоритм оценивания корреляционной размерности Л. Луки методом максимального правдоподобия с учетом смещения оценки, получено выражение для границы Рао-Крамера, исследовано влияние усечения выборки отсчетов на качество оценивания,
- получены оптимальный и адаптивный алгоритмы выделения границы, позволяющие выделять границы малококонтрастных объектов на фоне подстилающей поверхности,
- предложен подход и разработан алгоритм оценивания скорости движения фрактальных протяженных объектов на радиолокационных изображениях,

– проанализирована система текстурных признаков на основе фрактальных мер объектов, в том числе содержащая признак на основе максимально правдоподобной оценки корреляционной размерности, проведена классификация объектов при использовании текстурной обработки.

Пункты 1, 2 соответствуют специальности 05.12.04, пункты 3, 4 соответствуют специальности 05.12.14.

На защиту выносятся следующие научные положения:

– алгоритм оценивания фрактальной корреляционной размерности, полученный методом максимального правдоподобия, позволяющий уменьшить погрешность ее оценивания путем учета смещения получаемых оценок в 5 раз;

– алгоритм обнаружения сигналов и объектов, основанный на комплексировании максимально правдоподобного фрактального и энергетического признаков при оптимальном выборе порогов в каждом обнаружителе и на выходе комплексированного обнаружителя, позволяющий уменьшить вероятность ошибок обнаружения до 10...12 раз по сравнению с алгоритмом без комплексирования;

– алгоритм выделения границ и различения малококонтрастных объектов на радиолокационном изображении методом статистической обработки с применением фрактальной размерности в качестве текстурного признака, позволяющий выполнить классификацию объектов с вероятностью ошибки классификации меньшей, чем 0,1;

– алгоритм оценивания скорости движения объекта по изменению величины фрактальной размерности, позволяющий произвести селекцию движущихся объектов на радиолокационном изображении.

Пункты 1, 2 соответствуют специальности 05.12.04, пункты 3, 4 соответствуют специальности 05.12.14.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов диссертационной работы в комплексе программно-технических средств тематической обработки информации тактико-технических характеристик разработанном по теме ОКР «Обзор-Р» по работам филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр». Результаты исследований частично отражены в учебном пособии «Текстурный анализ сигналов и изображений РЛС с синтезированной апертурой», изданном в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и использованном в учебном процессе подготовки магистров.

Методы исследования. При проведении исследований использованы методы теории статистических решений, методы статистической радиотехники, методы теории математических пространств с дробной размерностью, методы фрактального анализа, методы статистического моделирования, методы обработки изображений, методы текстурной обработки.

Достоверность результатов и выводов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, согласованностью результатов расчетов, моделирования и экспериментальных исследований. Результаты обработки радиолокационных изображений, полученных с помощью спутниковых РСА, также показывают возможность эффективного применения результатов диссертационной работы.

Реализация и внедрение. Результаты научных исследований, полученные при работе над диссертацией, внедрены при разработке комплекса создания стандартных продуктов при выполнении СЧ ОКР «Разработка комплекса программно-технических средств для отработки методов тематической обработки информации и подтверждения основных ТТХ в ходе ЛКИ» (206КС-372-1131-2012 ТЗ) для обработки КК «Обзор-Р» в АО РКЦ «Прогресс». Кроме того, разработанные алгоритмы использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»: «Разработка теории и средств обработки сигналов в радиотехнических, телекоммуникационных и биомедицинских сигналах с комплексированием информационных каналов», № 2014/178 базовая часть государственного задания; грант РНФ № 14-19-01263 «Исследование путей создания высокопроизводительной системы передачи информации от беспилотных аппаратов»; «Разработка базовых информационных технологий создания перспективных космических, радиолокационных и информационных систем на основе методов нелинейной пространственно-временной обработки многомерных сигналов и полей», № 8.1697.2014/К проектная часть государственного задания. На основе методик обработки радиолокационных изображений написано и издано учебное пособие, а также разработан цикл лабораторных работ, используемых в учебном курсе подготовки студентов, обучающихся по направлениям «Радиотехника» в магистратуре.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на 33 научно-технических конференциях, в том числе 5 зарубежных и 15 международных: XV, XVI и XVII Международная НТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение», г. Москва, 2013, 2014, 2015 гг., V и VI Всероссийская НТК «Радиолокация и радиосвязь», г. Москва, 2012, 2013 гг., XIX, XX и XXI Международная НТК «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2013, 2014, 2015 гг., 23 и 24 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2013, 2014 гг., 2, 3 и 4 Международная НТК «Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)» г. Будва, Черногория, 2013, 2014, 2015 гг., International Radar Symposium (IRS), г. Дрезден, Германия, 2013 г., 2015 IEEE International Radar Conference, Arlington, USA, 2015 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), г. Омск. Материалы

докладов 8 конференций включены в базу IEEEExplore и индексируются в базе цитирования Scopus.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 печатных работ, из них пять – в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Зарегистрирован программный продукт в Фонде алгоритмов и программ, свидетельство № 2015613967. Результаты диссертации отражены в 2 отчетах по НИР, выполненных в ФГБОУ ВПО «РГРТУ».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Основной текст работы содержит 135 страниц, 81 рисунок. Список использованных источников включает 197 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, определены степень разработанности темы, цели и поставлены основные задачи исследования, необходимые для решения. Обоснована научная новизна диссертационной работы, показана ее практическая значимость и достоверность результатов, определены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о реализации, внедрении и апробации работы. Указано количество и статус публикаций по теме научных исследований, отмечено внедрение результатов исследований в научно-технические разработки и учебный процесс.

В первой главе приведен обзор методов обнаружения объектов при дистанционном зондировании поверхности, обоснован выбор радиолокационного метода обзора, обеспечивающего независимость результатов зондирования от времени суток и погоды. На основе принципа работы радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны (РСА), сформулированы основные этапы создания радиолокационного изображения (РЛИ).

Рассмотрены алгоритмы оптимального обнаружения объектов, используемые критерии оптимальности. Приведены схемы оптимальных обнаружителей сигналов, которые дополнены этапами обработки для случая фрактальности входных данных. Указаны основные принципы текстурной обработки двумерных изображений, проведена классификация текстурных признаков, а также методов выделения границ объектов.

Определено направление и основные задачи исследования, которое заключается в разработке алгоритмов текстурной обработки, выделения границ фрактальных объектов на фоне подстилающей поверхности, а также оценивания скорости движущихся протяженных фрактальных объектов с использованием методов оптимальных статистических решений.

Во второй главе описана статистическая модель фрактального сигнала, синтезированы алгоритмы оценивания фрактальной размерности и проведен их сравнительный анализ. Синтез алгоритма максимально правдоподобного

оценивания корреляционной размерности проводится в предположении, что корреляционный интеграл вычисляется для независимых случайных расстояний между векторами в псевдофазовом пространстве. При условии нормировки расстояний $x_k = l_k / l_{\max}$, закон распределения вероятностей для расстояний между векторами имеет вид степенной зависимости, а многомерная плотность распределения вероятностей является также зависит от неизвестной размерности D , а значит и функцией правдоподобия. При переходе к логарифму функции правдоподобия в работе Л. Луки получена максимально правдоподобная оценка, а также нижняя граница дисперсии ошибки, определяемая неравенством Рао-Крамера:

$$\hat{D} = -\frac{M}{\sum_{i=1}^M \ln x_i}, \quad D_{err} \geq D_{RK} = -\frac{1}{\mathbf{M}\left\{\frac{\partial^2 \ln w(\mathbf{x}, D)}{\partial D^2}\right\}} = \frac{D^2}{M}.$$

Для обеспечения минимальной ошибки оценивания корреляционной размерности предложено ввести усечение данных сверху и снизу, в целях выделения линейной части гистограммы распределения расстояний между векторами в псевдофазовом пространстве. При усечении сверху вводится параметр β , имеющий значения от 0 до 1 и определяющий относительный объем усеченных данных. Выполняется нормировка оставшихся после усечения M_1 значений данных к выбранной верхней границе. При усечении сверху не происходит изменения формы плотности распределения вероятностей расстояний между векторами, но изменяется число отсчетов наблюдений. Среднее значение количества отсчетов наблюдений равно $M_1 = M\beta^D$. Следовательно, результаты: полученные для $\beta = 1$, будут справедливы также и для $\beta < 1$ с учетом нового объема наблюдаемых данных M_1 .

При усечении снизу отбрасываются значения $x < \alpha$, где α - пороговое значение, показывающее, какая часть данных подлежит усечению. Нижняя граница дисперсии ошибки без учета смещения оценки имеет вид:

$$D_{RKT} = \frac{D_{RK}}{1 - D_{RK}k}, \quad D_{RK} = \frac{D^2}{M_1}, \quad k = \frac{M_1 \alpha^D (\ln \alpha)^2}{(1 - \alpha^D)^2}.$$

Для смещенной оценки расчет нижней границы дисперсии ошибки оценивания на основе неравенства Рао – Крамера имеет вид:

$$D_{RK} \geq -\frac{\left(\frac{M\Delta}{D}\right)^2}{\mathbf{M}\left\{\frac{\partial^2 \ln \Lambda(\mathbf{x}, D)}{\partial D^2}\right\}} = \frac{D^2}{M} \left(\frac{M\Delta}{D}\right)^2,$$

где Δ - смещение оценки корреляционной размерности.

Для сравнения результатов моделирования и расчетов дисперсии ошибки при моделировании использован следующая методика: сначала было выбрано достаточно большое число $M > M_1$, чтобы число расстояний, превышающих α , было больше M_1 . Затем из полученной совокупности выбрано M_1 значений расстояний и произведено моделирование алгоритма оценивания и расчет дисперсии ошибки.

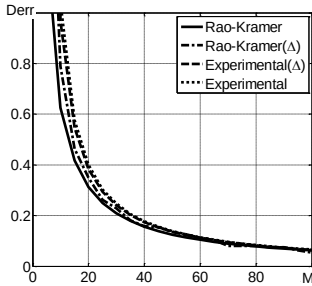


Рисунок 1 – Зависимость дисперсии ошибки оценивания от объема выборки M , $D=2,5$, $\alpha=0,2$

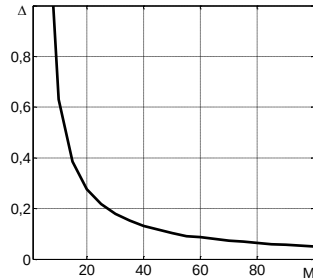


Рисунок 2 – Зависимость смещения оценки от объема выборки M , $D=2,5$, $\alpha=0,2$

На рисунке 1 представлены зависимости дисперсии ошибки оценивания от числа оставшихся после усечения расстояний M_1 при усечении данных снизу на уровне $\alpha=0,2$, полученные непосредственным моделированием без учета смещения Experimental и с учетом смещения Experimental(Δ), а также расчет границы Рао-Крамера с учетом смещения оценки Rao-Kramer(Δ), и без учета Rao-Kramer. Отмечается увеличение ошибки оценивания вследствие усечения (рисунок 1) по сравнению с анализом, проведенным без усечения, даже при одинаковом объеме расчетных данных $M=M_1$. Вместе с тем влияние смещения на величину дисперсии ошибки оценивания корреляционной размерности не превышает 0,1 при объеме выборки $M=20$ и снижается при увеличении M , как показано на рисунке 2.

В третьей главе синтезирован фрактальный обнаружитель на основе максимально правдоподобного алгоритма. Получены выражения для плотностей распределения вероятности при наличии и отсутствии полезного сигнала во входных данных. Для обнаружения сигналов и объектов достаточной статистикой является отношение правдоподобия или его логарифм:

$$z = \ln \Lambda = \ln \frac{w_1(\mathbf{x})}{w_0(\mathbf{x})} = \sum_{i=1}^M [\ln w_1(x_i) - \ln w_0(x_i)] = \sum_{i=1}^M \left[\ln \frac{D_1}{D_0} + (D_1 - D_0) \ln x_i \right].$$

При наличии априорной информации о корреляционной размерности объекта D_1 и фона D_0 , оптимальный алгоритм обнаружения получается на основе сравнения логарифма отношения правдоподобия с порогом.

В ходе исследования доказано, что максимально правдоподобная оценка корреляционной размерности также является достаточной статистикой обнаружения. Алгоритм обнаружения получается подстановкой оценки $\hat{D}$ в алгоритм максимального правдоподобия:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 1, & z = -\frac{M}{\hat{D}}(D_1 - D_0) > h \\ 0, & z = -\frac{M}{\hat{D}}(D_1 - D_0) \leq h \end{cases}.$$

Предложена схема комплексирования классического энергетического и фрактального обнаружителей на уровне решений. На рисунке 3 представлена структурная схема комплексированного обнаружителя. Обозначения: ФВ – формирователь векторов, ВР – вычислитель расстояний, ВС – вычислитель статистики, ПУ – пороговое устройство, δ_1 , δ_2 – решения фрактального и энергетического обнаружителя соответственно, a_1 , a_2 – весовые коэффициенты. Выполнен расчет характеристик обнаружения, показано преимущество предложенной структуры по сравнению с энергетическим и фрактальным обнаружителями в отдельности.

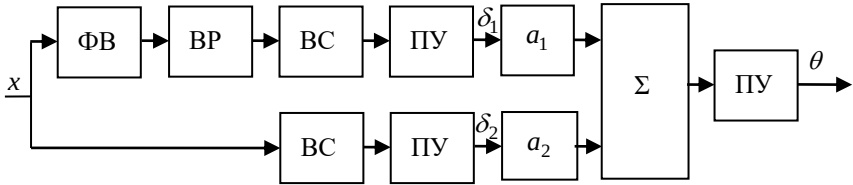


Рисунок 3 – Структурная схема комплексированного обнаружителя

Предложен алгоритм выделения границ объектов на РЛИ. Определение наличия границы производится путем вычисления отношения правдоподобия для проверяемой гипотезы – в соседних полукадрах располагаются объекты с различным значением размерности. При условии равновероятных расположений объекта и фона относительно границы отношение правдоподобия принимает вид:

$$\Lambda = \frac{\frac{1}{2} \prod_{i=1}^{M/2} D_1 r_{1i}^{D_1-1} \times \prod_{j=1}^{M/2} D_2 r_{2j}^{D_2-1} + \frac{1}{2} \prod_{i=1}^{M/2} D_2 r_{1i}^{D_2-1} \times \prod_{j=1}^{M/2} D_1 r_{2j}^{D_1-1}}{\frac{1}{2} \prod_{i=1}^M D_1 r_i^{D_1-1} + \frac{1}{2} \prod_{i=1}^M D_2 r_i^{D_2-1}}.$$

Если отношения правдоподобия превышает пороговый уровень, то область изображения, занимаемая соответствующим полукадром, считается границей объекта. В оптимальном алгоритме используются точные значения размерностей d_1, d_2 , которые полагаются априорно известными.

В условиях априорной неопределенности относительно значений размерностей применение оптимального алгоритма невозможно. Предложено использовать адаптивный байесов подход, который позволяет заменить значения размерности их оценками $\hat{d}_1, \hat{d}_2$. Выполнена оценка эффективности оптимального и адаптивного алгоритмов выделения границ по критерию минимума суммы вероятности пропуска границы и вероятности ложной границы.

Предложен метод классификации объектов гистограммным способом после текстурной обработки с использованием различных оценок фрактальной размерности и показателя Херста в качестве текстурных признаков. При этом обоснован оптимальный выбор размера квадратного кадра считывания данных для текстурной обработки. При слишком большом размере стороны кадра резко снижается детализация изображения, а при слишком маленьком оказывается недостаточно данных для эффективного вычисления оценки фрактальной размерности.

Рассмотрено влияние статистической зависимости выборок расстояний между векторами в псевдофазовом пространстве, сформированных по отсчетам входных данных, на качество выделения границ объектов на основе оценивания фрактальной размерности. Разработана методика формирования независимых выборок, рассчитано максимально возможное число независимых расстояний для данного объема выборки.

Так как яркостные методы оценки качества обработки изображения не позволяют объективно произвести сравнение анализируемых алгоритмов, то предложено оценивать эффективность алгоритмов выделения границ по вероятностным характеристикам, в качестве которых приняты вероятность ложных полей границы на всем изображении $F = N_{ЛГ} / N_{НГР}$ и вероятность пропуска границы $P_{УР} = N_{ПГ} / N_{ГР}$, где $N_{ЛГ}$ – число полей на изображении, не совпадающих с отметками эталонной границы, $N_{НГР}$ – число полей эталонного изображения, не относящихся к эталонной границе, $N_{ПГ}$ – число пропущенных полей на эталонной границе, $N_{ГР}$ – общее число полей на эталонной границе. Выбирая априорную величину вероятности появления ложных полей, можно устанавливать величину порога, с которым производится сравнение статистики. Исследование статистических характеристик проводится для числа векторов $N = 18; 72; 162$. Используются две структуры кадра – 2×1 и 3×3 поля. Количество независимых расстояний равно $M = N - 1$.

В четвертой главе описана методика применения разработанных algo-

ритмов при обработке радиолокационных изображений поверхности Земли при наличии либо отсутствии на них движущихся протяженных объектов. Приведен алгоритм автофокусировки изображения. Составлена модель комплексного коэффициента рассеяния, обоснован выбор модели фрактального броуновского движения для описания модуля комплексного коэффициента отражения. При использовании стохастических моделей отраженного электромагнитного поля коэффициент отражения $\underline{F}$ представляет собой случайный процесс, обычно нестационарный в пространстве. Для описания свойств естественных поверхностей принята модель двумерного фрактального броуновского движения (ФБД).

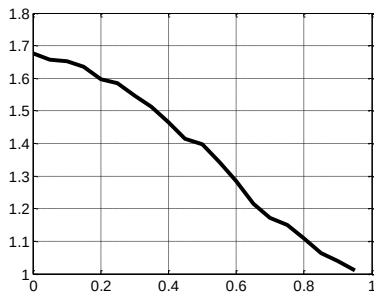


Рисунок 4 – Зависимость размерности покрытия фрактального объекта от скорости его движения

Амплитудная составляющая комплексного коэффициента отражения $X_{i,k}$ описывается двумерным ФБД, заданным в дискретном виде. Отсчеты ФБД принимают как положительные, так и отрицательные значения, в то время как $X_{i,k}$ является модулем комплексного числа, следовательно, должен иметь строго положительные значения. Это несоответствие устраняется при использовании случайных аргументов $\varphi_{i,k}$ коэффициента рассеяния, независимых и равномерно распределенных на интервале $[0, 2\pi]$. Показана возможность использования модели ФБД для описания синфазной и квадратурной составляющей сигнала, отраженного от облучаемой поверхности.

При отсутствии учета скорости движения объекта в опорной функции, используемой при фокусировке изображения, возможно оценивание скорости по изменению величины фрактальной размерности объекта на РЛИ. На рисунке 4 показана зависимость величины фрактальной размерности от относительной скорости движения объекта по поверхности Земли по сравнению со скоростью перемещения носителя РСА.

При наличии на изображении нескольких движущихся объектов возможно использование многоканальной структуры обнаружителя. Таким образом

обеспечивается обнаружение и различение объектов, движущихся с разными скоростями относительно подстилающей поверхности.

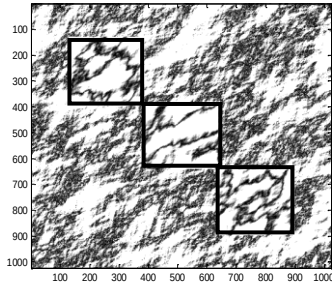


Рисунок 5 – Исходное изображение поверхности

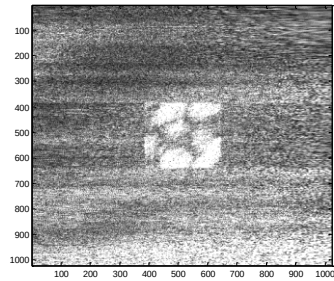


Рисунок 6 – Сфокусированное изображение

На рисунке 5 приведено яркостное изображение объектов на фоне подстилающей поверхности со свойствами ФБД с различными показателями Херста. Для наглядности контуры каждого объекта выделены. В модели предполагается, что каждый объект имеет свою скорость движения относительно подстилающей поверхности. Верхний объект имеет скорость $v_1 = 0,2v_{RSA}$, средний - $v_2 = 0,4v_{RSA}$, а нижний - $v_1 = 0,7v_{RSA}$, где v_{RSA} - скорость RSA относительно поверхности Земли. На рисунке 6 приведено сфокусированное изображение движущегося объекта. Фокусировка выполнена только на один из объектов, который перемещается со скоростью v_2 . Фокусировка выполнена вдоль строки, а по вертикали разрешение обеспечивается за счет разрешающей способности RSA по дальности.



Рисунок 7 – Радиолокационное изображение поверхности Земли – пирамиды в Гизе



Рисунок 8 – Результат текстурной обработки с применением признака «Корреляционная размерность» после классификации

Рассмотрена текстурная обработка радиолокационных изображений поверхности Земли (рисунок 7) с применением различных текстурных признаков, в том числе фрактальных. Показана эффективность фрактальных методов обработки при классификации различных природных поверхностей, некоторых форм рельефа и областей плотной городской застройки в условиях их малой контрастности. Текстурная обработка выполняется как для растровых РЛИ поверхности Земли, так и для исходных комплексных данных, полученных с РСА. Выполнена классификация объектов с различными значениями признаков гистограммным методом с использованием критерия Отсу для установки порога бинаризации изображения (рисунок 8).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания №8.1697.2014/К (главы 1-3), а также в рамках соглашения о получении гранта №14.574.21.0012 (RFMEFI57414X0012) (глава 4).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В представленной диссертационной работе проведены разработка и исследование алгоритмов обработки сигналов и радиолокационных изображений, полученных при помощи радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны, на основе фрактальных свойств объектов. В том числе:

1. Проведена модификация выражений для дисперсии оценивания корреляционной размерности методом максимального правдоподобия, которая позволила получить эффективную и несмещенную оценку. Проведено исследование с использованием статистических моделей сигналов.

2. На основе оценки корреляционной размерности максимального правдоподобия синтезирован обнаружитель фрактальных сигналов, получены характеристики обнаружения при гауссовской и негауссовской аппроксимации статистики обнаружения.

3. Исследована дисперсия максимально правдоподобной оценки, показана ее близость к нижней границе дисперсии ошибки Рао-Крамера.

4. Проведено исследование алгоритмов оценки корреляционной размерности с использованием усечения диапазона масштабов сверху и снизу, записаны выражения для нижней границы дисперсии ошибки Рао-Крамера.

5. Исследовано влияние зависимости сформированных расстояний в псевдофазовом пространстве на качество оценивания корреляционной размерности. Показана целесообразность выбора независимых расстояний для повышения качества оценивания.

6. Разработан адаптивный алгоритм выделения границ фрактальных объектов в условиях априорно неизвестных величин фрактальных размерностей. При наличии на изображениях объектов, проявляющих свойства схожие со свойствами фрактальной броуновской поверхности, доказано более эффек-

тивное выделение границы малококонтрастных объектов по сравнению с яркостными методами как при наличии априорной информации о величине размерности, так и при ее отсутствии.

7. Установлено преимущество использования максимально правдоподобных оценок фрактальных мер объектов в качестве текстурных признаков при обработке радиолокационных изображений в условиях малой контрастности объектов на фоне подстилающей поверхности. Разработан алгоритм классификации объектов по величине максимально правдоподобной оценки фрактальной меры при условии наличия самоподобных свойств объектов.

8. Синтезирован алгоритм оценивания скорости движения фрактального протяженного объекта по радиолокационному изображению на основе изменения величины фрактальной размерности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК РФ

1. Паршин, А.Ю. Использование максимально правдоподобных оценок фрактальной размерности в негауссовских статистиках для обнаружения радиосигналов / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – №1. – С. 42-46.

2. Паршин, А.Ю. Максимально правдоподобное оценивание корреляционной размерности с учетом влияния смещения оценки и усечения диапазона масштабов / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – №4-1(46). – С. 18-26.

3. Паршин, А.Ю. Оптимальное обнаружение сигналов и объектов на основе фрактальных броуновских моделей / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – №6. – С. 53-60.

4. Паршин, А.Ю. Выделение границ фрактального объекта методом максимального правдоподобия по независимой и зависимой выборкам / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – №4-2(50). – С. 3-9.

5. Кошелев, В.И. Обнаружение движущегося протяженного объекта на основе модели фрактального броуновского движения / В.И. Кошелев, А.Ю. Паршин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – №3(53) – С. 11-16.

Статьи в сборниках научных трудов

6. Паршин, А.Ю. Оптимальное распределение вероятности ложной тревоги по каналам обнаружения комплексированного энергетико-фрактального обнаружителя / А.Ю. Паршин // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. – Рязань: РГРТУ, 2013. – 134 с. – С. 28-32.

Работы, опубликованные в сборниках трудов научно-технических конференций

7. Паршин, А.Ю. Анализ характеристик обнаружения комплексированного энергетико-фрактального обнаружителя / А.Ю. Паршин // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 19 ноября – 23 ноября 2012 г., Москва. Доклады. – М: УРАН ИРЭ им. В.А. Котельникова, 2012. – Том 2. – С. 54-58.

8. Паршин, А.Ю. Статистический синтез и сравнительный анализ оценок корреляционной размерности / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин // Труды НТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – М.:НТОРЭС, 2012. – С. 214-217.

9. Parshin, A.Yu. Synthesis and analysis of efficiency of algorithm for objects edges detection by maximum likelihood method / A.Yu. Parshin, Yu.N. Parshin // 2013 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, June 15th-21st 2013. – 282 p. – P. 223-226.

10. Parshin, A.Yu. Usage of non-Gaussian statistics for RF signals detection by complex energy and fractal detector / A.Yu. Parshin, Yu.N. Parshin // International radar symposium – IRS 2013, Proceeding, volume I, II, Drezden, Germany. – German institute of navigation, 2013. – 1090 p. – P. 779-784.

11. Parshin, A. Negotiation of a priori uncertainty of image fractal properties by histogram / A. Parshin // Modern problems of radio engineering, telecommunication and computer science. Proceedings of the International Conference TCSET'2014, Lviv-Slavske, Ukraine February 25 – March 1, 2014. – 830 p. – P. 637-639.

12. Паршин, А.Ю. Применение максимально правдоподобных оценок корреляционной размерности при выделении границ объектов на радиолокационном изображении / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). Севастополь, 8-13 сентября 2013 г.: Материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. –1339 с. – С. 1165-1166.

13. Parshin, A. Optimal detection of 2D fractal object based on model of fractal Brownian surface /A. Parshin, Yu. Parshin // 2014 3nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, June 15th-21th 2014. – 282 p. – P. 128- 130.

14. Паршин Ю.Н., Паршин А.Ю. Оптимальное обнаружение фрактального сигнала на основе модели фрактального броуновского движения // XX международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь: Т.1 – Воронеж: ВГУ, 2014 – С. 270-275.

15. Паршин, А.Ю. Оценивание показателя Херста движущегося фрактального объекта методом максимального правдоподобия / А.Ю. Паршин // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникацион-

ные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014 г.: материалы конф. в 2 т. — Севастополь: Вебер, 2014. — 1246 с. — С.1127-1128.

16. Паршин, А.Ю. Оценивание размерности движущегося фрактального объекта / А.Ю. Паршин // XXI международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь: Т.2 – Воронеж: ВГУ, 2015. – С. 652-657.

17. Кошелев, В.И. Методы оценивания скорости движущегося фрактального объекта на радиолокационном изображении / В.И. Кошелев, А.Ю. Паршин // Тезисы докладов Третьей Всероссийской научно-практической конференции акционерного общества «Муромский завод радиоизмерительных приборов» «Радиолокационная техника: устройства, станции, системы РЛС – 2015». – Муром, 2015. – С. 66-67.

18. Parshin, A. Yu. Analysis of Edge Detection and Textural Processing Using Independent and Dependent Data. / A.Yu. Parshin, Yu.N. Parshin // 2015 IEEE International Radar Conference 10-15 May, 2015, Arlington VA, USA, Proceedings. – P. 1371-1375.

19. Parshin, A. Detection of moving extended object based on fractional Brownian motion model [Электронный ресурс] / A. Parshin, Yu. Parshin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

20. Parshin, A. Optimal detection of fractal signals and objects based on fractional Brownian models / A. Parshin, Yu. Parshin // 2014 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, June 14th-18th 2014, 282 p. – P. 128-130.

Объекты интеллектуальной собственности

21. Свидетельство №2015613967 Российская Федерация Программа для текстовой обработки изображений по фрактальным признакам: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Рязанский государственный радиотехнический университет. – №20146 63376; заявл. 22.12.2014; зарегистр. 31.03.2015. – 1 с.

Отчеты о научно-исследовательских работах

22. Разработка базовых информационных технологий создания перспективных космических, радиолокационных и информационных систем на основе методов нелинейной пространственно-временной обработки многомерных сигналов и полей: отчет о НИР / Науч. рук. Гусев С.И. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014.

23. Исследование путей создания высокопроизводительной системы передачи информации от беспилотных аппаратов: отчет о НИР / Науч. рук. Паршин Ю.Н. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014.

Паршин Александр Юрьевич

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ
ФРАКТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ МЕТОДОМ
МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать .10.15. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ
ООО «Информационные технологии».