

На правах рукописи



**ТРЕНИХИН Владимир Александрович**

**МЕТОДЫ ФРАКТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В  
СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в Департаменте радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Научный руководитель** – кандидат технических наук, доцент  
**Коберниченко Виктор Григорьевич**

**Официальные оппоненты:** **Горячкин Олег Валериевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи;

**Дементьев Виталий Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», докторант кафедры «Телекоммуникации»

**Ведущая организация** – ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

Защита состоится 20 июня 2017 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.285.11 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=268812>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зраенко Сергей Михайлович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Системы космического наблюдения на базе радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) позволяют решать широкий класс задач общего и специального назначения: мониторинг прибрежных зон, слабозаселенных территорий и водных путей, контроль рыболовства, экологический мониторинг, обеспечение контроля и планирования землепользования, охрана государственной границы, наблюдение за оперативной обстановкой в зонах локальных конфликтов. Создание в последнее десятилетие новых радиолокационных космических систем высокого пространственного разрешения (порядка 1 м и выше) с возможностью интерферометрической и полной поляризационной обработки сигналов, таких как Lacrosse (США), SARLupe и TerraSAR (Германия), COSMOSkyMed (Италия), YaoGan-13, 18, 23, 29 (Китай), Кондор (Россия), ALOS-2 (Япония), Sentinel-1 (Франция) открыло новые возможности для радиолокационного космического мониторинга. Так запланированная Канадой к созданию в 2016-2017 гг. система радиолокационного космического наблюдения двойного назначения RADARSAT Constellation Mission (RCM), которая кроме трех спутников будет включать комплекс автоматизированного дешифрирования снимков, должна обнаруживать и идентифицировать морские суда по всему Мировому океану практически в реальном масштабе времени.

При автоматизированной обработке космических изображений все шире применяются интеллектуальные системы распознавания (с использованием нейронных сетей, генетических алгоритмов, алгоритмов коллективного разума и так далее). Однако до настоящего времени технологии получения высокодетальных радиолокационных изображений (РЛИ) существенно опережают технологии дешифрирования (обработки РЛИ с целью получения необходимой информации). По-прежнему велика роль человека-оператора, контролирующего результаты этапов автоматической обработки. Это обусловлено, прежде всего, тем, что решаемые задачи характеризуются значительным уровнем априорной неопределенности, большим разнообразием объектов радиолокационного наблюдения. Перечисленные особенности приводят к разработке эвристических алгоритмов для автоматизации частных задач дешифрирования.

В первую очередь это относится к задаче обнаружения и определения границ слабо отражающих объектов, а также объектов, отражательные свойства которых близки друг к другу (малоконтрастных протяженных целей). При автоматизированной обработке космических РЛИ для ее решения в настоящее время чаще всего используются статистические, спектральные и контурно-текстурные методы. Широко распространены методы выделения границ на основе радиояркостного контраста, полученные на основе методов Лапласа, Уоллеса и Кирша, а также алгоритм Кэнни. Однако эти методы оказываются малоэффективными при решении задач выделения границ слабоконтрастных областей.

Исследования последнего десятилетия показали перспективность использования для решения задач выявления неоднородностей, малоконтрастных

объектов на наблюдаемой поверхности теории фракталов. В рамках этого подхода изображения рассматриваются не как совокупность отдельных элементов с определенными характеристиками, а как некоторая структура, обладающая внутренними топологическими связями между элементами и характеризующая сложный и протяженный объект в целом. Многочисленные исследования и эксперименты по анализу изображений природных поверхностей в различных диапазонах пространственных масштабов показали, что в большинстве случаев они обладают фрактальными свойствами. В частности, фрактальная размерность  $D$  (размерность Хаусторфа-Безиковича), которая количественно оценивает сложность и хаотический характер природных текстур, может быть использована в качестве эффективного признака сегментации РЛИ.

В современных системах дистанционного зондирования Земли получение данных об объектах наблюдения осуществляется как с помощью радиолокационных, так и оптико-электронных средств. Поэтому одним из направлений повышения эффективности обнаружения малоcontrastных целей по радиолокационным данным может стать их совместное использование с данными других съемочных систем. Получившая развитие в последние десятилетия, идея комплексной обработки предполагает объединение (комплексирование) данных различных систем в одно изображение с максимальным для исходных снимков пространственным разрешением и содержащим дополнительные дешифровочные признаки, позволяющие повысить эффективность интерпретации исследуемых объектов.

**Степень разработанности темы.** Применение текстурных и фрактальных мер в радиолокации, радиофизике и обработке многомерных сигналов впервые было предложено в России А.А. Потаповым еще в 1980 г. и в настоящее время успешно развивается под его руководством в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН в рамках фундаментального научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем». В области исследований и обработки фрактальных сигналов и изображений широко известны работы таких ученых, как В.В. Mandelbrot, R.M. Crownover, Т. Pei, А. Pentland, В.К. Иванов, И.М. Дремин, В.А. Нечитайло, Р.Э. Пащенко, Т.Н. Чимитдоржиев, А.М. Стадник, С.Е. Яцевич, В.А. Герман, А.Б. Русскин, А.Ю. Паршин. В области комплексной обработки спектрально-зональных изображений основные результаты были получены в работах следующих авторов: Y. Zhang, Н.А. Арманд, Т.Н. Чимитдоржиев, В.В. Ефременко, А.И. Захаров, А.А. Семенов, А.В. Мошков, Е. Sarogu, F. Bektas, Н. Varma, О. Gungor, J. Shan, Т. Bretschneider, О. Kao, I. De, В. Chanda.

Однако ряд вопросов фрактальной обработки космических радиолокационных изображений проработан недостаточно. Экспериментальные результаты по сегментации РЛИ высокого разрешения по полю фрактальной размерности с целью выделения малоcontrastных природных текстур носят ограниченный характер. Не изучена возможность применения фрактальной размерности для решения задач комплексирования радиолокационных данных со спектрально-зональными изображениями при условии сохранения исходного

разрешения. Не нашли должного отражения проблемы тестирования и анализа существующих алгоритмов, а также количественных оценок их работы и эффективности. Указанные выше факторы позволяют говорить о необходимости проведения дополнительных исследований по разработке и анализу фрактальных методов и алгоритмов обработки РЛИ с целью повышения дешифровочных свойств радиолокационных изображений в системах космического наблюдения.

**Цель работы** – повышение эффективности выделения слабоконтрастных протяженных объектов за счет применения фрактальных методов обработки радиолокационных изображений и комплексирования с данными спектрально-оптико-электронных систем.

Для достижения цели в работе были сформулированы и решены следующие **основные задачи**:

- провести аналитический обзор алгоритмов расчета фрактальной размерности и эффективности применения методов фрактального анализа для проведения процедур кластеризации космических РЛИ – *решается в главе 2*;
- адаптировать методы и алгоритмы расчета фрактальной размерности к типу и структуре изображений; разработать модифицированный метод расчета фрактальной размерности – *решается в главе 3*;
- провести экспериментальный анализ данных, полученных космическими РСА, с целью определения параметров и границ фрактальных свойств РЛИ различных типов подстилающих поверхностей и объектов – *решается в главе 4*;
- исследовать применимость фрактальной размерности космических РЛИ в качестве признака для решения задач автоматизированной кластеризации и распознавания слабоконтрастных протяженных объектов – *решается в главе 4*;
- разработать метод комплексирования радиолокационных и спектрально-оптико-электронных изображений на основе использования поля фрактальной размерности – *решается в главе 5*.

**Научная новизна** положений и результатов работы состоит в следующем:

- Предложена методика оценки эффективности применения методов фрактального анализа РЛИ. Создан программный комплекс моделирования и фрактальной обработки космических радиолокационных и спектрально-оптико-электронных изображений.
- Впервые предложено использование поля фрактальных размерностей в качестве одного из компонентов при комплексировании радиолокационных и спектрально-оптико-электронных данных. Разработан метод комплексирования радиолокационных и спектрально-оптико-электронных изображений различного пространственного разрешения на основе объединения процедуры слияния (rap-sharpening) и фрактальной обработки.
- Предложена модификация локально-дисперсионного метода расчета фрактальной размерности, особенностью которой является использование набора разномасштабных изображений, полученных на основе вейвлет-преобразования исходного РЛИ.
- Выполнен экспериментальный анализ данных, полученных космическими РСА и спектрально-оптико-электронными системами, с целью определения

параметров фрактальных свойств изображений различных типов подстилающих поверхностей и искусственных протяженных объектов. Проведена сравнительная оценка эффективности кластеризации по яркостному полю (амплитудное РЛИ) и по полю фрактальной размерности.

**Теоретическая и практическая ценность.** Предложенные в работе метод комплексирования и алгоритмы фрактальной обработки позволяют повысить эффективность распознавания малозаметных слабоконтрастных целей на РЛИ в системах дистанционного зондирования Земли. Предложенный модифицированный алгоритм расчета фрактальной размерности позволяет повысить скорость обработки данных при решении оперативных задач.

В работе разработаны рекомендации по выбору параметров алгоритмов фрактальной обработки космических радиолокационных и спектрозональных изображений, обеспечивающих выделение слабоконтрастных объектов.

Разработанный программный комплекс, содержащий новые и известные алгоритмы фрактальной и комплексной обработки данных систем космического наблюдения, позволяет производить как экспериментальную обработку данных различных систем космического наблюдения, так и сравнительный анализ работы различных алгоритмов на основе моделирования тестовых изображений.

**Методы исследования.** Для решения перечисленных задач были использованы методы цифровой обработки сигналов, математической статистики, теория вероятности, теория вейвлетов, теория детерминированного хаоса.

**На защиту выносятся следующие научные положения и результаты:**

1. Построение поля фрактальной размерности космических РЛИ и последующая многопороговая обработка позволяют определять принадлежность наблюдаемых системами ДЗЗ объектов к различным классам природных текстур (водная поверхность, отмели, кильватерные следы, нефтяные пятна, суша и др.) с использованием единственного параметра – фрактальной размерности  $D$ . Применение фрактальной обработки позволяет увеличить расстояние Джеффриса – Матусита между классами объектов в 2-2.5 раза, по сравнению с кластеризацией по амплитудному РЛИ.
2. Модифицированный локально-дисперсионный метод расчета фрактальной размерности, отличающийся от известного использованием набора разномасштабных изображений, полученных на основе вейвлет-преобразования исходного снимка, обеспечивает преимущество в 20-30% перед традиционной реализацией с точки зрения вычислительной трудоемкости при проведении обработки с использованием окон малого размера (5-7 пикселей), что позволяет использовать его в задачах выделения слабоконтрастных объектов на космических РЛИ.

*Положения 1, 2 соответствуют пункту 5 паспорта специальности.*

3. Применение нового метода комплексирования радиолокационных и спектрозональных оптико-электронных изображений различного пространственного разрешения на основе объединения процедуры слияния (ramp-sharpening) и фрактальной обработки позволяет повысить эффективность выделения слабоконтрастных протяженных целей.

*Соответствует пункту 9 паспорта специальности.*

4. Разработанный программный комплекс позволяет моделировать тестовые изображения с заданными фрактальными свойствами и осуществлять фрактальную обработку РЛИ, получаемых в космических РСА, с использованием различных алгоритмов. Анализ тестовых изображений, полученных с использованием разработанного программного комплекса, показывает, что при различии значений фрактальных размерностей соседних текстур не менее, чем на 0.05, дифференциация объектов при кластеризации по полю фрактальных размерностей улучшается в 3-5 раза по сравнению с кластеризацией по амплитудным РЛИ.

*Соответствует пункту 10 паспорта специальности.*

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечены корректным использованием математического аппарата, согласованностью полученных результатов расчетов, моделирования и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 25-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015), 1-й международной научной конференции «Computer Analysis of Images: Intelligent solutions for industrial networks» (Екатеринбург, 2016), V, VII, IX международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2006 г., Казань, 2007 г, Челябинск, 2010 г.), международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ2008» (Екатеринбург, 2008 г.), второй Всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия» (Каменск-Уральский, 2007 г.).

**Внедрение результатов.** Результаты диссертационной работы используются в ОАО «Технология 2000» в производственном процессе и при проведении НИОКР. Материалы диссертационной работы использованы в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина при выполнении НИР № 3346 «Исследование и разработка алгоритмов обработки данных многоспектральных и радиолокационных систем космического дистанционного зондирования» (2011 г.), а также в учебном процессе в департаменте радиоэлектроники и связи, что подтверждают приложенные акты об использовании научных результатов в практической деятельности.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (в Роспатенте); 12 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций; 1 учебное пособие.

**Личный вклад.** Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Все алгоритмы, приведенные в работе, были разработаны и экспериментально исследованы автором самостоятельно. Научный руководитель принимал участие в постановке целей и задач исследования, их предварительном анализе, планировании экспериментов, а

также в обсуждении полученных результатов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Работа изложена на 123 страницах машинописного текста, включая 117 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 152 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены объект и предмет исследований.

**В первой главе** приведен аналитический обзор методов формирования и обработки РЛИ в системах космического наблюдения. Определены тенденции развития современных космических радиолокационных систем ДЗЗ. Проанализированы типовая структура и режимы обзора космического РСА, описана базовая процедура формирования (Рисунок 1) и цифровая модель РЛИ, на основе которых в дальнейшем проводятся исследования.

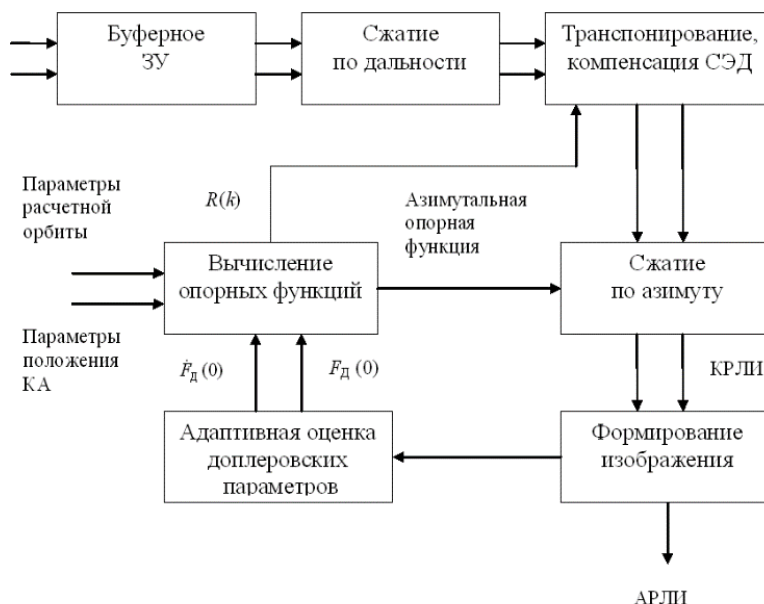


Рисунок 1 – Основные этапы цифрового формирования изображения РСА

В общем виде обработка сигналов РСА при формировании РЛИ сводится к вычислению скалярного произведения траекторного сигнала  $U_T(x, y)$  и комплексной опорной функции системы обработки  $\dot{h}(x, y)$ :

$$I(x, y) = \left| \int_{x-L_s/2}^{x+L_s/2} \int_{-\Delta R/2}^{\Delta R/2} U_T(\xi, \eta) \dot{h}(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \right|. \quad (1)$$

Обработка осуществляется совместно по двум направлениям: вдоль наклонной дальности  $r$  и вдоль путевой дальности  $x$  в пределах полосы захвата  $\Delta R$  и интервала синтезирования  $L_s$ . В качестве опорной выбирается функция, комплексно сопряженная с сигналом от одиночной точечной цели:

$$\dot{h}(x, r) = H_1[r - R(-x)] H_2(x) \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R(-x) \right\} \exp \{-j\Phi[r - R(-x)]\}, \quad (2)$$



где  $R(x)$  – оценка закона изменения наклонной дальности,  $\Phi(r)$  – закон внутриимпульсной модуляции,  $H_1(R)$ ,  $H_2(x)$  – амплитудные весовые функции по путевой и наклонной дальности соответственно. При реализации обработки в цифровой форме алгоритм формирования РЛИ принимает вид:

$$I(m,n) = \left| \sum_{l=-\frac{L_A-1}{2}}^{\frac{L_A-1}{2}} \dot{U}_T(m,l-n) \dot{h}(m,l) \right|, \quad (3)$$

где  $m, n$  – номера отсчетов по наклонной и путевой дальности соответственно,  $L_A$  – число отсчетов, используемых при синтезировании апертуры,  $\dot{h}(m,l)$  – цифровая опорная функция,  $\dot{U}_T(m,l)$  – отсчеты комплексной огибающей сжатого по дальности сигнала. Специфической особенностью радиолокационных изображений, полученных в РСА является наличие спекл-шума, который вызван интерференцией элементарных отражателей, образующих снимаемые однородные протяженные объекты. Принципиальным в образовании спекл-шума является соотношение размеров объекта и размера элемента разрешения, формируемого при когерентной обработке сигнала. Спекл-шум может использоваться для идентификации пространственно-распределенных объектов и оценивания характеристик РСА, и, в тоже время, наличие спекл-шума приводит к ухудшению дешифрируемости РЛИ, радиометрического разрешения и точности измерения компонентов радиолокационного портрета объекта.

Каждое спектрально-зональное или полнополяризационное радиолокационное изображение в фиксированный момент времени представляется матрицей с векторно-значными пикселями  $[\bar{I}(m,n)]_{m=0}^{M-1} \quad n=0}^{N-1}$  или пакетом из  $X$  скалярно-значных

матриц  $\left\{ [I_\chi(m,n)]_{m=0}^{M-1} \quad n=0}^{N-1} \right\}_{\chi=1}^X$ :

$$\bar{I}(m,n) = \begin{bmatrix} I_1(m,n) \\ I_2(m,n) \\ \vdots \\ I_X(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1(m,n)A_1[g(m,n)] + \beta_1(m,n) \\ v_2(m,n)A_2[g(m,n)] + \beta_2(m,n) \\ \vdots \\ v_X(m,n)A_X[g(m,n)] + \beta_X(m,n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $m, n$  – пространственные координаты,  $X$  – число каналов (спектральных, частотных, поляризационных),  $A_1, A_2, \dots, A_X$  – каналные формирователи цифровых изображений,  $v_1(m,n), v_2(m,n), \dots, v_X(m,n)$  и  $\beta_1(m,n), \beta_2(m,n), \dots, \beta_X(m,n)$  – мультипликативная и аддитивная помехи соответственно.

Представленный в заключительной части главы подробный обзор этапов развития методов текстурного анализа и фрактальной обработки РЛИ позволяет выделить основные результаты применения этих методов: установление факта, что большинство естественных поверхностей фрактальны (Алекс Пентланд, 1984); использование фрактальных оценок для идентификации ландшафтов и искусственных объектов (Тамар Пели, 1990); обнаружение инвариантности фрактальной размерности от яркости и источника данных (А.А. Потапов, 1997), проведение фрактальной сегментации (А.А. Потапов, 1997), установление

фрактальности спекл-шума (Wada N., Ishii K., Asakura T, 1995-1999), снижение спекл-шума при фрактальной обработке (А.А. Потапов, 1997).

Определены проблемы, связанные с применением фрактального анализа для обработки космических РЛИ, и трудности комплексирования радиолокационных и оптико-электронных спектрозональных изображений. Показано, что на сегодняшний день не существует примеров использования анализа фрактальной размерности в задачах комплексирования данных различных съемочных систем. В результате аналитического обзора литературы сформулированы и уточнены цель и задачи исследования.

**Во второй главе** рассматриваются основы фрактальной обработки: приведены сведения о фрактальных свойствах изображений Земной поверхности, представлены определения дробной размерности, описаны механизмы формирования полей фрактальной размерности и алгоритмы ее вычисления. Для анализа протяженных целей в работе вводится следующая модель РЛИ, получаемых РСА:

$$g_B(\bar{x}) \rightarrow \begin{cases} \geq 0, & \bar{x} \in A - A_s, \\ = 0, & \bar{x} \in A_s. \end{cases} \quad (5)$$

$$g_T(\bar{x}) \rightarrow \begin{cases} \geq 0, & \bar{x} \in A_s, \\ = 0, & \bar{x} \in A - A_s. \end{cases} \quad (6)$$

$$U_T(\bar{x}) = \varepsilon [g_o + g_T(\bar{x})s_T(\bar{x})] + g_B(\bar{x})n(\bar{x}), \quad (7)$$

где  $g_T(\bar{x})$  – текстурная функция цели ( $\bar{x} \in A_s$ ),  $g_B(\bar{x})$  – текстурная функция фона ( $\bar{x} \in A - A_s$ ).

В данной работе под процессом фрактальной обработки понимается последовательное выполнение следующих этапов:

1. Построение поля фрактальных размерностей многоканального РЛИ.
2. Пороговая обработка поля фрактальных размерностей.
3. Кластеризация РЛИ по полю фрактальных размерностей.

В практических задачах обработки изображений, полученных в системах ДЗЗ, расчет фрактальной размерности чаще всего производится на основе метода кубов, метода покрытий, локально-дисперсионного метода, метода призмы и ряда других. Однако даже при обработке одного изображения различными методами, результаты зачастую отличаются друг от друга. При расчете фрактальной размерности на практике следует выбирать соответствующий алгоритм из соображений вычислительной точности, скорости и системных ресурсов.

В работе предложена методика оценки эффективности фрактальной обработки при решении задач автоматической кластеризации РЛИ малоконтрастных целей, на основе моделирования обработки тестовых изображений. Предложен алгоритм моделирования эталонных поверхностей с заданными фрактальными характеристиками на основе метода фрактального броуновского движения. Разработан специальный программный комплекс, содержащий новые и известные алгоритмы фрактальной и комплексной обработки данных систем космического наблюдения, который позволяет производить как экспериментальную обработку данных различных систем космического

наблюдения, так и сравнительный анализ работы различных алгоритмов на основе моделирования тестовых изображений. Последние представляют собой набор комбинаций различных текстур, для которых пользователем задаются их форма и значение фрактальной размерности.

Степень улучшения дифференциации различных областей на изображениях природных текстур при использовании фрактальной обработки оценивалась в работе на основе вычисления матриц попарных расстояний Бхаттачарья и Джеффриса – Матусита:

$$B = \frac{(m_1 - m_2)^2}{4 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} + \ln \left( \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2 \cdot \sigma_1 \sigma_2} \right) / 2, \quad (8)$$

$$J = 2 \cdot (1 - e^{-B}), \quad (9)$$

где  $m_i$  и  $\sigma_i^2$  – математическое ожидание и дисперсия распределения интенсивности  $i$ -ой текстуры на амплитудном или фрактальном изображении. Представлены выявленные для тестовых изображений зависимости этих расстояний от разницы между значениями фрактальных размерностей различных текстур.

Таблица 1 – Значения попарных расстояний, вычисленных для двух тестовых текстур на изображении

Попарные расстояния	B		J	
	Амплитудное изображение	Поле фрактальной размерности, МП, 3x3	Амплитудное изображение	Поле фрактальной размерности, МП, 3x3
AD 0.2	0.0292273	0.1635038	0.0576087	0.3016735
0.1	0.0114995	0.0465012	0.0228672	0.0908733
0.05	0.0041639	0.0112815	0.0083104	0.0224362
0.025	0.0005420	0.0039326	0.0010837	0.0078497
0.0125	0.0005176	0.0004508	0.0010349	0.0009014

Проведенные в работе эксперименты показывают, что применение фрактальной обработки позволяет улучшить дифференциацию объектов на тестовых изображениях и повысить эффективность применения алгоритмов автоматической кластеризации.

Таким образом, на основе полученных во второй главе результатах было сделано заключение об обоснованности применения выбранного подхода формирования эталонных фрактальных поверхностей. Получена количественная оценка условий применимости методов фрактальной обработки.

**Третья глава** посвящена решению задачи адаптации методов и алгоритмов расчета фрактальной размерности к типу и структуре изображений. Предложена модификация локально-дисперсионного метода, которая предполагает использование вейвлет-преобразование для формирования разномасштабных изображений. Приводится описание математического аппарата вейвлет-преобразования, на применении которого опирается предложенная модификация. Представлено описание модифицированного алгоритма, блок-схемы и необходимые математические выкладки, иллюстрирующие принципы работы предложенной модификации.

Проведение прямого вейвлет-преобразования глубиной  $L$  позволяет

получить выражение для определения исходного изображения в следующем виде:

$$I(m,n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_i \sum_j I_{HчHч}(L,i,j) \rho_{l,i,j}(m,n) + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{l=1}^L \sum_i \sum_j I_{HчBч}(l,i,j) \psi_{l,i,j}^H(m,n) + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{l=1}^L \sum_i \sum_j I_{BчHч}(l,i,j) \psi_{l,i,j}^V(m,n) + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{l=1}^L \sum_i \sum_j I_{BчBч}(l,i,j) \psi_{l,i,j}^D(m,n), \quad (10)$$

где двумерное вейвлет-преобразование представляется в виде выполнения процедур фильтрации с прореживанием с использованием низкочастотного (Нч) и высокочастотного (Вч) фильтров. Алгоритм прямого двумерного вейвлет-преобразования определяет процесс представления изображения в виде совокупности приближений грубой  $[I_{HчHч}(l,i,j)]_{i=0}^{l-1} \quad j=0^{J-1}$  и уточненных составляющих:  $[I_{HчBч}(l,i,j)]_{i=0}^{l-1} \quad j=0^{J-1}$ ,  $[I_{BчHч}(l,i,j)]_{i=0}^{l-1} \quad j=0^{J-1}$ . При этом для единственного типа вейвлетов – вейвлетов Хаара – грубая  $[I_{HчHч}(l,i,j)]_{i=0}^{l-1} \quad j=0^{J-1}$  составляющая сигнала является уменьшенной в  $l$  раз копией исходного изображения  $[I(m,n)]_{m=0}^{M-1} \quad n=0^{N-1}$  и в 2 раза меньшей копией  $[I_{HчHч}(l-1,i,j)]_{i=0}^{l-2} \quad j=0^{J-1}$ . Из этого следует, что можно использовать  $[I(m,n)]_{m=0}^{M-1} \quad n=0^{N-1}, \dots, [I_{HчHч}(l,i,j)]_{i=0}^{l-1} \quad j=0^{J-1}, \dots, [I_{HчHч}(L,i,j)]_{i=0}^{L-1} \quad j=0^{J-1}$  в качестве набора разномасштабных изображений  $\cup \{ [I_\varepsilon(m,n)]_{m=0}^{M-1} \quad n=0^{N-1} \}_{\varepsilon=0}^E$  для получения значения фрактальной размерности (Рисунок 2). Но для этого необходимо проводить процедуру повышения частоты дискретизации в  $2^l$ -раз по строкам и столбцам для каждого из изображений  $[I_{HчHч}(l,i,j)]_{i=0}^{l-1} \quad j=0^{J-1}$  (на схеме эта процедура обозначена символами  $\uparrow 2^l \times 2^l$ ).

Подсчет вкладов всех элементов позволил оценить вычислительную сложность модифицированного локально-дисперсионного метода

$$T(M, N, E, K) = MN \left( 2C_1 E \left[ 1 - \frac{1}{4^E} \right] + EC_2 K^4 + C_3 \right), \quad (11)$$

где  $M, N$  – размеры исходного изображения  $I(m,n)$ ,  $E$  – количество масштабов измерений,  $K$  – размер окна обработки,  $C_1, C_2, C_3$  – весовые коэффициенты, определяющие вычислительную сложность выполнения соответствующих операций на ЭВМ, определяются операционной системой.

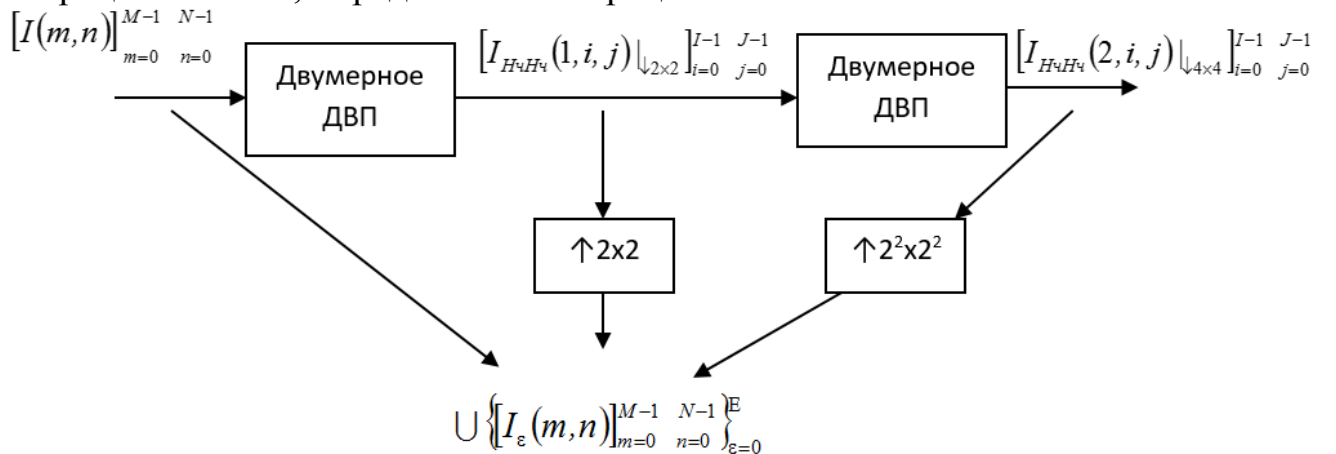


Рисунок 2 – Процедура формирования набора разномасштабных изображений

Расчеты показывают, что порядок роста традиционного и модифицированного алгоритмов совпадает и определяется размером окна обработки, таким образом, для обоих вариантов реализации локально-дисперсионного метода наибольший вклад в вычислительную сложность вносят такие параметры как размер окна обработки и размеры изображения. Однако в случае обработки изображений окнами малого размера (эксперименты показывают результат  $K \leq 9$ ) существенное влияние на вычислительную сложность начинает оказывать процесс формирования разномасштабных изображений, который в модификации локально-дисперсионного метода проходит с меньшими вычислительными затратами.

Анализ возможности использования поля фрактальной размерности для классификации различных объектов проводился в работе путем расчета поля значений фрактальной размерности  $D$  для изображений, полученных различными съемочными системами на одну территорию. Результаты свидетельствуют о том, что независимо от способа получения исходных изображений для каждого снимка удастся выявить скейлинг, обнаружить фрактальные свойства природных текстур, а вычисленные значения фрактальной размерности для одних и тех же классов природных текстур слабо отличаются на космических изображениях, полученных различными съемочными системами. Таким образом, непосредственный анализ поля фрактальных размерностей позволяет выделять особенности исследуемых поверхностей, кроме того дает возможность автоматизации обработки космических изображений при решении задач ДЗЗ.

**Четвертая глава** посвящена фрактальному анализу реальных космических РЛИ. Приводятся результаты исследования возможности применения фрактальной размерности космических РЛИ в качестве признака при проведении автоматической кластеризации и распознавании слабоконтрастных протяженных объектов. Выявлены особенности построения гистограмм распределения фрактальных размерностей, построены зависимости вычисляемых фрактальных размерностей от размера окна обработки. Представлены результаты кластеризации по полю фрактальных размерностей.

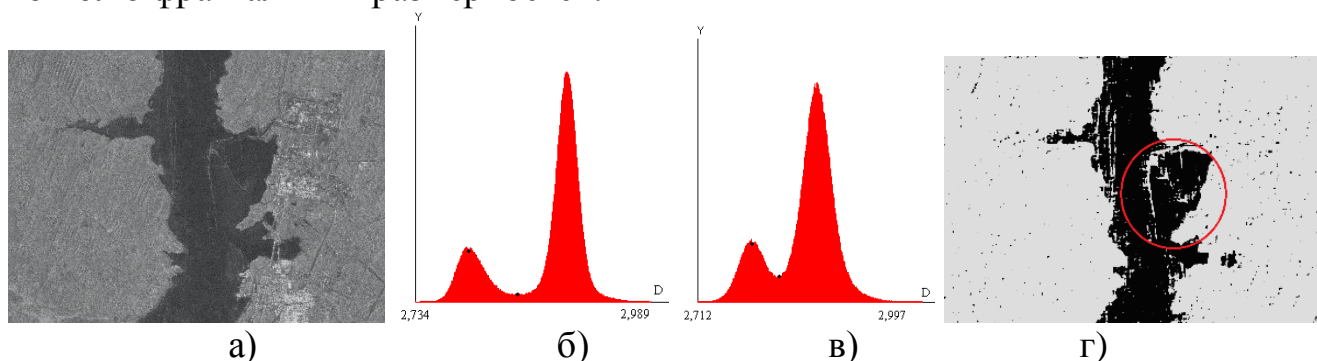


Рисунок 3 – РЛИ водной поверхности с отмелями и прибрежных зон (а); гистограмма поля фрактальных размерностей анализируемого изображения,  $k=15$ : метод призмы (б); модифицированный лок.-дисп. метод (в); результат пороговой обработки (г)

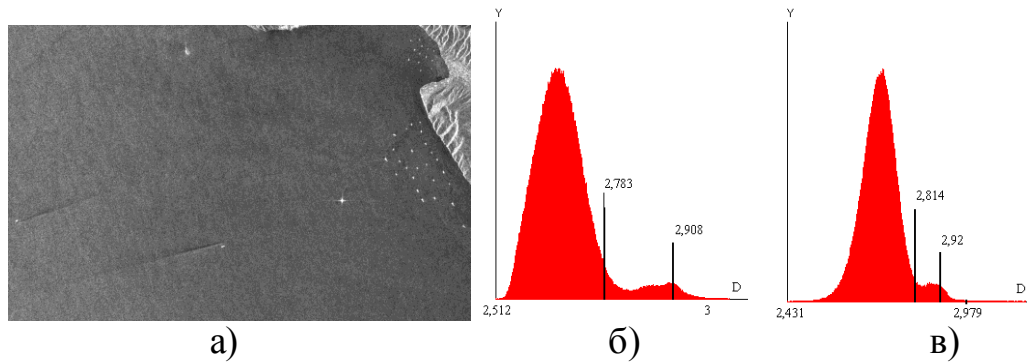


Рисунок 4 – Исследуемое РЛИ. Фрагмент снимка Radarsat-1 (а), гистограммы распределения значений фрактальной размерности,  $k=9$ : метод призмы (б), мод. лок.-дисп. метод (в)

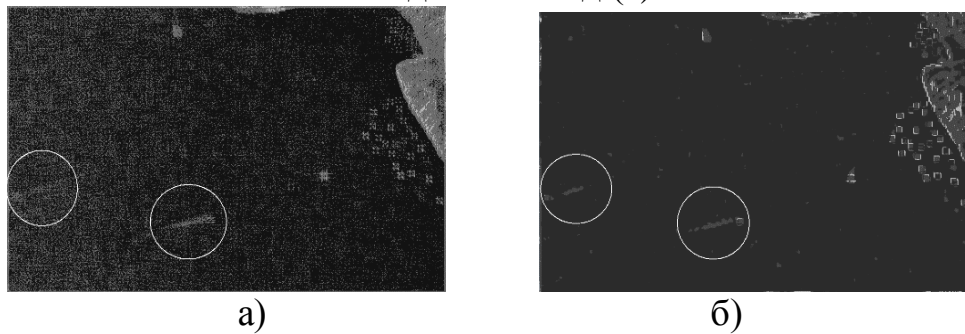


Рисунок 5 – Пороговая обработка поля фрактальных размерностей,  $k=11$ : метод призмы (а); мод. лок.-дисп. метод (б)

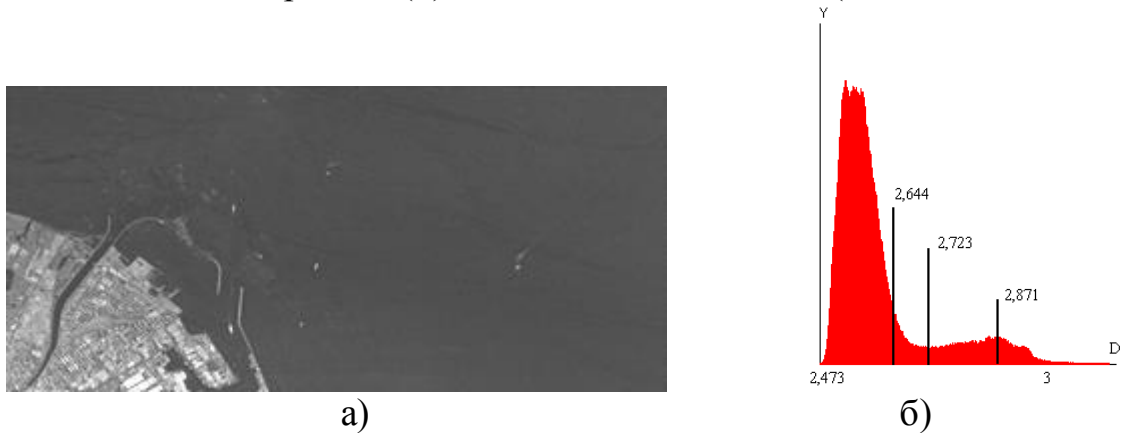


Рисунок 6 – Фрактальный анализ РЛИ акватории Барселоны, TerraSAR-X 3 м.: исходное изображение (а); гистограмма поля фрактальной размерности, метод призмы  $k=5$  (б)

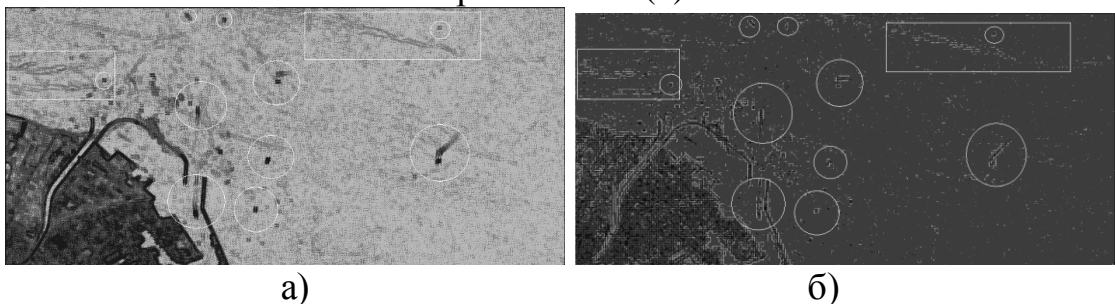


Рисунок 7 – Результаты кластерного анализа для поля, построенных различными методами: метод призмы,  $k=5$  (а); мод. лок.-дисп. метод,  $k=3$  (б)



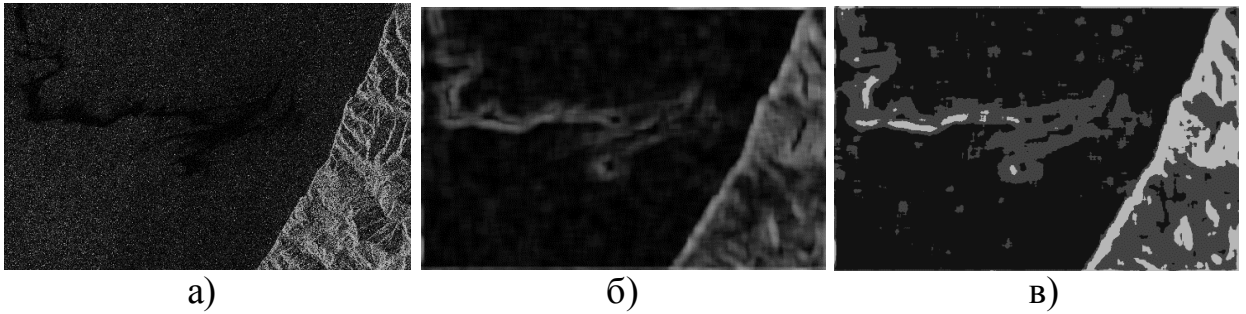


Рисунок 8 – Анализ нефтяных разливов на морской поверхности: исходное изображение (а); поле фрактальных размерностей, лок.-дисп. метод,  $k=29$  (б); разделение на три класса с использованием пороговой обработки (в).

В результате проведенных в главе 4 экспериментов было установлено, что построение поля фрактальной размерности и последующая многопороговая обработка РЛИ позволяют определять принадлежность исследуемых объектов к различным классам природных текстур (водная поверхность, отмели, кильватерные следы, нефтяные пятна, суша и др.) с использованием единственного параметра – фрактальной размерности  $D$ .

**В пятой главе** рассматривается проблема комплексирования данных радиолокационных и оптико-электронных систем. Предложено использовать модифицированный алгоритм слияния на основе вейвлет-преобразования для объединения радиолокационных и спектральных оптических изображений в одном цветном изображении. Предложенный новый метод опирается на применение в качестве одного из компонентов при комплексировании поля фрактальных размерностей, что позволяет преодолеть ряд трудностей, осложняющих объединение разнородных данных (Рисунок 9).

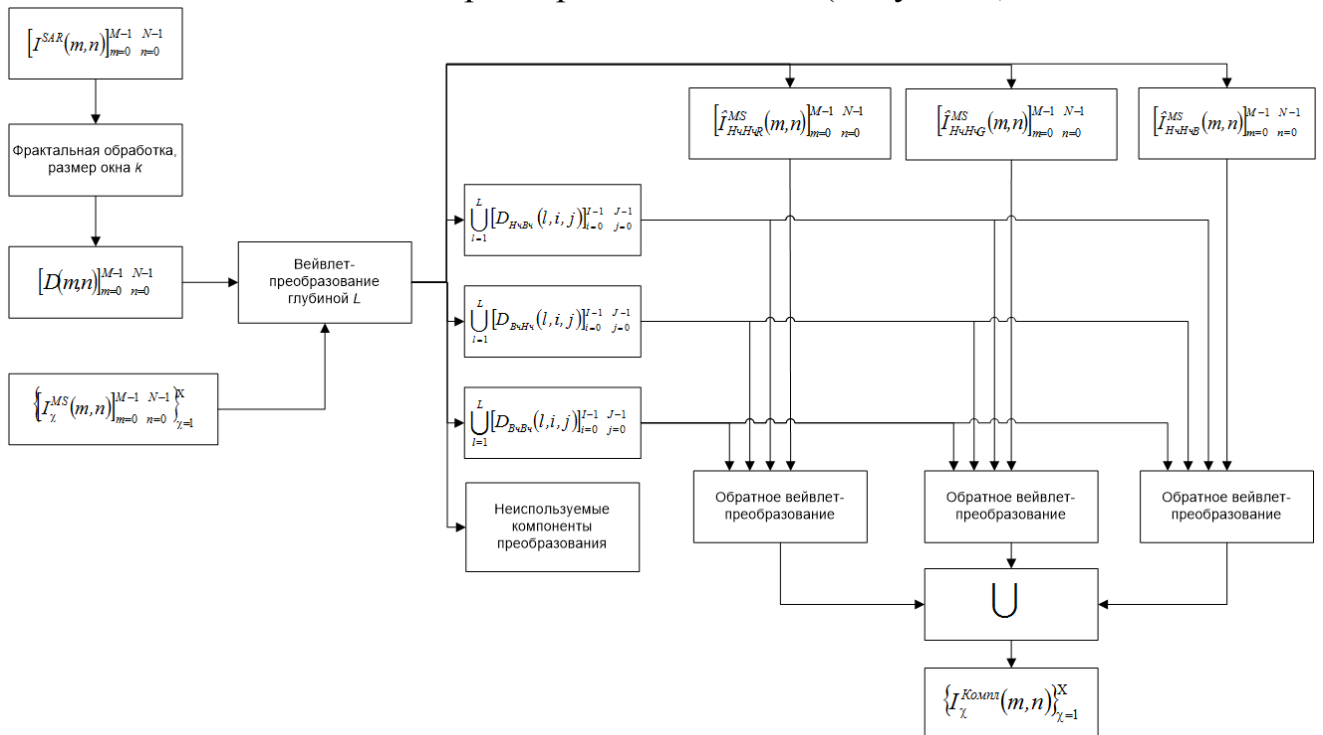


Рисунок 9 – Алгоритм слияния радиолокационных и мультиспектрального изображений

На рисунке 10 *а, б* представлены фрагменты снимков с разрешением 10 метров одной и той же территории спутниками ALOS в радиолокационном диапазоне и Landsat-7 в мультиспектральном диапазоне. На рисунке 10 *в* приведено поле фрактальных размерностей, построенное по методу призмы при обработке изображения, представленного на рисунке 10 *а*, окном  $7 \times 7$ .

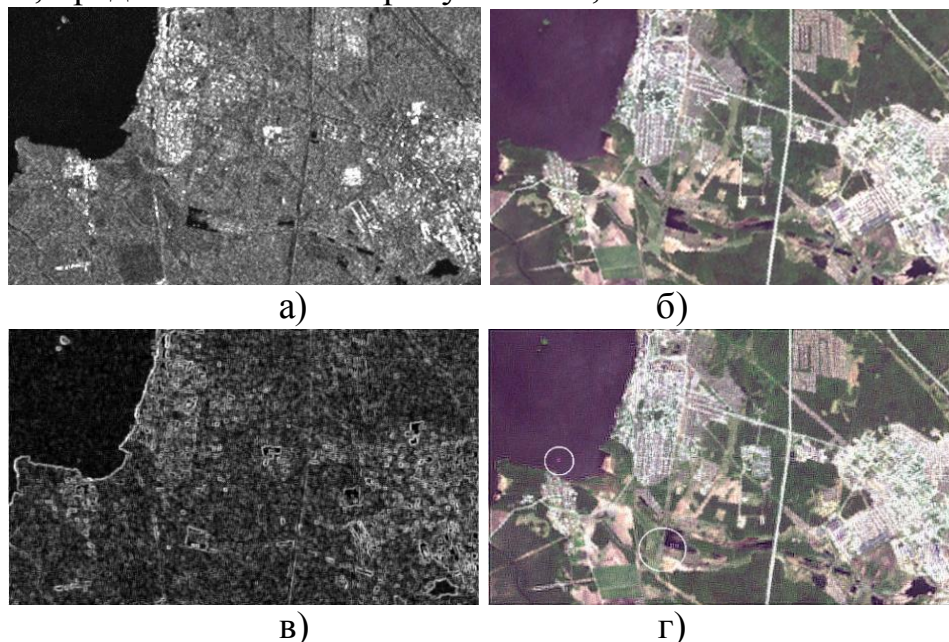


Рисунок 10 – Фрагменты космических изображений: РЛИ ALOS – 10 м. (*а*); мультиспектральное изображение Landsat-7 – 10 м. (*б*); поле фрактальных размерностей (*в*); результат слияния,  $l=2$  (*г*)

На рисунке 10 *г* представлен результат слияния изображения поля фрактальной размерности и мультиспектрального изображения при проведении вейвлет-преобразования глубиной  $l=2$ , представленных на рисунке 10 *а, б*, по предложенному методу.

В главе приводится количественный анализ эффективности проведения процедуры объединения, позволяющий оценить эффект уменьшению цветовой информации в итоговом изображении. На основе полученных данных сделаны заключения о границах применимости предложенного метода.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. На основе выполненного обзора исследований в области фрактальной и комплексной обработок космических РЛИ намечены перспективы развития данного направления, выбран объект и сформулированы основные задачи исследований.
2. Предложен единый методологический подход к оценке эффективности применения методов фрактального анализа РЛИ, который позволяет количественно оценить эффективность их использования.
- 2.1 Разработан программный комплекс, позволяющий моделировать тестовые изображения с заданными фрактальными свойствами и осуществлять фрактальную обработку РЛИ, получаемых в космических РСА с использованием различных алгоритмов.



- 2.2 На основе экспериментального анализа тестовых изображений установлено, что использование для обработки поля фрактальной размерности позволяет улучшить дифференциацию объектов в 3-5 раза по сравнению с амплитудными изображениями. Вместе с тем алгоритмы автоматической кластеризации обеспечивают успешное сегментирование тестовых изображений, если значения фрактальных размерностей соседних текстур различаются не менее, чем на 0.05.
3. Предложен модифицированный локально-дисперсионный метод расчета фрактальной размерности, отличающийся от известного использованием набора разномасштабных изображений, полученных на основе вейвлет-преобразования исходного снимка.
  - 3.1 Модифицированный локально-дисперсионный алгоритм расчета фрактальной размерности обладает преимуществом в 20-30% перед традиционной реализацией с точки зрения вычислительной трудоемкости при проведении обработки с использованием окна малого размера (5-7 пикселей).
  - 3.2 Продемонстрировано, что точность определения фрактальной размерности модифицированным локально-дисперсионным методом соответствует точности определения фрактальной размерности другими методами (метод призмы) и позволяет использовать его в задачах выделения слабоконтрастных объектов на космических изображениях.
  - 3.3 Предложен программный комплекс моделирования и фрактальной обработки космических радиолокационных и спектральных изображений, содержащий модифицированный локально-дисперсионный метод вычисления фрактальной размерности.
  - 3.4 Разработанный программный комплекс позволил установить, что увеличение окна обработки приводит к сглаживанию поля фрактальной размерности, небольшие неоднородности (меньше размеров окна обработки) на изображении не выделяются. При малых окнах обработки небольшие кластеры фрактальной размерности затевают общий характер изображения. При обработке изображений целесообразно использовать окна размером  $K \geq 5$ .
  - 3.5 На основании проведенного анализа фрагментов космических снимков показано, что граница между сушей и морской поверхностью однозначно идентифицируется по значению фрактальной размерности (при  $K=25$ ,  $D \sim 2.6$ ) для изображений, полученных в различных спектральных диапазонах (спектральные, панхроматические, радиолокационные изображения), что подтверждает фрактальный характер основных природных текстур.
4. Исследована целесообразность использования фрактальной размерности космических РЛИ в качестве признака для решения задач автоматизированной кластеризации и распознавания слабоконтрастных протяженных объектов.
  - 4.1 При кластеризации по полю фрактальной размерности, появляется возможность обнаружить области, слабо различимые на исходных РЛИ, например, в ряде случаев отделить кильватерные следы от других типов неоднородностей на морской поверхности.
  - 4.2 Обнаружено, что объекты, со значениями фрактальных размерностей,

- отличающимися менее 0.05 (НК, портовые сооружения и т.п.), не удается разделить на подклассы.
- 4.3 Установлено, что независимо от используемого метода расчета фрактальной размерности общий вид гистограмм сохраняется, при этом границы областей характеризуются одинаковыми значениями фрактальной размерности, что дает возможность идентифицировать различные типы исследуемых текстур.
  - 4.4 Применение фрактальной обработки изображений разнородных областей позволяет увеличить расстояние Джеффриса – Матусита между этими областями в 2-2.5 раза, что увеличивает дифференциацию различных типов природных объектов при проведении процедуры кластеризации. Сравнение эффективности кластеризации по амплитудному РЛИ и по полю фрактальной размерности на основе обработки космического снимка TerraSAR-X (разрешение 1 м) показало, что применение фрактальной обработки при сегментации на 4 класса методами ISODATA и k-ближайших соседей приводит к снижению количества неправильно интерпретируемых пикселей в 3-5 раз.
  5. Предложен новый метод комплексирования радиолокационных и спектральных оптико-электронных изображений земной поверхности в системах космического наблюдения, основанный на применении фрактальной обработки, обеспечивающий повышение эффективности (достоверности) обнаружения мало контрастных целей на радиолокационных изображениях в системах космического дистанционного зондирования земли.
  - 5.1 Применение предложенного алгоритма объединения позволяет получить одно изображение, обладающее как информацией о цвете, так и данными радиолокационного зондирования, при этом на изображениях, полученных таким способом, удается детектировать слаборазличимые мало контрастные детали, не обнаруживаемые до этого при обработке исходных данных.
  - 5.2 Использование предложенного метода объединения ограничено проявлением эффекта уменьшения цветовой информации в итоговом изображении.
  - 5.3 Показано, что при одинаковой частоте дискретизации исходных радиолокационных и спектральных оптико-электронных изображений результат их объединения будет содержать информацию о цвете и слаборазличимых деталях при проведении фрактальной обработки окном размером  $K < 16$ .

**Перспективы дальнейшей разработки темы исследования.** В результате проведенных в диссертационной работе исследований по анализу и разработке методов фрактальной обработки и комплексирования радиолокационных и спектральных данных в системах космического наблюдения решены актуальные научно-технические задачи по применению теории фракталов в вопросах обнаружения мало контрастных протяженных объектов на РЛИ. Дальнейшая разработка темы исследования видится нам в направлении решения следующих задач:

1. Совершенствование методов количественной оценки эффективности выделения (кластеризации и распознавания) слабоконтрастных протяженных

- целей при использовании предложенных методов.
2. Экспериментальная обработка РЛИ, получаемых современными космическими РСА сверхвысокого разрешения (Sentinel-1).
  3. Снижение вычислительной сложности алгоритмов расчета фрактальной размерности.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК*

1. Тренихин, В.А. Комплексирование радиолокационных и многозональных изображений в системах дистанционного зондирования Земли на основе слияния с использованием вейвлет-преобразования / В.А. Тренихин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – Специальный выпуск. – С. 72-76 (0,4 п.л.).
2. Тренихин, В.А. Фрактальная кластеризация радиолокационных и многозональных изображений в системах дистанционного зондирования Земли / В.А. Тренихин, В.Г. Коберниченко // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – Специальный выпуск. – С. 77-83 (0,6 п.л./0,4 п.л.).
3. Тренихин, В. А. Оценка фрактальной размерности космических снимков на основе модификации локально-дисперсионного метода / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Нелинейный мир. – 2009. – № 2. – С. 146-153 (0,6 п.л./0,3 п.л.).
4. Тренихин, В.А. Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 4. – С. 22-31 (0,8 п.л./0,5 п.л.).

### *Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

5. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014612574. Программный комплекс фрактальной обработки данных дистанционного зондирования Земли / Тренихин В.А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – №2013660977; заявл. 27.11.2013 ; опубл. 28.02.14.
6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2008613353. Пакет программ первичной обработки данных дистанционного зондирования Земли / Тренихин В.А. ; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ». – №2008612326; заявл. 27.05.08 ; опубл. 15.06.08.

### *Публикации в материалах конференций и других изданиях*

7. Тренихин, В.А. Применение метода вейвлет-преобразования при синтезе изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения / В.А. Тренихин, В.Г. Коберниченко // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях: сборник научных трудов по материалам I Международной конференции, 5-6 мая 2016 г. / Под ред. А.Г. Тягунова. – Екатеринбург, 2016. – С. 163-167 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

8. Trenikhin, V. A. The fractal processing of radar image / V. A. Trenikhin, V. G. Kobernichenko // 2015 25rd International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo, 2015). September 6-12, 2015. Sevastopol, Conference Proceedings. In Two Volumes – Sevastopol, 2015. – V.2. – P. 1218-1219 (0,15 п.л./0,08 п.л.).

9. Тренихин, В.А. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты: учебное пособие / В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С.М. Зраенко, А.В. Сосновский, В.А. Тренихин; под общ. ред. В.Г. Коберниченко. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 168 с.: ил (14 п.л./1 п.л.).

10. Тренихин, В.А. Сравнительный анализ алгоритмов кластеризации радиолокационных и спектральных космических снимков / В.А. Тренихин, Е.А. Обухова // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2010. – С. 208 (0,08 п.л./0,06 п.л.).

11. Тренихин, В.А. Модифицированный алгоритм слияния изображений на основе вейвлет-преобразования / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008» в рамках 5го Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2008». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2008. – С. 250-253 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

12. Тренихин, В.А. Анализ различных реализаций метода слияния космических изображений на основе вейвлет-преобразования с использованием различных типов вейвлетов / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Физика и технические приложения волновых процессов: Тез. докл. VII Международная научно-техническая конференция: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового. – Казань. – 2007. – С. 53-54 (0,15 п.л./0,08 п.л.).

13. Тренихин, В.А. Тестовые изображения для оценки эффективности алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования Земли / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Научные труды международной научно-практической конференции «Связь-Пром 2007» в рамках 4-го Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬПРОМЭКСПО». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2007. – С. 381-384 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

14. Тренихин, В.А. Анализ и разработка методов повышения информативности космических радиолокационных и мультиспектральных изображений. / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2007. – С. 227-230 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

15. Тренихин, В.А. Анализ методов обработки данных дистанционного зондирования Земли, основанных на алгоритме вейвлет-преобразования. / В.А. Тренихин // Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2007. – С. 231-233 (0,25 п.л.).

16. Тренихин, В.А. Анализ методов синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли. / В.А. Тренихин. // Научные труды V Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». – Екатеринбург, 2007. –

С.141-144 (0,3 п.л.).

17. Тренихин, В.А. Программный модуль для фрактальной обработки радиолокационных изображений местности / В.А. Тренихин, В.Г. Коберниченко // Радиовысотометрия: Сборник трудов второй научно-технической конференции, под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: ИД «Третья столица», 2007. – №400. – С. 338-341 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

18. Тренихин, В.А. Сравнение методов повышения пространственного разрешения при синтезе космических снимков / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов V международной конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: «Самарское книжное издательство». – 2006. – С.47 (0,08 п.л./0,04 п.л.).

19. Тренихин В.А. Оценка фрактальной размерности природных текстур на космических снимках / В. А. Тренихин // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов V международной конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: «Самарское книжное издательство», 2006. – С.235 (0,08 п.л.).