

РУССКИН АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЦЕНОК ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ.

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Радиолокация и радионавигация» Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Сосулин Юрий Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Чапурский Валерий Викторович

кандидат технических наук, профессор  
Сперанский Валентин Сергеевич

Ведущая организация: ОАО «Концерн радиостроения «Вега» (Москва).

Защита состоится «5» октября 2010 года в 14.00 на заседании Диссертационного Совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.03 доцент, к. т. н.

М. И. Сычев.

## Общая характеристика работы

Актуальность темы: Автоматическое обнаружение объектов на фоне отражений от земной и морской поверхности является одной из актуальных и трудных задач современной радиолокации. При создании новых радиолокационных систем (РЛС) в связи с постоянным увеличением требований к эффективности и быстродействию их работы, а также с расширением круга решаемых задач, возникает необходимость усовершенствования существующих и применения новых методов и алгоритмов обнаружения для обеспечения максимальной автоматизации процесса. Так, например, в существующих системах задачу обнаружения неподвижных наземных объектов (целей) решает, как правило, оператор, анализируя наблюдаемое радиолокационное изображение (РЛИ). Несмотря на то, что с принципиальной точки зрения задача автоматического обнаружения протяженных малоконтрастных объектов в значительной степени адекватна задаче обнаружения квазидетерминированных, стохастических, в том числе пространственно-временных сигналов на фоне помех, которая хорошо исследована в теоретическом и методическом плане во многих работах, ее практическое решение является весьма трудным. Это связано с рядом причин, в том числе с большой степенью неопределенности при описании распределений вероятностей сигналов протяженных целей и помех окружающего фона, что приводит к существенной зависимости эффективности работы алгоритмов обнаружения от априорных данных и условий работы системы. Для оптимизации существующих алгоритмов обработки в условиях априорной неопределенности используются параметрические, непараметрические и параметрико-непараметрические (робастные) методы, а также варианты математико-эвристического синтеза. Однако и они не всегда позволяют решать задачу обнаружения малоконтрастных целей с достаточно высокой эффективностью.

Одним из новых направлений, особенно активно развивающихся последние десять лет, как у нас в стране, так и за рубежом, является разработка методов обнаружения и распознавания неподвижных малоконтрастных объектов на фоне земной и морской поверхности на основе фрактальных характеристик. Понятие «фрактала» было введено в 1975 году Бенуа Б. Мандельбротом в фундаментальных междисципли-

лиарных работах, посвященных фрактальному описанию природы. Предложенный подход основан на принципе самоподобия и дробной меры природных процессов и объектов. При этом исследуемые явления рассматриваются не как совокупность отдельных элементов с определенными характеристиками, а как некоторая структура, обладающая внутренними топологическими связями между элементами и характеризующая сложный объект в целом. Количественная оценка сложности структуры базируется на таких показателях, как размерность Хаусдорфа – Безиковича, называемая фрактальной размерностью, и соответствующая фрактальная сигнатура. Фрактальная размерность является основным количественным показателем фрактальных структур. Ее оценка для фракталов принимает дробное значение, отличающееся от целой топологической размерности. При этом для простых объектов (прямоугольники, круги, гладкие кривые) фрактальная размерность совпадает или близка к топологической размерности. Таким образом, появляется новая возможность синтезирования алгоритмов обнаружения искусственных объектов, имеющих более простой геометрический вид, на фоне фрактальной подстилающей поверхности на основе измеренных значений фрактальной размерности. При этом важной особенностью данного подхода является слабое влияние интенсивности анализируемого сигнала на значения оцениваемого параметра. Это говорит о слабой зависимости используемого признака от условий наблюдения, что является важным обстоятельством при решении задачи обнаружения протяженных малоконтрастных неподвижных целей на фоне земной и морской поверхности.

На сегодняшний день опубликован ряд зарубежных работ Пентланда, Хайкина, Пиотровски, Сана, Лиу, Берицци, посвященных изучению вопросов применения фрактального анализа в радиолокации для решения различных задач, в том числе обнаружения и распознавания объектов. Полученные в них отдельные результаты указывают на высокие потенциальные возможности фрактального метода обнаружения, особенно в условиях слабой наблюдаемости объекта. При этом имеется два основных направления проводимых исследований. Первое связано с расширением информативности анализируемых фрактальных признаков за счет дополнительных параметров с целью повышения эффективности и устойчивости работы синтезируемых

алгоритмов, что в основном актуально при решении задач сегментации и классификации целей и различных природных покровов. В рамках второго направления проводятся попытки синтеза и анализа эффективности алгоритмов обнаружения, основанных на оценке фрактальной размерности, с использованием радиолокационных данных, полученных на основе моделирования и в реальных условиях съемки.

В нашей стране рассмотрение вопросов фрактального анализа в радиолокации наиболее полно представлено в работах Потапова А. А. и Германа В. А. Проведенные ими исследования в ИРЭ РАН в рамках междисциплинарного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: Проектирование фрактальных радиосистем» привели к новым результатам, как в теоретических, так и в прикладных вопросах применения фрактального анализа для обнаружения протяженных объектов на оптических, радиолокационных и синтезированных сложных (при наличии целей) изображениях. В частности, проведено обоснование применения фрактального анализа для решения прикладных задач радиолокации, оценены значения фрактальных параметров для некоторых искусственных и природных образований, выполнены исследования по применению фрактальных методов в задачах распознавания образов и подстилающих поверхностей. Предпринята попытка синтеза алгоритмов обнаружения мало контрастных радиолокационных целей, основанных на фрактальных характеристиках, и определения структуры и аппаратной реализации фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов. Однако, несмотря на то, что полученные в работах выводы и результаты достаточно интересны, рассмотрение ряда задач оказывается неполным. В частности, практически остаются не изученными вопросы анализа различных методов измерения фрактальной размерности, их классификации и сравнительной характеристики, определения структуры фрактального обнаружителя, функционирующего на основе измеренных значений фрактальной размерности, определения его основных параметров, необходимых для практической реализации, а также оценки эффективности алгоритма обнаружения в зависимости от различных параметров.

Следует отметить, что опубликованные на сегодняшний день результаты, указывающие на эффективную работу алгоритма обнаружения мало контрастных объек-

тов с использованием значений фрактальной размерности, страдают излишним оптимизмом и фрагментарностью проводимых исследований. Поэтому имеется необходимость выполнения более глубокого анализа рассматриваемой проблемы.

В этой связи решение задачи разработки и оценки эффективности фрактального обнаружителя протяженных малоконтрастных целей с использованием измеренных значений фрактальной размерности в зависимости от различных параметров алгоритма обнаружения является актуальной задачей, требующей своего решения.

Цель работы: Разработка и исследование эффективности алгоритма обнаружения протяженных малоконтрастных объектов на радиолокационных изображениях подстилающей поверхности с использованием оценок фрактальной размерности наблюдаемых данных.

Задачи работы:

1. Провести анализ существующих методов измерения фрактальной размерности двумерного сигнала. Выполнить отбор и классификацию необходимых методов, описать их свойства и алгоритмы, необходимые для практической реализации процедур оценок фрактальной размерности.

2. Провести анализ различных фрактальных моделей изображения отражающей поверхности. Выбрать модель для проведения исследований фрактального обнаружителя протяженных малоконтрастных объектов, определить ее свойства и методы синтеза реализаций.

3. Разработать методику и провести сравнительный анализ выбранных методов измерения фрактальной размерности по точности и вычислительной трудоемкости.

4. Разработать алгоритм и структурную схему фрактального обнаружения объектов. Рассмотреть основные параметры обнаружителя, определить их свойства и процедуру вычисления.

5. Разработать методику и провести анализ эффективности предложенной процедуры обнаружения в зависимости от различных параметров обнаружителя на основе моделирования и по реальным данным радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА).

### Методы решения.

При решении поставленных задач использовались теория фракталов и фрактального анализа, элементы теории случайных процессов, методы матричного анализа, теория цифрового спектрального анализа и его приложения, методы статистической теории радиолокации, методы математической статистики и математическое моделирование.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведен анализ существующих методов измерения фрактальной размерности двумерного сигнала, в результате которого выделено двенадцать наиболее распространенных методов. Выполнена их классификация и определены основные свойства.

2. Разработана методика и выполнен сравнительный анализ методов измерения фрактальной размерности по точности и вычислительной трудоемкости и определены методы, обладающие лучшими характеристиками.

3. Получен алгоритм фрактального обнаружения протяженных малоконтрастных целей с использованием оценок фрактальной размерности, определены его основные параметры.

4. Разработана методика и проведена оценка эффективности предложенной процедуры обнаружения на основе моделирования и по реальным РСА данным.

5. Определена зависимость эффективности работы алгоритма обнаружения от параметров обнаружителя и анализируемых данных.

Практическая ценность. Реализация предложенного алгоритма обнаружения, использующего оценки фрактальной размерности, позволит повысить эффективность обнаружения протяженных малоконтрастных целей на фоне морской и земной поверхности, особенно в условиях низких отношений сигнал-фон. Найденные параметры обнаружителя, процедура их определения и их влияние на эффективность работы алгоритма могут использоваться для оптимизации характеристик обнаружения в зависимости от конкретных условий наблюдения.

### Положения, выносимые на защиту

1. Для повышения эффективности обнаружения протяженных малоконтрастных целей на фоне фрактальной подстилающей поверхности в условиях малых отношений сигнал-фон целесообразно использование разработанного обнаружителя с измерением значений фрактальной размерности наблюдаемых изображений.

2. Эффективность работы фрактального обнаружителя протяженных малоконтрастных объектов зависит как от точности измерения размерности, так и от чувствительности метода оценки к наличию «нефрактального» объекта.

3. Выбираемые значения параметров разработанного обнаружителя позволяют решать задачу автоматического обнаружения протяженных малоконтрастных целей на фоне фрактальной подстилающей поверхности с заданными вероятностями ошибочных решений, в частности, с вероятностями правильного обнаружения  $P_{ПО}=0,95$  и ложной тревоги  $P_{ЛТ}=10^{-3}$ .

### Публикация результатов

Основное содержание диссертационной работы отражено в 7 печатных работах. Из них 2 статьи в журналах перечня ВАК, 5 работ в трудах Международных и Всероссийских конференций.

### Реализация и внедрение результатов

Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в разработках ОАО НИИЭМ при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию космического комплекса «Метеор-3М», а также в учебном процессе Московского авиационного института (государственного технического университета) на кафедре «Радиолокация и радионавигация» по дисциплине «Радиотехнические системы». Акты о внедрении приведены в приложении к диссертации.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректным использованием адекватного математического аппарата, методов компьютерного моделирования и логической обоснованностью выводов. Полученные выводы подтверждаются большим объемом собранных статистических данных, результатами анализа реаль-



ных радиолокационных изображений, а также согласованностью с опубликованными материалами в частных случаях.

### Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10-й Международной научно-технической конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2008 г.), международном симпозиуме по радиолокации IRS 2008 (г. Вроцлав, 2008 г.), 11-й Международной научно-технической конференции и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2009 г.), международном симпозиуме по радиолокации IRS 2009 (г. Гамбург 2009 г.), 2-ой Всероссийской конференции ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике - 2009».

### Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем работы составляет 167 страниц и содержит 29 рисунков и 40 таблиц. Список литературы включает в себя 108 позиций.

### **Краткое содержание работы**

Во введении к диссертационной работе обосновывается актуальность темы исследований, проводится обзор опубликованных работ по материалам отечественных и зарубежных источников по тематике исследования, формулируются цели и задачи работы.

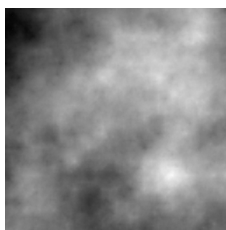
В первой главе рассматриваются элементы теории фракталов и фрактального анализа, необходимые для решения поставленной задачи, а также вопросы измерения фрактальной размерности двумерного сигнала. Формулируются понятия детерминированных и случайных (стохастических) фракталов и определение фрактальной размерности. Выделяются отличительные свойства фрактальных процессов. Приводится классификация измеряемой фрактальной размерности в зависимости от свойств фракталов, используемых при формировании методов измерения, на морфологическую, энтропийную или поточечную и трансформационную фрактальные размерности. Произведен обзор существующих методов измерения фрактальной размерности

двумерных сигналов. Выполнен их анализ и выделены двенадцать методов измерения фрактальной размерности. Согласно приведенной классификации различных типов измеряемой фрактальной размерности определено, что оценка морфологической размерности получается при использовании методов: кубов, треугольных призм, изаритм, прямой размерности, покрытий, Пентланда и блуждающего делителя. Энтропийная фрактальная размерность формируется при методах: вероятностном, информационной размерности и корреляционной размерности. Трансформационная фрактальная размерность является результатом применения методов: вариограм (дисперсионного) и спектрального. Также в главе подробно рассмотрены свойства каждого метода и описана процедура вычисления размерности, позволяющая выполнить практическую реализацию алгоритмов измерения фрактальной размерности. В заключении делается вывод о необходимости комплексного изучения вопроса измерения фрактальной размерности, т. к. процесс выбора метода является ключевым при исследовании и реализации алгоритма фрактального обнаружения на основе оценок размерности.

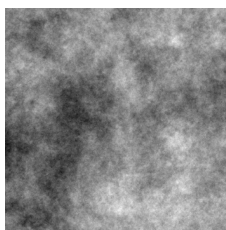
Вторая глава посвящена вопросу выбора фрактальной модели радиолокационного изображения отражающей поверхности. Вначале рассмотрены некоторые общие аспекты получения радиолокационной информации при использовании методов цифровой обработки сигналов, вопросы формирования радиолокационного изображения в РСА, а также различные виды представления изображения в цифровых системах обработки. Проведен анализ представленных в литературе детерминированных и стохастических фрактальных моделей, определены их основные свойства. На основе проведенного анализа принято решение использовать для сравнительного анализа различных методов измерения фрактальной размерности и изучения вопросов фрактального обнаружения малоконтрастных протяженных объектов фрактальную модель на основе обобщенного броуновского движения в качестве модели радиолокационного изображения подстилающей поверхности. Двумерное фрактальное броуновское движение (ФБД) является винеровским, нестационарным случайным процессом со стационарными приращениями. Рассмотрены основные свойства модели двумерного ФБД.

Графическим изображением двумерного ФБД является поверхность с фрактальной размерностью  $D=3-H$ , где  $H$  – параметр Херста ( $H=0\div 1$ ). Сечения этой поверхности, представляющие собой линии уровня, имеют размерность  $D=2-H$ .

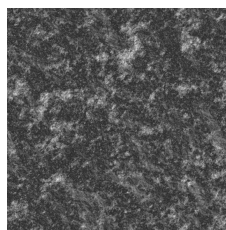
Для формирования рассмотренной фрактальной модели представлены три алгоритма моделирования: последовательного случайного сложения, случайного среднего смещения и на основе фрактальной Фурье-фильтрации. В результате компьютерного моделирования получены двумерные реализации модели ФБД со следующими параметрами: размер изображения  $1024\times 1024$  точек, заданные значения фрактальных размерностей  $D_{зад}$  от 2,1 до 2,9 с шагом 0,1, динамический диапазон по яркости:  $0\div 255$ . На рис. 1 представлены реализации ФБД с  $D_{зад}=2,1$ ; 2,5; 2,9 при соответствующих алгоритмах моделирования.



Алгоритм последовательного случайного сложения,  $D_{зад} = 2,1$ .



Алгоритм случайного среднего смещения,  $D_{зад} = 2,5$ .



Алгоритм на основе фрактальной Фурье-фильтрации,  $D_{зад} = 2,9$ .

Рис. 1. Примеры реализаций ФБД.

В третьей главе приведены результаты сравнительного анализа методов измерения фрактальной размерности по точности и вычислительной трудоемкости.

В первом разделе главы предложена методика сравнительной оценки методов измерения размерности. Определено, что в рамках рассматриваемой задачи фрактального обнаружения объектов, когда на основе наблюдаемого кадра радиолокационного изображения с помощью сканирующего окна  $R$  проводится измерение внутренней фрактальной размерности, полученные выборочные оценки  $D_{изм\ l}$ , где  $l=1\dots m$  – номер окна наблюдения, будут носить случайный характер. Проведен анализ различного рода ошибок, возникающих в процессе практического измерения размерности и определена суммарная ошибка или ошибка оценивания измеренных значений  $D_{изм}$  относительно заданных  $D_{зад}$ . Согласно предложенной методике сравнительный

анализ методов оценки фрактальной размерности проводится с использованием основных статистических показателей  $D_{изм}$ : математического ожидания (М), дисперсии  $\sigma^2$ , среднеквадратического отклонения (СКО), на основе полной ошибки измерения  $\xi$ . Данная мера точности учитывает как случайную, так и неслучайную (систематическую) составляющие ошибки измерения фрактальной размерности и определяется как:

$$\xi = \sqrt{\sigma^2 + [M(D_{изм}) - D_{зад}]^2}. \quad (1)$$

Метод считался более точным по сравнению с другими при меньших значениях соответствующих  $\xi$  и СКО. При этом при близких значениях  $\xi$  предпочтение отдавалось методу с меньшим СКО. Данное сравнение проводилось для каждого  $D_{зад}$ ,  $R$  и алгоритма формирования модели, после чего проводилась совместная оценка полученных результатов.

Во втором разделе главы представлены результаты сравнительного анализа методов по точности измерения фрактальной размерности. Для каждого окна размера  $R \times R$ , где  $R=2^i$ ,  $i=3,4 \dots 9$ , и алгоритма моделирования определены три метода, обладающие наилучшими точностными показателями измерения размерности. Выполненная совместная оценка результатов показала, что лучшим по точности является метод прямой размерности. Также определено, что при алгоритме формирования модели на основе фрактальной Фурье-фильтрации достигается наилучшая стабильность результатов.

В третьем разделе главы проведен сравнительный анализ методов по вычислительной трудоемкости измерения фрактальной размерности, который основан на оценке среднего времени вычисления размерности каждым из рассмотренных методов одной и той же области входного изображения в окне выбранного размера  $R$ . Совместный анализ полученных результатов показал, что лучшим по вычислительной трудоемкости является метод вариограм. При этом метод прямой размерности имеет второй результат.

В четвертом разделе главы представлены результаты совместного сравнительного анализа методов измерения фрактальной размерности по точности и вычисли-

тельной трудоемкости. Для сведения результатов различных анализов к единой оценочной системе предложена рейтинговая система баллов. Определено, что среди рассмотренных методов лучшим является метод прямой размерности.

В четвертой главе проводится синтез процедуры фрактального обнаружения малоконтрастных протяженных целей. Общая модель анализируемого изображения на входе фрактального обнаружителя имеет следующий вид:

$$I(i, j) = pQ(i, j)S(i, j) + (1 - pQ(i, j))G(i, j) + n(i, j), \quad (2)$$

где  $I(i, j)$  – функция входного изображения ( $i, j \in Z$ ),  $S(i, j)$  – функция объекта ( $i, j \in Z_s$ ,  $Z_s \subset Z$ ),  $G(i, j)$  – функция фона ( $i, j \in Z$ ),  $n(i, j)$  – функция случайного шума, обусловленная внутренними шумами приемно-передающего тракта, ( $i, j \in Z$ ),  $p$  – параметр, определяющий предположение о наличии ( $p=1$ ) или отсутствии ( $p=0$ ) объекта,  $Q(i, j)$  – функция положения объекта, имеющая следующий вид:

$$Q(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{при } i, j \in Z_s; \\ 0, & \text{при } i, j \in Z - Z_s. \end{cases} \quad (3)$$

При этом  $Z$  – дискретная область, определяемая размерами анализируемого кадра,  $Z_s$  – область, занимаемая объектом в кадре.

Предложена общая структурная схема алгоритма фрактального обнаружения (рис. 2). Описаны основные функциональные блоки. Проведен анализ основных параметров обнаружителя и определено их влияние на эффективность обнаружения.

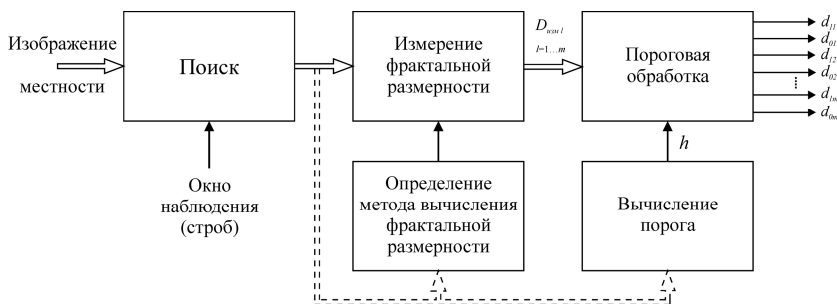


Рис. 1. Структурная схема фрактального обнаружителя целей.

Рассмотрена реализация блока измерения фрактальной размерности на основе метода покрытий. Развернутая структурная схема блока представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема блока измерения фрактальной размерности на основе метода покрытий.

Описан принцип работы блока. Показаны основные отличия, возникающие в процессе анализа данных, обладающих и не обладающих фрактальными свойствами.

Предложено правило определения порога, обеспечивающего заданный уровень вероятности ложной тревоги, как квантиль уровня  $P_{ЛТ}$  анализируемой выборки плотности распределения вероятностей измеренных значений  $D_{изм}$  на входе порогового устройства при условии отсутствия цели.

В пятой главе рассмотрен вопрос анализа эффективности предложенного фрактального метода обнаружения протяженных малококонтрастных целей.

В первом разделе главы приведены результаты исследований оценки эффективности на основе моделей подстилающего фона и объекта. Рассмотрены необходимые параметры и соответствующие критерии оценки для выполнения анализа эффективности. Представлена методика исследования, основанная на особенностях предложенного метода обнаружения. Определено, что при определении показателей качества обнаружения и вычислении характеристик обнаружения вместо значений отношения сигнал-шум (в данном случае можно говорить об отношении сигнал-фон) целе-

сообразно использовать отношение площади цели к площади окна, т.е.  $S_{ц}/S_{окна}$ . Проведены исследования по сбору статистических данных оценки фрактальной размерности сложного изображения при  $S_{ц}/S_{окна}$ : 0,25; 0,5 и 0,75. Для заданного фиксированного значения  $P_{ДТ}=10^{-3}$  определены  $P_{ПО}$  и построены эмпирические характеристики обнаружения как зависимости  $P_{ПО}$  от  $S_{ц}/S_{окна}$ . Для каждого метода измерения фрактальной размерности определены пороговые значения  $S_{ц}/S_{окна\ пор}$  и соответствующие им минимальные значения  $R_{min}$ , обеспечивающие заданную оценку вероятности  $P_{ПО}=0,95$ . Проведен сравнительный анализ фрактальных обнаружителей, использующих различные методы измерения размерности, и для каждого алгоритма моделирования определены методы, использование которых является наиболее эффективным. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Алгоритм случайного срединного смещения	Метод блуждающего делителя	Вероятностный метод	Метод покрытий	Метод прямой размерности
Алгоритм последовательного случайного сложения	Вероятностный метод	Метод прямой размерности	Метод покрытий	Метод блуждающего делителя
Алгоритм на основе фрактальной Фурье-фильтрации	Вероятностный метод	Метод блуждающего делителя	Метод покрытий	Метод информ. и корреляц. размерности

На рис. 3 для примера приведены эмпирические характеристики обнаружения при выбранных методах оценки, обеспечивающие наилучшую эффективность для различных алгоритмов формирования модели. Значение  $D_{зад}$  реализаций равно 2,7. Также на графиках пунктирной линией указан заданный уровень вероятности  $P_{ПО}=0,95$ , используемый при определении  $S_{ц}/S_{окна\ пор}$  и  $R_{min}$ .

Определено, что эффективность работы фрактального обнаружителя протяженных малоконтрастных объектов зависит как от точности измерения размерности используемым в алгоритме методом оценки  $D$ , так и от чувствительности метода оценки к «нефрактальному» объекту. При этом имеется существенная зависимость эффективности обнаружения от параметров анализируемого изображения, в частности от  $D_{зад}$ .

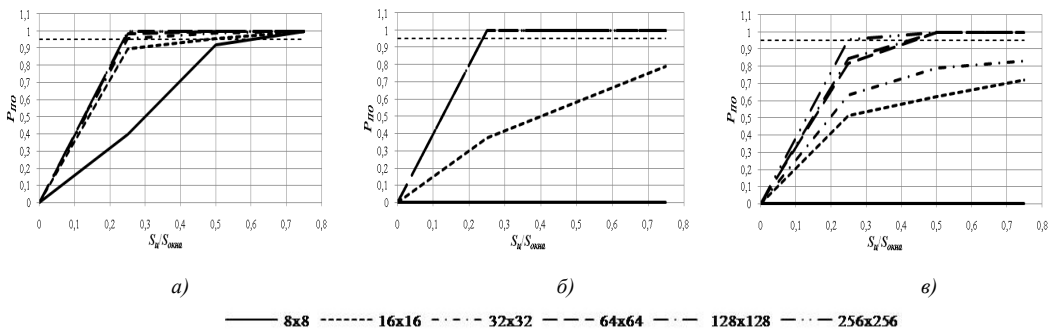


Рис. 3. Эмпирические характеристики обнаружения при:

а) алгоритме случайного срединного смещения и методе блуждающего делителя; б) алгоритме последовательного случайного сложения и вероятностном методе; в) алгоритме на основе фрактальной Фурье-фильтрации и вероятностном методе.

Во втором разделе главы приведены результаты анализа эффективности фрактального метода обнаружения на основе реальных радиолокационных данных. Выполнены исследования и отбор реальных РСА изображений отражающих поверхностей, обладающих фрактальными свойствами, на основе предложенного критерия с использованием оценок фрактальной размерности. Разработана методика решения задачи оценки эффективности разработанного обнаружителя по реальным данным. Анализ разделялся на два этапа. На первом этапе подстилающая поверхность – реальное РСА изображение, объект – модель, на втором – реальные изображения фона и объекта. Аналогично анализу на основе моделирования выполнен сбор статистических данных оценки размерности сложного изображения; при выбранном фиксированном значении  $P_{\text{лт}}=10^{-3}$  определены  $P_{\text{по}}$  и построены эмпирические характеристики обнаружения. Выполнена оценка эффективности и сравнительный анализ фрактальных обнаружителей в зависимости от метода измерения размерности по полученным значениям  $S_{\text{ц}}/S_{\text{окна пор}}$  и соответствующим им  $R_{\text{min}}$ , обеспечивающим оценку вероятности  $P_{\text{по}}=0,95$ . На рис. 4, в качестве примера, показаны эмпирические характеристики обнаружения для методов оценки, обеспечивающие наибольшую эффективность, при различных типах цели и выбранном РСА изображении подстилающей поверхности, а также пунктирной линией указан заданный уровень вероятности  $P_{\text{по}}=0,95$ , используемый при определении  $S_{\text{ц}}/S_{\text{окна пор}}$  и  $R_{\text{min}}$ .



На основе полученных данных показана возможность решения задачи автоматического обнаружения протяженных малоcontrastных объектов на фоне фрактальной подстилающей поверхности разработанным обнаружителем с заданными вероятностями ошибочных решений, в частности, с  $P_{\text{по}}=0,95$  и  $P_{\text{лт}}=10^{-3}$  по реальным данным.

Подтверждена существенная зависимость эффективности обнаружения от анализируемого кадра изображения отражающей поверхности. Определены методы, обеспечивающие высокие характеристики обнаружения при всех типах цели – прямой размерности, Пентланда, вероятностный и покрытий.

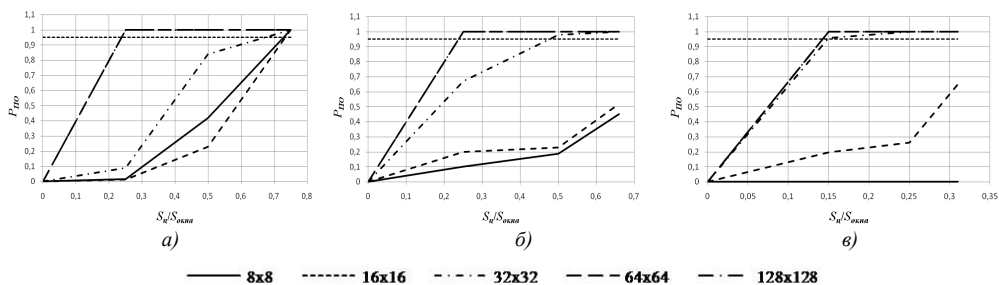


Рис. 4. Эмпирические характеристики обнаружения при:

- a)* методе блуждающего делителя и модели цели; *б)* методе покрытий и реальной цели 1; *в)* методе Пентланда и реальной цели 2.

Сравнение результатов анализа на основе моделирования и по реальным данным показало, что имеются различия в эффективности работы фрактального обнаружителя, использующего выбранные методы оценки  $D$ , в зависимости от входных данных – модели или PCA изображения. Однако выделены три метода: вероятностный, покрытий и Пентланда, использование которых в обнаружителе обеспечивает высокую эффективность обнаружения, как при моделировании, так и в условиях обработки реальных PCA данных.

В третьем разделе главы проведен сравнительный анализ разработанного фрактального и амплитудного обнаружителей по реальным PCA данным. Предложена методика сравнительной оценки. В результате исследований определено, что в условиях обнаружения слабоcontrastных протяженных объектов, когда значения отношения сигнал-фон  $q$  невелики, фрактальный обнаружитель оказывается более эффективным по сравнению с амплитудным, т.к. обеспечивает заданные показатели

обнаружения при более низких  $q_{пор}$ . При этом необходимым условием является выбор соответствующего размера окна сканирования  $R$ .

В конце главы обсуждаются вопросы, связанные с продолжением и расширением начатых исследований в части решения задачи фрактального обнаружения на основе реальных радиолокационных данных. Рассмотрена необходимость определения параметров и границ фрактальных свойств радиолокационных изображений различных подстилающих поверхностей в зависимости от масштаба, параметров РСА и условий съемки для адекватного применения разработанного метода обнаружения. При этом отмечается, что решение данных вопросов связано с объективными трудностями по проведению обширных практических исследований по получению и обработке значительного объема радиолокационных данных при различных параметрах съемки.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Выполнен анализ различных методов измерения фрактальной размерности двумерного сигнала. Проведен отбор и классификация двенадцати методов измерения фрактальной размерности. Описаны их параметры и процедуры измерения  $D$ , позволяющие осуществить практическую реализацию каждого метода.

2. Проведен анализ детерминированных и стохастических фрактальных моделей, определены их основные свойства. Принято решение использовать для сравнительного анализа различных методов измерения фрактальной размерности и изучения вопросов фрактального обнаружения малоконтрастных протяженных объектов фрактальную модель на основе обобщенного броуновского движения в качестве модели радиолокационного изображения подстилающей поверхности.

3. Рассмотрены алгоритмы формирования модели ФБД. Получены двумерные реализации модели фрактального броуновского движения при различных заданных значениях фрактальной размерности.

4. Проведен расширенный сравнительный анализ двенадцати методов измерения фрактальной размерности с точки зрения точности оценки  $D$  и вычислительной трудоемкости и определен лучший метод – метод прямой размерности.

5. Выполнен синтез процедуры фрактального обнаружения малоконтрастных протяженных целей, предложена общая структурная схема обнаружителя. Рассмотр-

рены основные параметры обнаружителя. Выявлена взаимосвязь между этими параметрами, характеристиками анализируемого изображения и эффективностью обнаружения.

6. Предложена процедура определения порога обнаружения, обеспечивающего заданный уровень вероятности ложной тревоги.

7. Определено, что эффективность работы фрактального обнаружителя протяженных малоконтрастных объектов зависит как от точности измерения размерности используемым в алгоритме методом оценки  $D$ , так и от чувствительности метода оценки к «нефрактальному» объекту.

8. Определено, что выбираемые значения параметров разработанного обнаружителя позволяют решать задачу автоматического обнаружения протяженных малоконтрастных целей на фоне фрактальной подстилающей поверхности с заданными вероятностями ошибочных решений, в частности, с вероятностями  $P_{\text{по}}=0,95$  и  $P_{\text{лт}}=10^{-3}$ .

9. В результате сравнительного анализа фрактальных обнаружителей, использующих различные методы измерения размерности, определены следующие методы: вероятностный, покрытий и Пентланда, обеспечивающие более высокую эффективность работы обнаружителя по сравнению с остальными.

10. Сравнительный анализ с амплитудным методом обнаружения показал, что в условиях обнаружения слабоконтрастных протяженных объектов, когда значения отношения сигнал-фон  $q$  невелики, фрактальный обнаружитель оказывается более эффективным по сравнению с амплитудным, т.к. обеспечивает заданные показатели обнаружения при более низких  $q_{\text{пор}}$ .

### **Основное содержание диссертации отражено в работах**

1. Рускин А. Б., Сосулин Ю. Г. Анализ методов оценивания фрактальной размерности стохастической модели отражающей поверхности. – 10-я Международная научно-техническая Конференция и Выставка «Цифровая Обработка Сигналов и ее Применение», 26-28 марта 2008 г., с. 402-405.

2. Sosulin Yu. G., Russkin A. B. Comparative Analysis of Dimension Estimation Methods of Fractal Surfaces and Fractal Target Detection. – International Radar Symposium 2008, Wroclaw, Poland, May 21-23, 2008.

3. Русскин А. Б. Сравнительный анализ методов измерения фрактальной размерности. – 11-я Международная научно-техническая Конференция и Выставка «Цифровая Обработка Сигналов и ее Применение», 25-27 марта 2009 г., с. 346-348.

4. Sosulin Yu. G., Russkin A. B. Fractal Detection of Targets: Analysis of Fractal Dimension Estimation Methods and Evaluation of Detection Characteristics. – International Radar Symposium 2009, Hamburg, Germany, September 9-11, 2009.

5. Русскин А.Б. Исследование методов оценки фрактальной размерности. – 2-я Всероссийская конференция ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2009», 20-24 апреля 2009 г., Москва. Тезисы докладов. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009, с 51-52.

6. Русскин А.Б. Сравнительный анализ методов измерения фрактальной размерности двумерных сигналов. – Информационно-измерительные и управляющие системы, 2009, №9, с. 10-19.

7. Сосулин Ю. Г., Русскин А. Б. Фрактальное обнаружение малоконтрастных объектов на изображениях. – Радиотехника, 2009, №12, с. 48-57.