

**Анализ и синтез топологических радиолокационных
обнаружителей малококонтрастных целей на фоне
интенсивных помех от земли, моря и осадков
как новая ветвь теории статистических решений**

А.А. Потапов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Российская Федерация, г. Москва
ул. Моховая, 11, корп. 7

Рассмотрены основные идеи и стратегические направления в синтезе новых топологических радиолокационных обнаружителей малококонтрастных объектов. Обнаружение объектов производится на фоне интенсивных отражений от земли, моря и осадков. Представлены новые топологические признаки и методы обнаружения малококонтрастных объектов на фоне интенсивных помех. Методы основаны на текстурном и фрактальном анализе, а также на теории детерминированного хаоса. Основная цель работы – истолкование основных направлений радиофизики, радиотехники и радиолокации на «фрактальном» языке, что создает новые пути и обобщения на будущие перспективные радиосистемы. Предложен новый вид и новый метод современной радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация.

Ключевые слова: текстура, фрактал, лакуарность, показатель Херста, обнаружитель сигналов, малококонтрастные объекты, радиолокация, фрактально-частотные ММО-системы.

Введение

Радиолокационное обнаружение малозаметных и малогабаритных объектов вблизи поверхности земли и моря, а также в метеорологических осадках представляет крайне трудную задачу [1; 2]. Кроме того, помехи от морской поверхности и растительности имеют нестационарный и многомасштабный характер, особенно при малых углах скольжения ϑ .

Разнообразие подстилающих покровов, условий радиолокационного наблюдения и сопровождение указанных выше объектов очень часто приводит к тому, что отношение сигнал/помеха q_0^2 для таких задач почти всегда заполняет область отрицательных (в децибелах) значений, т. е. $q_0^2 < 1$ дБ [1; 2]. Это делает неприменимым классические радиолокационные методы и алгоритмы обнаружения в большинстве случаев, то есть использование энергетических обнаружителей (когда отношение правдоподобия определяется исключительно и только энергией принимаемого сигнала) становится принципиально невозможным. Что делать?.. Выход есть!

Обнаружение малококонтрастных объектов на фоне указанных выше естественных интенсив-

ных помех неизбежно требует, чтобы предложить, а затем и вычислить некоторую принципиально новую характеристику, которая отличается от функционалов, связанных с помехами и энергией сигнала, а определяется топологией и размерностью принятого сигнала.

Введение в научный обиход радиофизики и радиолокации понятий «текстура», «детерминированный или динамический хаос», «фрактал» и «фрактальная размерность» позволило нам впервые в мире предложить, а затем и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) характеристики (инварианты), которые автором объединены под обобщенным понятием «топология выборки» [1–12].

Цель работы – дать краткий трактат развития и совершенствования авторских методов и алгоритмов новых топологических (в том числе и фрактально-текстурных) обнаружителей радиолокационных малококонтрастных объектов на фоне интенсивных помех от земной и морской поверхностей, а также в метеорологических осадках, и показать становление нового теоретического направления в современной радиолокации «Статистическая теория фрактальной радиолокации».

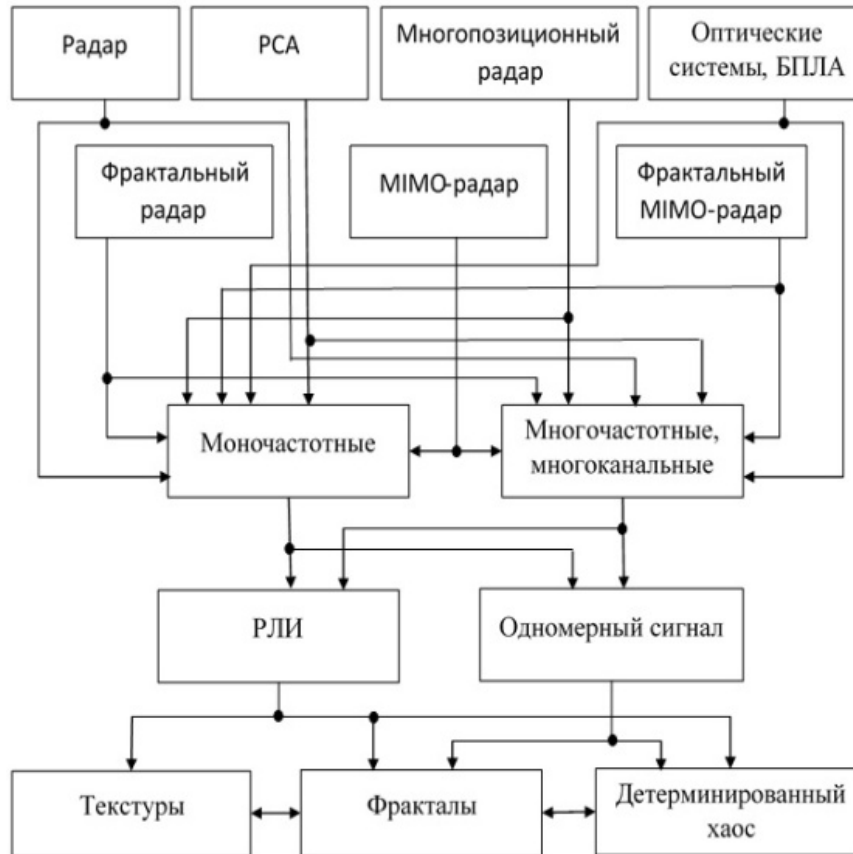


Рис. 1. Радиосистемы исходной информации

1. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация и фрактальные МIMO-радары как новый вид радиосистем

Для дальнейшей конкретизации проблем обнаружения слабых радиолокационных сигналов, считаем, что первичная информация поступает от различных радиосистем в виде одномерного сигнала и/или радиолокационного изображения (РЛИ) – рис. 1.

Упрощенная схема первичных радиосистем и рассмотрение РЛИ и одномерного сигнала в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) была представлена автором гораздо ранее. В настоящее время в схему рис. 1 добавлены фрактальный радиолокатор, МIMO-радар и фрактальный МIMO-радар, а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Концепция фрактального радиолокатора представлена в [1–5; 8; 11; 12], концепция фрактального МIMO-радара рассмотрена в [1–3; 5; 11; 12]. Технологии МIMO систем в общем случае подразумевает, что каждое радиотехническое устройство, участвующее в обмене данными, будет иметь по несколько пространственно распределенных приемных и пе-

редающих антенн. Основной идеей фрактальных МIMO-радаров является использование *фрактальных антенн* и *фрактальных обнаружителей* [1–12]. Способность фрактальных антенн одновременно работать на нескольких частотах или излучать широкополосный зондирующий сигнал дает резкое увеличение числа степеней свободы, что определяет многие важные преимущества такого вида радиолокации и значительно расширяет возможности адаптации. Для отражения этих особенностей автором в [1–3; 5; 11; 12] введен новый термин «*фрактально-частотные МIMO-системы (FF МIMO)*», что более полно отражает их физические возможности. Технологии МIMO, относящихся к пространственным многоканальным системам, дают большие возможности для применения авторского глобального фрактально-скейлингового метода обработки сигналов, разных алгоритмов и технологий фрактальных обнаружителей [1–12] на всех этапах синтеза информационных МIMO-систем.

Идеология фрактальной РЛС (рис. 1 и 2) базируется на разработанной автором концепции фрактальных радиосистем – рис. 3 [4; 8; 9].

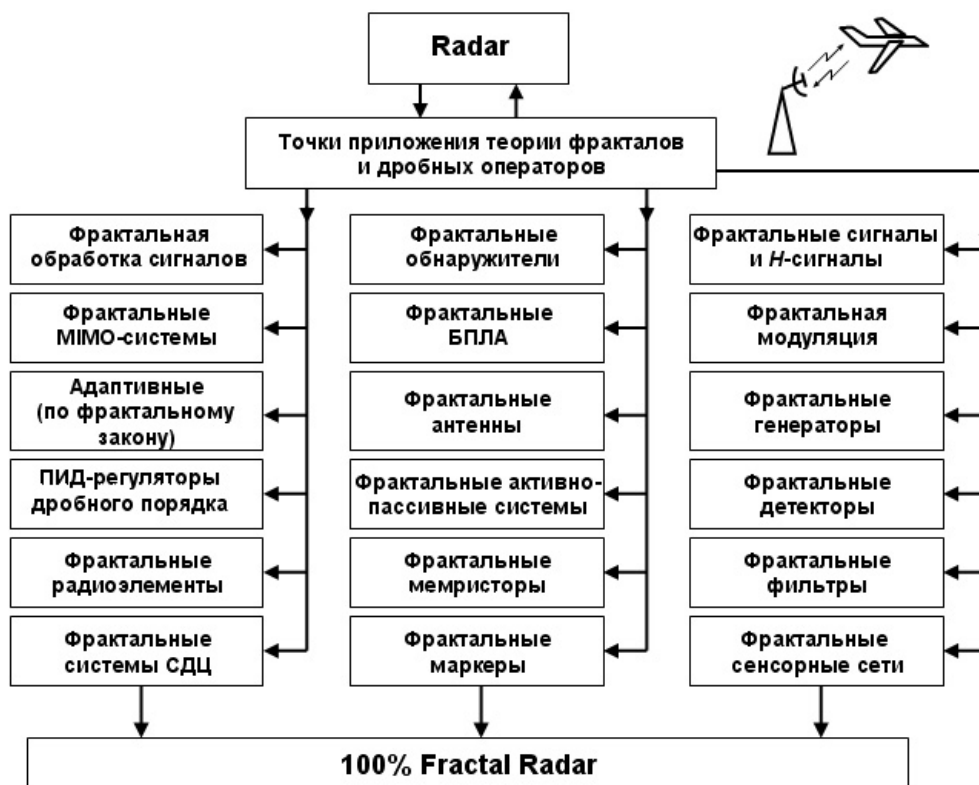


Рис. 2. Фрактальный радиолокатор



Рис. 3. Фрактальные радиосистемы

2. Новые признаки и топологические методы обнаружения малоконтрастных объектов на фоне интенсивных помех

Все существующие и применяемые автором на данный момент методы и топологические признаки обнаружения малозаметных объектов на фоне интенсивных отражений от моря, земли и метеорологических образований компактно представлены на рис. 4. Там же отмечены взаимосвязи между разнообразными признаками и методами. Работа над классификацией таких

методов, алгоритмов и признаков была начата автором в мае 2015 г. в Китае во время защиты проекта «Leading Talents of Guangdong Province» и закончена в начале 2016 г. в Китае. Тогда же была завершена в основном работа над книгой [2], где впервые в мире частично представлены приведенные здесь результаты.

Введение в США в 1973 г. понятия ансамбля текстурных признаков [13], позволило автору в 80-е годы впервые в мире рассчитать полные ансамбли из 28 текстурных признаков и провести их детальный синхронный анализ для реальных

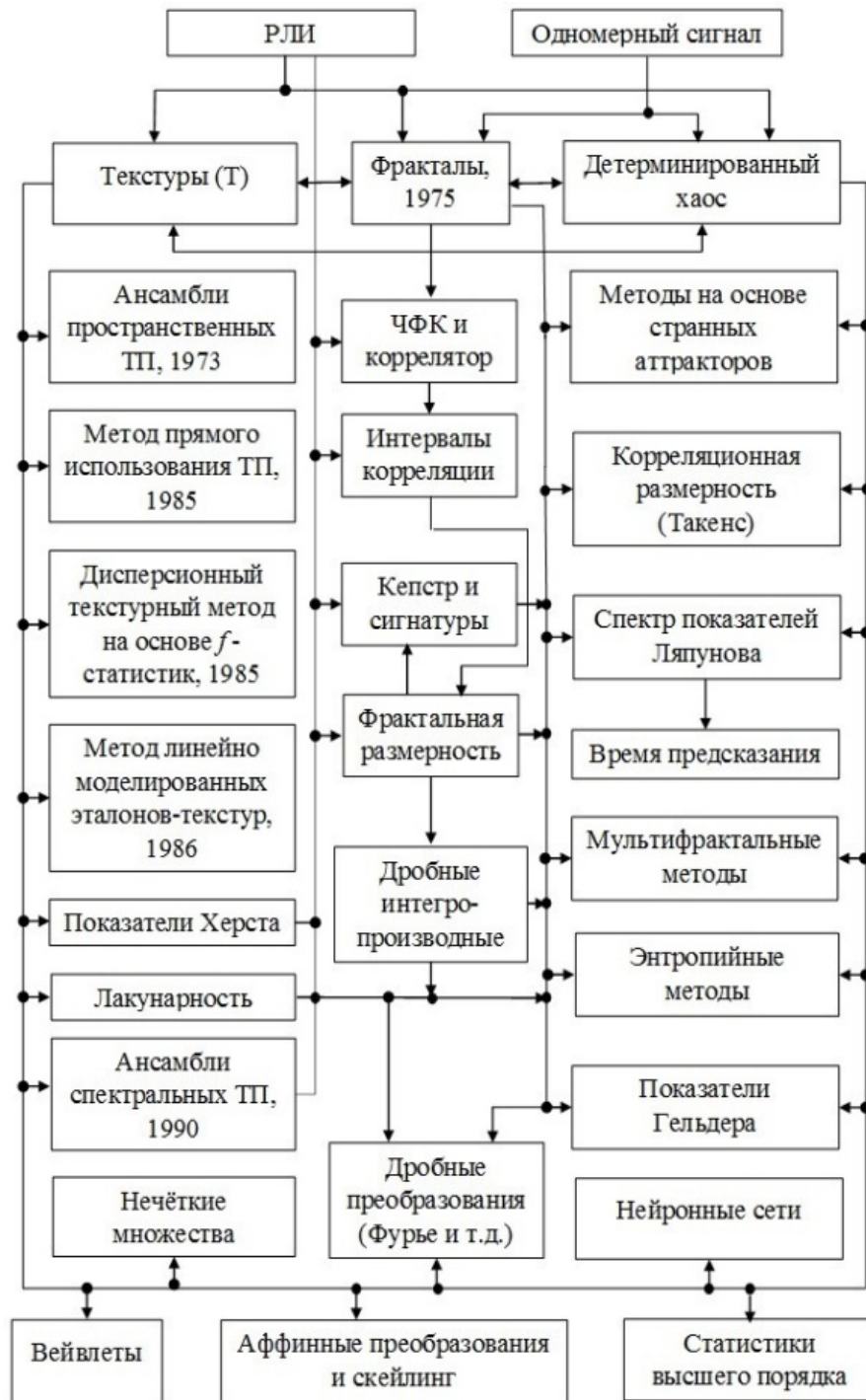


Рис. 4. Топологические признаки и методы обнаружения малококонтрастных объектов на фоне интенсивных помех

(оптических (АФС) и радиолокационных в диапазоне ММВ на волне 8,6 мм), а также синтезированных текстур на основе авторегрессионных моделей в зависимости от времени года [1; 2; 4].

Многолетние натурные эксперименты проводились автором совместно с ЦКБ «Алмаз» и другими ведущими промышленными организациями СССР. Все исследования велись на длинах волн $\lambda = 2,2$ и 8,6 мм (активное излучение) и $\lambda = 3,5$ мм (пассивное излучение). При выделении сигнала ММВ, рассеянного разнообразными зем-

ными покровами, автор еще в 1985 г. проводил первые эксперименты по селекции участков частотного и временного скейлинга, наличие которых и предполагают определенные фрактальные свойства принятой выборки. При этом была поставлена и решена задача расчета текстурных признаков с учетом дрейфа их сигнатур при изменении времени года. Были оптимизированы оценки влияния размера окон на точность определения текстурных признаков для изображений различных типов земных покровов.

В России длительное время эти работы по исследованию РЛИ земных покровов на ММВ с использованием текстурной информации фактически были единственными и актуальны до сих пор (особенно, в настоящее время) [1; 2; 4].

После расчета ансамблей текстурных признаков по оптическим и радиолокационным изображениям автором в 1985–1986 гг. были предложены методы и алгоритмы для обнаружения мало-контрастных целей на фоне интенсивных помех. К ним относятся метод прямого использования текстурных признаков (1985), дисперсионный метод на основе f -статистик (1985) и метод обнаружения с помощью линейно-моделированных эталонов – текстур (1986) [1–4; 8; 11]. Созданные методы обнаружения устойчиво работали при малых отношениях сигнал/помеха порядка единицы или меньше единицы (в размах). Насколько известно автору, за рубежом ни одного текстурного метода обнаружения мало-контрастных объектов предложено не было. Кроме того, важным достоинством текстурных методов обработки является возможность нейтрализации спеклов на когерентных изображениях земной поверхности, полученных с помощью РСА.

Методы детерминированного хаоса широко развиты, они представлены в правом столбце рис. 4. Отметим лишь, что алгоритмы радиолокационного обнаружения мало-контрастных объектов на фоне лесных массивов для радиолокатора на длине волны 2,2 мм опробованы нами в 2001 г. Был впервые реконструирован странный аттрактор, управляющий радиолокационным рассеянием миллиметровых радиоволн, и измерены его динамические и геометрические характеристики, а также вычислены фрактальные размерности D в зависимости от значения размерности вложения m . Наиболее точную оценку D получаем при изломе выпуклой зависимости $D(m)$, при этом нас не интересует усечение масштабов сверху и снизу.

По найденному максимальному показателю Ляпунова $\lambda_1 > 0,6$ бит/с было показано, что, если измеряем текущие условия с точностью до 1 бит, то потеряем всю предсказательную мощность во времени за 1,7 с. Поэтому *интервал предсказания* интенсивности отраженного сигнала больше классического времени корреляции τ примерно в 8 раз ($\tau \approx 210$ мс при скорости ветра 3 м/с). Интервал предсказания позволяет примерно оценить амплитуду следующих отсчетов в выборке и, как отмечено автором, может быть применен в практике радиолокации.

Расчеты показателя Херста H показали, что в двух случаях из трех процесс рассеяния миллиметровых волн лесными массивами соответствует персистентному процессу с $H > 0,5$, т. е. процессу с памятью.

3. Фрактальные топологические обнаружители мало-контрастных объектов в интенсивных помехах

В настоящее время чрезвычайный интерес проявляется к различным фрактальным и скейлинговым методам (рис. 4). Такие фрактальные исследования начались практически одновременно в России, США и Китае в 1980-е гг. [1–12]. Но в работах автора была сразу же поставлена глобальная задача обнаружения фрактального объекта на интенсивном фрактальном фоне с дополнительными гауссовскими и негауссовскими шумами и помехами [1–12]. Отличия и методология авторского подхода были настолько глубоки и необычны для того времени, что последовал ряд иностранных статей со ссылками на наши первые работы по фрактальной обработке сигналов и РЛИ (см., например, [14–16]) и их развитие.

Фрактальная размерность D или ее сигнатура $D(t, f, \bar{r})$ в различных участках изображения поверхности является одновременно и соответствующей мерой текстуры, т. е. свойств пространственной корреляции рассеяния радиоволн от соответствующих участков поверхности. Одновременно текстура определяет и *лакунарность* (рис. 4), которая использует статистику второго порядка для фрактальных изображений [1–12]. Лакунарность мала для плотной текстуры и велика, когда текстура крупнозернистая. Лакунарность Λ (по Мандельброту) определяется формулой

$$\Lambda = \left\langle \left(\frac{M}{\langle M \rangle} - 1 \right)^2 \right\rangle.$$

Здесь M – «масса» фрактального образования; $\langle M \rangle$ – ожидаемая «масса»; скобки $\langle \dots \rangle$ – усреднение по ансамблю данных. Рассмотрение лакунарности как признака обнаружения объектов проведено автором в 1997 г. Введение дробной меры и скейлинговых инвариантов вызывает необходимость работы со степенными вероятностными распределениями.

Основные принципы фрактального обнаружителя были открыты и предложены автором еще в 1980-х гг., а выход (также впервые в мире –

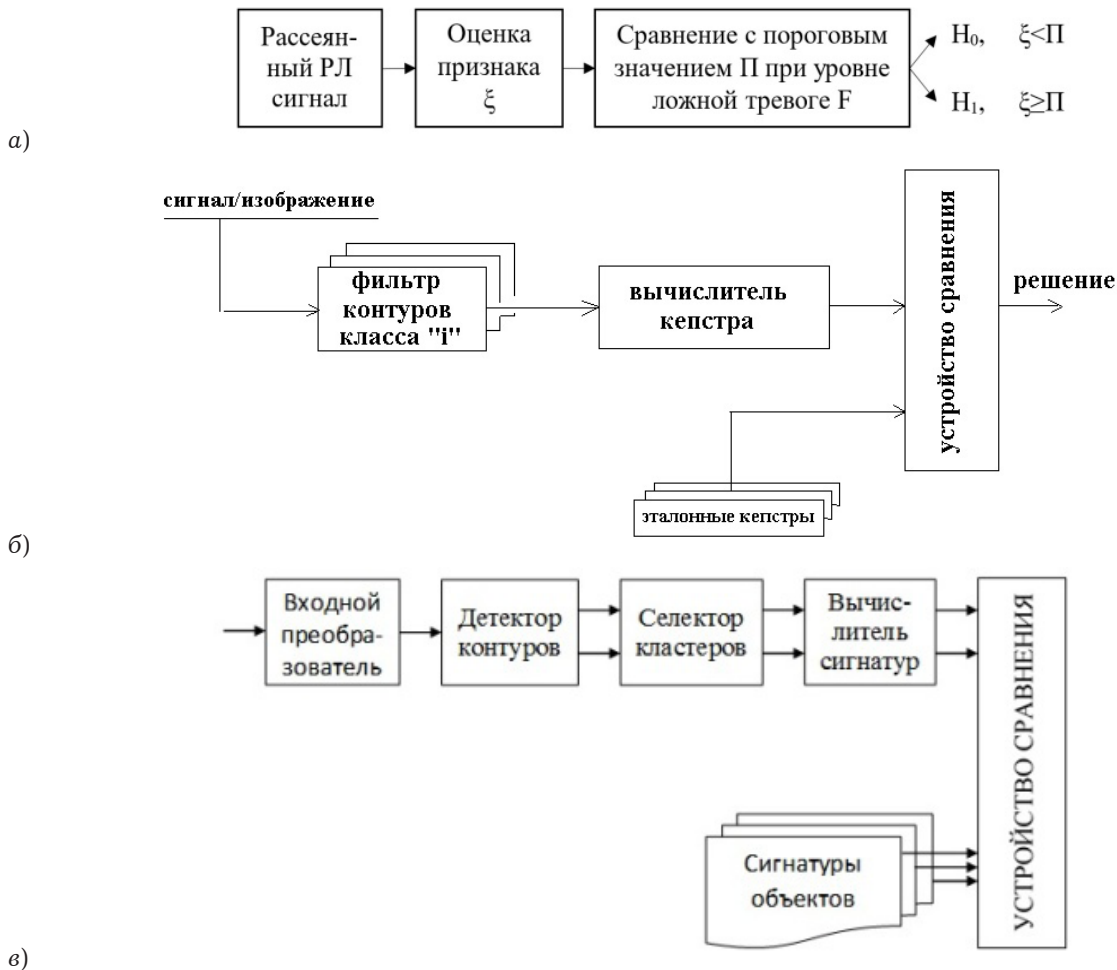


Рис. 5. Начальная (а) и детальные (б, в) структуры первых фрактальных обнаружителей

см. рис. 2 и 3) на действующий макет фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) произведен в 2003–2005 гг. [1–12]. Он демонстрировался в США в 2005 г. по проекту МНТЦ с ЦКБ «Алмаз» и ИРЭ РАН и заслужил очень высокую оценку специалистов [1; 2]. Была показана высокая устойчивость предложенных нами оригинальных алгоритмов фрактально-скейлингового обнаружения.

Некоторые первоначальные варианты обобщенных структур радиолокационных фрактальных обнаружителей представлены на рис. 5. Схематический вид предполагаемого обнаружителя приведен на рис. 5, а. По принятому радиосигналу или изображению определяется набор текстурных или фрактальных признаков ξ . Затем в пороговом устройстве при значении порога Π и определенном уровне вероятности ложной тревоги F выдается решение о наличии сигнала H_1 или его отсутствии H_0 . В качестве признаков ξ может быть использованы значения фрактальной размерности D , показатели Херста $0 \leq H \leq 1$

для многомасштабных поверхностей, показатели Гельдера, значения лакуарности и т. д. Показатель Херста равен $H = 3 - D$ для РЛИ и $H = 2 - D$ для одномерного сигнала.

Структурная укрупненная схема фрактального обнаружителя радиолокационных сигналов показана на рис. 5, б. В ее состав входят фильтр контуров и вычислитель *фрактальных кепстров*. Дальнейшая конкретизация структурной схемы ФНОРС приведена на рис. 5, в. Входной сигнал (РЛИ, одномерная выборка) поступает на входной преобразователь. Его назначение состоит в предварительной подготовке анализируемой выборки. Данная подготовка может включать в себя либо *принудительное зашумление* (в случае низкой разрешающей способности аналого-цифрового преобразователя радиолокатора) или, например, *уменьшение контраста* – в случае выборки с высоким динамическим диапазоном.

Принципиальным моментом является то, что из схем на рис. 5 в дальнейшем можно уже конкретно синтезировать абсолютно все виды дру-



Рис. 6. Фрактальный обнаружитель на основе показателя Херста



Рис. 7. Фрактальный обнаружитель с авторегрессионной оценкой спектра помехи и показателя Херста

гих фрактальных обнаружителей. (Специально отмечу, в последнее время стали предлагаться «новые» схемы фрактальных обнаружителей, авторы которых, не разбираясь во фрактальной радиофизике и радиолокации, претендуют на что-то новое, не зная просто основ фрактального анализа и динамического хаоса). *Приоритет в этой области давно (более 35 лет) и прочно принадлежит в России и в мире автору и ИРЭ им. В.А. Котельникову РАН.* Авторская концепция (рис. 3) фрактальных радиосистем и фрактальных устройств позволяет синтезировать и другие виды фрактальных обнаружителей – рис. 6 и 7.

Обнаружитель на основе показателя Херста (рис. 6) работает при использовании одной или нескольких зондирующих частот радиолокатора. Показатель Херста H отражает нерегулярность фрактального объекта. Чем меньше показатель H , тем более нерегулярный фрактальный объект. Так что, когда появляется объект, показатель Херста становится большим.

На рис. 7 показана схема фрактального обнаружителя с авторегрессионной оценкой спектра мощности помехи от земной поверхности. Авторегрессионная модель представляет собой линейную модель прогнозирования, которая оценивает спектр мощности помехи от поверхности и формируют его автокорреляционной матрицы.

Уравнение авторегрессии описывает связь между текущим и предыдущими отсчетами дискретного случайного процесса. Ранее нами 80-х гг. решалась задача авторегрессии на основе канонической системы уравнений Юла-Уокера с преобразованием гистограмм яркости. Таким образом, в обнаружителе на рис. 7 используются реальные фрактальные свойства спектра мощности на основе авторегрессионного спектрального оценивания, применяющиеся для обнаружения малококонтрастных объектов. Отмечу, что схемы, подобные рис. 6 и 7, **часто исследуются в настоящее время в Китае** [2]. Примерно такие обнаружители были использованы нами при текстурной обработке АФС и РЛИ еще в 80-е гг. XX в. Замечу, что в качестве статистики обнаружения нельзя рассматривать корреляционную размерность (см. рис. 4), требующую наличия выборки большого размера, что нереально в радиолокации.

4. Прорывные фрактально-скейлинговые технологии: создание, развитие и применение фрактальных методов для задач радиолокации и формирования основ фрактальной элементной базы

За 35 лет научных исследований созданный автором глобальный фрактально-скейлинговый

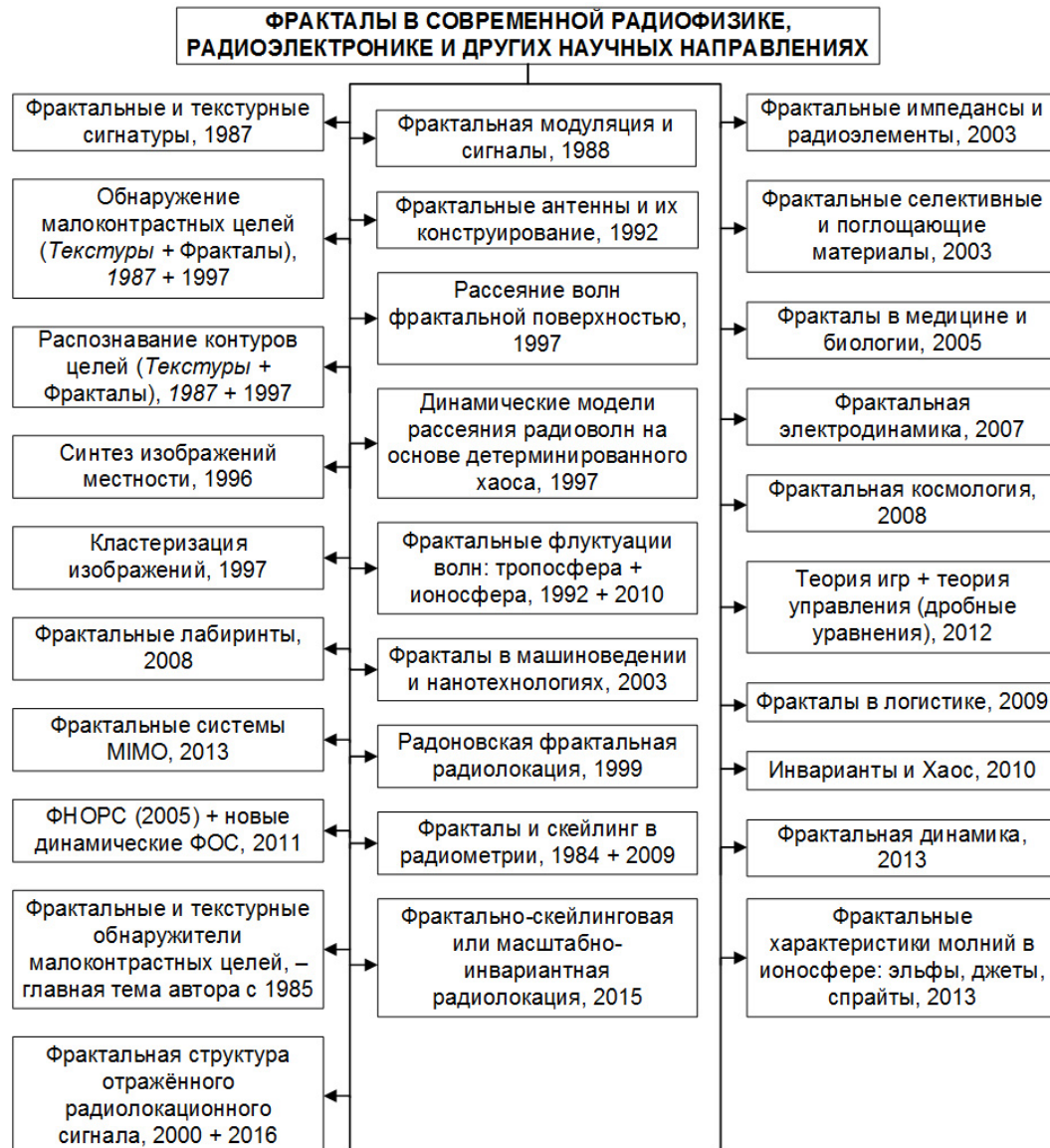


Рис. 8. Эскиз развития автором новых информационных технологий на основе фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для нелинейной физики и радиоэлектроники

метод полностью оправдал себя, найдя многочисленные приложения (см. рис. 8). Это своего рода вызов времени. Здесь за меня говорят только факты!

Автор ввел фундаментальный принцип «максимум топологии при минимуме энергии» для принимаемого сигнала, позволяющий более эффективно использовать преимущества фрактально-скейлинговой обработки информации, и неуклонно проводит его в практику [1–12; 16–23].

5. Новое направление в теории статистических решений

Быстрое развитие теории фракталов в радиолокации и радиофизике обусловило актуальную задачу становления нового теоретического на-

правления в современной радиолокации [1–12; 16–23]. Это направление можно обозначить как «Статистическая теория фрактальной радиолокации».

Оно включает (по крайней мере, на начальном первом этапе) следующие основные вопросы:

1. Теория целочисленной и дробной меры.
2. Конструкции Каратеодори в теории меры.
3. Мера Хаусдорфа и размерность Хаусдорфа-Безиковича.
4. Теория топологических пространств.
5. Теория размерности.
6. Линия с точки зрения математика.
7. Недифференцируемые функции и множества.
8. Основы теории вероятности.
9. Устойчивые вероятностные распределения.

10. Теория дробного исчисления.
11. Классическое броуновское движение.
12. Обобщенное броуновское движение.
13. Фрактальные множества.
14. Аномальная диффузия.
15. Основные критерии теории статистических решений в радиолокации.
16. Распространение волн во фрактальных случайно-неоднородных средах.
17. Рассеяние волн обобщенной броуновской поверхностью.
18. Рассеяние волн поверхностью на основе недифференцируемых функций.
19. Дифракталы.
20. Кластерный анализ.
21. Теория и схемотехника фрактальных обнаружителей.
22. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация.
23. Многопозиционная радиолокация.
24. ММО-радиолокация.
25. Когнитивная радиолокация.

Данный список изучаемых вопросов, естественно, подлежит расширению и уточнению в будущем.

Заключение

Автором созданы, развиты и применены фрактально-скейлинговые методы для задач радиолокации и формирования основ фрактальной элементной базы [1–12; 16–23]. Замечу, что синтез топологических (фрактальных, текстурных, хаотических и т. д.) обнаружителей позволяет по-новому взглянуть на проблему обнаружения сверхслабых реальных сигналов. В результате наше давнее открытие 80-х гг. приобретает смысл *обобщенного обнаружения*. Таким образом, чисто энергетические и чисто топологические обнаружители не противоречат и не дублируют, а дополняют друг друга.

Благодаря топологическим обнаружителям удастся по-новому взглянуть на процесс энергетического обнаружения и обнаружить в нем определенные существенные недостатки. Вследствие этого топологическое обнаружение приобретает не меньшую, если не большую, ценность для теории и практики, чем энергетическое обнаружение. Теория топологического обнаружения сформирована автором в [20]. Она особенно необходима для целей переосмысления прежней теории и получения на этой основе новых результатов, не доступных для традиционных

представлений радиолокации. Таким образом, топологическое обнаружение открывает двери в совершенно новую область теории статистических решений и позволяет скорректировать бытующие в этой области представления, что имеет важное теоретическое и практическое значение.

Приведенные здесь достаточно подробные рассуждения должны способствовать лучшему пониманию предложенной автором принципиально новой трактовки проблемы радиолокационного (и не только!) обнаружения.

Таким образом, авторскими работами за более чем 35 лет, практически с «нуля», заложены фундаментальные основы того, что будет применено в последующие десятилетия. Не результаты, не конкретные решения представляют самую большую ценность, а именно метод решения, подход к нему. Метод создан автором и показан в [1–12; 16–23]. Автор поставил изложенные выше вопросы еще в 1980 г. и более 35 лет успешно работает над их разрешением и развитием. Тщательные библиографические исследования доказывают полный и абсолютный приоритет автора по всем «фрактальным» направлениям в радиолокации и радиофизике (список авторских работ с учениками насчитывает более 800 публикаций, в том числе 23 монографии).

Список литературы

1. Potapov A.A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015 // in The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / ed. by C. Skiadas. Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. P. 195–218.
2. Fields, Fractals, Control and Low - Contrast Target Detection / A.A. Potapov [et al.]; ed. by A.A. Potapov. China, 2016, в печати.
3. Potapov A.A. The fractal - scaling radiolocation: formation history 1980–2015 // Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM). 2016. № 3. P. 317–331.
4. Potapov A.A. The textures, fractal, scaling effects and fractional operators as a basis of new methods of information processing and fractal radio systems designing // Proc. SPIE. 2009. V. 7374. P. 73740E-1–14.
5. Potapov A.A. New conception of fractal radio device with fractal antennas and fractal detectors in the MIMO systems // Book of Abstracts 9th Int. Conf. (CHAOS'2016) on Chaotic Modeling, Simulation and Applications (23–26 May 2016, London, U.K.). London: University of London. 2016. P. 85.

6. Potapov A.A., German V.A. Detection of artificial objects with fractal signatures // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1998. V. 8. № 2. P. 226–229.
7. Potapov A.A., German V.A. Fractals, fractal target selection and fractal antennas // *Proc. 1st Int. Workshop on Mathematical Modeling of Physical Processes in Inhomogeneous Media*, (Mexico, Guanajuato, Gto., March 20–22, 2001). Guanajuato. 2001. P. 44–46.
8. Potapov A.A. New information radiophysical technologies fractal in radiolocation: fractal and synergetic // *Proc. of 28th ESA Antenna Workshop on Antenna Systems and Technologies* (Noordwijk, The Netherlands, 31 May – 3 June 2005). Noordwijk: ESTEC. 2005. Pt. 2. P. 1047–1050.
9. Potapov A.A. Can we build an adaptive fractal radio system? // *Proc. PIERS 2009 in Moscow «Progress in Electromagnetics Research Symp.»* (18–21 August, 2009, Moscow, Russia). Cambridge, MA: Electromagnetics Academy. 2009. P. 1798–1802.
10. Potapov A.A. The global fractal method, fractal paradigm and the fractional derivatives method in fundamental radar problems and designing of revolutionary radio signals detectors // *Zbornik radova Konferencije MIT – Matematicke i informacione tehnologije* (Vrnjackoj Banji od 5. do 9. septembra i u Becicima od 10. do 14. septembra 2013. godine). Kosovska Mitrovica: Prirodno-matematski fakultet Ulverziteta u Pristini (Serbia), 2014. P. 539–552.
11. Potapov A.A. Fractals, scaling and fractional operators in modern physics and radio engineering // *Book of Abstracts of the Int. Conf. XIV Khariton's Topical Scientific Reading «High - Power Pulsed Electrophysics»* (April 21–25, 2014, Sarov, Russia). Sarov: RFNC-VNIIEF. 2014. P. 81–82.
12. Potapov A.A. Fractal radar: towards 1980–2015 // *Proc. of CHAOS 2015 Int. Conf.* (26–29 May 2015, Paris, France). Paris: Henri Poincaré Institute. 2015. P. 559–573.
13. Haralick R.M., Shanmugan K., Dinstein I. Textural features for image classification // *IEEE Trans.* 1973. V. SMC-3. № 6. P. 610–621.
14. Du G. Detection of sea-surface radar targets based on fractal model // *Electronics Letters*. 2004. V. 40. № 14. P. 906–907.
15. Using fractal dimension to target detection in bistatic SAR data / S. Cherouat [et al.] // *Signal, Image and Video Processing*. 2015. V. 9. № 2. P. 365–371.
16. Потапов А.А. У истоков фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации (1980–2015) // *Радиотехника*. 2015. № 8. С. 95–108.
17. Потапов А.А. Фрактально-скейлинговые или масштабно - инвариантные принципы радиолокации и их применение в радиолокаторах с синтезированной апертурой // *Сб. трудов III Всероссийской НТК «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО и комплексов управления и обработки информации: «РТИ Системы ВКО – 2015»* (Москва, ОАО «РТИ им. академика А.Л. Минца», 28 мая 2015 г.). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 573–590.
18. Потапов А.А. Синтез новых видов динамических текстурно-фрактальных обнаружителей малококонтрастных объектов с выделением их контуров и локализацией координат на фоне интенсивных помех от поверхности земли, моря и осадков // *Материалы 26-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. КрыМиКо'2016»* (Севастополь, Крым, Россия, 4–10 сентября 2016 г.). М.; Минск; Севастополь: КНТЦ им. А.С. Попова, 2016. Т. 12. С. 2625–2636.
19. Потапов А.А. О стратегических направлениях в синтезе новых видов радиолокационных текстурно-фрактальных обнаружителей малококонтрастных объектов с выделением их контуров и локализацией координат на фоне интенсивных помех от поверхности земли, моря и осадков // *IV Всероссийская НТК «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения воздушно-космической обороны и комплексов управления и обработки информации (РТИ Системы ВКО – 2016)»*, посв. 100-летию НИИДАР и 70-летию РТИ им. академика А.Л. Минца: Программа и тезисы (Москва, 2–3 июня 2016 г.). М.: ОАО «РТИ им. академика А.Л. Минца», 2016. С. 12.
20. Потапов А.А. Стратегические направления в синтезе новых топологических радиолокационных обнаружителей малококонтрастных объектов на фоне интенсивных помех от земли, моря и осадков // *Нелинейный мир*. 2016. Т. 14. № 3. С. 6–22.
21. Потапов А.А. Обработка фрактально-скейлинговыми и интегральными методами нечетких изображений, полученных с беспилотных летательных аппаратов в режиме пролета над неоднородной местностью // *Радиотехника*. 2016. № 7. С. 119–124.
22. Potapov A.A. Strategic directions in synthesis of new topological radar detectors of low-contrast targets against the background of high-intensity noise from the ground, sea and precipitations // *Proc. 2016 CIE Int. Conf. on Radar «Radar 2016»* / ed. Wu Shunjun (China, Guangzhou, Oct. 10–12, 2016). Beijing: Chinese Institute of Electronics (CIE), 2016. P. 692–696.
23. Potapov A.A. Fractality and scaling problems in radio location and radio physics with new methods of detection of low-contrast targets against a background of high intensity noise // *Proc. of the XV Int. Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in the Modern World»* (United Kingdom, Oxford, 6–8 September 2016). Oxford: Oxford University Press, 2016. P. 314–322.

Analysis and synthesis of topological radar detectors of low-contrast targets against the background of high intensity noise from the earth, sea and precipitation as the new branch of the statistical decision theory

A.A. Potapov

The main ideas and strategic directions in synthesis of fundamentally new topological radar detectors of low-contrast objects have been considered. The objects detection is conducted against the background of reflections from the ground, sea and precipitations. The new topologic signs and methods of detection of low-contrast objects against the background of high-intensity noise are presented. The methods are based on the textural and fractal analysis and also on the theory of deterministic chaos. The main purpose of this work is to interpret the main directions of radio physics, radio engineering and radio location in «fractal» language that makes new ways and generalizations on future promising radio systems. The new kind and approach of up-to-date radiolocation: fractal-scaling or scale-invariant radiolocation has been proposed.

Keywords: texture, fractal, lacunarity, Hurst exponent, signals detector, low-contrast target, radar, fractal – frequency MIMO – Systems.

Неганов, В.А.

Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой;
под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.

ISBN 5-256-01812-4

В.А. Неганов, Г.П. Яровой

**ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ
УСТРОЙСТВ СВЧ**



УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.