

Новое направление в радиофизике: фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация

А.А. Потапов

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

Предложен новый вид и метод современной радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации, а также в ее математическом аппарате. В основе созданного автором впервые в России и в мире научного направления лежит концепция фрактальных радиосистем, топология выборки, глобальный фрактально-скейлинговый метод и фрактальная парадигма. Данными вопросами автор занимается ровно 35 лет. Полученные автором результаты крупной научной и практической значимости были опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума Российской академии наук (2008, 2010, 2012, 2013 г.) и в докладе Правительству Российской Федерации (2012 г.).

Ключевые слова: фрактал, скейлинг, дробный оператор, динамический хаос, радиофизика, радиолокация, радиотехника, радиосистемы.

Введение

Богатство содержания и роль классической статистической радиофизики, радиотехники и радиолокации дает одновременно и громадные возможности для выработки альтернативных методов. В данной работе приведенные альтернативные решения в проблемах современной радиолокации базируются на идеях и методах нового научного фундаментального направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: Проектирование фрактальных радиосистем». Данное направление инициировано автором примерно с 1980 г. в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и к настоящему времени широко развито в его работах [1–3].

Интенсивное развитие современной радиолокационной техники и технологии, ставит перед теорией радиолокации и новые требования [1]. Одни из этих требований не затрагивают основ теории и сводятся в основном к увеличению точности, улучшению существующих и разработке новых методов расчета. Другие же являются более фундаментальными и касаются самих основ теории радиолокации. Эти последние требования представляются наиболее важными как в теоретическом, так и в практическом плане.

Необходимо сказать, что вся современная радиотехника базируется на классической теории целочисленной меры и целочисленного исчисления.

Таким образом, исторически «за бортом» оказалась обширная область математического анализа, называемая дробным исчислением, имеющая дело с производными и интегралами произвольного (вещественного или комплексного) порядка, а также и вся теория фракталов (!).

Отметим, что радиолокационные станции (РЛС) могут использоваться для поиска и обнаружения целей, для связи, для опознавания целей, для обнаружения излучений, для сопровождения и облучения целей, для обзора (картографирования) земной поверхности, трансляции информации в целях навигации, для создания помех и для обеспечения научных исследований (например, в радиоастрономии).

Создание фрактально-скейлингового метода, фрактальной парадигмы и фрактальной радиолокации – основная цель моей научной жизни. В связи с этим, мне было особенно приятно выиграть в конкурсной борьбе правительственный грант Китая в Пекине 28 – 30 апреля 2015 года по фрактально-скейлинговым методам обработки сигналов, изображений и полей в этом юбилейном для меня году, – ровно 35 лет моей научной деятельности в области фракталов и их применения в радиофизике, радиолокации, радиотехнике, теории антенн, электродинамике, электронике, теории управления и т. д.

За последние годы в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН значительно расширен масштаб работ по

внедрению фрактально-скейлингового метода в радиолокацию. В институте проводятся исследования как теоретического, так и практического характера. Автор является основателем Российской научной школы фрактальных методов, хорошо известной в мире, а также Президентом совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (2011 г.), также автор – почетный профессор Джинанского университета (Китай, 2011 г.). Актуальность этих работ для автора была очевидна с самого начала, для остальных – только сейчас.

Фрактальная радиофизика и фрактальная радиолокация имеют крупное значение для целого ряда как теоретических, так и практических проблем. Вопросы рассеяния и распространения электромагнитных волн, обработки сигналов, полей и изображений, теории антенн и др. в настоящее время невозможно ставить и решать на современном уровне науки без применения теории фракталов и скейлинга.

Предлагаемый новый метод радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговый или масштабно-инвариантный метод, основанный на научных исследованиях, проводимых автором 35 лет в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, является эффективным при малых и сверхмалых отношениях сигнал/шум (сигнал/помеха) и при пониженных контрастах между объектом и фоном. Основы теории фрактальной радиолокации и сопутствующие математические и физические вопросы подробно изложены автором в монографиях [2; 3]. Там же введены и новые для радиолокации понятия и определения, связанные с широким кругом теоретических вопросов фрактальной обработки информации.

1. Фрактально-скейлинговые методы и инварианты в радиофизике и радиолокации

В настоящее время в радиофизике, радиоэлектронике и обработке многомерных сигналов, как отмечено выше, преимущественно, привычно и повсеместно используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссовская статистика, марковские процессы и т. п. [1]. Замечу, что теория марковских процессов достигла уже своего насыщения и исследования проводятся на уровне рез-

кого усложнения синтезированных алгоритмов. Улучшение классических радиолокационных обнаружителей сигналов и их математическое обеспечение, так же, по сути, достигло своего насыщения и предела. Это заставляет изыскивать принципиально новые пути решения проблемы увеличения чувствительности или повышения дальности действия различных радиосистем.

Как хорошо известно, советская «нелинейная» школа физиков, математиков и механиков в XX веке в области теории колебаний и радиофизики завоевала ведущее место в мировой науке. В основе данной работы лежат многолетние идеи автора о необходимости перехода в науке к введенному им «фрактальному мышлению». На деле это означает, перефразируя слова С.М. Рытова о «нелинейном мышлении» из его интервью от 19 февраля 1991 г. [4, с. 246], найти математические средства, научиться мыслить понятиями этой математической теории, сделать эти понятия своими, привыкнуть к ним. Тогда и появится новая интуиция.

Возвращаясь к первым страницам данной статьи, следует отметить, что математический аппарат уже существует. Это – дробное исчисление и теория фракталов [2; 3; 5]. Дробный математический анализ имеет давнюю историю и чрезвычайно богатое содержание.

Одновременно замечу, что в науке часто бывает так, что математический аппарат играет роль «прокрустова ложа» для идеи. За сложной математической символикой и ее значениями бывает трудно разглядеть совершенно простую идею.

В частности, одну из таких простых идей и выдвинул *первым в мире* автор в конце 70-х гг. XX в., а именно, предлагая ввести в широкую практику радиофизики, радиотехники и радиолокации фракталы, скейлинг и дробное исчисление. После долгих интеллектуальных битв данная идея полностью показала свои преимущества и положительно воспринята большинством думающего научного сообщества. Сейчас по данному фундаментальному направлению список авторских работ с учениками насчитывает более 700 публикаций, в том числе 20 монографий.

С созданием в 70-х гг. XX в. **фрактальной геометрии** (Б. Мандельброт, 1924-2010 г.г.) в науку и технику начали стремительно проникать идеи дробных размерностей, дробных операторов, недифференцируемых функций, скейлинга. Данные математические понятия, объединенные

с физикой фракталов, образуют новые «мостики», довольно неожиданные, между не только смежными дисциплинами, что зачастую приводит к эффективным методам решения задач, иногда трудно разрешимых на данном уровне развития классических научных направлений.

В принципе, фракталы и дробные операторы невозможны друг без друга [2; 3]. Дробное исчисление имеет богатую и где-то даже драматическую историю. Первая зафиксированная в истории попытка обсуждения такой идеи содержится в переписке Г. Лейбница с Я. Бернулли и Г. Лопиталем. Отметим, что громадное значение имели работы член-корреспондента Петербургской Академии наук А.В. Летникова (1(13).01.1837 – 27.02.(10.03).1888), который за время своей 20-летней научной деятельности разработал полную теорию дифференцирования с произвольным указателем. В настоящее время его работы преданы почти полному забвению, поэтому в [6] воспроизведен основной цикл работ А.В. Летникова (к 175-летию со дня его рождения) и много биографических материалов, ставших библиографической редкостью. Эта область математики – приоритет и гордость России!

Уравнения с дробными производными описывают *немарковские процессы с памятью*. Именно сегодня они востребованы и в теории, и на практике.

Относительно радиолокации. Радиолокация с момента своего зарождения прошла большой и сложный путь развития. Радиолокатор – одно из сложнейших устройств, создавался на самой заре радиоэлектроники [1; 7; 8], и он стимулировал разработку и создание важных устройств, которые чрезвычайно широко используются сегодня. Радиолокатор и по сей день является одним из важнейших средств и используется всеми странами мира. И сегодня работа по совершенствованию радиолокаторов и их технологий ведется постоянно и ей не видно конца. Прогресс в радиолокационной технике был связан, в основном, с применением статистической теории обнаружения сигналов и оценки их параметров на фоне шумов и помех. В основе этой теории лежат допущения теории статистических решений и других разделов классической математики. Проблема обнаружения объекта сводится к обнаружению сигнала, излучаемого или переизлучаемого этим объектом на фоне различного рода случайных шумов и помех. При этом проблемы оптимальной обработки радиолока-

ционных сигналов остаются в центре внимания специалистов. В классической теории общепринято, что помехи на основе первой центральной предельной теоремы описываются гауссовским марковским процессом.

В настоящее время уже совершенно очевидно, что применение идей масштабной инвариантности – «скейлинга» совместно с теорией множеств, теорией дробной размерности, общей топологией, геометрической теорией меры и теорией динамических систем открывают большие потенциальные возможности и новые перспективы в обработке многомерных сигналов и в родственных научных и технических областях. Другими словами, полное описание процессов современной обработки сигналов и полей невозможно с помощью формул классической математики [2; 3; 9–12]. При фрактально-скейлинговом подходе, предложенном и развиваемом автором в течение 35 лет, описание и обработка сигналов и полей проводится исключительно в пространстве дробной меры с применением гипотез скейлинга и распределений с тяжелыми хвостами.

Основное внимание будет уделено принципам, а не деталям, которые подробно изложены в [2; 3; 9–12]. Для понимания достаточно владеть основными понятиями общей теории множеств, теории размерности и теории вероятностей.

2. Мера и размерность Хаусдорфа

Основным свойством фракталов является нецелое значение их размерности. Развитие теории размерности началось с работ Пуанкаре, Лебега, Брауэра, Урысона и Менгера. В различных областях математики возникают множества в том или ином смысле пренебрежимо малые и неразличимые в смысле меры Лебега. Для различения таких множеств с патологически сложной топологической структурой необходимо привлекать нетрадиционные характеристики малости, например, емкость, потенциал, меры и размерность Хаусдорфа и т. п. Наиболее плодотворным оказалось применение дробной размерности Хаусдорфа, тесно связанной с понятиями энтропии, фракталами и странными аттракторами в теории динамических систем [2; 3].

Понятие меры и размерность Хаусдорфа – одно из тех обязательных понятий, не усвоив которых органически, ни один исследователь не может стать специалистом по фракталам и детерминированному хаосу. Эта дробная размерность определяется p – мерной мерой с произ-

вольным вещественным положительным числом p , которую ввел Хаусдорф в 1919 г.

Размерность Хаусдорфа $\dim_H A$ определяется через хаусдорфову α - меру множества в виде

$$mes_{H,\alpha} = \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{\Gamma(A)} [d(U)]^\alpha, \quad (1)$$

где нижняя грань \inf берется по конечным или счетным покрытиям Γ множества A шарами U диаметрами $d(U) < \varepsilon$. Размерность $\dim_H A$ определяется как такое число α_0 , что мера (1) при $\alpha > \alpha_0$ равна нулю, а при $\alpha < \alpha_0$ – бесконечности.

В общем случае понятие меры не связано ни с метрикой, ни с топологией. Однако мера Хаусдорфа может быть построена в произвольном метрическом пространстве на основе его метрики, а сама размерность Хаусдорфа связана с топологической размерностью.

3. Однородные функции и скейлинг

К обсуждению идей скейлинга полезно подходить с точки зрения однородных функций. Как следует из [13], функция одного или нескольких переменных, удовлетворяющая условию, что при одновременном умножении всех аргументов функции $f(x, y, \dots, u)$ на один и тот же произвольный множитель λ значение функции умножается на некоторую степень α этого множителя, называется *однородной*:

$$f(\lambda x, \lambda y, \dots, \lambda u) = \lambda^\alpha f(x, y, \dots, u), \quad (2)$$

где α – порядок однородности, или измерение однородной функции.

Например, степенная функция $f(t) = bt^\alpha$ удовлетворяет соотношению однородности (2) или *скейлингу*:

$$f(t) = \lambda^\alpha f(\lambda t) \quad (3)$$

при всех положительных значениях масштабного множителя λ . Естественно, что степенная функция, как и многие другие функции, удовлетворяющие скейлинговому соотношению (3), не являются фрактальными кривыми. Однако многие виды фракталов (масштабно-инвариантные фракталы) обладают скейлинговой симметрией. Однородные функции обладают многими свойствами, делающими их весьма привлекательными для приближенного описания реальных процессов и объектов.

Различают: (1) – положительно однородные функции, для которых равенство (2) выполняется только для положительных λ ($\lambda > 0$), и (2) – абсолютно однородные функции, для которых выполняется равенство:

$$f(\lambda x) = |\lambda|^\alpha f(x). \quad (4)$$

Из дифференциальных свойств однородных функций отметим лемму Эйлера:

«Однородные функции пропорциональны скалярному произведению своего градиента на вектор своих переменных с коэффициентом равным порядку однородности:

$$\vec{x} \cdot \nabla f(\vec{x}) = \alpha f(\vec{x}). \quad (5)$$

Однородные функции играют очень важную роль в описании термодинамики фазовых переходов, в описании статистических свойств перколяции, в турбулентности, в современной ренормгрупповой теории критических явлений и т. п. Очень часто, из единственной посылки универсальности флуктуирующих систем с помощью скейлинговых оценок можно сделать далеко идущие выводы.

В [13] введена специально нормированная степенная функция

$$f_\lambda(t) = \frac{1}{\Gamma(\lambda + 1)} t^\lambda, \quad t > 0, \quad (6)$$

которая называется стандартной степенной функцией.

Эти функции самоподобные (у них нет характерного масштаба, что естественно приводит к концепции *фракталов*); они обладают полугрупповым свойством; в нулях гаммы-функции $\Gamma(\lambda + 1)$ они определены как обобщенные функции, выражающиеся через δ -функцию и ее производные $\delta^{(\lambda)}(t)$; их трансформанты Лапласа также принадлежат семейству степенных функций с точностью до постоянного множителя; в отличие от экспоненциальных функций, обладающих свойством инвариантности с точностью до постоянного множителя, степенные функции таким свойством не обладают (отсюда, свойство *памяти*); к ним применимы тауберовы теоремы, позволяющие по поведению преобразования Лапласа в области нуля однозначно определить асимптотическое поведение таких функций при $t \rightarrow \infty$ (эти теоремы верны и при условии, когда нуль и бесконечность меняются местами).

4. Степенные законы

Среди объектов материального мира самоподобие очень широко представлено [2; 3; 9; 14]. Математическим выражением самоподобия являются степенные законы. Данным законам подчиняются как увеличивающиеся в размерах объекты, например, города, так и распадающиеся на отдельные фрагменты, например, камни.

Единственное неперемное условие выполнения степенного самоподобного закона: отсутствие у данного вида объектов внутреннего масштаба. Действительно, не бывает реальных городов с числом жителей меньше 1 или больше 10^9 . Точно также размер камня не может быть меньше молекулы, или больше континента. Таким образом, если самоподобие и беспредельно, то только в ограниченных областях. Тот факт, что однородные степенные законы не имеют естественных внутренних масштабов обуславливает еще один феномен – *скейлинг* или *масштабную инвариантность*.

Можно сказать, что степенные законы с целочисленными или дробными показателями являются *генераторами самоподобия*. Как отмечено в [14, с. 165]: «Самоподобию, в конце концов, все равно, целочисленный у нас показатель или нет. Нередко дробный показатель содержит важный ключ к решению запутанной головоломки». В математике на основе степенных функций построено дробное исчисление, введено понятие полюсов и создана теория вычетов, построена теория асимптотических разложений, введены устойчивые распределения.

Познавательная ценность теории вероятностей раскрывается только предельными теоремами [15]. Интерес классических исследований сводился к выяснению условий сходимости функций распределений сумм независимых случайных величин к гауссовскому закону. Поэтому классическая теория вероятностей изучала лишь один предельный закон распределения – гауссовский. В теории вероятностей параллельно с завершением классической проблематики возник вопрос о том, какие законы, помимо гауссовских, могут быть предельными для сумм независимых случайных величин. Оказалось, что класс предельных законов далеко не исчерпывается гауссовским законом [2; 3; 14; 15].

В основе современной теории вероятностей лежат предельные теоремы о сходимости распределений сумм независимых случайных величин к так называемым *устойчивым распределениям*: гауссовским или негауссовским. Первые опираются на центральную предельную теорему, а вторые (негауссовские) – на предельную теорему, доказанную Б.В. Гнеденко (1939 г.) и W. Doeblin (1940 г.) [15].

В этом случае предельная теорема накладывает ограничения на форму негауссовских распределений. А именно: для того, чтобы закон

распределения $F(x)$ принадлежал области притяжения устойчивого закона с характеристическим показателем α ($0 < \alpha < 2$), отличного от гауссовского, необходимо и достаточно, чтобы

$$1) \frac{F(-x)}{1-F(x)} \rightarrow \frac{c_1}{c_2} \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (7)$$

2) для каждой постоянной $k > 0$

$$\frac{1-F(x)+F(-x)}{1-F(kx)+F(-kx)} \rightarrow k^\alpha \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (8)$$

где $c_1 \geq 0$, $c_2 \geq 0$, $c_1 + c_2 > 0$, $0 < \alpha < 2$.

Для доказательства (7) и (8) необходимо и достаточно, чтобы при некотором подборе постоянных B_n , выполнялись условия [15, с. 189]:

$$nF(B_n x) \rightarrow \frac{c_1}{|x|^\alpha} \quad (x < 0),$$

$$n[1-F(B_n x)] \rightarrow \frac{c_2}{x^\alpha} \quad (x > 0), \quad (9)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} n \left\{ \int_{|x| < \varepsilon} x^2 dF(B_n x) - \left[\int_{|x| < \varepsilon} x dF(B_n x) \right]^2 \right\} = 0.$$

Чем меньше величина α , тем длиннее хвост распределения и тем более оно отличается от гауссовского. При $1 < \alpha < 2$ устойчивые законы имеют математическое ожидание; при $0 < \alpha \leq 1$ устойчивые законы не имеют ни дисперсий, ни математических ожиданий. Условиями (7)–(9) определяется так называемая *негауссовская статистика*.

Негауссовские распределения, также как и недифференцируемые функции и сами фракталы очень часто гораздо точнее описывают временные и пространственные природные процессы.

5. К понятию «фрактал» в радиолокации

В общем виде радиолокационное изображение (РЛИ) всегда можно представить как множество элементов X_k , значения которых пропорциональны эффективной площади рассеяния (ЭПР) k -го элемента разрешения радиолокационной станции (РЛС) [2; 3; 8]. На рис. 1, а показано РЛИ местности, полученное на длине волны $\lambda = 8,6$ мм с вертолета. На рис. 1, б показано РЛИ того же участка местности, полученное РЛС на длине волны $\lambda \approx 30$ см. Оба изображения являются двумерными с уровнем серого, пропорциональным ЭПР.

Предположим, что для каждого РЛИ построена поверхность (рис. 1, в) с высотой h , также

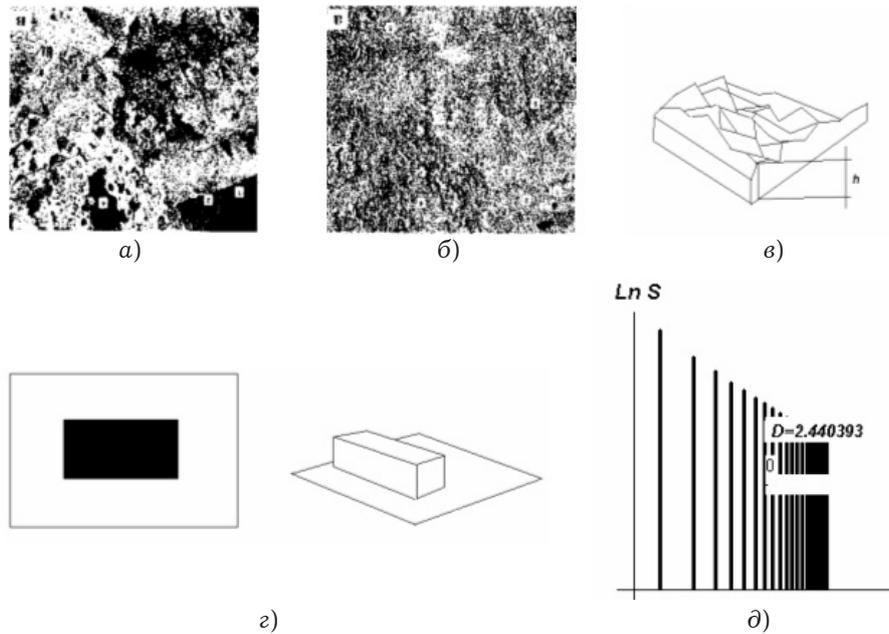


Рис. 1. Примеры, объясняющие сущность фрактальной обработки (а-г), и фрактальная пространственная сигнатура (д)

пропорциональной уровню серого. Пусть требуется измерить площадь получившейся поверхности. На РЛИ, соответствующем $\lambda \approx 30$ см, площадь получится меньше, чем для РЛИ на $\lambda = 8,6$ мм из-за того, что с уменьшением длины волны различаем больше деталей местности.

Зондирующая электромагнитная волна является в этом случае некоторой «измерительной» линейкой. При этом с укорочением длины волны начинает сказываться все более тонкая структура пространственно – временных сигналов или полей.

Если в нашем распоряжении имеется РЛИ, полученное в еще более коротковолновом диапазоне, то его площадь будет больше, и т. д. Уменьшая длину волны λ , будем получать возрастающие значения площадей. Тогда возникает вопрос: а какова в действительности площадь поверхности, с которой получены РЛИ? Если поверхность покрыта простыми объектами, например, прямоугольным возвышением (рис. 1, г), и размеры этого возвышения гораздо больше длины волны, то площади РЛИ объектов на коротких и длинных волнах будут примерно одинаковыми. Тогда на поставленный вопрос можно было бы ответить, подсчитав число элементов разрешения, покрывающих объект. Площадь S поверхности в этом случае была бы равна:

$$S \equiv S(\lambda) = N(\lambda)\delta(\lambda), \quad (10)$$

где $\delta(\lambda)$ – площадь элемента разрешения РЛС; $N(\lambda)$ – число элементов разрешения, необходимых для покрытия объекта; λ – длина волны

РЛС. Как уже было отмечено, для простого объекта (рис. 1, г) величина $S(\lambda) = const$.

Для РЛИ на рис. 1, а и б можно построить зависимость $S(\lambda) = f(\lambda)$, а предположив, что $\delta(\lambda) = K(\lambda)$, где K – известная функция, затем построить зависимость $S(\lambda) = f(\delta)$. Оказывается, что измеренная площадь S поверхности прекрасно описывается формулой

$$S(\lambda) = k\lambda^{-D}. \quad (11)$$

Тогда, с помощью простой операции логарифмирования, мы можем вычислить параметр D . Зависимость $\log S(\lambda) = f(\log \delta)$, определяющая собой *фрактальную сигнатуру* $D(t, f, \vec{r})$ РЛИ, показана на рис. 1, д [16; 17]. Она характеризует пространственный *фрактальный кепстр* изображения (данное понятие введено автором в начале 90-х гг. XX века). Дробный параметр $D \equiv \dim_H A$ называется *размерностью Хаусдорфа – Безиковича* или *фрактальной размерностью* [2; 3]. Для РЛИ объектов, имеющих простой геометрический вид (прямоугольники, круги, гладкие кривые), эта размерность совпадает с топологической, т. е. равна значению 2 для двумерных РЛИ, и определяется угловым коэффициентом прямых (11) в двойных логарифмических координатах. Однако значение D для большинства изображений *реальных покровов и метеорологических образований* оказывается большим, чем топологическая размерность $D_0 = 2$, что подчеркивает их сложность и хаотичность.

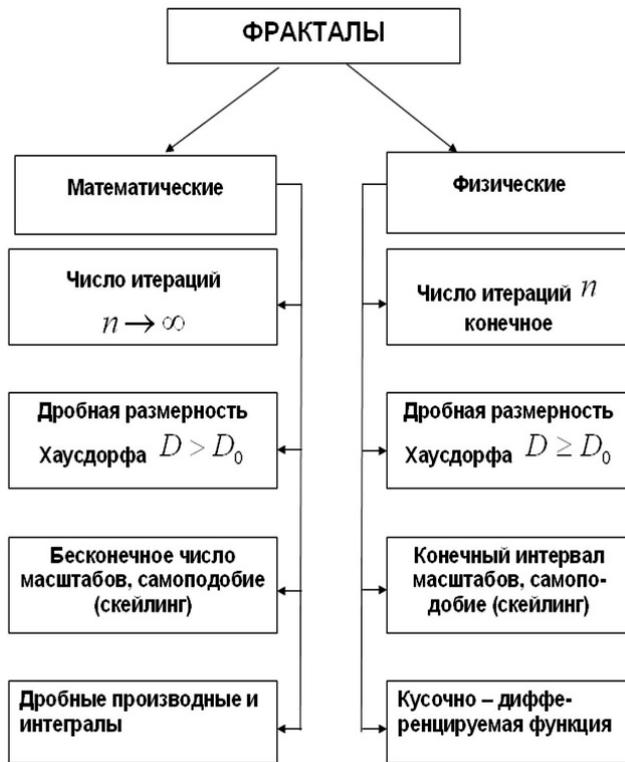


Рис. 2. Авторская классификация фрактальных множеств и сигнатур

6. Текстуры и фрактальные инварианты и меры в радиофизике и радиолокации

Радиолокатор совместно с объектами наблюдения и средой распространения радиоволн образует пространственно-временной радиолокационный канал зондирования. При радиолокационном зондировании полезный сигнал от цели является частью общего волнового поля, создаваемого всеми отражающими элементами наблюдаемых фрагментов окружающего цель фона, поэтому на практике сигналы от этих элементов образуют помеховую составляющую. Для создания радиосистем автоматического распознавания реальных неоднородных изображений ландшафтов целесообразно использование концепции текстуры [2; 3; 8; 9]. Текстура описывает пространственные свойства участков изображений земной поверхности с локально однородными статистическими характеристиками. Обнаружение и идентификация цели происходит тогда, когда цель затеняет участок фона, изменяя при этом интегральные параметры текстуры.

Многие естественные объекты, такие как почва, растительность, облака и т. п. проявляют фрактальные свойства в некоторых масштабах [2; 3; 8]. В настоящее время анализ естественных

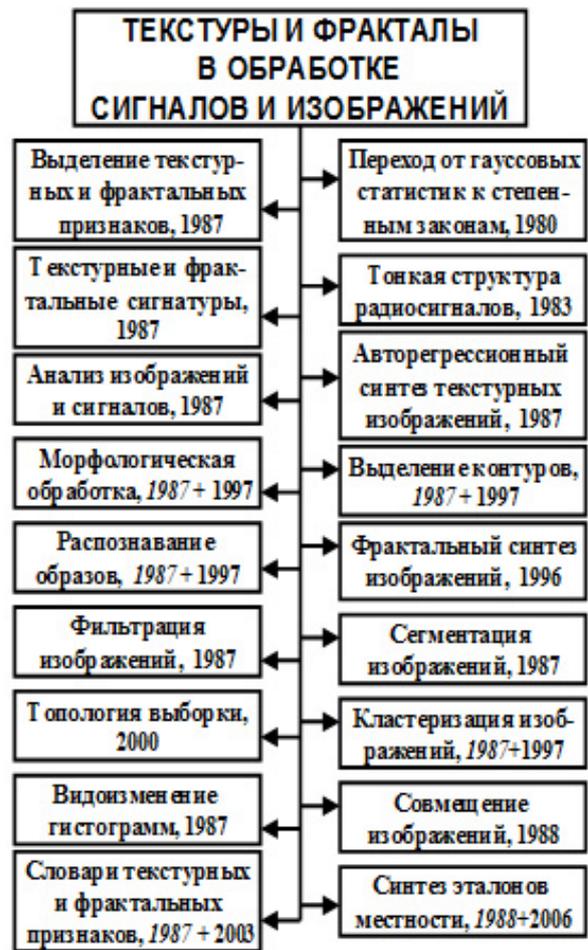


Рис. 3. Текстуры и фрактальные методы обработки мало-контрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных помехах

текстур претерпел значительные изменения из-за использования метрик, заимствованных во фрактальной геометрии. После текстуры было введено понятие фракталов, т. е., признаков, основанных на теории дробной меры, для принципиально иного подхода к решению современных радиолокационных задач.

Фрактальная размерность D или ее сигнатура $D(t, f, \vec{r})$ в различных участках изображения поверхности является мерой текстуры, т. е., свойств пространственной корреляции рассеяния радиоволн от соответствующих участков поверхности. На уже далеких начальных этапах автором вначале была подвергнута детальному исследованию концепция текстуры при радиолокации земных покровов и объектов на их фоне. В дальнейшем особое внимание было обращено на разработку текстурных методов обнаружения объектов на фоне земных покровов при малых отношениях сигнал/фон (см., например. [8; 18–28] и ссылки в них).



Рис. 4. Эскиз развития автором прорывных информационных технологий на основе фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для нелинейной физики и радиоэлектроники

7. Фрактальная обработка сигналов и изображений в интенсивных помехах и шумах

Автором было впервые показано, что фрактальная обработка как нельзя лучше подходит для решения современных задач при обработке малоконтрастных изображений и обнаружении сверхслабых сигналов в интенсивных помехах, когда современные радиолокаторы практически не функционируют [2; 3; 10]. При фрактальном подходе, как отмечено выше, естественно сосредоточить внимание на описании, а также обработке радиофизических сигналов (полей), исключительно в пространстве дробной меры с применением гипотезы скейлинга и универсальных распределений с «тяжелыми хвостами» или устойчивых распределений. Предложенная автором классификация фракталов была в декабре 2005 г. в США лично одобрена Б. Мандельбротом [29; 30] и приведена на рис. 2, где описаны их свойства при условии, что D_0 – топологическая размерность пространства вложения.

Разрабатываемые автором с учениками текстурные и фрактальные цифровые методы

(рис. 3) [2; 3; 10; 16; 31–46] позволяют частично преодолевать априорную неопределенность в радиолокационных задачах с помощью *геометрии или топологии выборки* – одномерной или многомерной.

При этом большое значение приобретают топологические особенности выборки, а не усредненные реализации, имеющие другой характер [47].

8. Созданные прорывные технологии и фрактальные радиосистемы

Коренное отличие предложенных автором фрактально-скейлинговых методов от классических связано с принципиально иным (дробным) подходом к основным составляющим физического сигнала. Это позволило нам перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей. Таким образом, это *принципиально новая* радиотехника.

За 35 лет научных исследований созданный автором глобальный фрактально-скейлинговый метод полностью оправдал себя, найдя многочисленные приложения (рис. 4). Это своего рода



Рис. 5. Авторская концепция фрактальных радиосистем, устройств и радиоэлементов

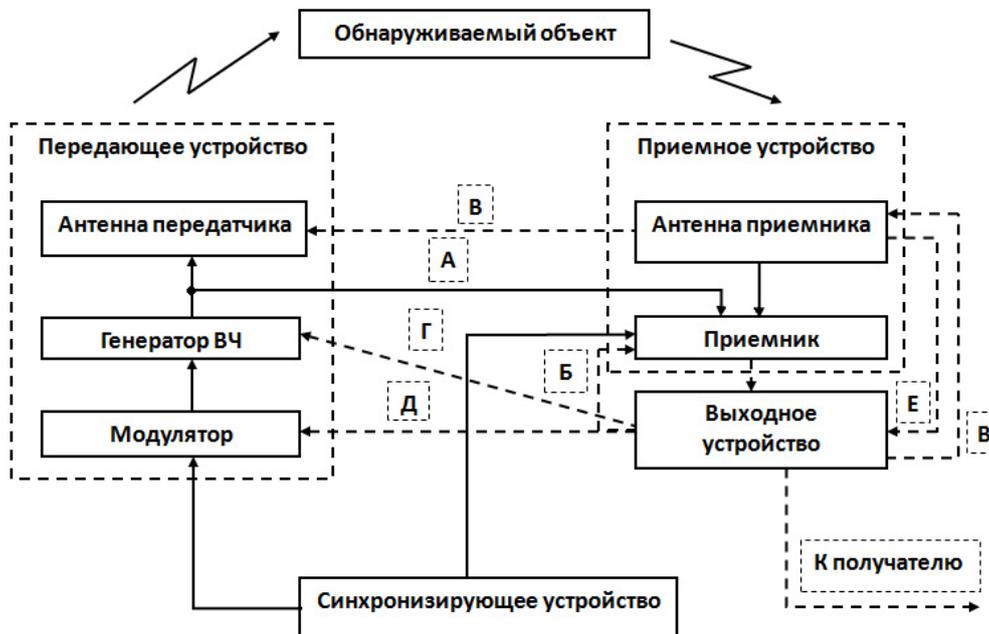


Рис. 6. Обобщенная функциональная схема классического радиолокатора

вызов времени. Все это обозначено мной кратко и выразительно – *фрактальная парадигма* [1–3; 9–12; 16; 17; 26–80].

Фрактальная геометрия – громадная и гениальная заслуга математика Б. Мандельброта. Но ее радиофизическое/радиотехническое и практическое воплощение – заслуга Российской (Международная – сейчас) научной школы фрактальных методов и дробных операторов под руководством проф. А.А. Потапова (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН; см., также, сайт автора www.potapov-fractal.com).

Несколько утрируя, можно сказать, что фракталы составляли тонкую амальгаму на мощном острове науки конца XX века. В современной си-

туации интеллектуальное фиаско потерпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания. Во фрактальных исследованиях я всегда основываюсь на своих трех глобальных тезисах:

1. Обработка искаженной негауссовскими шумами информации в пространстве дробной меры с использованием скейлинга и устойчивых негауссовских вероятностных распределений (1981 г.) – рис. 1–4.

2. Применение непрерывных недифференцируемых функций (1990 г.) – рис. 2.

3. Фрактальные радиосистемы (2005 г.) – рис. 4 и 5.

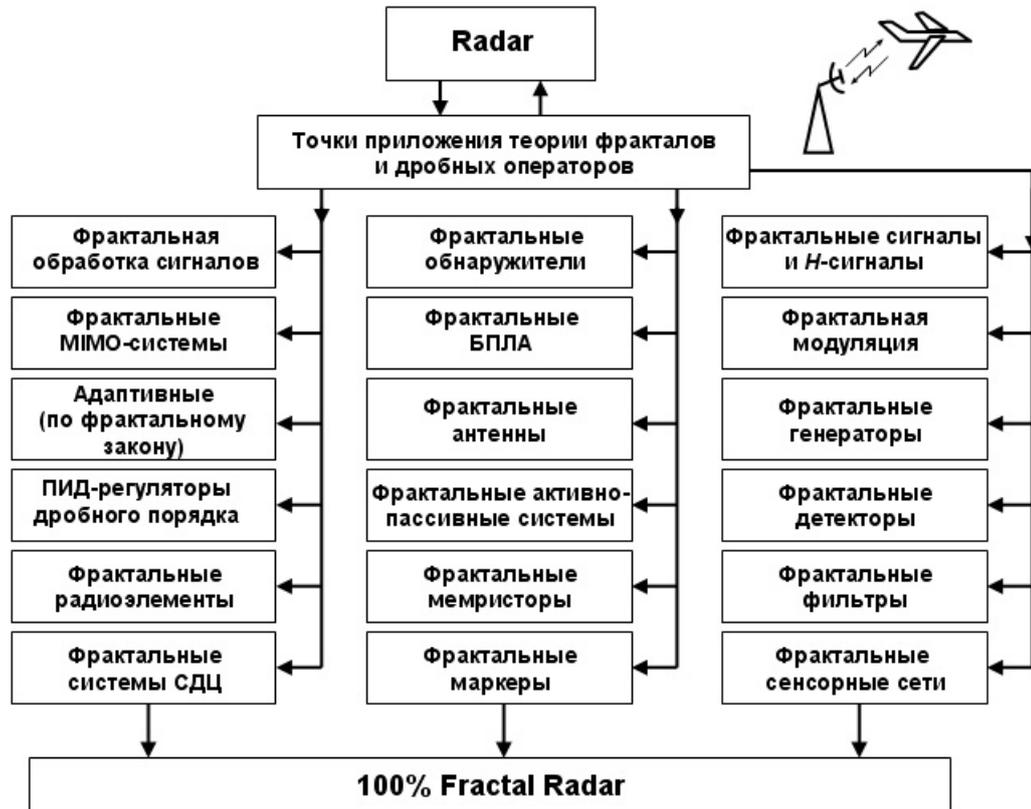


Рис. 7. Точки приложения фракталов, скейлинга и дробных операторов в классическом радиолокаторе с целью перехода к фрактальной РЛС

Логическое объединение указанной выше триады проблем в общий «фрактальный анализ и синтез» и создает основу *фрактально-скейлингового метода* (2006 г.) и единой глобальной идеи фрактального естествознания и *фрактальной парадигмы* (2011 г.), предложенных и интенсивно развиваемых автором [2; 3; 46].

Далее, опираясь на изложенный выше материал, перейдем к концепции *фрактального радиолокатора*, а также к вопросам использования его масштабно-инвариантных принципов в различных системах мониторинга.

9. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация

В настоящее время работы по фрактальной радиолокации в мире проводятся исключительно в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [1–3; 9–12; 16; 17; 26–80]. В соответствии с требованиями, которые предъявляются к перспективным радиолокаторам, рассмотрим обобщенную функциональную схему классической системы – рис. 6. Она, с одной стороны, достаточно проста, а с другой, – содержит все принципиально необходимые элементы. Также здесь может идти речь

и об одноканальной радиолокационной станции (РЛС), и о многоканальной РЛС.

Синхронизирующее устройство обеспечивает координацию работы всех элементов схемы РЛС. Генерирование и излучение электромагнитной энергии производится с помощью передающего устройства, состоящего из модулятора, генератора высокой частоты (ВЧ) и передающей антенны. Отраженные сигналы поступают к приемной антенне. Приемное устройство выполняет все необходимые преобразования поступающих сигналов, связанные с их разделением, усилением, выделением от шумов. Выходное устройство предназначается для выполнения заключительных операций по обработке сигналов и преобразования их к виду, требуемому получателем информации. Выходное устройство, в зависимости от результатов измерений, может оказывать то или иное воздействие на приемник (линия *Б*), антенну (линия *В*), и передающее устройство (линии *Г* и *Д*), что позволяет автоматически изменять требуемым образом вид излучаемых колебаний, условия приема и обработки сигналов, приближая их к наилучшим для конкретной ситуации. Связь выходного устройства с приемной антенной обеспечивает возможность автоматического измерения угловых ко-

ординат и управление антенной при пеленгации цели. В свою очередь, от антенного устройства в выходное устройство вводятся данные (линия E) об угловом положении антенны.

От данных рис. 6 можно перейти непосредственно к фрактальному радиолокатору. На рис. 7 изображены практически все точки приложения гипотетических или проектируемых в настоящее время фрактальных алгоритмов, элементов, узлов и процессов, которые можно ввести в схему на рис. 6. Идеология фрактальной РЛС базируется на концепции фрактальных радиосистем – рис. 5.

10. Фрактально-скейлинговые или масштабно-инвариантные обнаружители сигналов

Обработка принятых радиолокационных сигналов естественно ведется во всех блоках РЛС, включая антенну, приемник, измерители и может быть охарактеризована совокупностью математических операций, которые необходимо выполнить для определения тех или иных параметров сигнала. Однако, несмотря на математическую общность между всеми видами обработки в тракте РЛС, на каждом ее этапе решаются свои задачи, и используется, как правило, различная техника. Таким образом, наряду с общей задачей определения оптимальных алгоритмов обработки сигнала в целом, которая решается при проектировании РЛС, возникает задача выбора оптимальных методов обработки сигналов и способов их реализации на различных ее этапах. Процесс обработки радиолокационных сигналов и полученных при этом данных можно разделить на два этапа: этап извлечения первичной радиолокационной информации и этап обработки данных по первичной информации.

Принципы первого в мире фрактального обнаружителя сигналов были открыты и предложены мной еще в 1989 г. (!). Выход (также впервые в мире) на действующий макет фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) произведен в 2004–2005 гг. [3; 10–12; 48–52; 60–80]. Отмечена высокая устойчивость предложенных нами алгоритмов. Один из главных выводов, сделанных нами еще в 80-е годы XX века: *работа по точечной оценке фрактальной размерности D приводит к абсурдным результатам*. В то же время, почти все авторы, использующие фрактальную

обработку (и, часто не понимая ее физический смысл) дают исключительно точечные оценки, да еще со среднеквадратическим отклонением (абсурд!).

В своих работах мы ввели фрактальные сигнатуры и фрактальные кепстры, и проблема точности цифровой фрактальной обработки в режиме реального времени была решена. Эффективность работы фрактального обнаружителя зависит, естественно, как от точности измерения фрактальной сигнатуры, так и от чувствительности метода оценки к наличию обнаруживаемого объекта.

Идеология перехода к фрактально-скейлинговым обнаружителям также базируется на концепции фрактальных радиосистем – рис. 5. Основные виды предложенных автором в течение 2011–2014 гг. избранных семейств (кластеров) схем новых динамических фрактальных обнаружителей сигналов (ФОС) приведены на рис. 8.

Здесь я ограничился лишь основными функциональными примерами для иллюстрации разработанных общих теоретических и эвристических принципов синтеза динамических фрактальных обнаружителей.

В случае комплексирования классического обнаружителя с фрактальным обнаружителем повышается вероятность правильного обнаружения и распознавания. На данном этапе, эта задача уже не имеет глубокого научного интереса, а относится практически к рядовым инженерным техническим решениям. Этот этап мы закрыли, сделав вывод, что более интересна в научном плане, для открытия и фиксации новых радиофизических эффектов, композиция двух фрактальных обнаружителей с различными пространственными координатами на рис. 8.

Значительный интерес представляет разработка адаптивных методов применительно к фрактальной обработке информации. Для адаптивной задачи характерно изменение параметров и/или структуры системы в соответствии с внешними условиями. В работе [37] рассмотрен исключительно фрактальный адаптивный обнаружитель (ФАО).

Данные рис. 8 иллюстрируют неисчерпаемые возможности методов фрактального обнаружения сигналов. На основе общих логических правил и данных рис. 8, **возможен синтез множества** других типов фрактальных обнаружителей. Кстати, на рис. 8 специально не обозначены функциональные связи между отдельными раз-



Рис. 8. Основные виды предложенных автором фрактально-скейлинговых обнаружителей сигналов

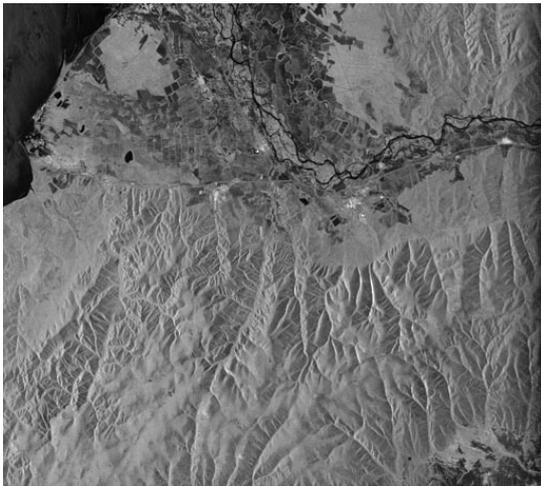


Рис. 9. Дельта реки Селенги на снимке PCA PALSAR от 7 августа 2006 г.

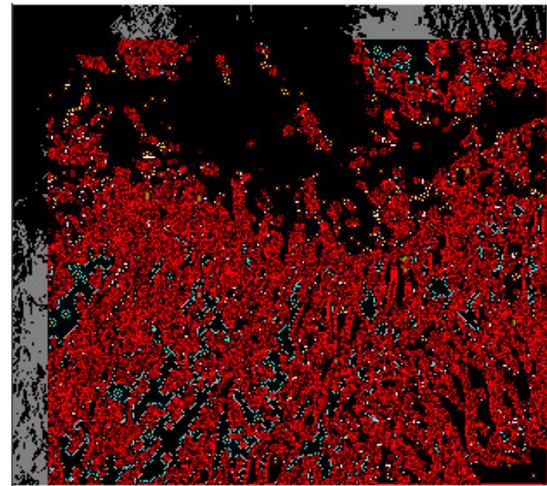


Рис. 10. Результат фрактальной обработки снимка PCA PALSAR

новидностями фрактальных обнаружителей, а везде обозначены лишь одни стрелки, чтобы научная платформа динамических фрактальных обнаружителей была максимально свободной для будущих исследователей, конструкторов и технологов. Универсальность алгоритмов обеспечивает возможность исследования весьма широких классов задач.

В настоящее время рассматривается, в частности, очень важный вопрос о синтезе на основе теории фрактального лабиринта принципиально нового «не энергетического» фрактального обнаружителя сигналов по их сингулярностям

и топологии принятой выборки. То есть, я предлагаю *максимально «уйти» от энергии принимаемого сигнала.*

В моих исследованиях впервые вводится функциональный постулат «максимум топологии при минимуме энергии», позволяющий более эффективно использовать преимущества фрактально-скейлинговой обработки информации. Использование фрактального принципа приводит к переоценке ценностей в области обнаружения подвижных и неподвижных объектов на фоне интенсивных помех и шумов [1–3; 10–12; 48–52; 60–80].

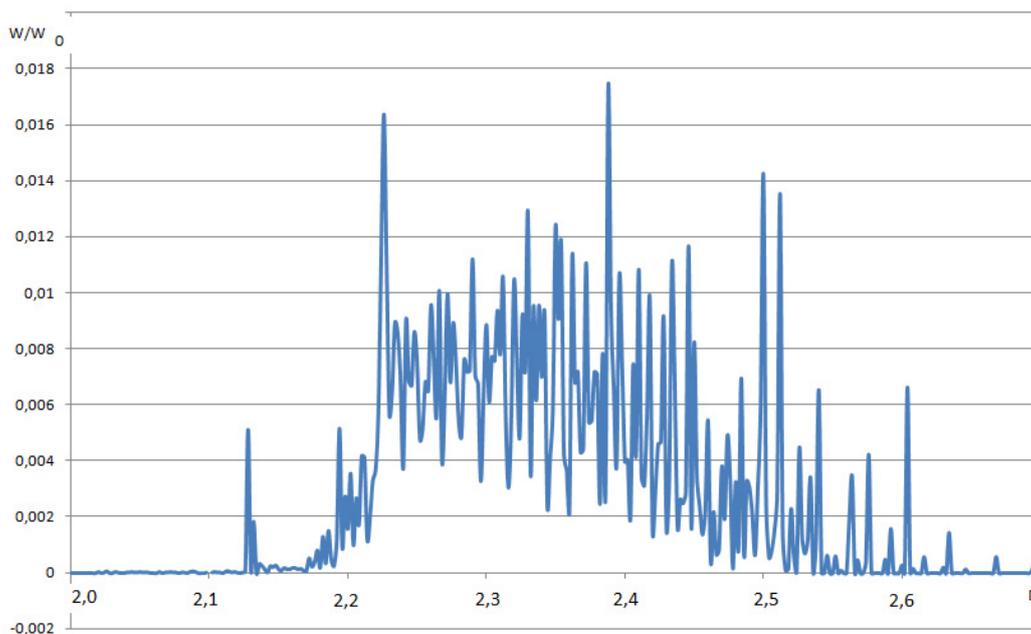


Рис. 11. Эмпирическое распределение значений мгновенной фрактальной размерности D

11. Фрактальное обнаружение объектов на изображениях, полученных РСА и БПЛА

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) и БПЛА получили широкое распространение в практике исследования земных покровов. Такие радары являются ключевым элементом современных и перспективных информационных РСА — технологий. Основными достоинствами данных систем съемки являются нетребовательность к условиям освещенности исследуемого района и нечувствительность к погодным условиям в зоне съемки с достаточно высоким пространственным разрешением. Ниже исследуем потенциальные возможности фрактальной обработки информации для решения задач автоматического фрактального обнаружения мало-контрастных объектов по РЛИ, полученными космическими и авиационными комплексами.

Исходные данные для цифровой фрактальной обработки РЛИ получены спутниковым радаром с синтезированной апертурой (РСА) PALSAR L-диапазона (Япония). PALSAR — космический РСА на длине волны 23 см, с пространственным разрешением порядка 7 м, разработанный японским агентством JAXA и успешно отработавший на орбите с 2006 по 2011 год. Область применения данных РСА PALSAR включает ледовую разведку, океанографию, картографию, геологию, гидрологию, исследование лесов, решение задач сельского хозяйства и охраны окружающей среды.

В качестве примера на рис. 9 приведено РЛИ дельты реки Селенги в Забайкалье, полученное 7 августа 2006 г. в режиме высокого разрешения FBS на согласованной горизонтальной поляризации. В зону съемки размером примерно 60×50 км входят покрытая лесами гористая область Хамар-Дабан (внизу, передана более светлым тоном с характерной «смятой» структурой), равнинная область дельты реки Селенги (в середине верхней части снимка, передана более темными тонами) и черный участок на снимке в левом верхнем углу — гладкая водная поверхность озера Байкал. В равнинной части снимка видны линейчатые структуры — границы сельскохозяйственных полей, а также скопления ярких объектов — сильно отражающие элементы зданий и других конструкций в пределах населенных пунктов. Длинные извилистые темные линии на равнине — многочисленные рукава реки Селенги.

Предложенные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН фрактальные методы обработки изображений существенно дополняют текстурные и другие методы, и позволяет более надежно производить операцию кластеризации. Еще ранее нами был сделан важный вывод о достаточной трудоемкости и неоднозначности непосредственно прямого использования оценок средней фрактальной размерности D для идентификации земных покровов и метеоцелей на их фоне и определения/обнаружения числа одинаковых объектов.

На первом этапе фрактальной обработки РЛИ РСА были измерены поля локальных значе-

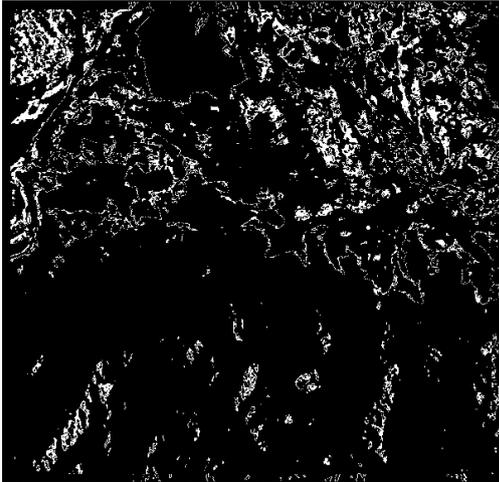


Рис. 12. Фрагмент РЛИ с $D \approx 2,2$



Рис. 14. Фрагмент РЛИ с $D \approx 2,5$

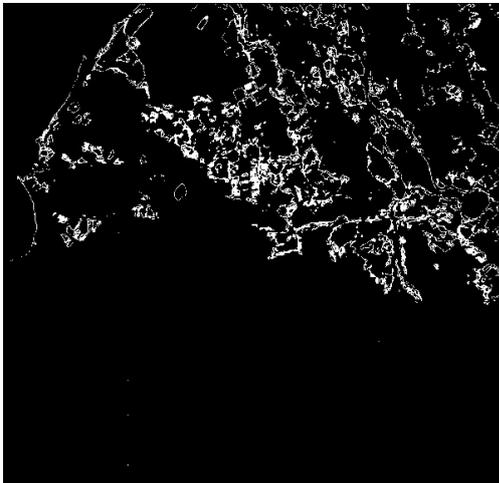


Рис. 13. Фрагмент РЛИ с $D \approx 2,4$

ний дисперсионной фрактальной размерности D (рис. 10). Далее было получено эмпирическое распределение значений мгновенной фрактальной размерности D – рис. 11.

Ниже приведены примеры фрактальной селекции по D (рис. 12–14). Выделенный фрагмент изображения с фрактальной размерностью $D \approx 2,2$ вблизи 1-го большого пика (рис. 11) приведен на рис. 12. Следующий выделенный фрагмент изображения с фрактальной размерностью $D \approx 2,4$ вблизи 2-го большого пика (рис. 11) приведен на рис. 13. Выделенный фрагмент изображения с фрактальной размерностью $D \approx 2,5$ (почти броуновская поверхность) вблизи 3- и 4-го больших пиков (рис. 11) показан на рис. 14.

Отметим, что после фрактальной обработки изображений поверхности, кроме устойчивого разделения по типам земных покровов, отмечаются невидимые (скрытые) до этой обработки особенности (как, например, данные кластеризации дистанционного зондирования земных по-

кровов). Это позволяет говорить о применении методов фрактального распознавания для идентификации участков изображения, «невидимых» при классических методах кластеризации по полю яркостей. В обработке РЛИ использован исключительно наш собственный локально – дисперсионный метод измерения [16; 31–33].

Рассмотренные методы фрактального анализа могут найти применение при обработке данных, получаемых с камер, устанавливаемых на подвижных летательных аппаратах и на спутниковой аппаратуре. Описанные подходы отличаются высокой скоростью обработки данных и хорошей проработанностью математического аппарата.

12. Спектры фрактальных характеристик необычных высотных разрядов в ионосфере – эльфы, джеты и спрайты

Каждые сутки небо прочерчивают 4 миллиона молний, ежесекундно – примерно 50. А над свинцовыми грозовыми фронтами, в верхних слоях атмосферы разворачивается световое шоу «призрачных молний»: голубые джеты, краснофиолетовые спрайты, красные кольца парящих в вышине эльфов – рис. 15. Это разряды очень высокой энергии, которые бьют не в землю, а в ионосферу! Таким образом, высотные электрические разряды (20 – 100 км) подразделяются на несколько основных типов: эльфы, джеты, спрайты, гало и т. д. – рис. 14 [62].

Краткая их история – в ночь с 5 по 6 июля 1989 года, в истории изучения Земли произошло важное событие. Джон Рандольф Уинклер, отставной профессор, 73-летний ветеран NASA, направил на грозовые облака высокочувстви-

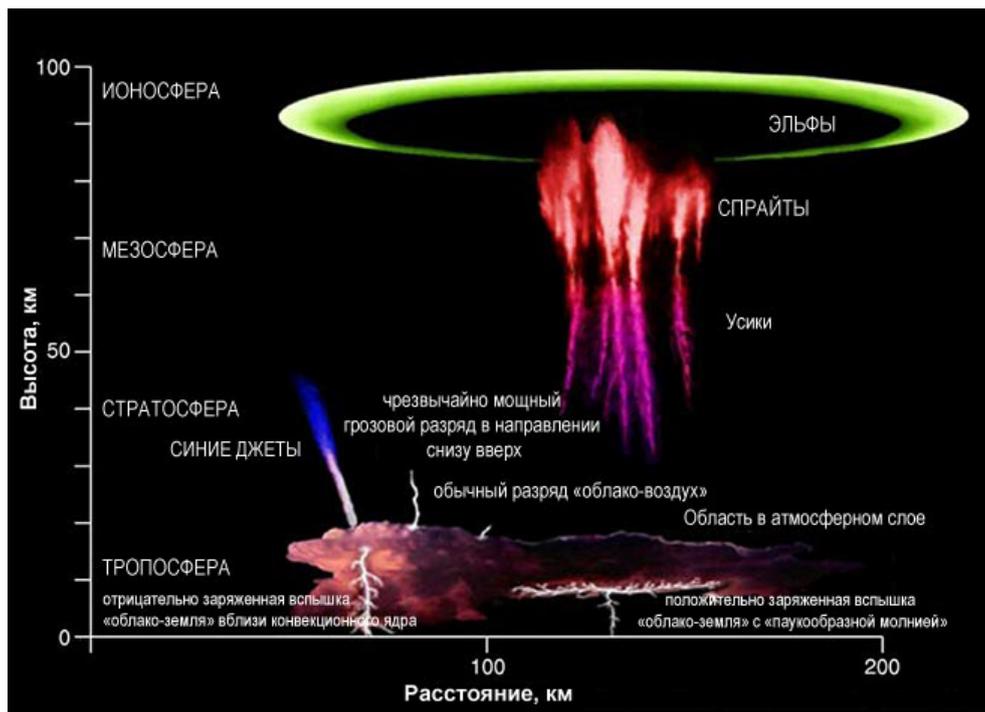


Рис. 15. Динамические фрактальные структуры в атмосфере

тельную видеокамеру, а потом, просматривая запись, кадр за кадром, обнаружил две яркие вспышки, которые в отличие от молний шли не вниз, к земле, а вверх, к ионосфере. Так были открыты спрайты – самые крупные из высотных разрядов в атмосфере Земли. Они наглядно подтвердили существование на нашей планете глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и дали новые возможности для ее исследования. Его статьи буквально вызвали шок у специалистов по астрономии, атмосферному электричеству, радиофизике, атмосферной акустике, физике газового разряда и аэрокосмической безопасности. После этих публикаций в NASA уже не могли отмахнуться от возможной угрозы космическим кораблям и начали развернутое исследование высотных разрядов.

Самые короткоживущие высотные разряды – эльфы возникают в нижней ионосфере на высотах 80–100 км. Возникнув в центре, свечение расширяется до 300–400 км, меньше чем за миллисекунду, а затем угасает. Рождаются эльфы через 300 микросекунд после сильной молнии, ударившей из грозового облака в землю. Ствол молнии становится «передающей антенной», от которой со скоростью света «стартует» мощная сферическая электромагнитная волна очень низкой частоты. За 300 микросекунд она добирается до высоты 100 км, где «возбуждает» красное свечение молекул азота. Самые за-



Рис. 16. Исходное изображение спрайта (США, NASA [47])

гадочные высотные разряды – голубые джеты, это также свечение молекул азота в ультра-фиолетово-голубой полосе. Они выглядят как голубой узкий перевернутый конус, «стартующий» с верхней границы грозового облака. Иногда джеты достигают высоты 40 км, скорость распространения их от 10 до 100 км/с. Их появление не всегда связано с разрядами молний. Кроме голубых джетов выделяют «голубые стартеры» (распространяются до высот ≤ 25 км) и «гигантские джеты» (распространяются до высот нижней ионосферы примерно 70 км). Гигантские джеты наблюдаются очень редко; к настоящему времени насчитывают не более дюжины таких событий. Интерес физиков к гигантским джетам

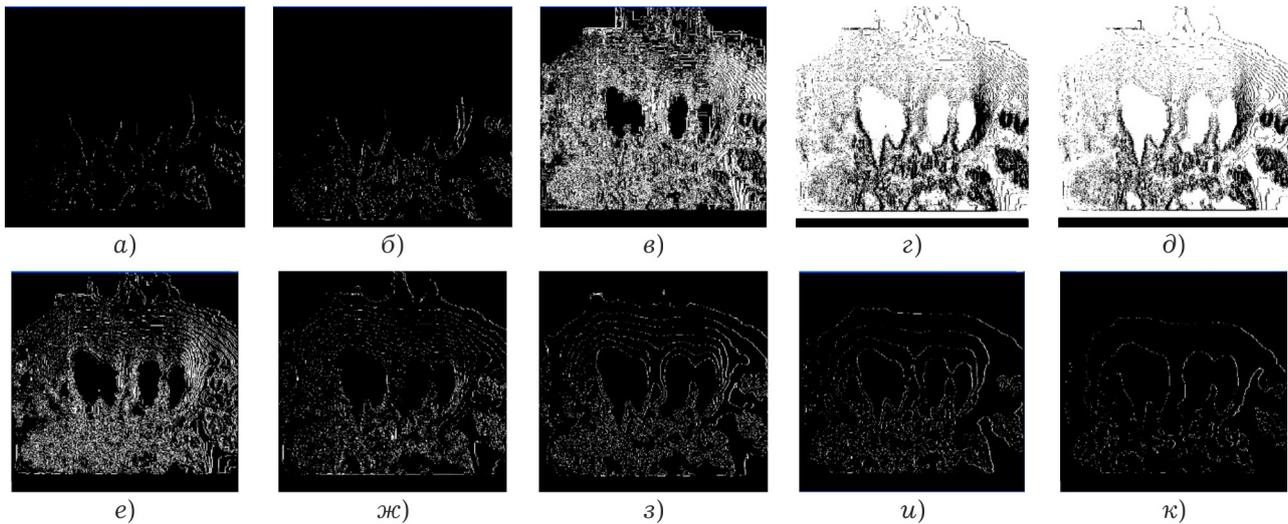


Рис. 17. Результаты фрактальной фильтрации изображения спрайта: а) карта фрактальной размерности со средним значением $D = 2,1$; б) 2,2; в) 2,3; г) 2,4; д) 2,5; е) 2,6; ж) 2,7; з) 2,8; и) 2,9; к) 3,0

под стать их размерам, ведь эти разряды совершают «беспосадочный перелет» из тропосферы прямо в ионосферу. Спрайты – очень яркие объемные вспышки длительностью порядка миллисекунд, возникающие на высоте 70–90 км и спускающиеся вниз на 30–40 км. Их ширина достигает в верхней части десятки километров. Спрайты вспыхивают в мезосфере примерно через сотую долю секунды после разряда мощных молний «облако – земля», иногда на удалении несколько десятков километров по горизонтали от канала молнии. Красно-фиолетовый цвет спрайтов, как и эльфов, связан с атмосферным азотом. Частота появления спрайтов – порядка нескольких тысяч событий в сутки по всему земному шару. Тонкая структура нижней части спрайтов характеризуется множеством светящихся каналов с поперечными размерами от десятков до сотен метров. Возникновение спрайтов связано с образованием высокого дипольного момента нескомпенсированного заряда, после особенно мощных молниевых разрядов облако-земля, обычно положительной полярности.

Хотя этап накопления данных, характеризующих морфологию этих явлений, отнюдь не завершен, уже можно перейти к исследованию более тонких особенностей структуры и динамики высотных разрядов и их роли в глобальной электрической цепи и балансе малых составляющих атмосферы. Динамические пространственно-временные особенности и морфология спрайтов могут быть объяснены, в частности, фрактальной геометрией разрядов и перколяцией. Мы имеем здесь еще один пример самоорганизованной критичности, когда динамика

системы (в данном случае высотного разряда) обусловлена достижением порога так называемой направленной перколяции, которая характеризует формирование разветвленных (фрактальных) проводящих каналов, перекрывающих всю длину спрайта.

Иначе обстоит дело с вопросами статистической обработки данных. Здесь по традиции используют классические методы. Это не позволяет извлечь всю информацию о таких новейших атмосферных структурах. Избранные примеры нашей фрактальной обработки сечений спрайта (рис. 16) приведены на рис. 17, а–к. Примеры фрактальной обработки джета (рис. 18, а) показаны на рис. 18, б, в. Четко различаются внешние, основные и сверхтонкие структуры. Кстати, это *первые в мире* результаты фрактальной обработки таких структур (обработка начала 2013 г.), результаты полностью приведены в [45; 46].

Другими словами, автором показано, что применение математической теории дробной меры и фракталов открывает для физиков и экспериментаторов целый ряд новых методологических принципов. Здесь также применимо моделирование на основе фрактальных лабиринтов, которые хорошо отражают физику и морфологию таких ионосферных структур. Полученные результаты дают основу для более глубокого понимания развития, релаксации таких атмосферных процессов и учета действия такого рода природных помех на функционирование авиационных и космических систем.

Фрактально-скейлинговая методология, примененная для описания морфологии джетов, спрайтов и эльфов, может быть успешно ис-

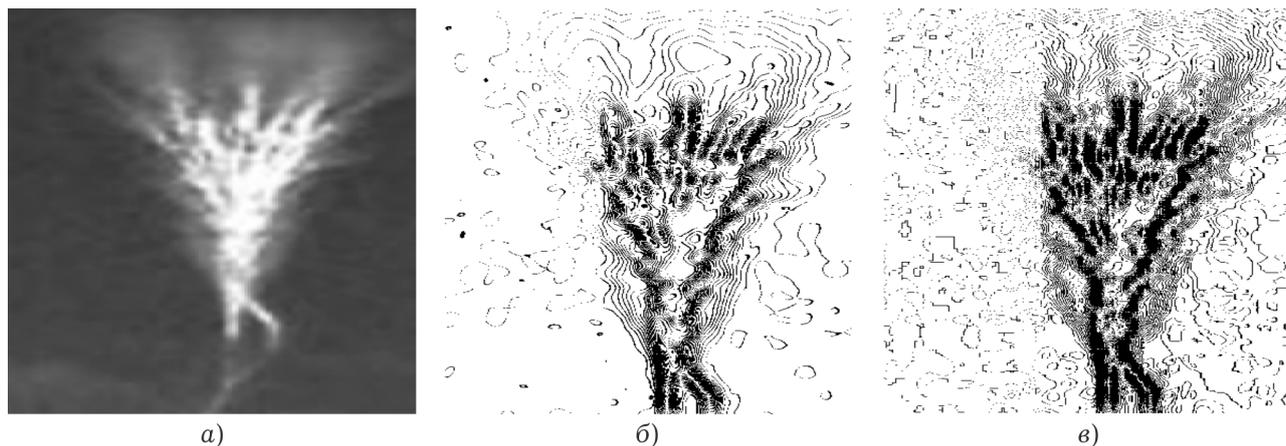


Рис. 18. Результаты фрактальной фильтрации изображения гигантского джета (съемка в Китае, 12 августа 2010 г.): а) изображение джета [48], б) и в) срезы оценок D

пользована для оценки их характеристик и динамики их развития. Такая оценка будет полной и объективной – она основана на количественных оценках фрактальной размерности D при оконтуривании связанных структур, и она оперативна, так как обработка данных выполняется легко на компьютерах. Затем решаются задачи математической физики.

13. Официально признанные результаты фрактальных исследований

Результаты нашей научной деятельности в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по фрактально-скейлинговой обработке информации в интенсивных помехах, а также по фрактальным радиосистемам и фрактальным радиоэлементам опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума Российской академии наук (Научные достижения РАН. – М.: Наука, 2008, 2010, 2012, 2013 гг.) и в Докладе Правительству Российской Федерации. Об итогах реализации в 2011 году Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг. В трех томах. – М.: Наука, 2012. Приведем кратко текст этих официально признанных достижений.

– В книге «Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2007 году» (М.: Наука, 2008. 204 с.) в подразделе «Локационные системы», раздел «Информационные технологии и вычислительные системы» (с. 41), приведен следующий текст: «Создан эталонный словарь фрактальных признаков оптических и радиоизображений, необходимый для реализации принципиально новых фрактальных методов обра-

ботки радиолокационной информации и синтеза высокоинформативных устройств обнаружения и распознавания слабых сигналов на фоне интенсивных негауссовских помех. Установлено, что для эффективного решения задач радиолокации и проектирования фрактальных обнаружителей многомерных радиосигналов существенное значение имеют дробная размерность, фрактальные сигнатуры и кепстры, а также текстурные сигнатуры фона местности (ИРЭ РАН)» – 2007 г., опубликовано в 2008 г.

– В книге «Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2009 году» (М.: Наука, 2010. 616 с.) в подразделе «Локационные системы. Геоинформационные технологии и системы», раздел «Нанотехнологии и информационные технологии» (с. 24), приведен следующий текст: «Впервые в мировой практике предложены и экспериментально доказаны принципы построения новых, фрактальных адаптивных радиосистем и фрактальных радиоэлементов для современных задач радиотехники и радиолокации. Принцип действия таких систем и элементов основан на введении дробных преобразований излучаемых и принятых сигналов в пространстве нецелой размерности при учете их скейлинговых эффектов и негауссовской статистики. Это позволяет выйти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей (ИРЭ РАН)» – 2009 г., опубликовано в 2010 г.

– В книге «Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2011 году» (М.: Наука, 2012. 620 с.) в подразделе «Локационные системы. Геоинформационные технологии и си-

стемы», раздел «Информатика и информационные технологии» (с. 199–200), и в книге «Доклад Правительству Российской Федерации. Об итогах реализации в 2011 году Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008 – 2012 гг. В трех томах» (М.: Наука, 2012. 1016 с.) на с. 242 приведен следующий текст: «На основе фрактального анализа проведено систематическое исследование электродинамических свойств фрактальных антенн. Подтверждены широкополосные и многодиапазонные свойства фрактальных антенн и зависимость числа резонансов от номера итерации фракталов. Показано, что на основе миниатюрных фрактальных антенн возможна эффективная реализация частотно-избирательных сред и защитных экранов, искажающих радиолокационный портрет цели. Изучены фрактальные частотно-избирательные 3D-среды или фрактальные «сэндвичи» (инженерные радиоэлектронные микро- и наноконструкции). (ИРЭ РАН)» – 2011 г., опубликовано в 2012 г.

– В книге «Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2012 году» (М.: Наука, 2013. 616 с.) в подразделе «Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров. Материалы для микро- и наноэлектроники. Нано- и микросистемная техника. Твердотельная электроника», раздел «Нанотехнологии и информационные технологии» (с. 195), приведен следующий текст: «Установлено, что в физической основе функционирования мемристора лежит целочисленный квантовый эффект Холла. Получены соотношения между током и напряжением для произвольного типа мемристора. Результаты направлены на практическую реализацию мемристоров как новых элементов электронных схем. (НИИ ПМА КБНЦ РАН, ИРЭ РАН)» – 2012 г., опубликовано в 2013 г.

Заключение

Фракталы ранее составляли тонкую амальгаму на мощном остове науки конца XX века. В современной ситуации интеллектуальное фиаско потерпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания.

Данная работа касается основного радиофизического направления – радиолокации, и имеет целью выяснить, что сделано и что следует сделать в этой области на основе теории фракталов. Проведенные исследования со всей

очевидностью показали правильность выбранного автором пути (начиная с 1980 г.) по совершенствованию методов радиолокации. За 35 лет это, в частности, привело автора к изобретению, созданию и развитию нового вида и метода радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации, а также в ее математическом аппарате.

В задачу настоящей статьи не входил подробный анализ всех работ, который с успехом мог бы быть использован для отдельной монографии. Тем не менее, общее знакомство с исследованиями автора в этом направлении должно существенно помочь широкому кругу специалистов и точнее определить пути практического приложения теории фракталов к решению радиофизических и радиолокационных задач. Автор имеет полное основание думать, что обширный и ценный материал, уже полученный им, и результаты дальнейших исследований будут использованы в перспективных радиосистемах. Я считаю проблему «топологии выборки» [2; 3; 9; 47] одной из важнейших во всей радиоэлектронике, и при этом я также убежден, что без фрактальности и скейлинга вся теория обнаружения сигналов теряет свое каузальное значение для понятий сигнала и шума.

При фрактальном подходе естественно сосредоточить внимание на описании, а также обработке радиофизических сигналов (полей), исключительно в пространстве дробной меры с применением гипотезы скейлинга и универсальных распределений с «тяжелыми хвостами» или устойчивых распределений.

Автором введен функциональный принцип «максимум топологии при минимуме энергии» для принимаемого сигнала, позволяющий более эффективно использовать преимущества фрактально-скейлинговой обработки информации. Использование фрактального принципа приводит к переоценке ценностей в области обнаружения подвижных и неподвижных объектов на фоне интенсивных помех и шумов.

Определены и обоснованы основные принципы построения фрактальных радиосистем, узлов и фрактальных радиоэлементов.

В статье автор коснулся лишь некоторых наиболее важных вопросов, связанных с использованием фракталов и эффектов скейлинга в статистической радиофизике и радиолока-

ции. В развитии фрактальных направлений уже пройдены многие важные этапы, в том числе, и этап становления этой области наук. Однако много задач еще предстоит решить. Не результаты, не конкретные решения представляют самую большую ценность, а, именно, метод решения, подход к нему. Метод автором создан [2; 3; 44; 46].

В результате в научном мире образовано новое смысловое пространство с его необычными для классической физики свойствами и задачами. Область фрактальных наук открыта для творческих поисков. Однако прежде чем начинать творить, необходимо ясно осознать идеи, лежащие в основе фрактально-скейлингового метода.

И еще одно. В книге (Гвай И.И. О малоизвестной гипотезе Циолковского / С предисл. и под ред. д.т.н. П.К. Ощепкова.- Калуга: Калужское книжное изд-во, 1959. 248 с., с. 24–25) можно найти такие слова: «Новые научные гипотезы почти всегда требуют и новых необычных аргументаций потому, что эти гипотезы оперируют именно с новым, а не с ожидаемым, и необходимые закономерности, которые эта гипотеза обещает создать в будущем, не являются очевидными с первого взгляда. В этом – основная уязвимость новых гипотез, тогда как устоявшиеся и закреплённые практикой теории зачастую кажутся незыблемыми. Но, ни одна даже лучшая гипотеза не может считаться законченной и абсолютно неподвижной, а ученый, идущий по следу, как говорил Леонардо да Винчи, никогда не обгонит»).

Результаты и выводы, полученные автором с учениками, имеют большой инновационный потенциал, реализация которого, на наш взгляд, обеспечит решение ряда современных задач радиофизики, радиотехники, радиолокации, связи и управления, позволит обеспечить новое качество систем обнаружения и распознавания, развития новых информационных технологий и повышения конкурентоспособности отечественных изделий радиоэлектроники.

Автор поставил изложенные выше вопросы еще в 1980 году и в течение 35 лет успешно работает над их разрешением и развитием. Избранные работы, подготовленные к этой дате, по фрактальным радиолокаторам представлены в [60–80].

Дополнительные сведения можно получить из литературы [1–3; 10–12; 48–52; 60–80].

С большой благодарностью хочу специально отметить, что без благожелательной поддержки академиков В.А. Котельникова, Ю.В. Гуляева (ИРЭ РАН) и Б.В. Бункина (ЦКБ «Алмаз») моя работа в области фракталов и физики их применения в радиолокации, радиосистемах, а также в цифровой обработке информации, не была бы столь эффективной, систематической и широкой.

Список литературы

1. Вопросы перспективной радиолокации // Б.В. Бункин [и др.]. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
2. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.
3. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки; изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
4. Сергей Михайлович Рытов: жизнь, воспоминания, интервью, записки, стихи, документы / сост. В.М. Березанская, Н.С. Рытова; под ред. А.А. Гиппиуса. М.: ЛЕНАНД, 2012. 552 с.
5. Oldham K.B., Spanier J. The Fractional Calculus. N.-Y.: Academic Press, 1974. 234 p.
6. Потапов А.А., Черных В.А. Дробное исчисление А.В. Летникова в физике фракталов. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 688 с.
7. Андреев Г.А., Потапов А.А. Миллиметровые волны в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 11. С. 28–62.
8. Потапов А.А. Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн: дис. ... д-р физ.-мат. наук: 01.04.03. М.: ИРЭ РАН, 1994. 436 с.
9. Потапов А.А. Фракталы и хаос как основа новых прорывных технологий в современных радиосистемах / дополнение к кн.: Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах; пер. с англ. под ред. Т.Э. Кренкеля. М.: Техносфера, 2006. С. 374–479.
10. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов [и др.]; под ред. А.А. Потапова. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
11. Потапов А.А. Фрактальные модели и методы на основе скейлинга в фундаментальных и прикладных проблемах современной физики // Сб. науч. тр. «Необратимые процессы в природе и технике» / под ред. В.С. Горелика и А.Н. Морозова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН. 2008. Вып. II. С. 5–107.
12. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в обработке информации (Московская научная школа фрактальных методов в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 1981–2011 гг.) // Сб. науч. тр. «Необратимые процессы в природе и технике» / под ред. В.С. Горелика и А.Н. Моро-

- зова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН. 2012. Вып. IV. С. 5–117.
13. Гельфанд И.М., Шилов Г.Е. Обобщенные функции и действия над ними. М.: Физматлит, 1958. 440 с.
 14. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы / пер. с англ. под ред. А.В. Борисова. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 528 с.
 15. Гнеденко Б.В., Колмогоров А.Н. Предельные распределения для сумм независимых случайных величин. М.; Л.: Гостехиздат, 1949. 264 с.
 16. 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.
 17. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Элементы теории фракталов // *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45. № 11. С. 1285–1292.
 18. Андреев Г.А., Потапов А.А. Влияние хаотических неровностей поверхности на отраженный импульсный сигнал миллиметровых волн // *Радиотехника и электроника*. 1986. Т. 31. № 7. С. 1405–1414.
 19. Потапов А.А. Применение модулированных ММВ для формирования и идентификации изображений // *Радиотехника*. 1989. № 12. С. 61–64.
 20. Дисперсионный метод обнаружения детерминированных объектов на текстурных оптических и радиолокационных изображениях земной поверхности / А.А. Потапов [и др.] // *Радиотехника и электроника*. 1990. Т. 35. № 11. С. 2295–2301.
 21. Метод выделения контуров протяженных детерминированных объектов в стохастических полях / А.А. Потапов [и др.] // *Радиотехника и электроника*. 1991. Т. 36. № 11. С. 2240–2242.
 22. Потапов А.А., Колесников А.И. Корреляционные характеристики изображений земной поверхности // *Радиотехника и электроника*. 1993. Т. 38. № 7. С. 1270–1279.
 23. Потапов А.А., Колесников А.И. Спектральные характеристики изображений земной поверхности // *Радиотехника и электроника*. 1993. Т. 38. № 10. С. 1851–1862.
 24. Потапов А.А. Исследование влияния растительного покрова на обратнорассеянное поле миллиметровых волн // *Радиотехника и электроника*. 1991. Т. 36. № 2. С. 239–246.
 25. Павельев В.А., Потапов А.А. Влияние земной поверхности на структуру импульсного сигнала в диапазоне миллиметровых волн // *Радиотехника и электроника*. 1994. Т. 39. № 4. С. 573–582.
 26. Потапов А.А. Обобщенный коррелятор полей, рассеянных шероховатыми поверхностями // *Радиотехника и электроника*. 1996. Т. 41. № 7. С. 816–823.
 27. Потапов А.А. Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоконтрастных целей // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 9. С. 1101–1119.
 28. Потапов А.А., Соколов А.В. Перспективные методы обработки радиолокационных сигналов на основе фрактальных и текстурных мер // *Известия РАН. Сер. Физическая*. 2003. Т. 67. № 12. С. 1775–1778.
 29. Потапов А.А. Моя встреча с Б. Мандельбротом // *Нелинейный мир*. 2007. Т. 5. № 6. С. 402–404.
 30. Потапов А.А. Бенуа Мандельброт (1924–2010) – человек, «преодолевший пропасть размерностей» // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2011. № 3. С. 5–10.
 31. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Фрактальный анализ сигналов // *Радиотехника и электроника*. 2001. Т. 46. № 3. С. 261–270.
 32. Потапов А.А., Герман В.А. Применение фрактальных методов для обработки оптических и радиолокационных изображений земной поверхности // *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45. № 8. С. 946–953.
 33. Потапов А.А., Герман В.А. О методах измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49. № 12. С. 1468–1491.
 34. Опаленов Ю.В., Потапов А.А. Стохастические сигналы и преобразование Радона при получении растровых радиолокационных изображений микроволновым цифровым радиолокатором с фрактальной обработкой информации // *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45. № 12. С. 1447–1458.
 35. Потапов А.А., Герман В.А. Эффекты детерминированного хаоса и странный аттрактор при радиолокации динамической системы типа растительного покрова // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28. № 14. С. 19–25.
 36. 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.
 37. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Основы теории рассеяния волн фрактальной поверхностью // *Радиотехника и электроника*. 2002. Т. 47. № 5. С. 517–544.
 38. Потапов А.А. Фрактальный анализ в современных задачах радиолокации и радиофизики // *Радиотехника*. 2003. № 8. С. 55–66.
 39. Потапов А.А. Синергетические принципы нелинейной динамики и фракталы в разработке новых информационных технологий для современных радиосистем // *Радиотехника*. 2005. № 8. С. 73–88.
 40. Development and structure of the first etalon dictionary of fractal properties of target classes / A.A. Potapov [et al.] // *Electromagnetic Phenomena*. 2005. V. 5. № 2(15). P. 107–142.
 41. Потапов А.А. Современное состояние и тенденции развития прорывных фрактальных технологий в радиофизике и радиоэлектронике // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2006. Т. 9. № 3. С. 44–54.

42. Потапов А.А. К теории функционалов стохастических полей обратного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 261–310.
43. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы как основа новых методов обработки информации и конструирования фрактальных радиосистем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 5(77). С. 3–19.
44. Potapov A.A. The global fractal method and the fractal paradigm in fundamental radar problems // Book of Abstracts Int. Conf. «Dynamics, Bifurcations and Strange Attractors» Dedicated to the Memory of L.P. Shil'nikov (1934–2011). Nizhni Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 2013. P. 98.
45. Потапов А.А. Методы обработки малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов интегральными операторами и дробными фрактально-скейлинговыми методами // Сб. «Инновационные разработки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук». М.: «Република», 2013. С. 15.
46. Потапов А.А. Фрактальный метод и фрактальная парадигма в современном естествознании. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. 108 с.
47. Потапов А.А. Топология выборки // Нелинейный мир. 2004. Т. 2. № 1. С. 4–13.
48. Потапов А.А., Герман В.А. Фрактальный непараметрический обнаружитель радиосигналов // Радиотехника. 2006. № 5. С. 30–36.
49. Потапов А.А., Герман В.А. Методы фрактальной обработки слабых сигналов и малоконтрастных изображений // Автометрия. 2006. Т. 42. № 5. С. 3–25.
50. Идеи скейлинга и дробной размерности в схеме фрактального обнаружителя радиосигналов / Ю.В. Гуляев [и др.] // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 8. С. 968–975.
51. Potapov A.A. On fractal theory in radio engineering, micro- and nanoelectronics // Problems of Non-Linear Analysis in Engineering Systems. 2008. V. 14. № 1(29). P. 165–177.
52. Потапов А.А. Концепция фрактальных радиосистем и фрактальных устройств: анализ и синтез // Динамика сложных систем. 2008. Т. 2. № 1. С. 11–29.
53. Опаленов Ю.В., Потапов А.А. Фрактальная радиолокационная радонометрия: Эндоморфизмы радоновских представлений // Electromagnetic Phenomena. 2005. V. 5. № 2(15). P. 143–159.
54. Избранные вопросы теории и практики линейной и нелинейной радиолокации: в 3-х частях. Ч. I. Линейная радиолокация, 240 с.; Ч. II. Нелинейная радиолокация, 234 с.; Ч. III. Нелинейная радиолокация, 180 с. / А.А. Потапов [и др.]; под ред. А.А. Потапова. М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2014.
55. О проектировании фрактальных радиосистем. Численный анализ электродинамических свойств фрактальной антенны Серпинского / Ю.В. Гуляев [и др.] // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 9. С. 1070–1076.
56. Леонов К.Н., Потапов А.А., Ушаков П.А. Использование инвариантных свойств хаотических сигналов в синтезе новых помехоустойчивых широкополосных систем передачи информации // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 12. С. 1209–1229.
57. Foukzon J., Men'kova E., Potapov A.A. The solution classical feedback optimal control problem for m-persons differential game with imperfect information // Open Journal of Optimization. 2013. V. 2. № 1. P. 16–25.
58. Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / под ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003. 720 с.
59. Foukzon J., Men'kova E., Potapov A.A. The solution classical feedback optimal control problem for m-persons differential game with imperfect information // Open Journal of Optimization. 2013. V. 2. № 1. P. 16–25.
60. Потапов А.А. Новые виды и методы синтеза динамических фрактальных обнаружителей пространственно-временных сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 2. С. 24–40.
61. Потапов А.А., Шифрин Я.С., Кузеев Р.Р. Генетические и самоаффинные методы проектирования фрактальных антенн // Антенны. 2014. № 3 (202). С. 25–48.
62. Потапов А.А. Колебания, волны, структуры и системы на примерах глобального фрактально-скейлингового метода (множества меры нуль, сингулярности, скейлинг, топология выборки, спрайты, джеты, эльфы, мемристоры, осцилляторы, фрактальные лабиринты, робастные антенные решетки и фрактальные обнаружители) // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 4. С. 3–38.
63. 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-matematicki fakultet Ulverziteta u Pristini (Serbia), 2014. P. 539–552.
64. Потапов А.А. Фрактально-скейлинговые методы в радиолокации // Юбилейная НТК ОАО «Концерн «Вега»: Программа и тезисы (Москва, 16–17 октября 2014 г.). М.: ОАО «Концерн «Вега», 2014. С. 9 (см., также, Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 5).
65. Потапов А.А. Классификационные построения фрактальных радиолокаторов и их систематика // Сб. докл. VIII Всероссийской НТК «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 24 – 26 ноября 2014 г.). М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2014. С. 222–226.
66. Потапов А.А. О фрактальных радиолокаторах и их схемотехнике // Труды восьмой Всероссийской конф. «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 27–29 января 2015 г.). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. Часть I. С. 104–111.

67. Потапов А.А. Опыт создания и примеры использования глобального фрактально-скейлингового метода в радиопрозрачности, радиолокации и радиотехнике (1980–2015) // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 189–206.
68. Потапов А.А. Фрактальная радиолокация: промежуточные итоги и новые задачи // Сб. докладов XXI Междунар. НТК «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 14–16 апреля 2015 г.). Воронеж: НПФ «Саквое», 2015. Т. 2. С. 560–581.
69. Потапов А.А. Фрактально-скейлинговые или масштабно – инвариантные принципы радиолокации и их применение в РСА, БПЛА И МИМО – системах // III Всероссийская НТК «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО и комплексов управления и обработки информации (РТИ Системы ВКО – 2015)»: Программа и тезисы (Москва, 28 мая 2015 г.). М.: ОАО «РТИ им. академика А.Л. Минца», 2015. С. 17.
70. Potapov A.A. Fractals and scaling in the radar: a look from 2015 // Book of Abstracts 8th Int. Conf. (CHAOS' 2015) on Chaotic Modeling, Simulation and Applications (Paris, France, Greece, 26–29 May 2015). Paris: Henri Poincare Institute, 2015.
71. Потапов А.А. Фракталы и скейлинг в радиолокации: взгляд из 2015 года // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2.
72. Потапов А.А., Ильин Е.М., Чигин Е.П. Размерные и топологические эффекты при фрактально-скейлинговом обнаружении и обработке многомерных сигналов // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2.
73. Потапов А.А. Фрактальный радиолокатор // Вестник РГРТУ. 2015. № 2 (Вып. 51).
74. Потапов А.А. К проблеме фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации: взгляд из юбилейного 2015 года // Материалы 9-й Междунар. науч. конф. «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Казахстан, Караганда, 18–20 июня 2015 г.). Караганда: Изд. КарГУ им. академика Е.А. Бекегова, 2015.
75. Потапов А.А. О принципе фрактальной радиолокации «Максимум топологии при минимуме энергии» для принимаемого сигнала // Book of Abstracts Third Int. Scientific Symp. «The Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2015)» (Moscow, 22–26 June 2015). М.: Янус-К, 2015.
76. Potapov A.A. New conception of fractal radio device with fractal antennas and fractal detectors in the MIMO – systems // Book of Abstracts Third Int. Scientific Symp. «The Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2015)» (Moscow, 22–26 June). М.: Янус-К, 2015.
77. Потапов А.А. Фрактально-скейлинговые или масштабно-инвариантные принципы радиолокации: взгляд из юбилейного 2015 года // Материалы 25-й юбилейной Международной Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо' 2015» (Севастополь, 6–12 сентября 2015 г.). Севастополь: Вебер, 2015.
78. Потапов А.А., Лактюшкин А.В. Частотная функция когерентности пространственно-временного радиолокационного канала формирования изображений анизотропной фрактальной поверхности и фрактальных объектов // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 9.
79. Потапов А.А. У истоков фрактально-скейлинговой радиолокации (1980–2015) // Радиотехника. 2015. № 9.
80. Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах, электродинамике, квантовой механике и космологии: в 3-х т. / С.А. Подосенов [и др.]; под ред. А.А. Потапова. М.: Ленанд, 2015. 1200 с.

The new direction in radio physics: fractal-scaling and scale-invariant radiolocation

A.A. Potapov

The new kind and approach of up-to-date radiolocation: fractal-scaling or scale-invariant radiolocation has been proposed. It leads to basic changes in the theoretical radiolocation structure itself and also in its mathematical apparatus. The fractal radio systems conception, sampling topology, global fractal-scaling approach and the fractal paradigm underlies the scientific direction established by the author in Russia and over the world for the first time. The author has been investigating these issues for exactly 35 years. The results of big practical and scientific importance obtained by the author were published in four summary reports of the Presidium of Russian academy of science (2008, 2010, 2012, 2013) and in the report for the Government of Russian Federation (2012).

Keywords: fractal, scaling, fractional operator, dynamic chaos, radio physics, radiolocation, radio engineering, radio systems.
