

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
ПРОРЫВНЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В
РАДИОФИЗИКЕ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

А.А. Потапов

**THE CURRENT STATE AND THE BREAK FRACTAL
TECHNOLOGY DEVELOPMENT TENDENCY IN THE RADIO
PHYSICS AND RADIO ELECTRONICS**

А.А. Potapov

В докладе рассмотрены основные результаты применения прорывных информационных технологий, предложенных и развиваемых в ИРЭ РАН с использованием текстурных (80-е гг. XX в.) и фрактальных (90-е гг. XX в.) сигнатур/мер на основе принципов детерминированного хаоса для решения современных радиофизических и радиоэлектронных задач [1 - 7]. Все исследования проводятся исключительно в рамках нового фундаментального междисциплинарного направления "Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: Проектирование фрактальных радиосистем".

Для каждой научной дисциплины весьма важны с точки зрения ее развития, те новые задачи, которые в ней ставятся и возникают. За почти 20-летний период автору удалось разработать ряд важных глав фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники, почти завершающих ее основные построения [1 - 3]. Одновременно, эти результаты открыли новые широкие выходы этих направлений в классическую радиофизику и радиоэлектронику, и показали перспективы новых больших применений. Следует отметить, что по данному направлению выпущено в свет несколько монографий и опубликовано более 160 научных работ (см., например, [1 - 62] и ссылки в них).

На рис. 1 показаны основные направления проводимых в ИРЭ РАН работ и приведены сведе-

ния о моменте их интенсивного развертывания: более подробно см. обширные ссылки в монографиях [1, 2].

**Фрактальное обнаружение
малоконтрастных объектов и
слабых сигналов**

Начнем с работ, впервые выяснивших одно из основных приложений теории фракталов – обработка одномерных и многомерных сигналов при малых отношениях сигнал/помеха q_0^2 [1, 2, 4 - 6, 8, 10 - 14, 17, 25 - 31, 33, 38 - 43, 45, 48, 49, 54 - 58, 61].

Разрабатываемые фрактальные цифровые методы позволяют частично преодолевать априорную неопределенность в радиолокационных задачах с помощью информации о геометрии (топологии) выборки – одномерной или многомерной [1, 2, 28]. При этом большое значение приобретают топологические особенности индивидуальной выборки, а не усредненные реализации, имеющие зачастую совершенно другой характер. В докладе приведены характеристики используемых в ИРЭ РАН классических и оригинальных, экспериментально отработанных, методов измерения фрактальной (дробной) размерности D , фрактальных сигнатур, а также соответствующих фрактальных кепстров одномерных и многомерных сигналов. Приведены характерные примеры цифровой фрактальной фильтрации малоконтрастных изображений в интенсивных помехах при различных условиях. Рассмотрены

А.А. Потапов, д.ф.-м.н.

г. Москва, ИРЭ РАН



Рис. 1

фрактальные методы кластеризации природных объектов.

Предложенные и экспериментально отработанные эффективные цифровые методы измерения фрактальных характеристик (фрактальных сигнатур, фрактальных кепстров и паретианов) могут быть широко использованы (и уже применяются) в различных физико-технических, астрономических, биологических, медицинских и т.п. исследованиях [1, 2, 4, 14, 31 – 37, 45, 48, 49, 61, 62]. Созданные в ИРЭ РАН методы и алгоритмы вычисления фрактальных сигнатур работоспособны в очень широком диапазоне физических размеров характерных деталей изображений и позволяют легко находить и детектировать эффекты скейлинга, замаскированные интенсивными шумами. Таким образом, следует отметить, что в работах ИРЭ РАН были впервые введены в практику радиофизики и радиоэлектроники признаки, основанные на теории дробной меры и физическом скейлинге.

Фрактальные распределения или паретианы

Введение дробной меры и учет скейлинговых эффектов вызывает необходимость работы преимущественно со степенными вероятностными распределениями. Их часто называют фрактальными распределениями, а также распределениями с “тяжелыми хвостами” или паретианами [1, 2, 4, 6, 25, 26, 33 – 43]. Для распределений с “тяжелыми хвостами” выборочные средние неустойчивы и малоинформативны из-за неприменимости классического закона больших чисел. Простые системы обычно имеют экспоненциальное и гауссовское распределения.

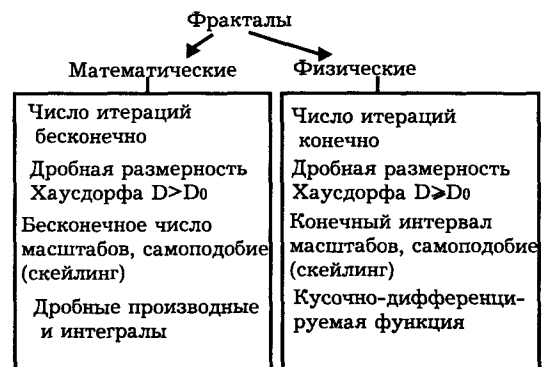


Рис. 2

В докладе показана эффективность фрактальных распределений с тяжелыми хвостами (паретианов) для решения рассматриваемого круга задач фильтрации [1, 2, 4, 6, 8, 11, 12, 45, 55, 56]. Данный факт объясняется тем, что на практике довольно часто сумма случайных величин сходится не к гауссовским, а к устойчивым распределениям с тяжелыми хвостами. В то же время, синтезированные на основе гауссовских моделей оптимальные решающие правила не относятся к робастным, и часто требуют эвристических методов селекции выборов.

В нашем случае применение устойчивых распределений мгновенных фрактальных размерностей D обрабатываемой выборки (одномерной или двумерной) позволяет в значительной степени снять указанные выше ограничения. Синтезированные на основе устойчивых распределений оптимальные решающие правила относятся непосредственно к классу робастных; поэтому они не требуют дополнительных эвристических приемов. Существенно то обстоятельство, что моделирование распределенных по Леви - Парето случайных величин может приводить к процессам аномальной диффузии широкой физической природы, описываемой дробными производными по пространственным и/или временным переменным. Явления аномальной диффузии возникают при переносе зарядов в полупроводниках, в квантовой оптике, в турбулентности, в хаотической динамике гамильтоновых систем, в сверхпроводниках, во фрактальных кластерах, в случае дальнедействующих корреляций и т.д. [1, 2, 4, 8, 23, 24, 59]. По сути дела уравнения с дробными производными описывают немарковские процессы с памятью.

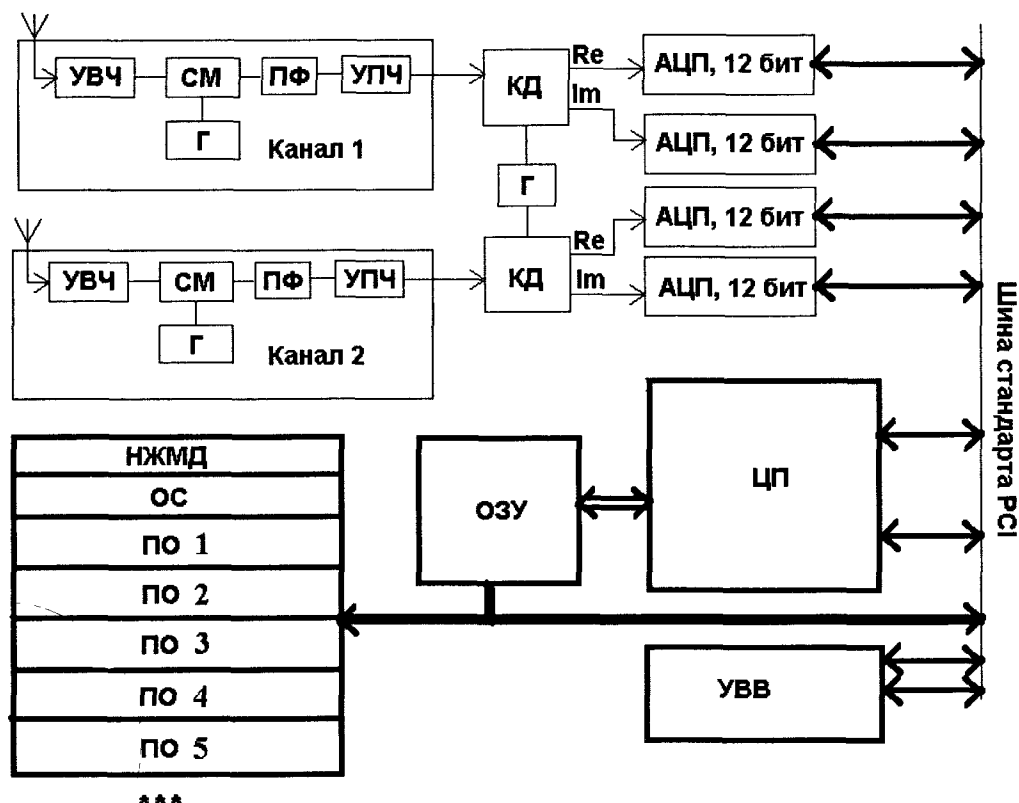


Рис. 3. Структурная схема фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов

Модели рассеяния радиоволн на основе странных аттракторов

В докладе рассмотрены избранные примеры создания новых динамических моделей рассеяния электромагнитных волн земными покровами. Обработка отраженных радиолокационных сигналов на длине волны 2,2 мм с помощью корреляционного интеграла позволила впервые определить в фазовом пространстве характеристики странного аттрактора [1, 2, 4, 6, 20, 21], управляющего рассеянием миллиметровых волн. Для измерения и реконструкции странного аттрактора были использованы оценки фрактальной размерности D , размерности вложения m , максимального показателя Ляпунова λ_1 и времени предсказания $\tau_{\max}$. Расчет корреляционного интеграла $C(r)$ проводился с использованием теоремы Ф. Такенса по выборке из 50 000 отсчетов.

Были получены следующие значения: $D = 1 \pm 1.184$; $m = 7$; $\lambda_1 \geq 0.6 \text{ бит/с}$; $\tau_{\max} \approx 1.7 \text{ с}$ при времени корреляции интенсивности отра-

женного сигнала $\tau \approx 210 \text{ мс}$ и скорости ветра 3 м/с. Следовательно, если текущие условия изменяются с точностью до 1 бита, то вся предсказательная мощность во времени потеряется примерно за 1,7 с. При этом интервал предсказания интенсивности радиолокационного сигнала превышает время корреляции примерно в 8 раз. Полученные результаты показывают, что для корректного описания процесса рассеяния радиоволн требуется не более 5 независимых переменных. Корреляционный интеграл $C(r)$ можно также применять как средство разделения режимов детерминированного хаоса и белого шума.

Полученные данные совместно с семейством фрактальных распределений лежат в основе новой динамической модели сигналов, рассеянных растительными покровами. Предложенная модель рассеяния электромагнитных волн земными покровами имеет принципиальное отличие от существующих классических моделей [9, 10]. Она имеет конечное число степеней свободы, описы-

вает процессы негауссовского рассеяния и вводит в рассмотрение интервал предсказания интенсивности принятого радиолокационного сигнала и его фрактальные характеристики. Особо отметим, что учет фрактальности земных покровов позволяет более точно описывать индикаторы рассеяния земных покровов, чем используемые в настоящее время классические модели [1, 2].

Разработка первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей

В [46, 47] изложены результаты по разработке первого эталонного словаря фрактальных признаков. Поставленная задача представляет большой научный и практический интерес в различных областях радиофизики, радиоэлектроники и информационно-управляющих систем. Формализация задачи синтеза эталонного словаря классически предполагает следующие этапы: (i) — первоначальная априорная классификация целей или их классов, т.е. составление алфавита классов целей; (ii) — определение необходимого перечня фрактальных признаков, характеризующих цели; (iii) — разработка эталонного словаря фрактальных признаков целей или классов целей; (iv) — описание алфавита классов целей на языке ансамбля фрактальных признаков эталонного словаря или их сочетаний; (v) — разбиение пространства фрактальных признаков на области, соответствующие исходным классам алфавита; (vi) — выбор метрики (решающего правила) или алгоритмов распознавания, обеспечивающего отнесение распознаваемой цели к тому или иному классу целей.

При разработке первого эталонного словаря фрактальных признаков, в качестве последних были выбраны [1, 2, 46, 47]: 1) — значение фрактальной (дробной) топологической размерности D ; 2) — вид фрактальных сигнатур или фрактальных кепстров; 3) — вид пространственного спектра и значения пространственных частот, характеризующие текстуру изображений. Методы фрактального распознавания опираются на исследования топологии цели и фона, отображенной в одномерных и многомерных принятых радиолокационных сигналах. В случае фрактального подхода необходимо искать, реализовывать и использовать правила, которым подчиняется

дробная (сложная) топология рассматриваемых образов.

Алгоритмы фрактального распознавания образов основаны на использовании парадигмы "топология цели - ее фрактальная размерность" [1, 2, 13, 14, 25 - 27]. В качестве фрактальных примитивов для исследования вопросов распознавания образов на изображениях был использован набор фигур из "Танграма" [1, 2, 18, 33, 45]. В компьютерных экспериментах применялись 16 фигур "Танграма", включающие в себя многоугольники, силуэты искусственных сооружений, самолета, корабля, человека и животных. В [46, 47] приведены подробные результаты измерения фрактальных пространственных кепстров, фрактальных сигнатур и спектров пространственных частот всех фигур. Удалось выявить ряд общих закономерностей в тонкой структуре фрактальных кепстров и определить ранги средних фрактальных размерностей D для одиночных тангов и их совокупностей. Из полученного семейства признаков мы можем взять необходимый набор "фрактальных примитивов" - элементов "фрактального языка", чтобы моделировать реальные воздушные и наземные цели. При этом состав фрактальных примитивов (фрактальных символов), являющихся наименьшими элементами фрактального языка, будет зависеть от числа классов целей, которые необходимо обнаруживать в реальных условиях. Полученное множество и есть необходимый на практике "фрактальный алфавит" или "фрактальный словарь".

Первый фрактальный непараметрический обнаружитель радиосигналов

Создание первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей и постоянное усовершенствование алгоритмического обеспечения явились основными этапами при разработке первого в мире фрактального непараметрического обнаружителя радиосигналов (ФНОРС) в виде спецпроцессора [2 - 4, 29, 31, 41, 48, 49, 54 - 58].

Структурная схема макета первого ФНОРС приведена на рис. 1 [54, 57, 58]. В этой схеме приняты следующие обозначения: УВЧ — усилитель высокой частоты; СМ — смеситель; Г — гетеродин; ПФ — полосовой фильтр; УПЧ — усилитель промежуточной частоты; КД — квадратурный детектор (перенос спектра на нулевую частоту); Re, Im — действительная и мнимая

квадратуры; АЦП — аналого — цифровой преобразователь; ЦП — центральный процессор; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; УВВ — устройство ввода/вывода (монитор, клавиатура, манипулятор «мышь», принтер, сетевой адаптер); НЖМД — устройство накопления на жестких магнитных дисках; ОС — операционная система; ПО — программное обеспечение. В НЖМД ФНОРС хранятся следующие программное обеспечение (ПО): а) «ПО 1» — вычисление мгновенных значений фрактальной размерности D ; б) «ПО 2» — вычисление полной сигнатуры $\Lambda(\delta)$, обрабатываемого массива данных; в) «ПО 3» — вычисление в реальном времени реализаций наблюдаемых данных в разных временных масштабах, прореживание, интерполяция (сгущение); г) «ПО 4» — отбор данных по значениям их дробной меры; д) «ПО 5» — восстановление полезного сигнала из входной смеси с помощью многомасштабного фрактального анализа. В соответствии с решаемыми на практике задачами, ПО ФНОРС может быть в дальнейшем расширено. Описание работы макета ФНОРС, его характеристики обнаружения и примеры обработки одномерных радиосигналов в режиме текущего времени подробно приведены в работах [54, 57, 58].

Фрактальные антенны и фрактальные частотно-избирательные поверхности

Сведения о фрактальных антеннах появились в зарубежных работах с конца 80-х гг. XX в. Анализ и синтез фрактальных антенн привел в мировой практике к устойчивому термину «фрактальная электродинамика». Число зарубежных исследований по разработке различных конструкций фрактальных антенн в настоящее время стремительно растет (см. гл. 11 «Фрактальные антенны и методы их проектирования» [2]). В докладе подробно рассмотрены классы существующих и проектируемых фрактальных монополей и диполей, а также различные эквидистантные и неэквидистантные одномерные и двумерные фрактальные антенные решетки с использованием преобразования Фурье-Вейерштрасса. Анализируются различные конфигурации фрактальных лакунарных канторовых антенных решеток (спиральные, круговые, радиальные и нерегулярные). Обсуждаются понятия реконфигурируемых апертур и многодиапазонных антенных решеток с фрактальными излучающими элементами. Представлены результаты строгого анализа электродинамических свойств фрактальных антенн Сер-

пинского и с использованием дерева Кейли, на основе применения алгоритмов численного решения гиперсингулярных интегральных уравнений [5, 7, 50 – 52, 55, 60].

В отличие от традиционных методов, когда синтезируются гладкие диаграммы направленности антенны, в основе теории фрактального синтеза заложена идея реализации характеристик излучения с повторяющейся структурой на произвольных масштабах. Это дает возможность создавать новые режимы во фрактальной электродинамике, а также получать принципиально новые свойства. Помимо чисто классических задач, возможно и достаточно необычное использование фрактальных частотно-избирательных поверхностей. В частности, размещение фрактальных элементов на корпусе объекта может существенно исказить сигнатуру или радиолокационный портрет данного объекта [2, 4]. На рис. 4 приведены результаты вычисления частотных зависимостей входного импеданса $Z = \operatorname{Re} I + i \operatorname{Im} I$ для фрактальных монополей и диполей Серпинского с высотой $H = 0.35$ м и различными углами раствора α при вершине треугольника.

Можно выделить четыре резонансных частоты (рис. 4), на которых активная часть входного импеданса имеет минимум, а реактивная равна нулю. Уменьшение угла α приводит к увеличению значений резонансных частот f_p . Активная часть импеданса на всех значениях резонансных частот составляет несколько десятков Ом, что удобно при согласовании ее с распространенными типами фидеров. Значения резонансных частот для монополя Серпинского составляют $f_1 = 0.53$ ГГц; $f_2 = 1.1$ ГГц; $f_3 = 2.25$ ГГц и $f_4 = 4.7$ ГГц. Кроме того, на частоте $f_0 = 0.14$ ГГц имеется резонанс того же типа, что и для полуволнового вибратора. Резонансные частоты для диполя Серпинского равны 0.76 ГГц; 1.66 ГГц; 3.21 ГГц и 6.78 ГГц. Обширные результаты измерений в безэховой камере [51, 52] подтвердили численные результаты. Всегда отношение двух соседних частот примерно равно двум, что соответствует коэффициенту скейлинга для универсальной треугольной кривой Серпинского [1, 2, 5, 7]. На резонансных частотах анализировалось пространственное распределение плотности токов по фрактальным структурам. Был также проведен расчет поля в ближней зоне на разных частотах [52].

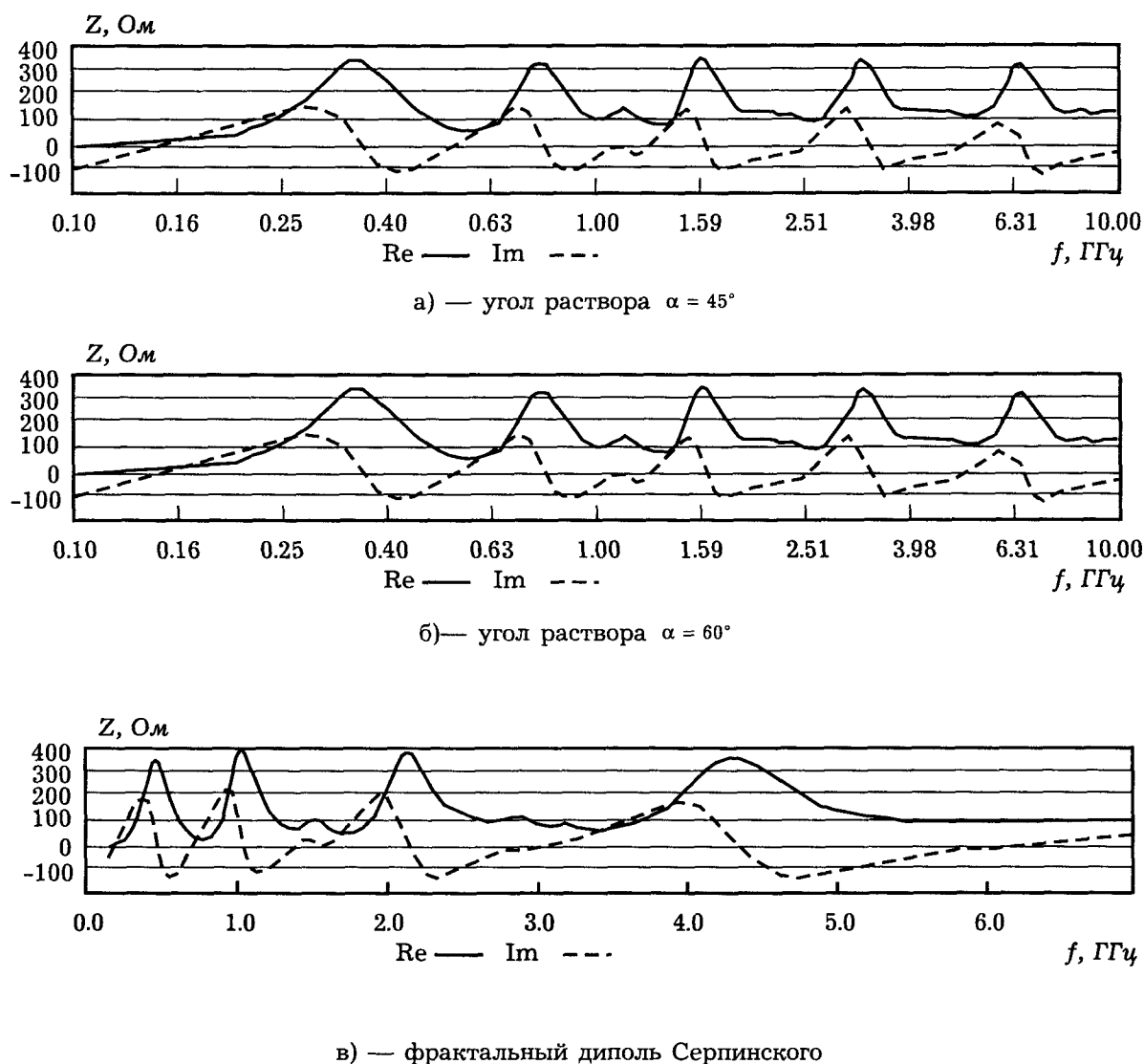


Рис. 4

Концепция фрактальных радиоэлементов и фрактальных радиосистем

Основываясь на полученных результатах, можно говорить о проектировании не только фрактальных элементов (устройств), но и непосредственно фрактальных радиосистем [1 - 7, 48 - 50, 55 - 59]. Такие фрактальные радиосистемы структурно включают в себя (начиная с входа) фрактальные антенны и цифровые фрактальные обнаружители, основаны на фрактальных методах обработки информации, а в перспективе могут использовать фрактальные методы модуляции и демодуляции радиосигналов [1, 2, 44]. Применение рекурсивного процесса позволяет, в принципе, создавать самоподобную иерархическую струк-

туру, вплоть до отдельных проводящих дорожек в микросхеме и в наноструктурах.

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

На основе фрактальных антенных систем можно конструировать также фрактальные поглощающие и отражающие покрытия, а также фрактальные радиолокационные заграждения. Полученные результаты позволяют распространить метод расчета на основе алгоритмов численного решения гиперсингулярных интегральных уравнений на широкий класс электродинамических

задач, возникающих при исследовании фрактальных магнетонных кристаллов [53], фрактальных резонаторов, фрактальных экранов, а также других фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов, которые необходимы для реализации предложенных автором фрактальных радиоэлементов и фрактальных радиосистем [1 – 7]. Некоторым прообразом таких систем в радиолокации, в частности, может служить много-частотный радиолокатор с применением параметронов в приемно-передающих каналах, сложным стохастическим сигналом большой базы в диапазоне СВЧ, полным поляризационным базисом и фрактально-радоновской фильтрацией принимаемых радиосигналов [1, 2, 8, 16].

На практике довольно часто, как отмечено выше, сумма случайных величин сходится не к гауссовским, а к устойчивым или “Леви – Парето” распределениям с тяжелыми хвостами (т.е., фрактальным распределениям – паретианам) [1 – 3, 6]. У таких распределений функция распределений является “широкой”. Это приводит к тому, что некоторые моменты такого распределения формально будут бесконечными. Моделирование распределенных по Леви – Парето случайных величин может приводить к процессам аномальной диффузии, описываемой дробными производными по пространственным и/или временным переменным.

Физическое моделирование дробных интегральных и дифференциальных операторов позволяет на основе нанотехнологий создавать радиоэлементы на пассивных элементах, моделирующие фрактальные импедансы $Z(\omega)$ с частотным скейлингом $Z(\omega) = A(j\omega)^{-\eta}$, где $0 \leq \eta \leq 1$, $A - \text{const}$, ω — угловая частота. Для этого была создана модель импеданса $Z(\omega)$ в виде бесконечной цепной (непрерывной) дроби. В случае конечной стадии построения эквивалентной электрической схемы для RC цепочек, когда используем n -ю подходящую дробь к данной непрерывной дроби, можно регулировать диапазоны частот, в которых будет наблюдаться степенная зависимость импеданса вида $\omega^{-\eta}$. В таком случае мы впервые реализуем на практике нелинейный “фрактальный конденсатор” [4, 56, 59].

В докладе также рассмотрен целый массив задач моделирования фрактальных импедансов для фрактальных радиоэлементов низкочастотных и высокочастотных диапазонов длин волн. В [2, 34 – 37] на основе проведенных экспериментов нами

впервые предложены методы оценок с использованием различных фрактальных характеристик качества поверхности изделий и свойств микрорельефа современных конструкционных материалов. В связи с интенсивным развитием методов обработки методов обработки концентрированными потоками энергии – КПЭ (лазерной, плазменной, электроэрозионной), а также нанотехнологий (химическая сборка, золь – гель процессы, парофазное осаждение металлов, атомно – слоевая эпитаксия), возникают значительные трудности в описании и оценке шероховатости профильным методом. В этих случаях форма элементов шероховатости, их распределение на обрабатываемой площади сильно отличается от традиционного представления о них, сформированного в рамках процесса обработки резанием, как о периодическом чередовании “выступов” и “впадин”, описываемых в рамках Евклидовой геометрии.

Следовательно, проблемы формирования качества поверхности, и в частности, такой важнейшей его характеристики как шероховатость, приобретают в настоящее время особую актуальность в связи с созданием новых технологий обработки материалов. Эти проблемы отчетливо проявляются в области нанотехнологий, для которых топология шероховатостей рассматривается не как вторичная характеристика, являющаяся “откликом” структуры поверхностного слоя на воздействие того или иного физического процесса (как в обработке резанием, например), а как свойство самой структуры, тем более, что размеры таких слоев сопоставимы с длиной свободного пробега в них электронов. В [2, 34 – 37] было доказано существование на уровне микрорельефа таких обработанных поверхностей фрактальных кластеров с распределением неровностей по степенным законам с тяжелыми хвостами.

Наличие фрактальности в таких различных средах можно контролировать, в частности, по изменению скин – эффекта и импеданса. Именно пространственная/временная эволюция тока позволяет электромагнитному полю “прощупать” фрактальные характеристики (фрактальные сигнатуры) исследуемой физической среды. Скейлинговые модели шероховатого слоя поверхности твердого тела часто можно представить в виде эквивалентных электрических схем, имеющих вид, например, канторовой пыли и т.д. [1, 2, 59].

На основе нанофазных материалов также можно создать планарные и объемные наноструктуры, моделирующие рассмотренные выше “фрактальные” радиоэлементы и радиоустройства микроэлектроники, т.е. речь идет о построении элементной базы нового поколения на основе фрактальных эффектов и свойств. В частности, элементарное обобщение канторова множества на физическом уровне позволяет перейти к так называемым канторовым блокам в планарной технологии молекулярных наноструктур.

В настоящее время заметное внимание специалистов уделяется моделированию фрактальных объектов комплексной динамики различными диссипативными системами. Наиболее естественный путь моделирования – это использование сценария Фейгенбаума перехода к хаосу через удвоение периода. В контексте нашей работы, множества Жюлиа, Фату и Мандельброта – интересные объекты для физической разработки новых форм и видов фрактальных антенн и других фрактальных структур на их основе [1, 2, 55, 56, 59].

Предложенные автором фрактальные радиосистемы открывают новые возможности в современной радиоэлектронике и могут иметь самые широкие перспективы практического применения.

В результате чтения лекций по разработанным А.А. Потаповым в ИРЭ РАН фрактальным технологиям и докладам по проекту МНТЦ в 2000 г. и 2005 г. в США (Вашингтон, Нью Йорк, Хантсвилл, Атланта, Франклин) в декабре 2005 г. американскими специалистами в официальном письме на имя директора ИРЭ РАН академика Ю.В. Гуляева было отмечено, что “...Семинары были крайне интересны и подтвердили высокую научную квалификацию доктора А. Потапова. Радиолокационные технологии, представленные доктором А. Потаповым, основаны на теории фракталов и являются новыми. Важность этих исследований для международного сообщества специалистов и ученых неоспорима”. Тогда же состоялась научная встреча А.А. Потапова с основателем фрактальной геометрии Б. Мандельбротом.

Становление теории фракталов – яркий пример развития нового направления науки, в равной мере основанного как на достижениях в весьма абстрактных областях математики, так и на новом взгляде на давно известный эмпирический

материал, который до создания адекватных моделей не поддается даже научному описанию и интерпретации. Обладая большой объяснительной силой, теория фракталов стимулирует развитие естествознания.

Применение теории фракталов позволяет вскрыть огромные неиспользуемые ранее резервы и применить их, в частности, в области различных технических приложений. Кардинальные шаги, заключающиеся в переводе принятых радиосистемой сигналов целочисленной меры в пространство дробной меры и привлечение затем скейлинговых соотношений, позволяют привнести в традиционные области радиоэлектроники и радиофизики совершенно новые идеи и методы и получать на их основе достаточно неожиданные для практики, но физически обоснованные результаты.

Литература

1. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. — М.: Логос. — 2002. — 664 с.
2. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. — М.: Университетская книга. — 2005. — 848 с. (Изд. 2-е, перераб. и доп.).
3. Александр Алексеевич Потапов (к 55-летию со дня рождения) // Нелинейный мир, 2006. — Т. 4. — № 4-5. — С. 163-164.
4. Потапов А.А. Синергетические принципы нелинейной динамики и фракталы в разработке новых информационных технологий для современных радиосистем // Радиотехника, 2005. — № 8. — С. 73-88.
5. Potapov A.A. New Information Radiophysical Technologies in Radiolocation: Fractal and Synergetic // Proc. 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies.- Noordwijk (Netherlands): ESTEC, 2005. — Pt. 2. — P. 1047 – 1050.
6. Потапов А.А. Синергетика и проблемы радиоэлектроники: основы, методы, прикладные задачи // В кн.: Синергетика. — М.: Изд. МГУ. — 2006. — Т. 8. — С. 163 – 179.
7. Potapov A.A. Modern Classes of Fractal Antennas and Fractal Frequency Selective Surfaces and Volumes // Abstracts Int. Conf “Day on Diffraction - 2006”.— St. Petersburg: SPbU, 2006. — P. 84 – 85.
8. Бункин Б.В., Реутов А.П., Потапов А.А. и др. Вопросы перспективной радиолокации (Коллективная монография) / Под ред. А.В. Соколова. — М.: Радиотехника. — 2003. — 512 с.
9. 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.

10. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В. Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой. — М.: Радиотехника. — 2005. — 368 с.
11. Потапов А.А. Детерминированный хаос в радиолокационных изображениях земной поверхности и фрактальные сигнатуры распознавания // Тез. докл. ЛП Научной сессии, посв. Дню Радио (Москва, 21 - 22 мая 1997 г.). — М.: Изд. СЗФП РЭС им. А.С. Попова, 1997. — Т. 1. — С. 169.
12. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации // Тез. докл. Региональной XXIII конф. по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 28 - 29 октября 1997 г.). — СПб.: Изд. СПбГУ. — 1997. — С. 25.
13. 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.
14. 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.
15. Потапов А.А. Фракталы в дистанционном зондировании // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 2000. — № 6. — С. 3 - 65.
16. 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.
17. Potapov A.A., German V.A. Fractal Method of Detection of Weak Signals from Complex Images // Book of abstracts Second Int. Conf. "Modern Trends in Computational Physics", (Russia, Dubna, July 24-29, 2000).- Dubna: JINR, 2000.- P. 132.
18. Potapov A.A., German V.A. Chines "Tangram" in Problems of Fractal Resolution // Book of abstracts Second Int. Conf. "Modern Trends in Computational Physics", (Russia, Dubna, July 24-29, 2000).- Dubna: JINR, 2000.- P. 133.
19. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Фрактальный анализ сигналов // Радиотехника и электроника, 2001. — Т. 46. — № 3. — С. 261 - 270.
20. 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.
21. Реутов А.П., Потапов А.А., Герман В.А. Странные аттракторы и фракталы как основа новой динамической модели радиолокационных сигналов, рассеянных растительным покровом // Нелинейный мир, 2003. — Т. 2. — № 1-2. — С. 12-27.
22. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Основы теории рассеяния волн фрактальной поверхностью // Радиотехника и электроника, 2002. — Т. 47. — № 5. — С. 517 - 544.
23. Потапов А.А. Краткое историческое эссе о зарождении и становлении теории дробного интегродифференцирования // Нелинейный мир, 2003. — Т. 2. — № 1-2. — С. 69 - 81.
24. Потапов А.А., Матвеев Е.Н. Фрактальная аномальная диффузия и операторы дробного интегродифференцирования // Тр. IX Всероссийской школы-семинара "Волновые явления в неоднородных средах" (Звенигород МО, 24 - 29 мая 2004 г.).- М.: Изд. МГУ, 2004. — С. 23 - 24.
25. Потапов А.А. Фрактальный анализ в современных задачах радиолокации и радиофизики // Радиотехника, 2003. — № 8. — С. 55 - 66.
26. Потапов А.А. Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малококонтрастных целей // Радиотехника и электроника, 2003. — Т. 48. — № 9. — С. 1101-1119.
27. Потапов А.А. Фракталы в задачах искусственного интеллекта: подходы, модели, некоторые результаты // Сб. тр. третьего расширенного семинара "Использование методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений в аэрокосмических исследованиях" (Переславль-Залесский, 26-27 ноября 2003 г., ИПС РАН). — М.: Физматлит, 2003. — С. 76 - 90.
28. Потапов А.А. Топология выборки // Нелинейный мир, 2004. — Т. 2. — № 1. — С. 4 - 13.
29. Потапов А.А. Фракталы, текстуры и динамический хаос как основа новых информационных технологий в радиолокации: Часть I.- Полученные результаты // Тез. докл. I НТК "Радиооптические технологии в приборостроении" (Сочи, 9 - 12 сентября 2003 г.). — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. — С. 58 - 59.
30. Потапов А.А. Перспективные информационные технологии бортовых и наземных радиосистем на основе фракталов, текстурных мер и динамических систем // Тез. докл. третьей НТК "Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в изделиях ракетно-космической техники разработки ГКНПЦ им. М.В. Хруничева", (Москва, 16 - 18 декабря 2003 г.). — М.: ИПУ РАН, 2003. — С. 272 - 275.
31. Potapov A.A., German V.A. Digital Fractal Processing in Signal and Image Analysis: Bases, Methods, Applications // Proc. 2nd IASTED Int. Multi - Conf. "Automation, Control, and Information Technology - ACIT'2005", Conf. "Signal and Image Processing".- Anaheim, Calgary, Zurich: ACTA Press; Novosibirsk: IAE SB RAS, 2005. — P. 60 - 65.
32. Потапов А.А., Герман В.А. О применимости фрактальной концепции к структурам во Вселенной // Тр. Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (Тез. докл. Всероссийской Астрономической конф. ВАК - 2004 "Горизонты Вселенной" (Москва, 2 - 10 июня 2004 г.). — М.: Изд. ГАИШ МГУ, 2004. — Т. 75. — С. 176 - 177.

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. Потапов А.А., Вячеслава О.Ф. Качественная и количественная оценка поверхности деталей машин на основе фрактальных размерностей и фрактальных сигнатур // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2004. — Т. 11. — № 4. — С. 901 – 903.
35. Булавкин В.В., Потапов А.А., Вячеслава О.Ф. Синергетический подход на основе фрактальных сигнатур в задачах качественной и количественной оценки микрорельефа обработанных поверхностей изделий // Нелинейный мир, 2005. — Т. 3. — № 1-2. — С. 128 – 145.
36. Потапов А.А., Булавкин В.В., Герман В.А., Вячеслава О.Ф. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур // ЖТФ, 2005. — Т. 75. — № 5. — С. 28 – 45.
37. Булавкин В.В., Потапов А.А., Герман В.А., Вячеслава О.Ф. Теория фракталов в проблеме формирования и оценки качества поверхности изделий // Тяжелое машиностроение, 2005. — № 6. — С. 19 – 25.
38. Потапов А.А. Синергетика и радиофизические процессы в радиолокации // Материалы Первой Междунар. науч.-практ. конф. “Стратегии динамического развития России: единство самоорганизации и управления” (Москва, 16 – 18 июня 2004 г.). М.: Изд. “Проспект” Российской академии государственной службы при Президенте РФ, 2004. — Т. III. — Ч. 3. — С. 129 – 135.
39. Потапов А.А. Фракталы и динамический хаос в современных проблемах дистанционного зондирования // Сб. докл. Второй Всероссийской науч. конф. “Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами” (Санкт – Петербург, 16 – 18 июня 2004 г.). — СПб.: Изд. РГТУ, 2004. — Т. 3. — С. 51 – 56.
40. Потапов А.А. Идеи синергетики, фрактальной геометрии и детерминированного хаоса в радиолокационных технологиях: фрактальная радиолокация и фрактальная радиофизика // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2004)” (Москва, 7 – 10 сентября 2004 г.). — М.: МИРЭА – ЦНИИ “Электроника”, 2004. — Ч. 2. — С. 20 – 25.
41. Потапов А.А. О теории и методах цифровой фрактальной обработки слабых радиолокационных сигналов // Тез. докл. 10-й Юбилейной междунар. науч. конф. “Теория и техника передачи, приема и обработки информации” (Туапсе, 28 сентября – 1 октября 2004 г.). — Харьков: ХНУ-РЭ, 2004. — Ч. 1. — С. 155 – 156.
42. Потапов А.А. Геометрия хаоса и фрактальная топология выборки как основа технологий современных радиосистем // Сб. тр. Междунар. НТК “Прикладная синергетика – II”, посвященной памяти Ильи Пригожина (Уфа, 20 – 22 октября 2004 г.). — Уфа: Изд. УГНТУ, 2004. — Т. 2. — С. 100 – 106.
43. Потапов А.А. О стохастичности и фрактальности в современных радиолокационных задачах // Proc. Int. Conf. “Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence – MSS-04” (Russia, Moscow, November 23 – 25, 2004). — М.: ИКИ РАН. — 2004. — Р. 508 – 513.
44. Потапов А.А. Фрактальные методы передачи информации // Тез. докл. III Всероссийской. конф. “Необратимые процессы в природе и технике” (Москва, 24 – 26 января 2005 г.). — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — С. 252 – 253.
45. Потапов А.А., Герман В.А. Фрактальная радиолокация и фрактальная радиофизика: Этапы становления, результаты, перспективы // Тр. X НТК “Радиолокация, навигация, связь” (Воронеж, 13 – 15 апреля 2004 г.).- Воронеж: Изд. НПФ “Саквоее”, 2004. Т. — III.- С. 1869 – 1896.
46. Потапов А.А., Ильин Е.М., Чигин Е.П., Герман В.А., Кузнецов Е.В., Чесноков Ю.С. Разработка и структура первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей // Тр. XI Междунар. НТК “Радиолокация, навигация, связь” (Воронеж, 12 – 14 апреля 2005 г.).- Воронеж: НПФ “Саквоее”, 2005. — Т. III.- С. 1724 – 1767.
47. Potapov A.A., Il'yin E.M., Chigin E.P., German V.A. Development and Structures of the First Etalon Dictionary of Fractal Properties of Target Classes // Electromagnetic Phenomena, 2005. — V. 5. — № 2 (15). — P. 105 – 141.
48. Потапов А.А. Об эффективности применения скейлинговых инвариантов и теории дробной меры в современных радиотехнических и радиофизических задачах // Тез. докл. Междунар. науч. конф. ИРЭМВ-2005 «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», посв. 110-й годовщине Дня радио (Таганрог, 20 – 25 июня 2005 г.). — Таганрог: Изд. ТГРТУ, 2005. — С. 20 – 23.
49. Потапов А.А. Об эффективности применения теории дробной меры и скейлинговых инвариантов в современных прикладных задачах радиолокации // Тр. 2 Междунар. радиоэлектронного форума МРФ-2005 «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харьков, 19 – 23 сентября 2005 г.).- Харьков: Изд. ХНУ-РЭ, 2005. — Т. II. Междунар. конф. «Системы локации и навигации». — С. II-110 – II-113.
50. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Давыдов А.Г. О проектировании фрактальных радиосистем. Численный анализ электродинамических свойств фрактальной антенны Серпинского // Радиотехника и электроника, 2005. — Т. 50. — № 9. — С. 1070 – 1076.
51. Реутов А.П., Потапов А.А., Замуруев С.Н., Баранников И.В., Потапов В.А., Ожерельев К.С. Результаты исследований некоторых классов фрактальных антенн и частотно-избирательных поверхностей // Тр. Междунар. науч. конф. ИРЭМВ-2005 “Излучение и рассеяние электромагнитных волн”, посв. 110-й годовщине Дня радио.- Таганрог: ТРТУ, 2005. — С. 24 – 25.
52. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Реутов А.П., Давыдов А.Г., Замуруев С.Н., Потапов В.А. Современные классы фрактальных антенн и методика численного ана-

- лиза их электродинамических свойств // Тр. 2-го Международ. радиоэлектронного форума МРФ-2005 "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". — Харьков: ХНУРЭ, 2005. — Т. V. Междунар. конф. "СВЧ и оптоэлектроника". — С. V-29 – V-32.
53. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Матвеев Е.Н. Фракталы в фотонных и магннных кристаллах // Тр. XII Междунар. конф. по спиновой электронике. — М.: МЭИ (ТУ), 2003. — С. 7 – 42.
54. Потапов А.А., Герман В.А. О проектировании фрактальных радиосистем. Алгоритмы функционирования и принципы аппаратной реализации первого фрактального непараметрического обнаружителя радиосигналов // Тр. XII Междунар. науч.- техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (Воронеж, 18 – 20 апреля 2006 г.).- Воронеж: НПФ "Саквое", 2006. — Т. 3. — С. 1726 – 1759.
55. Потапов А.А., Герман В.А., Потапов В.А. Фрактальные антенны, фрактальные обнаружители слабых сигналов и фрактальные частотно – избирательные структуры как основа новых радиоэлектронных систем и устройств // Тез. докл. Московской конф. "Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики" в рамках Российского Научного Форума "Демидовские чтения".- М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2006. — С. 132 – 133.
56. Потапов А.А., Потапов В. А. Роль скейлинговых эффектов, фракталов и теории дробной меры в создании одного из направлений в сфере прорывных информационных технологий // Тез. докл. Первой Всероссийской конф. "Искусственный интеллект: философия, методология, инновации" (Россия, Москва, 6 – 8 апреля 2006 г.). — М.: МИРЭА, 2006.— С. 170 – 173.
57. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Герман В.А. Применение теории фракталов, дробной меры и скейлинговых эффектов в схемах обнаружителей радиосигналов // Нелинейный мир, 2006. — Т.4. — № 4-5. — С. 165 – 171.
58. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Герман В.А. Идеи скейлинга и дробной размерности в схеме фрактального обнаружителя радиосигналов // Радиотехника и электроника, 2006. — Т. 51. — № 8.
59. Потапов А.А., Потапов А.А. (мл.), Потапов В.А. Фрактальный конденсатор, дробные операторы и фрактальные импедансы // Нелинейный мир, 2006. — Т.4. — № 4-5. — С. 172 – 187.
60. Колесов В.В., Крупенин С.В., Потапов А.А. Численное моделирование сверхширокополосных фрактальных антенн // Нелинейный мир, 2006. — Т.4. — № 4-5. — С. 188 – 194.
61. Герман В.А., Потапов А.А. Пример использования гипотезы самоподобия в задаче обнаружения акустического сигнала // Нелинейный мир, 2006. — Т.4. — № 4-5. — С. 204 – 207.
62. Герман В.А., Кузнецов Е.В., Потапов А.А., Чесноков Ю.С. Проектирование фрактальных радиосистем. Избранные вопросы фрактальной обработки реальной радиолокационной информации // Нелинейный мир, 2006. — Т.4. — № 4-5. — С. 208 – 213.