

УДК 537.86 + 621.37 + 621.396

Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники.

Часть 2. Фрактально-скейлинговая радиолокация и новые информационные технологии¹

Потапов А. А.

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009, Российская Федерация
potapov@cplire.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В работе представлены научные направления и основные полученные автором результаты по созданию новых информационных технологий на основе текстур, фракталов, дробных операторов и динамического хаоса. Исследования проводятся в рамках научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 года по настоящее время. Введение в научный обиход радиолокации вышеупомянутых понятий позволило автору впервые в мире предложить, а затем и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты, которые объединены под обобщенным понятием «топология выборки» ~ «фрактальная сигнатура». В части 2 представлены результаты применения новых информационных технологий, предложенных автором.

Ключевые слова: радиофизика, радиолокация, нелинейная динамика, фрактал, текстура, дробный оператор, немарковский случайный процесс.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Потапов А. А. Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов,

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники. Часть 2. Фрактально-скейлинговая радиолокация и новые информационные технологии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 4. С. 476—488.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Потапов, А. А. Избранные результаты теоретических и экспериментальных 40-летних исследований текстур, фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для решения задач радиофизики и радиоэлектроники. Часть 2. Фрактально-скейлинговая радиолокация и новые информационные технологии / А. А. Потапов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 4. — С. 476—488.

Selected results of theoretical and experimental 40 years research of textures, fractals, fractional operators and scaling effects for solving problems of radio physics and radio electronics. Part 2. Fractal-and-scaling radio location and new information technologies

A. A. Potapov

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS
11/7, Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russian Federation
potapov@cplire.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *Research areas and main results on designing of the new information technologies on the basis of textures, fractals, fractional operators and dynamic chaos which were obtained by the author are presented in this work. The researches are conducted in the framework of scientific direction “Fractal radio physics and fractal radio electronics: designing of fractal radio systems”, which was initiated and is developed by the author in V. A. Kotel'nikov IREE RAS since 1979 and up to the present. Introduction of the conceptions above into the scientific usage of radio location allowed the author to propose and then to apply new dimensional and topological (not power!) signs or invariants for the first time in the world, which are united under a generalized conception “sampling topology” ~ “fractal signature”. Results of application of the new information technologies proposed by the author are presented in part 2.*

Keywords: *radio physics, radio location, non-linear dynamics, fractal, texture, fractional operator, non-Markovin random process.*

For citation (IEEE): A. A. Potapov “Selected results of theoretical and experimental 40 years research of textures, fractals, fractional operators and scaling effects for solving problems of radio physics and radio electronics. Part 2. Fractal-and-scaling radio location and new information technologies,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 476–488, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Применение идей масштабной инвариантности — «скейлинга» — совместно с теорией множеств, теорией дробной размерности, дробным исчислением, общей топологией, геометрической теорией меры и теорией динамических систем открывает 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 подходов и формул только классической математики.

Большое значение приобретает аналогия между современными задачами радиофизики и радиоэлектроники и теорией фазовых переходов и критических явлений. Как известно, в основе современной ренормгрупповой теории фазовых переходов лежит подход, базирующийся на гипотезе скейлинга, или масштабной инвариантности. На основе глубокой проработки данного научного направления автору удалось сформировать аналогичный подход для решения большого класса радиофизических и радиотехнических проблем.

Во второй части статьи представлены конкретные результаты применения созданных автором новых информационных технологий на основе понятий текстур, фракталов, дробных операторов и методов нелинейной динамики в современных задачах радиофизики, радиолокации, электродинамики, распространения и дифракции волн, теории антенн, радиотехники, нанотехнологий и т. п. Исследования, как отмечено ранее, проводятся в рамках научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 года по настоящее время.

2. Глобальный фрактально-скейлинговый метод в новых информационных технологиях

Эволюция взглядов автора за 40 лет развития им в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН «фрактальной идеологии» исследований показана на рис. 1—3, где также приведены сведения о моменте их интенсивного развер-

тивания и первых открытых публикаций [1—3]. На рис. 3 введены аббревиатуры: ФНОРС — фрактальный непараметрический обнаружитель радиолокационных сигналов, ФОС — фрактальный обнаружитель сигналов.

Условно в данных исследованиях можно проследить три этапа.

На *первом этапе* акцент был сделан на экспериментальной проверке фрактальности различных природных и искусственных образований, что позволило применить к ним понятия дробной размерности и масштабной инвариантности, и начать разработки методов фрактальной фильтрации объектов в различных интенсивных помехах.

Второй этап был целиком посвящен усовершенствованию созданных оригинальных алгоритмов фрактальной цифровой обработки сигналов и изображений, фрактальным методам обнаружения, распознавания, повышения контрастности, т. е. фрактальной обобщенной фильтрации.

Третий этап характеризуется переходом к проектированию фрактальной элементной базы и некоторых фрактальных узлов, а в перспективе фрактальных радиосистем в целом.

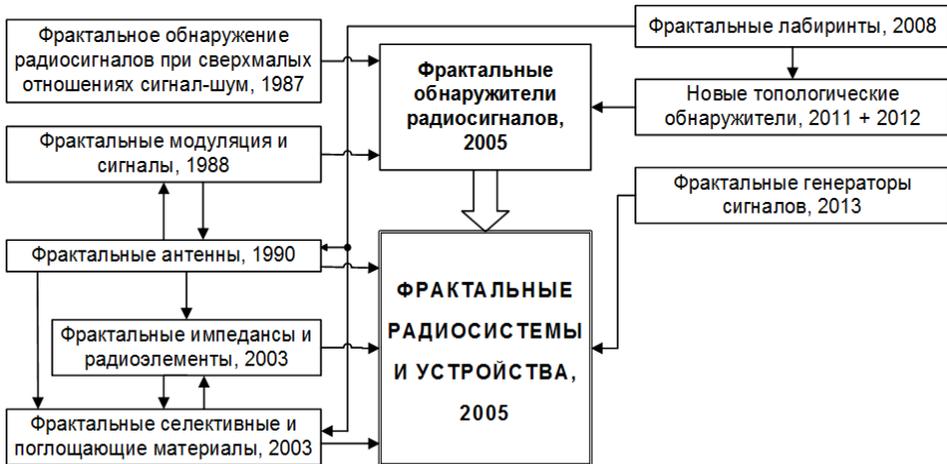


Рис. 1. Авторская концепция фрактальных радиосистем, датчиков, устройств и радиоэлементов.

Fig. 1. The author's conception of fractal radio systems, sensors, devices and radio elements.

Разработанная автором классификация фракталов была в декабре 2005 г. в США одобрена и принята Б. Мандельбротом [2, 3, 5] (рис. 2, а); она приведена на рис. 2, б, где описаны свойства фракталов при условии, что D_0 — топологическая размерность пространства, в котором рассматривается фрактал с дробной размерностью D .

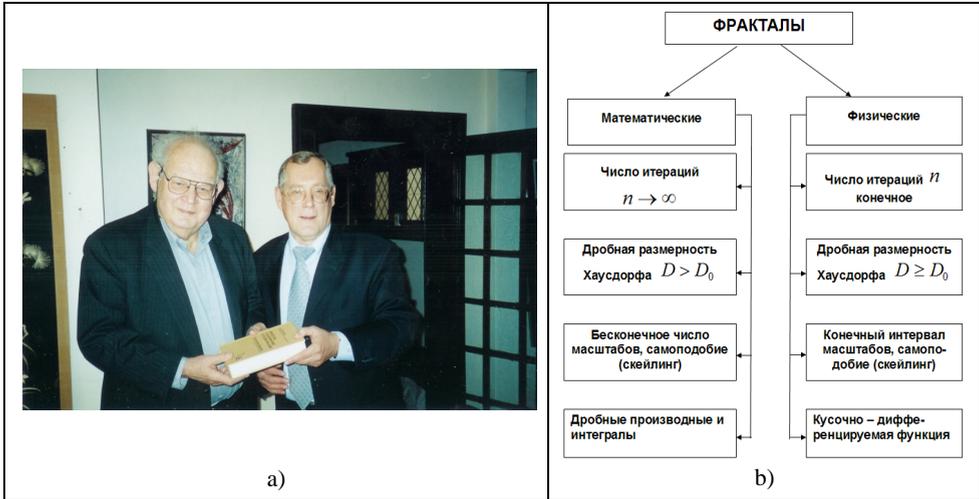


Рис. 2. Обсуждение новых идей в теории фракталов с Б. Мандельбротом в Нью-Йорке 16.12.2005 г. (а); авторская классификация фракталов, одобренная Б. Мандельбротом (б).

Fig. 2. Discussion of new ideas in the fractal theory with B. Mandelbrot in New York, 16.12.2005 (a); the author's fractals classification, approved by B. Mandelbrot (b)

На рис. 4 приведена полная структура авторских исследований в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН *текстурных* и *фрактальных* методов обработки малоcontrastных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовских помехах.

Фрактальная размерность D или ее сигнатура $D(t, f, \vec{r})$ в различных участках изображения поверхности является мерой текстуры. Фрактальные методы могут функционировать на всех уровнях сигнала: амплитудном, частотном, фазовом и поляриационном.

Весьма плодотворным оказалось введение автором в практику измерений понятий *фрактальных сигнатур* и *фрактальных кепстров*. Фрактальные сигнатуры и фрактальные кепстры отражают свойство самоподобия реальных сигналов и электромагнитных полей.

При этом большое значение приобретают *топологические особенности выборки*, а не усредненные реализации, имеющие зачастую другой характер. Для того чтобы акцентировать внимание на учете этих особенностей, автор ввел термин *размерностный склероз* сигналов, полей и их фрактальных сигнатур. При описании немарковских процессов для раскрытия физического смысла дробных производных используется термин *асимптотический склероз*.

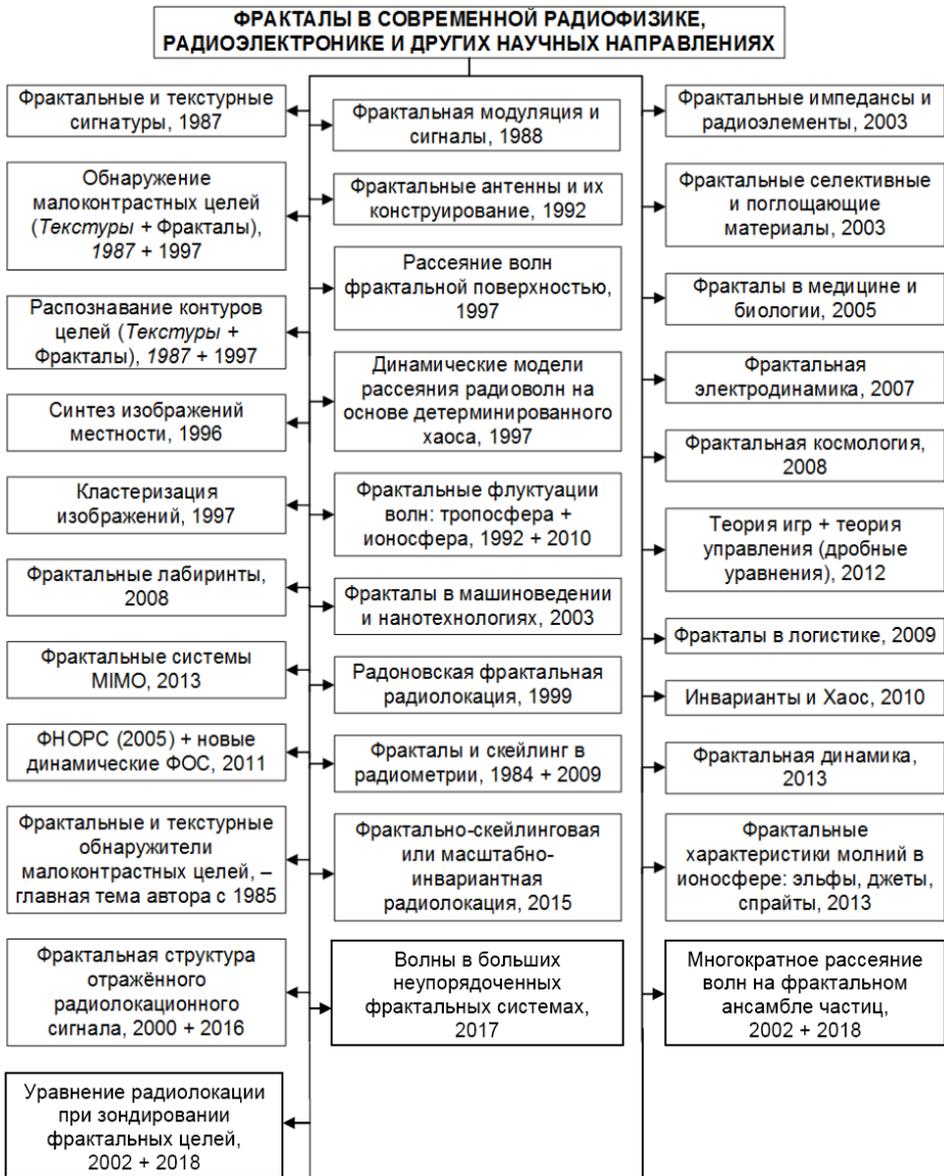


Рис. 3. Эскиз развития прорывных технологий на основе фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для нелинейной физики и радиоэлектроники.

Fig. 3. The layout of the author's development of new information technologies based on fractals, fractional operators and scaling effects for nonlinear physics and radio electronics



Рис. 4. Текстуры и фрактальные меры для малококонтрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовских помехах.

Fig. 4. Texture and fractal measures for low-contrast images and super-weak signals in intense non-Gaussian interference

Большое число примеров текстурно-фрактальной обработки малококонтрастных многомерных сигналов приведено в [2—4].

3. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация

Создание первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей и постоянное совершенствование алгоритмического обеспечения явились основными этапами при разработке и макетировании нами первого фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) в виде спецпроцессора. Обнаружение малококонтрастных объектов на фоне интенсивных помех требует вычисления принципиально новых характеристик, которые отличаются от функционалов, связанных с энергией сигнала и помех, а определяются лишь топологией и

размерностью принятого сигнала. Вышеприведенные исследования позволили автору *впервые в мире* предложить и применить для обнаружения малоконтрастных объектов новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты (рис. 5).



Рис. 5. Новые топологические признаки и методы обнаружения малоконтрастных объектов на фоне помех (ТП — текстурные признаки, ЧФК — частотная функция когерентности, РЛИ — радиолокационное изображение).

Fig. 5. New topological features and methods for detecting low-contrast objects against interference (TF – textural features, CFF – coherence frequency function, RI – radar image)

Предложенная автором *фрактально-скейлинговая* или *масштабно-инвариантная радиолокация* базируется на трех *постулатах*: 1 — интеллектуальная обработка сигнала/изображения, основанная на теории дробной меры и скейлинговых эффектов, для расчета поля фрактальных размерностей D ; 2 — выборка принимаемого сигнала в шумах относится к классу устойчивых негауссовых распределений вероятностей D сигнала; 3 — максимум топологии при минимуме энергии входного случайного сигнала.

Данные постулаты открывают в радиолокации принципиально новые возможности для обеспечения устойчивой работы при малых отношениях сигнал/помеха или для увеличения дальности действия радаров.

Классические методы обработки многомерных сигналов принципиально выделяют лишь только ту составляющую информации, которая связана с целочисленной мерой. Фрактально-скейлинговые методы обработки сигналов, волновых полей и изображений в широком смысле основаны на той части информации, которая при классических методах обработки радиолокационной информации никогда прежде не учитывалась. Алгоритмы обнаружения протяженных объектов и целей на оптических и радиолокационных изображениях с использованием текстурной обработки были созданы нами еще в 80-е годы XX века (рис. 5, слева).

4. Основные результаты за 40 лет исследований [1–11]

Впервые исследованы *полные* ансамбли текстурных и пространственных корреляционно-спектральных признаков оптических и радиолокационных изображений реальных земных покровов с последующим выделением кластеров и определением наиболее информативных признаков для определенных классов текстур. Проведенные эксперименты продемонстрировали эффективность и общность предложенного подхода в задачах классификации земных покровов при комплексировании изображений на оптических и миллиметровых волнах. Установлена связь размеров объекта и анализируемого фрагмента оптических и радиолокационных изображений широкого класса земных покровов в случае оптимального обнаружения текстурными методами.

Предсказано наличие странного аттрактора, контролирующего радиолокационное рассеяние от растительных покровов. Впоследствии эффект был обнаружен экспериментально на длине волны 2,2 мм (2002). Показано, что интервал (время) предсказания интенсивности отраженного радиолокационного сигнала примерно на порядок превышает классическое время корреляции. Это позволило ввести в теорию радиолокации новый характеристику, а именно, интервал (время) предсказания, что расши-

ряет методы радиолокации. Дано физическое обоснование применения фрактальных методов в современных областях радиофизики, радиоэлектроники и информационно-управляющих систем. В 1997 г. разработаны методы фрактальной модуляции и фрактальные сигналы, включая введенные автором H -сигналы.

Впервые обнаружена и доказана эффективность и перспективность применения теории дробной меры и скейлинговых соотношений (для текстуры и фракталов) в случае обнаружения и распознавания (обобщенной фильтрации) одномерных и многомерных радиолокационных сигналов от малококонтрастных целей на фоне интенсивных негауссовских помех разного рода. Таким образом, это *принципиально новая радиотехника*.

Результаты (БПЛА, РСА, медицина и т. д.) показывают, что фрактальные методы обработки дают повышение качества и детализации объектов и целей в пассивном и активном режиме в несколько раз. Эти методы могут быть успешно применены для обработки информации с космических, авиационных комплексов, малозаметных высотных псевдоспутников (НАРС) или обнаружения кластеров НАРС и БПЛА, синтезированных кластеров космических антенн и космического мусора. Исследованы фрактальные характеристики эльфов, джетов и спрайтов — наиболее интересных типов недавно открытых высотных разрядов в ионосфере. Синтезированы алгоритмы выделения движущегося удаленного объекта неизвестной формы (фрактального или не фрактального) на малококонтрастном изображении, формируемом в оптико-электронных системах. Впервые доказана принципиальная возможность синтеза новых фрактальных функций и фрактальных функционалов на основе теории нечетких множеств. Впервые показано, что физическое содержание теории дифракции, содержащей многомасштабные поверхности, становится более четким при фрактальном подходе и выделении фрактальной размерности D или фрактальной сигнатуры как параметра. Учет фрактальности сближает теоретические и экспериментальные характеристики индикатрис рассеяния земных покровов, что важно для радиолокации и дистанционного зондирования.

Получены аналоги уравнений Максвелла с дробными производными Капуто. Рассмотрена калибровочная инвариантность и выведено диффузионно-волновое уравнение для скалярного и векторного потенциалов. Найдено и проанализировано частное решение диффузионно-волнового уравнения. Проведен строгий электродинамический расчет многочисленных типов фрактальных антенн, принципы конструирования которых лежат в основе фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов (фрактальные «сэндвичи»). Синтезировано на основе топологии

фрактальных лабиринтов семейство широкополосных миниатюрных фрактальных антенн. Впервые предложена и реализована модель «фрактального» конденсатора как фрактального импеданса. Созданы, обоснованы и применены фрактально-скейлинговые методы для формирования основ фрактальной элементной базы, фрактальных датчиков и фрактальных радиосистем. Перспективными элементами фрактальной радиоэлектроники являются функциональные элементы, фрактальные импедансы которых реализуются на основе фрактальной геометрии проводников на поверхности (фрактальные наноструктуры) и в пространстве (фрактальные антенны), фрактальной геометрии поверхностного микрорельефа материалов и т.д. Развитые подходы могут быть распространены на класс электродинамических задач при исследовании фрактальных магнитных кристаллов, фрактальных резонаторов, фрактальных экранов и заграждений, а также других фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов.

Открыт, предложен и обоснован новый вид и новый метод современной радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация. Доказана эффективность функционалов, которые определяется топологией, дробной размерностью и текстурой принятого многомерного сигнала, для синтеза принципиально новых не энергетических обнаружителей малоcontrastных объектов на фоне помех. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации, а также в ее математическом аппарате. Проведенные исследования в области теоретической радиолокации позволяют создавать новые фрактальные многочастотные ММО-системы. Разработаны постулаты фрактально-скейлинговой радиолокации, открывающие новые возможности для обеспечения устойчивой работы при малых отношениях сигнал/(шум+помеха) или увеличения дальности действия радаров.

Существенно развиты теоретические вопросы фрактальной неинерциальной релятивистской радиолокации и квантовой космологии в искривленном пространстве — времени отрицательной фрактальной размерности. *Пример:* На основе уравнения Шредингера с оператором дробного исчисления по пространственным координатам вычислен Фейнмановский интеграл по траекториям для обобщенного лагранжиана с оператором дробного дифференцирования по времени.

4. Заключение

Впервые в России и в мире созданы, разработаны и применены фрактально-скейлинговые методы для задач радиолокации, формирования фрактальной элементной базы и фрактальных радиосистем. Коренное от-

личие предложенных автором текстурно-фрактальных методов от классических связано с принципиально иным подходом к основным составляющим сигнала и поля. Это позволило перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей. Таким образом, это *принципиально новая радиотехника*. Внедрение фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов дает «импульс» и современной радиоэлектронике, так как вся предыдущая и настоящая радиоэлектроника базируется исключительно на основе теории целочисленных функций.

Фрактальная геометрия — громадная и гениальная заслуга Б. Мандельброта (1924—2010). Но ее радиофизическое (радиотехническое) и практическое воплощение — это заслуга известной в мире Российской научной школы фрактальных методов под руководством проф. А. А. Потапова (*особенно после встречи с Б. Мандельбротом в США в 2005 г.*). Несколько утрируя, можно сказать, что фракталы составляли тонкую амальгаму на мощном острове науки конца XX в. В современной ситуации интеллектуальное фиаско потерпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания.

Результаты научной деятельности А. А. Потапова по фрактально-скейлинговой и текстурной обработке информации, а также по фрактальным радиосистемам и радиоэлементам опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума РАН и в Докладе Правительству РФ.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена в рамках государственного задания и была частично подержана Международным научно-техническим центром (проект № 0847.2, 2000–2005, США), Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ №05-07-90349, 07-07-07005, 07-07-12054, 07-08-00637, 11-07-00203, 18-08-01356-а), а также проектом “Leading Talents” (проект № 00201502, 2016—2020) в Джинанском университете (Гуанджоу, Китай).

Список литературы

1. Гуляев Ю. В., Потапов А. А. Применение теории фракталов, дробных операторов, текстур, эффектов скейлинга и методов нелинейной динамики в синтезе новых информационных технологий для задач радиоэлектроники (в частности, радиолокации) // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 9. С. 839—854.
2. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации : Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Университетская книга, 2005. 848 с.
3. 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.
4. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений / Под ред. А. А. Потапова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.

5. Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. — Глава 12 в книге : The Foundations of Chaos Revisited : From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas. Switzerland, Basel : Springer Int. Publ., 2016. Pp. 195—218.
6. Potapov Alexander A. On the Indicatrixes of Waves Scattering from the Random Fractal Anisotropic Surface. — Глава 9 в книге : Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology / Ed. Fernando Brambila. Rijeka : InTech, 2017. P. 187—248.
7. Potapov Alexander A. Postulate “The Topology Maximum at the Energy Minimum” for Textural and Fractal-and-Scaling Processing of Multidimensional Super Weak Signals against a Background of Noises. — Глава 3 в книге: Nonlinearity : Problems, Solutions and Applications. Vol. 2 / Ed. L. A. Uvarova. New York : Nova Science Publ., 2017. Pp. 35—94.
8. Потапов А. А. Многократное рассеяние волн на фрактальном ансамбле частиц и в больших неупорядоченных фрактальных системах. В кн. : Турбулентность, динамика атмосферы и климата / Под ред. Г. С. Голицына. М. : Физматкнига, 2018. С. 564—573.
9. Акиншин Р. Н., Петешов А. В., Пафилов Е. А., Потапов А. А., Румянцев В. Л. Физические основы устройства ракетно-артиллерийского вооружения. Алгоритмы и устройства функционирования бортовых радиотехнических средств воздушной разведки артиллерии. Пенза : Филиал ВА МТО, Пенз. арт. инж. ин-т, 2018. 400 с.
10. Alisultanov Z. Z., Agalarov A. M., Potapov A. A., Ragimkhanov G. B. Some Applications of Fractional Derivatives in Many-Particle Disordered Large Systems. — Глава 7 в книге: Fractional Dynamics, Anomalous Transport and Plasma Science / Ed. C. Skiadas. Switzerland : Springer Int. Publ., 2018. Pp. 125—154.
11. Профессор Александр Алексеевич Потапов. Биобиблиографический указатель / Под ред. академика Ю. В. Гуляева. М. : 2019. 256 с.

Информация об авторе

Потапов Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова и академик РАЕН, почетный профессор Евразийского национального университета (Астана, Казахстан), почетный профессор Джинанского университета (Гуанджоу, Китай), Президент совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, профессор Казанского государственного технического университета (КАИ) им. А. Н. Туполева, действительный член Вневедомственного экспертного совета по проблемам воздушно-космической сферы, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация.

Information about the author

Alexander A. Potapov, Dr. Sci. (Phys.-Math), academician of the Academy of Engineering Science of A. M. Prokhorov, academician of Russian Academy of Natural Sciences, honorary professor of the Eurasian National University (Kazakhstan, Astana), honorary professor of the University of Jinan (China, Guangzhou), President of the Sino-Russian Laboratory of Informational Technologies and Signals Fractal Processing, professor of Kazan State Technical University of A.N. Tupolev, full member of nonprofit non-government expert society on space threat defense, chief scientific researcher of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation.