



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5)

Обзорная статья
УДК 537.86 + 621.3

DOI: 10.18500/0869-6632-003183
EDN: YYRUFM

Зарождение и становление фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники в ИРЭ РАН

А. А. Потапов^{1,2}

¹Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²Университет Цзинань, Гуанчжоу, Китай

E-mail: ✉ potapov@cplire.ru

Поступила в редакцию 17.03.2025, принята к публикации 12.05.2025,

опубликована онлайн 19.06.2025, опубликована 30.09.2025

Аннотация. *Цель.* В статье изложены основные моменты зарождения, становления и развития применения теории фракталов, топологии, теории дробной размерности и скейлинга в решении задач радиоэлектроники и радиофизики в СССР и России в ИРЭ АН СССР и ИРЭ РАН, начиная с 80-х годов XX века. *Методы.* Актуальность проведения авторских исследований связана с необходимостью более точного описания реальных процессов, происходящих в современных интеллектуальных радиосистемах. Это, прежде всего, учет эрмитовости (памяти), негауссовости, скейлинга (самоподобия, автомодельности) и топологии физических сигналов и полей. *Результаты.* Все исследования проводятся в фундаментальном научном направлении «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированном и разрабатываемом автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 г. по настоящее время. *Заключение.* Автор развивает и усиливает свои идеи о том, что в радионауках должно быть прочно введено новое — «фрактальное» — измерение, причем не на вспомогательную роль, а в качестве фундаментального объясняющего фактора. Это позволяет перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей. Показана важная роль академика РАН Юрия Васильевича Гуляева в развитии данного фундаментального научного направления, выразившаяся, в частности, в его разнообразной помощи автору в продвижении своих идей в СССР, России и мире.

Ключевые слова: фрактал, текстура, скейлинг, дробные производные, радиофизика, радиоэлектроника, многопрофильное радио.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ РАН, тема «Эфир – 3».

Для цитирования: Потапов А. А. Зарождение и становление фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники в ИРЭ РАН // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 5. С. 748–776. DOI: 10.18500/0869-6632-003183. EDN: YYRUFM

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

The origin and formation of fractal radiophysics and fractal radio electronics at the IRE RAS

A. A. Potapov^{1,2}

¹V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia

²Jinan University, Guangzhou, China

E-mail: ✉ potapov@cplire.ru

Received 17.03.2025, accepted 12.05.2025, available online 19.06.2025, published 30.09.2025

Abstract. *Purpose.* The article describes the main points of the origin, formation and development of the application of fractal theory, topology, fractional dimension theory and scaling in solving problems of radio electronics and radiophysics in the USSR and Russia in the IRE of the USSR Academy of Sciences and IRE RAS, since the 80s of the XX century. *Methods.* The relevance of the author's research is related to the need for a more accurate description of the real processes occurring in modern intelligent radio systems. First of all, this takes into account the hereditary (memory), non-Gaussianity, scaling (self-similarity, self-similarity) and topology of physical signals and fields. *Results.* All research is carried out in the fundamental scientific direction "Fractal Radiophysics and Fractal Radioelectronics: Design of Fractal Radio Systems", initiated and developed by the author at the V. A. Kotelnikov IRE RAS from 1979 to the present. *Conclusion.* The author develops and reinforces his ideas that a new "fractal" dimension should be firmly introduced into radiosciences, and not as an auxiliary role, but as a fundamental explanatory factor. This allows us to move to a new level of the information structure of real non-Markov signals and fields. The important role of RAS academician Yuri Vasilyevich Gulyaev in the development of this fundamental scientific field is shown. His participation is expressed, in particular, in his diverse assistance to the author in promoting his ideas in the USSR, Russia and the world.

Keywords: fractal, texture, scaling, fractional derivatives, radio physics, radio electronics, multi-profile radio.

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the State assignment of IRE RAS, theme "Ether-3".

For citation: Potapov AA. The origin and formation of fractal radiophysics and fractal radio electronics at the IRE RAS. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5):748–776. DOI: 10.18500/0869-6632-003183

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Круг излагаемых в этой работе идей сложился как результат большого личного опыта исследования конкретных проблем теории фракталов, в особенности в области фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники¹. Недавно исполнилось ровно 45 лет моей работы в стенах ИРЭ АН СССР. Дело в том, что я пришел в ИРЭ АН СССР 3 сентября 1979 г. и стремился претворить свои мечты и идеи о фракталах в радиотехнике и радиофизике. В этот период моей жизни, когда я был уже сформировавшимся радиоинженером, и зарождалась концепция, которая на всю жизнь определила мои научно-исследовательские интересы в области создания основ фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники, а именно: в науке и технике должно быть прочно введено новое — «фрактальное» — измерение, причем не на вспомогательную роль, а в качестве фундаментального объясняющего фактора.

В данной статье мне захотелось привести некоторые весьма важные научные моменты, связанные с именем академика РАН Юрия Васильевича Гуляева, без которых не было бы столь стремительного и достаточно мощного развития и фрактальной радиоэлектроники, и фрактальной радиофизики в СССР. И я горд тем, что все это произошло именно в стенах ИРЭ АН СССР. В общем плане — это внедрение топологии, теории дробной размерности и скейлинга в классическую радиоэлектронику (радиотехнику, радиолокацию и т. д.). В частности, речь идет о создании

¹Термины «фрактальная радиофизика», «фрактальная радиолокация», «фрактальная радиоэлектроника» и т. п. введены автором [1–6] и употребляются исключительно для выделения главенствующей роли фракталов и для сокращения. Эти термины также входят в название нового фундаментального научного направления, инициированного и разрабатываемого автором с 1979 г. по настоящее время.

первого в мире фрактального топологического (неэнергетического!) обнаружителя сверхслабых сигналов. Прокомментировать можно следующим образом.

Сейчас в радиофизике, радиоэлектронике, обработке многомерных сигналов, потоках разнообразных больших данных (например, цифровая Земля) и т. д. преимущественно, привычно и повсеместно используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссова статистика, марковские процессы и т. п. Актуальность проведения авторских исследований была связана с необходимостью более точного описания реальных процессов, происходящих в современных интеллектуальных системах. Это, прежде всего, учет эрeditarности (памяти), негауссовости, скейлинга (самоподобия, автомодельности) и топологии физических сигналов и полей.

Все эти понятия входят в определение фрактальных множеств, или фракталов, впервые предложенное Б. Мандельбротом в 1975 году [7, 8]. Термин «фрактал» в конце прошлого века воспринимался как экзотика. Можно сказать, что фракталы образовывали тонкую амальгаму на мощном острове науки в конце 20-го века. Ситуация радикально изменилась с использованием фрактальных структур в технических приложениях для обработки стохастических сигналов и изображений, распространения и рассеяния радиоволн, электродинамики, проектирования антенных устройств, других электродинамических и радиотехнических конструкций, радиоэлементов с фрактальным импедансом, искусственного интеллекта и др. В настоящее время можно уверенно говорить о проектировании полностью фрактальных радиосистем. При этом физики включили в свой арсенал новый математический аппарат (дробное интегрирование), а математики обогатились новыми эвристическими соображениями и совместными постановками задач [1–6]. Таким образом, в современной ситуации интеллектуальное фиаско потерпели многочисленные попытки принизить значение фракталов и мультифракталов и опираться только на классические знания. Заметим, что класс непрерывных функций, не имеющих производной ни в одной точке, неизмеримо богаче класса функций с производными.

В работе рассмотрены базовые направления внедрения текстур, фракталов, дробных операторов, эффектов скейлинга и методов нелинейной динамики в фундаментальные задачи радиофизики, радиотехники, радиолокации и широкий спектр радиотехнических наук для создания новых информационных технологий. Исследования проводятся в рамках фундаментального научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 г. по настоящее время на основе работ автора с его учениками (первым в СССР и России) [1–6, 9, 10]. Без преувеличения можно сказать, что в настоящее время основным институтом в России, который на постоянной основе проводит фундаментальные исследования по фракталам и их применению в науке и технике, является ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН [1–6, 9–51].

Показана важная роль академика РАН Юрия Васильевича Гуляева в развитии данного фундаментального научного направления, выразившаяся, в частности, в его разнообразной помощи автору в продвижении идей о фракталах в СССР, России и мире.

Сначала я работал один. Затем с помощью зам. директора Андрея Владимировича Соколова постепенно создал и возглавил группу, занимавшуюся разработкой различных фрактальных применений. Среди первых молодых специалистов, участвующих в создании основ фрактальной радиоэлектроники и фрактальной радиофизики, необходимо отметить следующих: В. А. Германа (МГТУ им. Н. Э. Баумана), А. В. Лактюнькина (МГУ им. М. В. Ломоносова), Е. Н. Матвеева (МФТИ), В. А. Потапова (МИРЭА). Под моим руководством они успешно развивали следующие направления: В. А. Герман — неэнергетические фрактальные обнаружители и фрактальную обработку многомерных сигналов; А. В. Лактюнькин — распространение и рассеяние волн во фрактальных случайно-неоднородных средах; Е. Н. Матвеев и В. А. Потапов — фрактальные антенны и частотно-селективные устройства («фрактальные импедансы» — термин придуман и введен впервые нами) на их основе.

1. Исторические корни (Время смелых решений)

В августе 1979 г. мне позвонил из отдела кадров ИРЭ АН СССР Василий Сергеевич Козлов и сказал, что в Институте есть свободная ставка инженера. Я немедленно согласился и принялся оформлять документы. Единственная загвоздка была в том, что я тогда был ведущим конструктором Института металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, мой прибор должен был поехать за границу на международную выставку вместе со мной, моя зарплата в несколько раз превышала предлагаемую, у меня уже родился первый сын, и мы с супругой стояли в очереди на кооперативную квартиру. Но была молодость — только 28 лет, и время смелых решений. Сейчас мы с женой вспоминаем то время наших диспутов с улыбкой... Так я и оказался в ИРЭ АН СССР (о чем мечтал со школы) на должности инженера, а потом младшего научного сотрудника, и с 2002 г. по настоящее время — главного научного сотрудника.

Хочу отметить, что все вопросы, связанные с применениями теории фракталов, скейлинговых соотношений и дробных операторов в радиотехнике и радиофизике, также очень интересовали академика АН СССР, директора Института Владимира Александровича Котельникова. На своих встречах и обсуждении данных вопросов с автором Владимир Александрович отмечал большое значение этих направлений для развития фундаментальных и прикладных наук, а также значительные трудности с осуществлением их на практике и пониманием/восприятием их специалистами, воспитанными на традиционных математических и радиотехнических курсах. Таких встреч было несколько. И это несмотря на его чрезвычайную занятость! Кстати, академик В. А. Котельников охотно дал свое согласие войти в редакционную коллегию созданного автором в 2003 г. журнала «Нелинейный мир», освещающего все указанные выше направления, и участвовал в ее работе (беседа со мной) с начала 2004 г. до своей кончины.

В 80-е годы XX века Владимир Яковлевич Кислов и Евгений Павлович Чигин в стенах ИРЭ АН СССР организовали несколько семинаров с моими выступлениями по фракталам и дробным операторам в радиофизике и радиоэлектронике, что также повлияло на дальнейшее расширение исследований по фракталам и постановку поисковых НИР.

Член-корреспондент АН СССР Л.Д. Бахрах на заседании диссертационного совета в МФТИ (кафедра академика АН СССР Б. В. Бункина) в 1989 г. предложил переквалифицировать мою диссертацию по спецтеме с кандидатской на докторскую. В ответном слове я горячо поблагодарил диссертационный совет и сказал, что хочу защитить открытую докторскую, что и успешно произошло в октябре 1994 г. в ИРЭ РАН. Тема моей докторской диссертации на соискание ученой степени д.ф.-м.н. — «Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн» (ведущая организация ЦКБ «Алмаз», специальность «Радиофизика», официальные оппоненты — д.т.н. проф. Кулемин Г. П., д.ф.-м.н. с.н.с. Ржиги О. Н., д.ф.-м.н. проф. Фукс И. М.).

Именно Юрий Васильевич Гуляев гораздо ранее при мне позвонил Б. В. Бункину, познакомил меня с ним и подробно рассказал ему обо мне и моей научной деятельности. Так произошла моя встреча с академиком Б. В. Бункиным и со знаменитым ЦКБ «Алмаз», с которым я активно проработал несколько десятков лет. В декабре 2016 г. я был награжден медалью им. А. А. Расплетина от Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. Очень много было встреч и обсуждений текущих дел и планов НИР с моим старшим другом Евгением Михайловичем Сухаревым из ЦКБ «Алмаз» [5].

2. Общая характеристика выполненных пионерских НИР и ОКР по фракталам и мультифракталам

Проблема фрактально-скейлингового подхода к широкому кругу научно-технических проблем, вынесенная в название раздела, начала изучаться впервые в мире автором более 45 лет назад в ИРЭ АН СССР в связи с выполнением цикла фундаментальных исследований

с ведущими отраслевыми НИИ и конструкторскими бюро СССР и России (примерно 20 организаций), посвященных созданию новых прорывных технологий для радиолокации. Основное — это обнаружение по одномерной (вероятностный статистический сигнал) и многомерной (стохастические оптические и радиолокационные изображения — РЛИ) выборке разнообразных малоcontrastных объектов на фоне интенсивных помех от поверхности Земли. За период работы в ИРЭ РАН были выполнены более 50 фундаментальных и поисковых НИР и множество проектов РФФИ. В период 2001–2005 гг. автор являлся научным руководителем НИР, выполняемой по решению Секции прикладных проблем при Президиуме РАН.

В итоге проведения многолетних натурных экспериментов выполнен статистический анализ больших массивов данных по пространственно-временным характеристикам рассеяния земных покровов в диапазонах миллиметровых и сантиметровых радиоволн и дана их надежная интерпретация. Предложен и обоснован новый класс информативных признаков, основанный на тонкой структуре отраженных радиолокационных сигналов. Впервые исследованы полные ансамбли текстурных признаков оптических и радиолокационных изображений реальных земных покровов. На основе предыдущих результатов предложены и опробованы новые методы обнаружения слабых радиолокационных сигналов при наличии интенсивных негауссовских помех. Разработана модель стохастического авторегрессионного синтеза оптических и радиолокационных изображений земных покровов с объектами. Высокая степень достоверности синтеза (до 90%) позволяет использовать его при создании цифровых эталонных карт местности для летательных аппаратов. Важно отметить, что проводимые автором работы по исследованию информативности радиоизображений указанных выше типов с применением новых технологий текстурных мер не имели аналогов как в России, так и за рубежом, и не потеряли своей актуальности и в настоящее время.

В начале 90-х гг. XX в. автором были предложены и обоснованы топологические фрактальные (неэнергетические) методы обнаружения малоcontrastных объектов на фоне интенсивных негауссовских помех от поверхности земли, моря и осадков с выделением их контуров. В настоящее время можно говорить о надежном обосновании практического применения фрактальных методов, имеющих в своей основе дробные меры и скейлинговые соотношения, в современных областях радиофизики, радиолокации, телекоммуникаций, радиоэлектроники, нанотехнологиях и в конструировании элементной базы на совершенно новых физических принципах.

В 2005 г. в наших работах была сформирована и получила развитие концепция создания принципиально новых фрактальных радиосистем и фрактальной элементной базы. Также в 2005 г. в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН создан действующий макет фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС). На основе анализа некоторых типов фрактальных широкополосных и многодиапазонных антенн показано, что перспективными элементами фрактальной радиоэлектроники являются функциональные элементы, фрактальные импедансы которых реализуются на основе фрактальной геометрии проводников на поверхности (фрактальные наноструктуры, метаповерхности) и в пространстве (фрактальные антенны), фрактальной геометрии поверхностного микрорельефа материалов и т. д. Развитые подходы могут быть распространены на широкий класс электродинамических задач при исследовании фрактальных магнитных кристаллов и фрактальных метаповерхностей, фрактальных резонаторов, фрактальных экранов и заграждений, а также других фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов. Решена задача рассеяния волн фрактальными поверхностями с вычислением трехмерных индикаторов рассеяния.

Проведен строгий электродинамический расчет многочисленных типов фрактальных антенн, принципы конструирования которых лежат в основе фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов (фрактальные «сэндвичи»). Предложена и реализована модель «фрактального» конденсатора как фрактального импеданса, а также фрактальные лабиринты для синтеза СВЧ-структур. В 1997 г. впервые разработаны методы фрактальной модуляции и фрактальные широкополосные и сверхширокополосные сигналы, включая Н-сигналы.

В период 2001–2005 гг. совместно с ЦКБ «Алмаз» автор был соруководителем международного проекта № 0847.2 по линии МНТЦ по созданию многофункциональной автоматизированной радиоизмерительной системы со сложным сигналом на сантиметровых и миллиметровых волнах, использующей принципиально новые запатентованные технологии схемотехники и цифровой обработки информации на основе фрактальных и радоновских алгоритмов в режиме реального времени. Дважды по линии МНТЦ (2000 и 2005 гг.) автор выезжал в США в научные командировки (города Хантсвилл, Франклин, Вашингтон, Атланта, Нью-Йорк) с чтением лекций по фрактальным технологиям в радиолокации и радиотехнике. Американскими специалистами (Центр Космической Плазмы и Аэроисследований, г. Хантсвилл, США) в официальном письме к академику РАН Ю. В. Гуляеву от 14.12.2005 г. был отмечен мировой приоритет работ автора по применению теории фракталов в информационных и радиолокационных технологиях — рис. 1 [5]. В частности, 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».



IRE RAS Director
Academician Yu.V.Gulyaev

Dear Dr. Gulyaev:

It is my pleasure to inform you that Dr. A.Potapov has successfully presented several seminars in the Center for Space Plasma and Aeronomic Research (CSPAR) Center for Space Plasma and Aeronomic Research (CSPAR) at the University of Alabama in Huntsville. The seminars were of essential interest and confirmed high scientific credentials of Dr. A.Potapov. RADAR technologies presented by Dr. Potapov are novel and based on the fractal theory. Their importance for the international community of specialists and scientists is undeniable.

Thank you for your attention.

Sincerely,

S. T. Wu
Distinguished Professor Emeritus, University of Alabama System
Department of Mechanical and Aerospace Engineering (UAH)
Center for Space Plasma and Aeronomic Research (UAH)
Co-Director, Space Science Center of the NSSTC
Vice-President, Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP)
Fellow, American Institute of Aeronautics & Astronautics (AIAA)

Рис. 1. Письмо академику Ю. В. Гуляеву о русских приоритетах во фракталах

Fig. 1. Letter to Academician Yu. V. Gulyaev about Russian priorities in fractals

Тогда же состоялась встреча автора с основателем фрактальной геометрии Б. Мандельбротом у него дома в США, когда он принял и одобрил определение фракталов, введенное А. А. Потаповым, и его работы — (рис. 2 [5, 6]). Монография автора [2] внесена Мандельбротом в его знаменитый международный список лучших книг по фракталам. С тех пор в Москве у автора хранятся 6 томов избранных работ Б. Мандельброта с его воодушевляющими автографами.



a



b

Рис. 2. *a* — Встреча с Б. Мандельбротом в Нью-Йорке (16.12.2005); *b* — авторская классификация фрактальных множеств и сигнатур, одобренная Б. Мандельбротом (D_0 — топологическая размерность пространства вложения)

Fig. 2. *a* — Meeting with B. Mandelbrot in New York (16.12.2005); *b* — the author's classification of fractal sets and signatures, approved by B. Mandelbrot (D_0 is the topological dimension of the embedding space)

А. А. Потапов назначен Президентом совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (2011). В апреле 2015 г. автор в Пекине победил в международном научном конкурсе и выиграл Правительственный грант Китая «Leading Talents» по фрактальным методам обработки сигналов и изображений.

За период 2019–2024 гг. автором с китайскими учеными были совместно выполнены около десятка работ по фотонике и радиофотонике, которые опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах. Тематика этих статей: оптико-аналоговые вычисления пространственного дифференцирования и обнаружение контуров; метаповерхности Гюйгенса; управление рассеянием света наночастицами с помощью магнитоэлектрической связи и нулевое обратное рассеяние; теория рассеяния света наночастицами и электромагнитные мультиполи; численное моделирование; поверочные эксперименты в области частот от 4 до 7.5 ГГц; сильная оптомеханическая связь в цепочечных волноводах и кольцевых резонаторах из наночастиц и наностержней кремния с квазисвязанными состояниями в континууме (фотон — фононное взаимодействие с микроструктурами) и т. п.

В 2015 г. автором открыты, предложены, обоснованы и разработаны основополагающие принципы нового вида и нового метода современной радиолокации, а именно фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации (МИР) [5, 6]. Доказана эффективность функционалов, которые определяются топологией, дробной размерностью и текстурой принятого многомерного сигнала, для синтеза принципиально новых неэнергетических обнаружителей малоконтрастных объектов на фоне помех. Сформулированы основы фрактальной радиолокации:

- 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 (то есть максимальный «уход» от энергии принимаемого сигнала).

Данные принципы открывают новые возможности для обеспечения устойчивой работы при малых отношениях сигнал/(шум + помеха) или увеличения дальности действия радиолокаторов. Подтверждено повышение чувствительности радиосистемы (что эквивалентно увеличению дальности действия) при использовании фрактальных и текстурных признаков в топологических обнаружителях. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиотехники и радиолокации, а также в их математическом аппарате.

Ниже на рис. 3–6 схематически рассмотрены (включая данные начала 2025 г.) основные направления внедрения созданной автором топологической текстурно-фрактальной обработки (ТТФО) информации в новые прорывные технологии. Введение в научный обиход вышеупомянутых понятий позволило автору предложить и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты на основе изучения топологии выборки принятого сигнала.

А. А. Потапов — академик Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова (2008) и академик РАЕН (2007). Подготовил программу, разработал и прочитал в течение ряда лет лекции по специальному курсу «Применение фракталов и вейвлетов в радиолокации» для Центра подготовки специалистов в Концерне РТИ Системы (РТИ им. академика А. Л. Минца и ОАО НПК НИИДАР). По монографиям А. А. Потапова поставлены курсы лекций «Фракталы в статистической радиофизике», «Статистическая теория фрактальной радиолокации», «Фракталы в радиофизике и радиолокации», «Статистическая фрактальная радиотехника», «Фракталы в машиностроении» и т. п. в различных университетах России и стран ближнего зарубежья.

За разработки в области прорывных информационных технологий и реализацию научных проектов по текстурам, фракталам и дробным операторам в радиолокации, радиотехнике

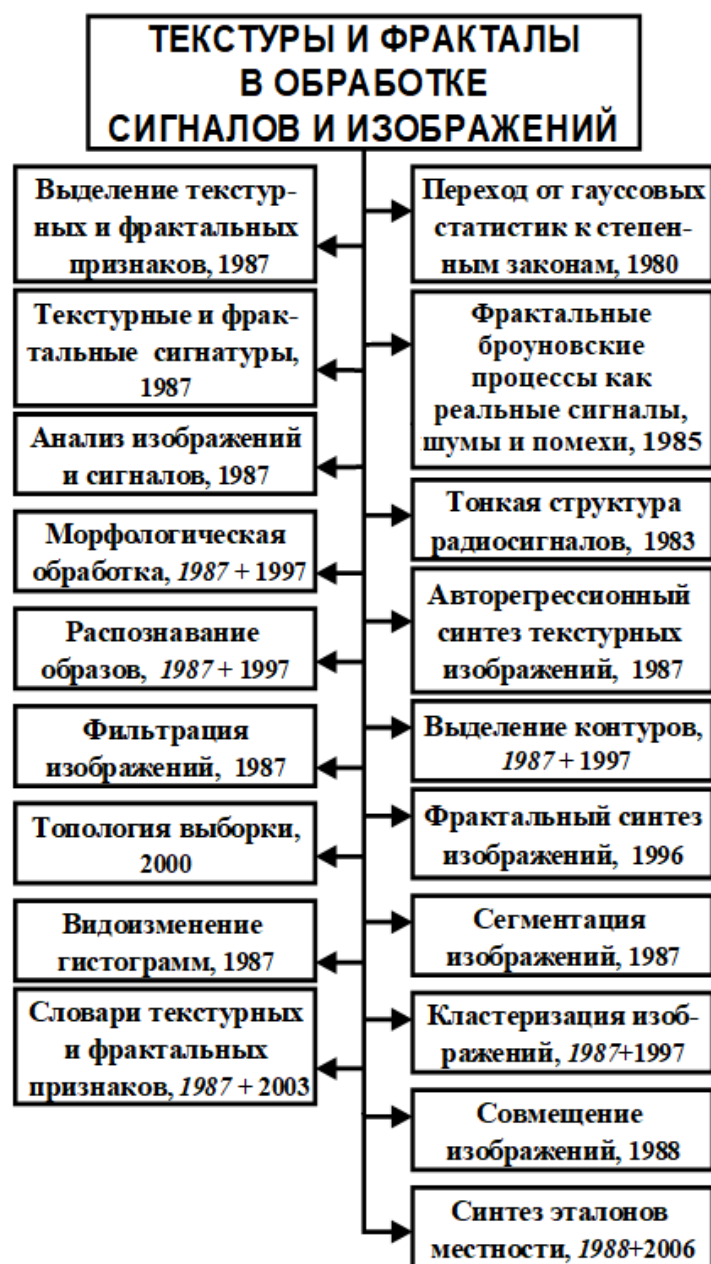


Рис. 3. Текстуры и фракталы для обработки малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов в шумах и помехах
 Fig. 3. Textures and fractals for processing low-contrast images and ultra-weak signals in noise and interference

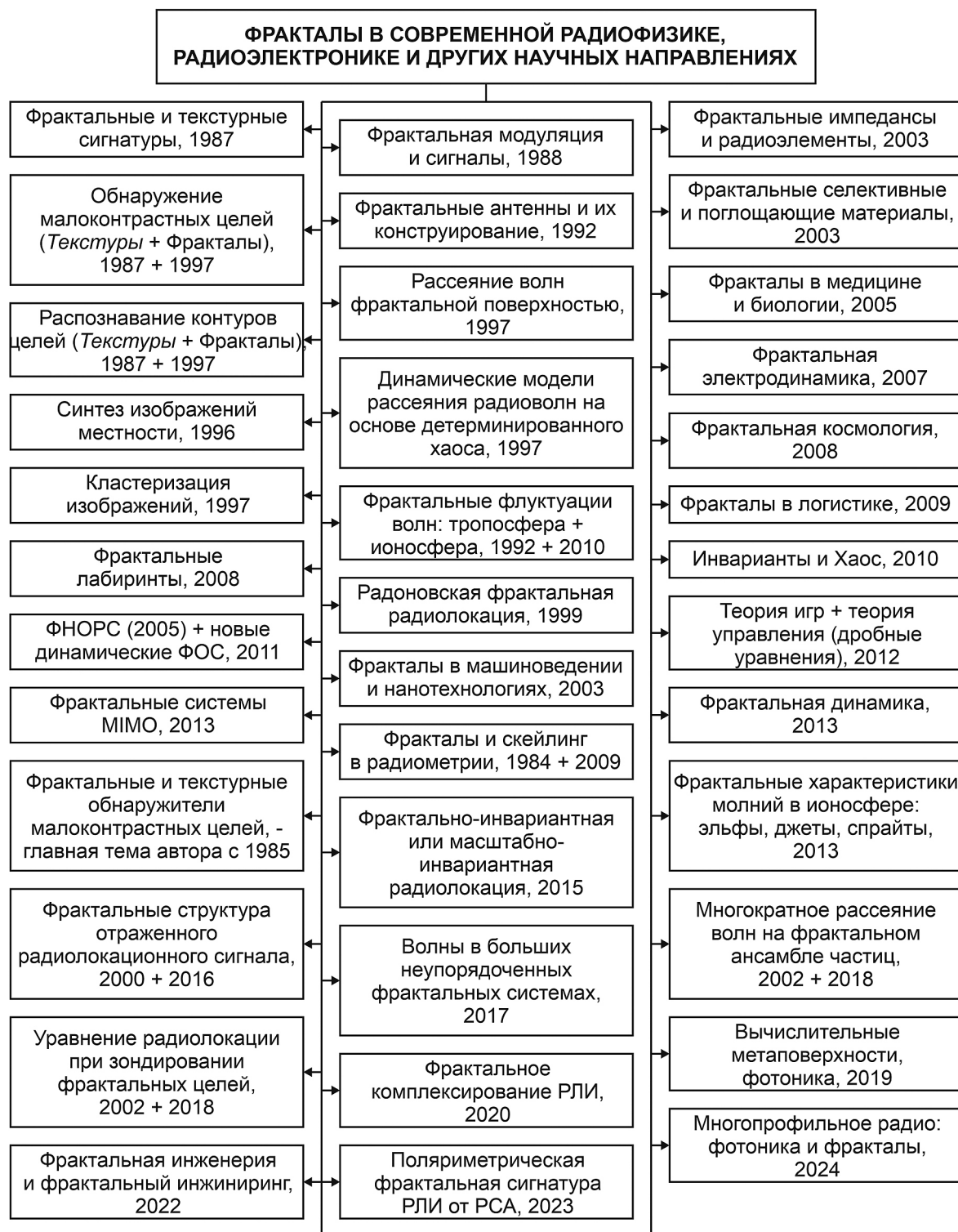


Рис. 4. Эскиз развития автором прорывных технологий на основе фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов для физики и радиоэлектроники (ФОС — фрактальные обнаружители сигналов, РСА — радиолокационное синтезирование апертуры)

Fig. 4. A sketch of the author's development of breakthrough technologies based on fractals, scaling effects and fractional operators for physics and radio electronics (FSD — fractal signal detectors, SAR — synthetic aperture radar)



Рис. 5. Новые топологические признаки и методы обнаружения малококонтрастных (малозаметных) объектов на фоне интенсивных шумов и помех (ТП — текстурные признаки, ЧФК — частотная функция когерентности)

Fig. 5. New topological features and methods for detecting low-contrast (barely noticeable) objects against a background of intense noise and interference (TF — textural features, FCF — frequency coherence function)



Рис. 6. Авторская концепция фрактальных радиосистем, датчиков, устройств и радиоэлементов

Fig. 6. The author's concept of fractal radio systems, sensors, devices and radio elements

и радиофизике А. А. Потапов награжден 18 медалями (Федерация космонавтики России, АИН им. А. М. Прохорова, Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского, РАЕН, ВЭС ВКС и т. д.). В 2006 г. А. А. Потапову присвоено звание «Почетный радист РФ». Решением Президиума Центрального Совета РНТОРЭС им. А. С. Попова в 2015 г. А. А. Потапов награжден медалью «За заслуги в развитии радиоэлектроники и связи». В честь 40-летия научной деятельности в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и за выдающиеся достижения в области инженерных наук награжден нагрудной медалью им. академика А. М. Прохорова (2019).

3. Наши результаты по фракталам в докладах Президиума РАН и в докладе Правительству Российской Федерации

Рассмотрим универсальность топологии фрактальных множеств. Тщательный библиографический анализ доказал наш абсолютный приоритет [1–6, 9–51] по всем «фрактальным» направлениям (в радиофизике и радиоэлектронике) в СССР и в России, а также в мировой науке. Все просто и с чистого листа: не было до моих работ — стало после. Замечу, что мои идеи о фракталах и дробных операторах, с которыми я выступил почти 45 лет тому назад, ныне уже уверенно перешли из стадии чисто умозрительной в стадию осязаемой действительности и достигли своей зрелости в качестве мощного аналитического инструмента описания классических и аномальных стохастических процессов. Этому есть серьезное подтверждение, а именно:

1. 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 обработки 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.

2. В книге «Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2009 году» (М.: Наука, 2010. 486 с.) в подразделе «Локационные системы. Геоинформационные технологии и системы», раздел «Нанотехнологии и информационные технологии» (с. 24) приведён 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.

3. 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 системы», 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 3-х т.» (М.: Наука, 2012. 1015 с.) (с. 242) приведён 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.

4. 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» (с. 195) приведён 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.

4. Пример 1: Фрактальные антенны и частотно-селективные устройства на их основе

Антенные устройства — неотъемлемая часть любой радиотехнической системы. Всегда ключевыми проблемами теории и техники антенн являются уменьшение их размеров, широкое регулирование электромагнитных характеристик и расширение рабочей полосы частот. Геометрические размеры антенны определяются длиной рабочей волны и, в свою очередь, влияют на массогабаритные характеристики радиосистемы. Исключительное значение в настоящее время приобретают широкополосные и сверхширокополосные антенны.

Работа фрактальных антенн достигается через геометрию проводников, а не через накопление отдельных компонентов или элементов (как в классических антеннах), что в последнем случае увеличивает сложность и потенциальные точки отказа. Фрактальные антенны позволяют создать многополосные варианты с уменьшенным размером и часто оптимальную или «шикарную» технологию таких устройств [1–3, 5, 10, 26, 37, 46]. Несомненным достоинством фрактальных антенн (монополей и диполей) является то, что они нередко имеют меньшие резонансные частоты по сравнению с классическими (евклидовыми) антеннами тех же размеров. Поскольку

эффективные длины играют важную роль в дизайне антенн, то фрактальная упаковка может быть использована в качестве жизнеспособного аспекта техники миниатюризации. Увеличение фрактальной размерности D апертуры антенны ведет к более высокой степени миниатюризации. Врожденные широкополосные качества фрактальных антенн идеальны для интеллектуальных приложений.

В отличие от традиционных методов, когда синтезируются гладкие диаграммы направленности (ДН) антенны, в основе теории фрактального синтеза изначально заложена идея реализации характеристик излучения с повторяющейся структурой на произвольных масштабах. Это дает возможность создавать новые режимы во фрактальной электродинамике, получать принципиально новые свойства, а также и фрактальные радиоэлементы (например, фрактальный конденсатор) [1–3, 5, 10, 37].

Отметим, что еще в 1988 году автором совместно с ЦКБ «Алмаз» были выполнены первые разработки в СССР и проектирование таких необычных для того времени фрактальных антенных структур (см. ниже). Проведен строгий электродинамический расчет многочисленных типов фрактальных антенн, принципы конструирования которых лежат в основе фрактальных частотно-избирательных поверхностей и объемов (фрактальные «сэндвичи» и фрактальные лабиринты — рис. 6 [1, 2, 5, 9, 10]). 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. Сейчас фрактальные антенны — полностью самостоятельный новый класс антенн.

5. Пример 2: Неэнергетические фрактальные обнаружители слабых сигналов

Создание первого эталонного словаря фрактальных признаков классов целей, включающего фрактальные примитивы — элементы фрактального языка, фрактальные символы, фрактальную грамматику для фрактальных слов, и постоянное усовершенствование алгоритмического обеспечения явились основными этапами при разработке и макетировании нами первого фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) в виде спецпроцессора [1–3, 5, 6, 20, 21, 23, 32, 33, 47]. Основные принципы текстурно-фрактального обнаружителя были открыты и предложены автором еще в 80-х гг. XX века, а выход на действующий макет фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) произведен в 2003–2005 гг. Один из главных выводов, сделанных автором еще в 80-е годы XX века: работа по точечной оценке фрактальной размерности D приводит из-за неоднозначности зачастую 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!). Также мы впервые доказали, что интенсивность изображения цели влияет на изменение фрактальной размерности гораздо слабее, чем отношение площадей, покрываемых целью и всем изображением. Наличие пространственных гауссовых флуктуаций площади целей со среднеквадратическим отклонением порядка 35% показало практически их одинаковую степень обнаружения.

В качестве примеров эффективного действия глобальной фрактальной методологии и концепции фрактальных радиосистем и устройств представим ниже ряд принципиально новых ФОС (рис. 4–7). Здесь автор ограничился лишь основными функциональными примерами для иллюстрации разработанных общих теоретических и эвристических принципов синтеза динамических ФОС. Отдельно стоит вопрос о необходимости разработки решающих правил, основанных на фрактальных сингулярных и топологических характеристиках принятой стохастической выборки



Рис. 7. Основные виды предложенных топологических фрактально-скейлинговых обнаружителей многомерных сигналов

Fig. 7. The main types of proposed topological fractal-scaling detectors of multidimensional signals

негауссовской смеси (сигнал + шум + помеха). Все ФОС составляют два класса: некогерентные (ФНО) и когерентные (ФКО). Затем идут одночастотный (ФОО — в частности, одна излучаемая частота радиолокатора), многочастотный (ФМО — несколько рабочих частот радиолокатора; в данном случае элементарно обнаруживать скейлинг в принятой выборке), а также непосредственно скейлинговый фрактальный обнаружитель (ФСО). Работоспособность ФСО успешно проверена на практике при обнаружении и пеленгации акустического сигнала на фоне лесного массива. Была показана его высокая эффективность в условиях сильных фоновых помех, когда классический корреляционно-спектральный анализ не дал правильных результатов в режиме реального времени.

Фрактальный топологический обнаружитель (ФТО) — представляя пространство принятых сигналов в виде топологической связной структуры с дробной размерностью (ситуация «фрактального лабиринта»), мы можем определить каналы с гипотезой H_0 и гипотезой H_1 , выделить их и затем обнаружить. Фрактальный лабиринт — это новый объект математической физики и нанотехнологий, который является топологической связной структурой с фрактальной размерностью $D > 1$ и скейлинговым характером проводящих путей [10, 37]. Таким образом, проблема расширения классов фрактально-скейлинговых обнаружителей сигналов и их комплексирования при равных фрактальных сигнатурах объекта и фона может быть рассмотрена и под углом математики фрактальных лабиринтных структур. Фрактальный динамический обнаружитель (ФДАО), кроме фракталов, использует характеристики детерминированного/динамического хаоса. В фазовой плоскости принятых выборок сигналов реконструируется странный аттрактор, вычисляются его характеристики, в том числе показатели Ляпунова, интервал предсказания, энтропия Колмогорова. Этот тип ФОС проверен нами также успешно на практике в условиях растительных покровов [19]. Дальнейшее его усовершенствование — это использование статистических мер

энтропии и информации различия Реньи, Хаврда–Чарвата–Дароши, Ратье–Каннаппана, Шарма–Миттала, Кульбака–Лейблера и теоретико-групповых аспектов теории информации. Фрактальный дробночисленный обнаружитель (ФДЧО) использует полностью интегро-дифференцирование дробного порядка.

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. Здесь рассматривается исключительно фрактальный адаптивный обнаружитель (ФАО). Адаптация нелинейной фрактальной фильтрации в условиях априорной неопределенности обеспечивается, в частности, текущей оценкой показателя Херста H . Показатель Херста, в зависимости от своего значения относительно величины $H = 1/2$ (гауссовский процесс), характеризует или персистентность ($1/2 < H < 1$), или антиперсистентность ($0 < H < 1/2$) текущей выборки. В первом случае мы наблюдаем процесс, сохраняющий тенденцию роста или уменьшения мгновенных амплитуд в выборке, то есть процесс с памятью. Во втором случае мы наблюдаем процесс более подверженный переменам, который обозначают «возврат к среднему». Представляет также интерес вывести правила использования дополнительной информации о параметре H выборки из соображений оптимальности.

Параметрические и непараметрические обнаружители взаимно дополняют друг друга. Непараметрические алгоритмы в случае обнаружения сигналов используют не значения наблюдаемых величин, а какую-либо степень их упорядоченности. Их важнейшим свойством является практически фиксированная вероятность ложного обнаружения при произвольных законах распределения выборки. Для случаев непараметрической априорной неопределенности нами введен фрактальный непараметрический обнаружитель (ФНПО). Пример такого рода обнаружителя — ФНОРС (см. выше). Возможно последовательное комбинирование параметрических и непараметрических ФОС. В интересующем нас варианте это трансляция на объединение классических энергетических и фрактальных алгоритмов.

Робастные обнаружители (ФРО) используют методы синтеза, занимающие промежуточное положение между параметрическими и непараметрическими. При этом, естественно, сужается класс возможных распределений, для которого сохраняется устойчивость алгоритмов. При наличии обучающей выборки возможно построение фрактального адаптивно-робастного обнаружителя. В нашем случае устойчиво совмещение ФНПО, ФНОРС и ФАО.

Фрактальный многоэтапный обнаружитель (ФМЭО) решает задачи, когда принятие гипотез совершается на каждом n -м шаге с подтверждением принятых решений или с их изменением на последующих шагах наблюдения. На каждом шаге вычисляется отношение правдоподобия и происходит сравнение их с изменяющимися в зависимости от функций потерь порогами. На практике в радиолокации часто применяют двухэтапную процедуру обнаружения. Фрактальный векторный или многоканальный обнаружитель (ФВО) характерен для многопозиционной радиолокации.

Тематика комплексирования радиосистем обработки информации была досконально изучена нами в 80–90-е гг. XX века для систем миллиметровых и оптических волн. Фрактальный комплексированный обнаружитель (ФКомО) на рис. 7 использует различные сочетания с классическими обнаружителями и базируется на проведенных опытах по проверке работоспособности ФНОРС, а также при состыковке ФНОРС с выходом действующей радиосистемы [13, 14, 47]. Было показано, что в данном случае повышается вероятность правильного обнаружения и распознавания. На данном этапе эта задача уже не имеет глубокого научного интереса, а относится практически к инженерным техническим решениям.

Функциональные связи между отдельными разновидностями фрактальных обнаружителей (рис. 7) специально не введены, чтобы платформа ФОС была максимально свободной для будущих исследователей и конструкторов. Ранее нами было применено преобразование Радона совместно с фрактальной обработкой в радиолокаторе со сложным сигналом в диапазоне миллиметровых волн [9, 16]. Динамические ФОС могут широко использоваться и в нелинейной радиолокации.

6. Пример 3: Фрактальная обработка многомерных сигналов

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, красно-фиолетовые спрайты, красные кольца парящих в вышине эльфов. Это разряды очень высокой энергии, которые бьют не в землю, а в ионосферу! Высотные электрические разряды (20...100 км) подразделяются на несколько основных типов: эльфы, джеты, спрайты, гало и т. д. — см. рис. 8.

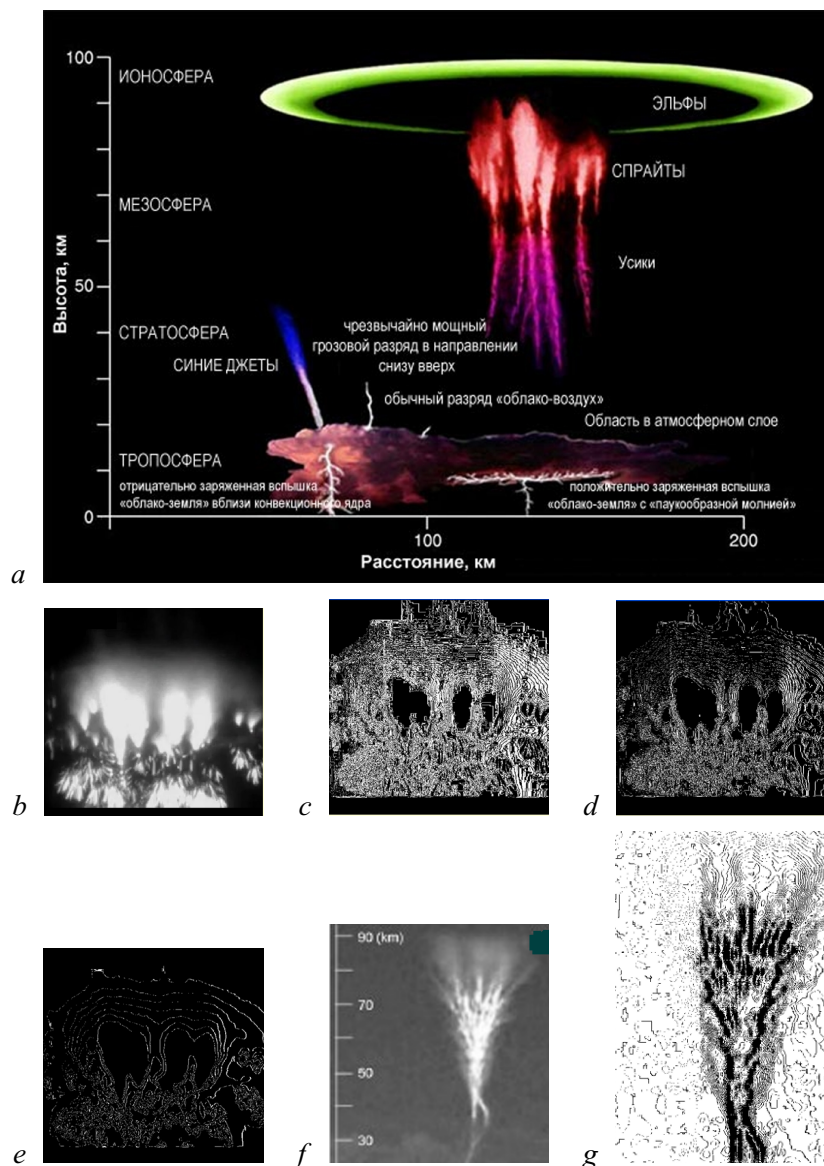


Рис. 8. Динамические мультифрактальные структуры в атмосфере: *a* — динамические мультифрактальные структуры, *b* — спрайт (съемка с КА — США, NASA); фрактальная фильтрация изображения спрайта: *c* — карта $D = 2.3$, *d* — карта $D = 2.6$, *e* — карта $D = 2.8$, *f* — джет (ИК — съемка с КА — Китай), *g* — фрактальная фильтрация изображения джета: карта D . КА — космический аппарат (цвет онлайн)

Fig. 8. Dynamic multifractal structures in the atmosphere: *a* — dynamic multifractal structures, *b* — sprite (shot from the spacecraft — USA, NASA); fractal filtering of the sprite image: *c* — map $D = 2.3$, *d* — map $D = 2.6$, *e* — map $D = 2.8$, *f* — jet (IR shot from the spacecraft — China), *g* — fractal filtering of the jet image: map D (color online)

История их открытия очень интересна. Спрайты, например, были открыты случайно в ночь с 5 по 6 июля 1989 г. в США. Они наглядно подтвердили существование на нашей планете глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и дали новые возможности для ее исследования. На картах фрактальной размерности (рис. 8) четко различаются внешние, основные и сверхтонкие структуры. Динамические пространственно-временные особенности и морфология спрайтов могут быть объяснены, в частности, мультифрактальной геометрией разрядов и перколяцией. Здесь также применимо моделирование на основе фрактальных лабиринтов [37], которое хорошо отражает физику и морфологию подобных ионосферных структур. Следует отметить, что представленные на рис. 8 данные являются уникальными результатами фрактальной обработки подобных структур, вызвавшими значительный интерес на конференциях по радиолокации в США и Китае.

Многочисленные результаты показывают [4, 21, 22], что фрактальные методы обработки дают повышение качества и детализации объектов в активном и пассивном режимах примерно в несколько раз.

7. Фрактальный инжиниринг

Сфера применения топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов, полей и изображений постоянно расширяется, и трудно поверить, что еще около тридцати лет назад было немало скептических высказываний относительно перспективности этого нового фундаментального научного направления, связанного исключительно с фракталами и их динамикой, созданного и развиваемого автором сначала в СССР, а затем в России. Эти скептические высказывания были связаны с некомпетентностью, просто невежеством и незнанием.

Приведу характерный пример (их было много). В публикациях по истории фрактальных антенн обычно упоминается работа 1986 г. ученых Университета штата Пенсильвания Я. Кима и Д. Джаггарда. Первенство в теоретических исследованиях формирования многополосных по частоте антенн приписывают с 1993 г. ученому Технологического университета Каталонии К. Пуенте. Начало же практическому применению фрактальных антенн в 1995 году положил, как принято считать в иностранных и даже некоторых русскоязычных журналах, американский инженер Натан Коэн (N. Cohen). А вот последнее предложение — просто нонсенс (абсурд)!

Справка автора как ответ на этот абсурд — см. рис. 9 [1, 2, 5, 9, 10]: «В 1988 году автором совместно с ЦКБ «Алмаз» были выполнены первые разработки и проектирование таких необычных (для того времени) фрактальных антенных структур (в частности, был изготовлен действующий макет фрактальной целевой антенной решетки в диапазоне ММВ и СМВ) для переносного твердотельного двухчастотного когерентного радиолокатора на параметронах со сложным фазоманипулированным сигналом сверхбольшой базы (есть наш патент). Этот цифровой радар (размером с небольшой кейс) был установлен на вертолете, и с ним автор долгое время работал и получал первые РЛИ земных покровов и объектов». А до этого еще надо было нам суметь строго рассчитать параметры уникальной двухчастотной фрактальной приемно-передающей антенны на два диапазона и затем изготовить несколько почти промышленных образцов!

Замечу, что именно на этом радаре автор впервые исследовал фрактальные свойства кодовых М-последовательностей с периодом до $2^{20} - 1$. Квантование входного сигнала в радаре происходило в стохастической системе счисления. Сигнал, представленный таким кодом, проявляет свои фрактальные свойства. Подобно голограмме, любой фрагмент которой несет информацию о полном объекте, любой фрагмент стохастического кода содержит информацию об амплитуде квантуемого сигнала. Затем на этом модуле был реализован также впервые новый метод радиолокации на основе преобразования Радона [5, 9, 16].

Вот это и есть на деле фрактальный инжиниринг с элементами философии инженерии (можно сказать, то время, а именно 80-е годы XX века, было для автора началом зарождения

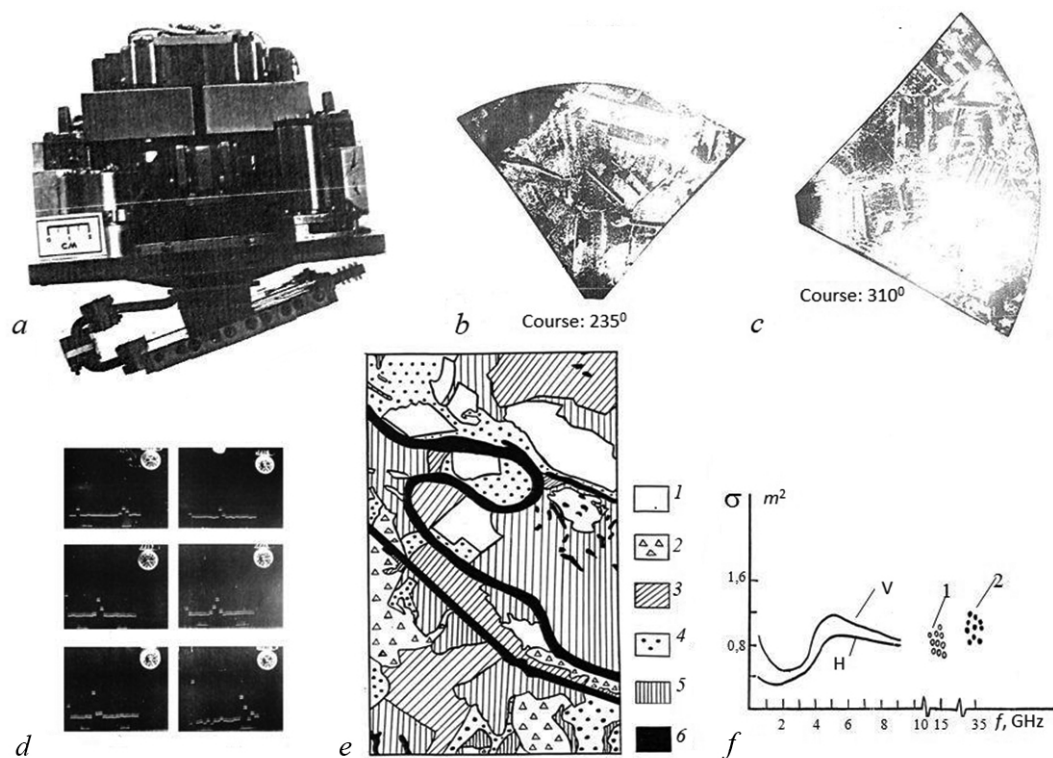


Рис. 9. Переносной цифровой твердотельный двухчастотный когерентный радар на параметронах со сложным сигналом сверхбольшой базы $m = 2^{17} - 1$ с фрактальной щелевой решеткой в диапазоне ММВ и СМВ (*a*) и некоторые результаты натурных испытаний радиолокатора: *b, c* — первые РЛИ на длине волны 8.6 мм; *d* — характерные формы огибающей сигнала, отраженного характерными текстурными земными покровами; *e* — пример эталонной синтезированной карты неоднородной местности по энергетическим, текстурным и фрактальным признакам; *f* — средняя ЭПР человека как функция частоты для горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризаций, 1 и 2 — данные автора, который участвовал в натурном эксперименте в качестве «лоцируемой цели»

Fig. 9. Portable digital solid-state dual-frequency coherent parametron radar with complex signal of very long base $m = 2^{17} - 1$ with fractal slot array in MMW and SMW ranges (*a*) and some results of full-scale tests of the radar: *b, c* — first radar images at 8.6 mm wavelength; *d* — characteristic shapes of signal envelope reflected by characteristic textural land covers; *e* — example of reference synthesized map of heterogeneous terrain by energy, textural and fractal features; *f* — average human RCS as a function of frequency for horizontal (H) and vertical (V) polarizations, 1 and 2 — data of the author, who participated in full-scale experiment as a “located target”

русской философии фрактальной инженерии)! Это был серьезный и передовой проект в великом СССР, а не какие-то элементарные «детские безделушки», которые изогнул и разместил на балконе в 1995 г. американский инженер!

8. Многопрофильное радио

Концепция или парадигма «Multi-profile radio — Многопрофильного радио» была окончательно сформирована автором в начале мая 2024 г. — рис. 10. Этому предшествовал цикл наших работ в России и Китае в 2022–2024 годы по возможности и необходимости объединения дорожных карт «Фракталы», «Фотоника» и «Искусственный интеллект» для сквозных технологий (см. например [48, 49]). Авторская парадигма основана на принципиально новом подходе к совместному использованию физических свойств электромагнитных волн (ЭМВ) в широком диапазоне частот и универсальности топологии фрактальных множеств. Замысел нашего научного

исследования состоял в современном приложении топологии и теории размерности в открытых множествах задач радиофизики, радиолокации и радиотехники, вдохновленных современной физикой и фотоникой. Статьи [48,49] охватывают отдельные составляющие следующих рядов 3–5. Конечная цель — принципиально новая архитектура радиосистем и радиоканалов. Добавление новых сегментов в рис. 10 не только возможно, но и крайне необходимо. ЭМВ, несущие орбитальный угловой момент, представляют большой интерес и открывают возможности для будущих прорывов в области радио. В [48,49] представлена современная картина развития исследований в области топологически нетривиальных спиновых текстур, таких как скирмионы. Оптические скирмионы представляют собой квазичастицы с нетривиальными топологическими фрактальными текстурами, которые обладают значительным потенциалом в оптической обработке, передаче и хранении информации.

«Умная» или Интеллектуальная радиосреда — это беспроводная среда, которая превращается в интеллектуальное реконфигурируемое пространство и играет активную роль в передаче и обработке информации, и делает более надежным обмен данными между передатчиками и приемниками. Концепция «умных» радиосред не ограничивается улучшением беспроводной связи, а направлена на создание по-настоящему распределенной интеллектуальной платформы беспроводной связи, зондирования и вычислений, которая соединяет физический и цифровой миры.

В Таблице показаны физические свойства ЭМВ и универсальность топологии фрактальных множеств, и их совместное потенциальное использование с точки зрения многопрофильного радио, а также НИИ и ВУЗы, с которыми работал автор с 1979 г. в ИРЭ АН СССР (ИРЭ РАН).

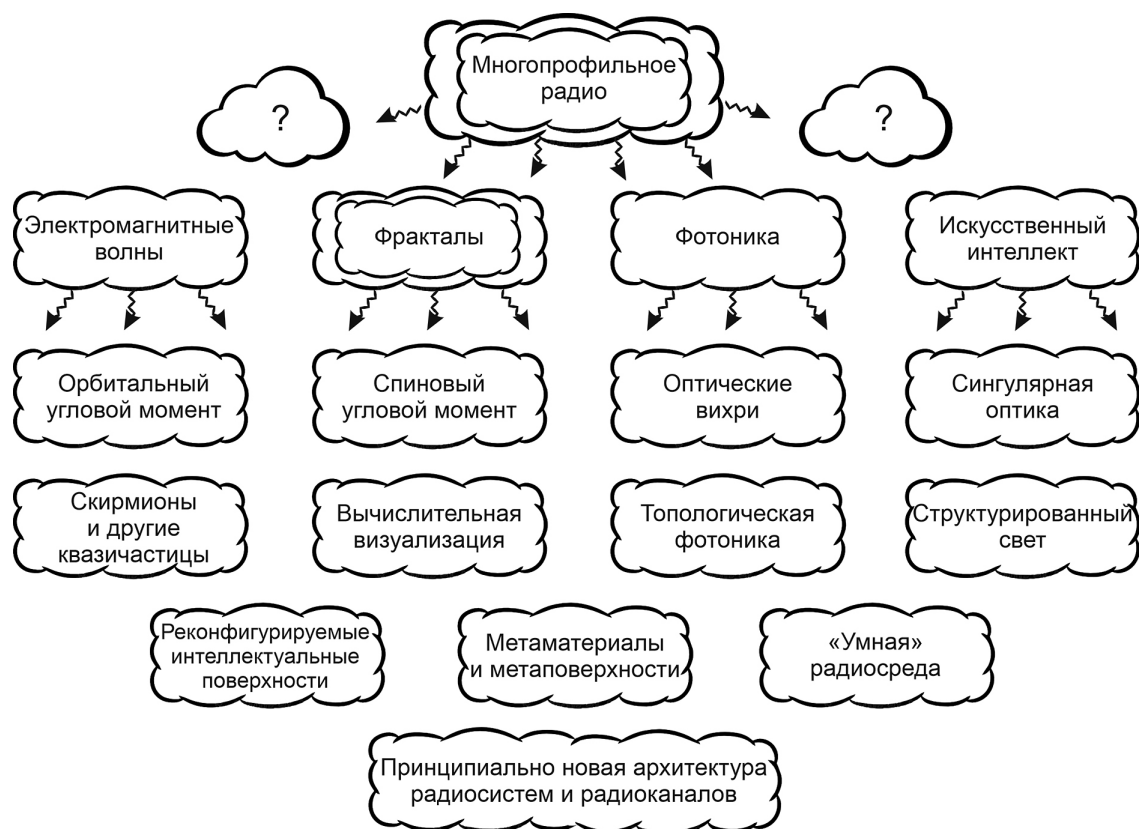


Рис. 10. Авторская парадигма «Многопрофильное радио» как фреймворк новых идей

Fig. 10. The author's paradigm "Multi-profile radio" as a framework for new ideas

Таблица. Физические свойства ЭМВ вкупе с фрактальной топологией и их использование для многопрофильного радио

Table. Physical properties of electromagnetic waves together with fractal topology and their use for multi-profile radio

Физические свойства / направления	Применение	Примечание
ТТФО сигналов и полей (учёт эредитарности (памяти), негауссовости и скейлинга), фрактальное кодирование (НАЧАЛО — XX в.)	ЭМВ и акустика, РЛС, радиометрия, БПЛА, РСА, машиноведение, материаловедение, нанотехнологии, медицина, биология, зондирование, связь, экономика, логистика, динамический хаос, большие данные	ИРЭ АН СССР, ИРЭ РАН, — А. А. Потапов
Неэнергетические текстурные и фрактальные обнаружители сверхслабых сигналов (размерность D , показатели Херста и Гельдера, лакуарность, стохастический авторегрессионный синтез и т. д.)	Новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты (сигнатуры), топология выборки, нечеткие множества, искусственный интеллект	НАЧАЛО — 1979 г. и так далее в БУДУЩЕЕ, ИРЭ АН СССР, ИРЭ РАН, — А. А. Потапов
Распространение и дифракция волн во фрактальных и турбулентных средах, теория катастроф в волновой физике, стохастические уравнения с дробными операторами, интеграл Фейнмана по траекториям, асимптотики и т. п.	Рассеяние волн фрактальной поверхностью (функции когерентности, спеклы, вариации ЭПР, индикатрисы, странные аттракторы, время предсказания), фрактальные флуктуации волн (тропосфера, ионосфера — эльфы, джеты, спрайты), солитоны	ИРЭ АН СССР, ИРЭ РАН, Технион (Хайфа), ВНИИОФИ, — А. А. Потапов
Фрактальные антенны, хиральные среды, антенные решётки для ММО, фрактальные лабиринты, экраны из метаматериала для развязки антенн	Широкополосность или многодиапазонность, вариации ЭПР, рост фрактальных структур и границ, оригами и т. п.	ИРЭ РАН, ЦКБ «Алмаз», ВГУ, МФТИ, МИРЭА, ЛЭТИ, ПГУТИ, ННГУ, НГТУ, — А. А. Потапов
Фрактальные элементы, датчики, селективные и поглощающие материалы, устройства и системы	Фрактальный генератор, фрактальные фильтры, новые материалы, мемристор, отрицательный конденсатор, фрактальные межфазные границы, магнитные фазовые переходы, мезопористые ферромагнитные материалы, регуляторы дробного порядка, МЭМС, наноразмерные покрытия с фрактальной топологией и т. д.	ИРЭ РАН, МГТУ, МАМИ, ЛЭТИ, ИжГТУ, КАИ, ННГУ, ИМХ РАН, НГТУ, УГАТУ, ИПМА КБНЦ РАН, — А. А. Потапов
Фрактальные РЛС и фрактально-частотные ММО-системы	Многочастотная работа и др. режимы и варианты, нелинейная радиолокация	ИРЭ РАН, — А. А. Потапов
Фрактальные сигналы, помехи и степенные шумовые процессы	Простые и сложные сигналы, хаотические сигналы, Н-сигналы, ФБД (fBm), фликкер-шум (доклад на семинаре С. М. Рытова по флуктуационным явлениям в ИФА РАН)	ИРЭ АН СССР, ИРЭ РАН, — А. А. Потапов
Фрактальная электродинамика и фрактальные импедансы, нелинейная электродинамика, хиральные наноструктуры на основе ДНК-оригами	Уравнения Максвелла, волновое уравнение, фрактальный конденсатор, исследование дробных операторов и полей	ИРЭ АН СССР, ИРЭ РАН, МГУ, МФТИ, ПГУТИ, ДагГУ, ИПМА КБНЦ РАН, — А. А. Потапов

Продолжение Таблицы на стр. 769

Физические свойства / направления	Применение	Примечание
Фрактальное комплексирование и ФПС, формирование портретов сложных объектов	Оптика, ММВ, СМВ, РЛИ, РСА. — Патент	ИРЭ АН СССР, ВВА ВВС, ИРЭ РАН, — А. А. Потапов
Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация; активно-пассивная радиолокация; преобразование Радона в РЛС (впервые в мире)	Полные ансамбли текстурных и фрактальных признаков и кепстры, словари фрактальных признаков, впервые введенные автором. — Патент	ИРЭ РАН, ЦКБ «Алмаз» (пр. Радона в РЛС); (уравнение радиолокации для фрактальных целей), — А. А. Потапов
Фрактальный инжиниринг: фрактальная радиоэлектроника, фрактальная радиоп физика, фрактальная радиотехника и т. д.	Всё сделанное выше по фракталам и БУДУЩЕЕ	ИРЭ РАН, — А. А. Потапов
Теория игр, теория управления, фрактальная геометрия пространства-времени, фрактальные квантовые поля (дробные уравнения и операторы)	Дробные уравнения и операторы, дробные функции Грина, отрицательные фрактальные размерности Хаусдорфа-Коломбо D (теория) [44] и т. д.	ИРЭ РАН, Технион (Хайфа), ВНИИОФИ, — А. А. Потапов
Фотоника / радиофотоника и другие исследования; участие в разнообразных международных конференциях, выпуск высокорейтинговых статей и монографий [10]	Обработка сигналов и полей, метаповерхности, нулевое обратное рассеяние, мультиполи, управление рассеянием света, численное моделирование, поверочные эксперименты на СВЧ, искусственный интеллект, новые классы антенн, оптомеханика кремниевых волноводов и резонаторов и т. д.	ИРЭ РАН, Джинанский университет (Гуанчжоу, Китай) — Совместная китайско-российская лаборатория информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (с 2011 г.), — А. А. Потапов

В Таблице: ФБД (fBm) — фрактальное (обобщённое) броуновское движение, ФПС — введенные авторами в [43] фрактально-поляризационные сигнатуры.

Таким образом, это концептуальный документ (рис. 10 и Таблица), в котором сжато излагается авторская парадигма новой архитектуры радиосистем и радиоканалов (то есть «Многопрофильное радио») на основе дорожных карт «Фракталы», «Фотоника» и «Искусственный интеллект» [48, 49].

Заключение

С большой благодарностью хочу сказать еще раз, что без благожелательной поддержки академиков Б. В. Бункина, В. А. Котельникова, Ю. В. Гуляева моя работа в области теории фракталов и их широкого применения в радиофизике, радиотехнике, радиолокации (в общем, всей радиоэлектронике), а также в цифровой обработке информации не была бы столь эффективной, систематической и плодотворной за более чем 45 лет работы в ИРЭ АН СССР (ИРЭ РАН).

Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника — это своеобразные радионауки, проникнутые духом и идеями классической радиофизики и радиоэлектроники, в то же время они являются принципиально новыми направлениями. Фрактальные методы, аналогичные излагаемым в настоящей работе, могут быть применены при рассмотрении волновых и колебательных процессов в оптике, акустике и механике.

В своих работах автор более чем за 45 лет, практически «с нуля», преодолевая трудности идущих первыми, заложил фундаментальные основы того, что будет применено в будущем. Не только результаты и конкретные решения представляют самую большую ценность, а именно метод решения, подход к нему. Коренное отличие предложенных автором фрактальных методов от классических связано с принципиально иным подходом к основным составляющим сигнала и поля. Глобальный фрактальный метод создан автором и многосторонне продемонстрирован в [1–6, 9–51] и непосредственно здесь, в этой работе. В результате в научном мире образовано новое смысловое пространство с его необычными для классической радиофизики и радиоэлектроники свойствами и задачами. Полученные научные результаты являются исходным материалом для дальнейшего развития и практического применения фрактальных методов в современных областях радиофизики, радиотехники, радиолокации, электроники и информационно-управляющих систем [52]. Все это и определяет фрактальный инжиниринг.

Фрактальная геометрия — громадная и гениальная заслуга Б. Мандельброта (1924–2010 гг.). Но ее радиофизическое / радиотехническое и практическое воплощение — это исключительная заслуга известной в мире Российской научной школы фрактальных методов под руководством проф. А. А. Потапова (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН).

Автор развивает и усиливает свои идеи о том, что в науке и технике должно быть прочно введено новое — «фрактальное» — измерение, причем не на вспомогательную роль, а в качестве фундаментального объясняющего фактора. Наш приоритет в этих областях на май 2025 год закреплен более чем 1250 работами и 68 отечественными и зарубежными монографиями и отдельными главами в них на русском, английском и китайском языках; сделаны доклады в 23 странах. В научно-информационной сети Research Gate (А. А. Potapov (researchgate.net)) работы автора сейчас читают более 72 тысяч корреспондентов.

В преддверии своего 75-летия хочу заметить следующее. В моей жизни существовали и существуют три большие страсти: наука (фракталы и радиолокация), книги (великолепная домашняя библиотека) и семья. Несмотря на все трудности, эти области находятся в равновесии. И в этом исключительная заслуга моей супруги Потаповой (Самборской) Валентины Яковлевны и наших двух сыновей Алексея и Виктора [5].

Список литературы

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. 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 // В кн.: Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах. 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. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
5. Профессор Александр Алексеевич Потапов. Фракталы в действии: Биобиблиографический указатель / Под ред. Ю. В. Гуляева. М.: ЦПУ «Радуга», 2019. 256 с.
6. *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) // РЭ. 2019. Т. 64, № 9. С. 839–854. DOI: 10.1134/S0033849419080059.
7. *Mandelbrot B.* Les objets fractal: Forme, hasard et dimension. Paris: Flammarion, 1975. 190 p.
8. *Mandelbrot B.* The Fractal Geometry of Nature. N.Y.: W. H. Freeman, 1982. 468 p.
9. Вопросы перспективной радиолокации / Под ред. А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.

10. *Potapov Alexander A., Wu Hao, Xiong Shan.* Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2020. 280 p.
11. *Павельев В. А., Потапов А. А.* Влияние земной поверхности на структуру импульсного сигнала в диапазоне миллиметровых волн // РЭ. 1994. Т. 39, № 4. С. 573–582.
12. *Потапов А. А.* Обобщенный коррелятор полей, рассеянных шероховатыми поверхностями // РЭ. 1996. Т. 41, № 7. С. 816–823.
13. *Potapov A. A., German V. A.* Detection of artificial objects with fractal signatures // Pattern Recognition and Image Analysis. 1998. Vol. 8, no. 2. P. 226–229.
14. *Потапов А. А., Герман В. А.* Применение фрактальных методов для обработки оптических и радиолокационных изображений земной поверхности // РЭ. 2000. Т. 45, № 8. С. 946–953.
15. *Потапов А. А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. Элементы теории фракталов // РЭ. 2000. Т. 45, № 11. С. 1285–1292.
16. *Опаленов Ю. В., Потапов А. А.* Стохастические сигналы и преобразование Радона при получении растровых радиолокационных изображений микроволновым цифровым радиолокатором с фрактальной обработкой информации // РЭ. 2000. Т. 45, № 12. С. 1447–1458.
17. *Потапов А. А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. Фрактальный анализ сигналов // РЭ. 2001. Т. 46, № 3. С. 261–270.
18. *Потапов А. А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. Основы теории рассеяния волн фрактальной поверхностью // РЭ. 2002. Т. 47, № 5. С. 517–544.
19. *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.
20. *Потапов А. А.* Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоконтрастных целей // РЭ. 2003. Т. 48, № 9. С. 1101–1119.
21. *Потапов А. А., Герман В. А.* О методах измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов // РЭ. 2004. Т. 49, № 12. С. 1468–1491.
22. *Потапов А. А., Булавкин В. В., Герман В. А., Вячеславова О. Ф.* Исследование микро-рельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур // ЖТФ. 2005. Т. 75, № 5. С. 28–45.
23. *Потапов А. А., Герман В. А.* Методы фрактальной обработки слабых сигналов и малоконтрастных изображений // Автометрия. 2006. Т. 42, № 5. С. 3–25.
24. *Потапов А. А.* К теории функционалов стохастических полей обратного рассеяния // РЭ. 2007. Т. 52, № 3. С. 261–310.
25. *Потапов А. А., Лактюнькин А. В.* Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью // Нелинейный мир. 2008. Т. 6, № 1. С. 3–36.
26. *Потапов А. А., Матвеев Е. Н.* Фрактальная электродинамика, скейлинг фрактальных антенн на основе кольцевых структур и мультимасштабные частотно-избирательные 3D-среды или фрактальные «сэндвичи»: переход к фрактальным наноструктурам // РЭ. 2010. Т. 55, № 10. С. 1157–1177.
27. *Потапов А. А.* Фрактальные модели и методы на основе скейлинга в фундаментальных и прикладных проблемах современной физики // В сб.: Необратимые процессы в природе и технике» / Под ред. В. С. Горелика и А. Н. Морозова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. Вып. II. С. 5–107.
28. *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 г.) // В сб.: Необратимые процессы в природе и технике / Под ред. В. С. Горелика, А. Н. Морозова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. Вып. IV. С. 5–117.

29. *Леонов К. Н., Потапов А. А., Ушаков П. А.* Использование инвариантных свойств хаотических сигналов в синтезе новых помехоустойчивых широкополосных систем передачи информации // РЭ. 2014. Т. 59, № 12. С. 1209–1229. DOI: 10.7868/S0033849414120110.
30. *Потапов А. А., Лактюнькин А. В.* Частотная функция когерентности пространственно-временного радиолокационного канала формирования изображений анизотропной фрактальной поверхности и фрактальных объектов // РЭ. 2015. Т. 60, № 9. С. 906–913. DOI: 10.7868/S0033849415090089.
31. *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. С. 51–66.
32. *Потапов А. А.* О стратегических направлениях в синтезе новых видов радиолокационных текстурно-фрактальных обнаружителей малоконтрастных объектов с выделением их контуров и локализацией координат на фоне интенсивных помех от поверхности земли, моря и осадков // В сб.: Труды IV Всероссийской НТК «РТИ Системы ВКО – 2016». 02–03 июня 2016 г., Москва, Россия. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 438–448.
33. *Потапов А. А.* Текстурные и фрактально-скейлинговые методы обнаружения, обработки и распознавания слабых радиолокационных сигналов и малоконтрастных изображений на фоне интенсивных помех // Вестник воздушно-космической обороны. 2018. № 2(18). С. 15–26.
34. *Потапов А. А.* Волны в неупорядоченных больших фрактальных системах: радиолокация, наносистемы, кластеры беспилотных летательных аппаратов и малоразмерных космических аппаратов // РЭ. 2018. Т. 63, № 9. С. 915–934. DOI: 10.1134/S0033849418090176.
35. *Багманов В. Х., Потапов А. А., Султанов А. Х., Жанг В.* Фрактальные фильтры для обнаружения сигналов при обработке данных дистанционного зондирования // РЭ. 2018. Т. 63, № 10. С. 1062–1068. DOI: 10.1134/S0033849418100030.
36. *Потапов А. А.* О применении теории размерности и нелинейной динамики в новом виде и методе радиолокации // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 1. С. 100–102. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(1).30.
37. *Потапов А. А.* Фрактальная электродинамика. Численное моделирование малых фрактальных антенных устройств и фрактальных 3D микрополосковых резонаторов для современных сверхширокополосных или многодиапазонных радиотехнических систем // РЭ. 2019. Т. 64, № 7. С. 629–665. DOI: 10.1134/S0033849419060068.
38. *Акинишин Н. С., Потапов А. А., Быстров Р. П., Есиков О. В., Чернышков А. И.* К вопросу построения систем распознавания объектов многоканальными комплексами зондирования на основе нейронных сетей и фрактальных сигнатур // РЭ. 2020. Т. 65, № 7. С. 705–713. DOI: 10.31857/S0033849420060017.
39. *Потапов А. А., Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н.* Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоконтрастных изображений // РЭ. 2021. Т. 66, № 5. С. 457–467. DOI: 10.31857/S0033849421050107.
40. *Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А.* Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 6–21. DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21.
41. *Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А.* Структурно-параметрический синтез систем оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных радиолокационных изображений // РЭ. 2022. Т. 67, № 1. С. 51–67. DOI: 10.31857/S0033849422010077.
42. *Акинишин Н. С., Потапов А. А., Минаков Е. И., Тимошенко А. В., Перлов А. Ю.* Метод оценки

производительности вычислительного комплекса при мониторинге технического состояния радиолокационных станций и сенсорных платформ // РЭ. 2022. Т. 67, № 5. С. 493–499. DOI: 10.31857/S0033849422050011.

43. *Потапов А. А., Кузнецов В. А.* Текстурно-фрактальный анализ поляриметрических изображений, формируемых радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // РЭ. 2023. Т. 68, № 10. С. 941–953. DOI:10.31857/S0033849423100145.
44. *Подосенов С. А., Потапов А. А., Фоукзон Дж., Менькова Е. Р.* Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах, электродинамике, квантовой механике и космологии. М.: URSS, 2015. 1128 с.
45. Радиолокация. Теория и практика / Под ред. А. Б. Бляхмана. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2023. 719 с.
46. *Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Потапов А. А., Давыдов А. Г.* О проектировании фрактальных радиосистем. Численный анализ электродинамических свойств фрактальной антенны Серпинского // РЭ. 2005. Т. 50, № 9. С. 1070–1076.
47. *Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Потапов А. А., Герман В. А.* Идеи скейлинга и дробной размерности в схеме фрактального обнаружителя радиосигналов // РЭ. 2006. Т. 51, № 8. С. 968–975.
48. *Потапов А. А.* Волны, орбитальный угловой момент, связанные состояния в континууме, фракталы и метаповерхности: Многопрофильное радио // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2024. Т. 16, № 8. С. 961–1008. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.961.
49. *Potapov A. A.* Multi-Profile Radio, Fractal Engineering, Artificial Intelligence and Smart Radio Environments: A New Approach Based on the Topology of Fractal Sets and Intelligent Meta surfaces // Evolutions Mech. Eng. 2025. Vol. 5, no. 5. P. EME.000623. DOI: 10.31031/EME.2025.05.000623.
50. *Потапов А. А., Кузнецов В. А., Гончаров С. А.* Имитационная модель формирования портретов сложных радиолокационных объектов со сниженной радиолокационной заметностью // РЭ. 2025. Т. 70, № 6. С. 564–582. DOI: 10.31857/S0033849425060047.
51. *Potapov A. A., Tupik V. A., Margolin V. I., Kostrin D. K.* Ion-plasma formation of nanosized coatings with fractal topology // IJIE: Int. Journal of Integrated Engineering. 2024. Vol. 16, no. 9. P. 284–293. DOI: 10.30880/ijie.2024.16.09.023.
52. *Кузнецов В. А.* Исторические аспекты возникновения фрактальной теории // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 2. С. 113–126. DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.2.113-126.

References

1. Potapov AA. Fractals in Radio Physics and Radar. M.: Logos; 2002. 664 p. (in Russian).
2. Potapov AA. Fractals in Radio Physics and Radar: Topology of a Sample. M.: Universitetskaya kniga; 2005. 848 p. (in Russian).
3. Potapov AA. Fractals and chaos as the basis for new breakthrough technologies in modern radio systems. In: Crownover RM. Fractals and Chaos in Dynamic Systems. M.: Tekhnosphaera; 2006. P. 374–479 (in Russian).
4. Potapov AA, Gulyaev YuV, Nikitov SA, Pakhomov AA, German VA. The Latest Methods of Image Processing. M.: Fizmatlit; 2008. 496 p. (in Russian).
5. Gulyaev YuV, editor. Professor Alexander Alekseevich Potapov. Fractals in Action: Biography and Publication Index. M.: Raduga; 2019. 256 p. (in Russian).
6. Gulyaev YV, Potapov AA. Application of fractal theory, fractional operators, textures, scaling effects, and nonlinear dynamics methods in the synthesis of new information technologies in

- radio electronics (specifically, radiolocation). *J. Commun. Technol. Electron.* 2019;64(9):911–925. DOI: 10.1134/S1064226919080059.
7. Mandelbrot B. *Les objets fractal forme, hasard et dimension*. Paris: Flammarion; 1975. 190 p.
 8. Mandelbrot B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman; 1982. 468 p.
 9. Sokolov AV, editor. *Issues of Advanced Radar*. M.: Radiotekhnika; 2003. 512 p. (in Russian).
 10. Potapov AA, Wu Hao, Xiong Shan. *Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control*. Guangzhou: South China University of Technology Press; 2020. 280 p.
 11. Pavel'ev VA, Potapov AA. Influence of the ground surface on the structure of a pulse signal in millimeter wavelength band. *J. Commun. Technol. Electron.* 1994;39(4):573–582. (in Russian).
 12. Potapov AA. Generalized correlator of fields scattered by rough surfaces. *J. Commun. Technol. Electron.* 1996;41(9):759–766. (in Russian).
 13. Potapov AA, German VA. Detection of artificial objects with fractal signatures. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1998;8(2):226–229.
 14. Potapov AA, German VA. Processing of optic and radar images of the earth surface by fractal methods. *J. Commun. Technol. Electron.* 2000;45(8):853–860.
 15. Potapov AA. Fractals in radiophysics and radar. Elements of the theory of fractals: A review. *J. Commun. Technol. Electron.* 2000;45(11):1157–1164.
 16. Opalenov YuV, Potapov AA. Application of stochastic signals and the radon transform to the formation of raster radar images by a microwave digital radar with fractal data processing. *J. Commun. Technol. Electron.* 2000;12:1311–1322.
 17. Potapov AA. Fractal in radio physics and radio location: Fractal analysis of signals. *J. Commun. Technol. Electron.* 2001;46(3):237–246.
 18. Potapov AA. Fractal in radio physics and radar: Fundamental theory of wave scattering by a fractal surface. *J. Commun. Technol. Electron.* 2002;47(5):461–487.
 19. Potapov AA, German VA. Effects of deterministic chaos and strange attractor in the radar of dynamic systems of the vegetative cover type. *Tech. Phys. Lett.* 2002;28(7):586–588. DOI: 10.1134/1.1498793.
 20. Potapov AA. New information technology in radar detection of low-contrast targets based on probabilistic texture and fractal features. *J. Commun. Technol. Electron.* 2003;48(9):1012–1029.
 21. Potapov AA and German VA. Methods of measuring the fractal dimension and fractal signatures of a multidimensional stochastic signal. *J. Commun. Technol. Electron.* 2004;(12):1370–1391.
 22. Potapov AA, Bulavkin VV, German VA, Vyacheslavova OF. Fractal signature methods for profiling of processed surfaces. *Tech. Phys.* 2005;75(5):560–575. DOI: 10.1134/1.1927210.
 23. Potapov AA, German VA. Fractal processing of faint signals and low-contrast images. *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2006;42(5):4–20.
 24. Potapov AA. The theory of functionals of stochastic backscattering fields. *J. Commun. Technol. Electron.* 2007;52(3):245–292. DOI: 10.1134/S1064226907030011.
 25. Potapov AA, Laktyunkin AV. Theory of the Wave Scattering by Anisotropic Fractal Surface. *Journal Nonlinear World*. 2008;6(1):3–36 (in Russian).
 26. Potapov AA, Matveev EN. Fractal electrodynamics. Scaling of the fractal antennas based on ring structures and multiscale frequency-selective 3D media and fractal sandwiches: Transition to fractal nanostructures. *J. Commun. Technol. Electron.* 2010;55(10):1083–1101. DOI: 10.1134/S1064226910100013.
 27. Potapov AA. Fractal model and methods based on scaling in fundamental and applied problems of modern physics. In: Gorelik VS, Morozov AN, editors. *Irreversible Processes in Nature and Technique*. M.: Bauman Moscow State Tech. Univ. Publishing; 2007. Iss. II. P. 5–107 (in Russian).
 28. Potapov AA. Fractals, scaling and fractional operators in information processing (Moscow Scientific School of Fractal Methods at the V. A. Kotelnikov Institute of Radio Electronics, Russian Academy of Sciences, 1981–2011). In: Gorelik VS, Morozov AN, editors. *Irreversible*

- Processes in Nature and Technique. M.: Bauman Moscow State Tech. Univ. Publishing; 2012. Iss. IV. P. 5–117. (in Russian).
29. Leonov KN, Potapov AA, Ushakov PA. Application of invariant properties of chaotic signals in the synthesis of noise-immune broadband systems for data transmission. J. Commun. Technol. Electron. 2014;59(12):1393–1411. DOI: 10.1134/S1064226914120110.
 30. Potapov AA, Laktyun'kin A.V. Frequency coherence function of a space-time radar channel forming images of an anisotropic fractal surface and fractal objects. J. Commun. Technol. Electron. 2015;60(9):962–969. DOI: 10.1134/S1064226915090089.
 31. Potapov AA, Il'yin EM., Chigin EP. Dimensional and topological effects in fractal-scaling detection and processing of many-dimensional signals. Bulletin of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science. 2015;(2):51–66 (in Russian).
 32. Potapov AA. On the strategic directions in synthesis of new types of radar textural-fractal detectors of low-contrast objects with marking off its outlines and coordinates against the background of high-intensity noise from the ground, sea and precipitations. In: Proc. IV All-Russian Scientific and Technical Conf. «RTI VKO Systems – 2016». 02–03 June 2016, Moscow, Russia. M.: Bauman Moscow State Tech. Univ. Publishing; 2017. P. 438–448 (in Russian).
 33. Potapov AA. Textural and fractal-scaling methods of detection, processing and identification of weak radar signals and soft images in the background of high-intensity noises. Bulletin of Aerospace Defense. 2018;2(18):15–26 (in Russian).
 34. Potapov AA. Waves in large disordered fractal systems: Radar, nanosystems, and clusters of unmanned aerial vehicles and small-size spacecrafts. J. Commun. Technol. Electron. 2018;63(9): 980–997. DOI: 10.1134/S1064226918090176.
 35. Bagmanov VKh, Potapov AA, Sultanov AKh, Zang W. Fractal filters intended for signal detection during remote-sensing data processing. J. Commun. Technol. Electron. 2018;63(10):1163–1169. DOI: 10.1134/S1064226918100030.
 36. Potapov AA. On the dimension and non-linear dynamics theory application in a new form and method of radio location. Journal of Oceanological Research. 2019;47(1):100–102 (in Russian). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(1).30.
 37. Potapov AA. Fractal electrodynamics: Numerical modeling of small fractal antenna devices and fractal 3D microwave resonators for modern ultra-wideband or multiband radio systems. J. Commun. Technol. Electron. 2019;64(7):629–663. DOI: 10.1134/S1064226919060068.
 38. Akinshin NS, Potapov AA, Bystrov RP, Esikov OV, Chernyshkov AI. Building systems for object recognition by multichannel sensing systems based on neural networks and fractal signatures. J. Commun. Technol. Electron. 2020;65(7):835–842. DOI: 10.1134/S1064226920060017.
 39. Potapov AA, Kuznetsov VA, Pototskii AN. New class of topological textural multifractal descriptors and their application for processing low-contrast radar and optical images. J. Commun. Technol. Electron. 2021;66(5):581–590. DOI: 10.1134/S1064226921050090.
 40. Potapov AA, Kuznetsov VA, Alikulov EA. Methods for complexing images formed by multi-band synthetic aperture radars. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021;24(3):6–21 (in Russian). DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21.
 41. Potapov AA, Kuznetsov VA, Alikulov EA. Structural-parametric synthesis of systems for optimal texture-fractal processing of multidimensional radar images. J. Commun. Technol. Electron. 2022;67(1):63–78. DOI: 10.1134/S1064226922010077.
 42. Akinshin NS, Potapov AA, Minakov EI, Timoshenko AV, Perlov AYu. Methods for evaluating the performance of a computer complex for monitoring the technical condition of radar stations and sensor platforms. J. Commun. Technol. Electron. 2022;67(5):567–572. DOI: 10.1134/S1064226922050011.
 43. Potapov AA, Kuznetsov VA. Textural-fractal analysis of polarimetric images generated by

- synthetic aperture radar. J. Commun. Technol. Electron. 2023;68(10):1127–1139. DOI: 10.1134/S1064226923100145.
44. Podosenov SA, Potapov AA, Foukzon Ja, Men'kova ER. Nonholonomic, Fractal and Coupled Structures in Relativistic Continuous Media, Electrodynamics, Quantum Mechanics and Cosmology. M.: URSS; 2015. 1128 p. (in Russian).
 45. Blakhman AB, editor. Radar. Theory and Practice. Moscow: UNITY-DANA; 2023. 719 p. (in Russian).
 46. Gulyaev YuV, Nikitov SA, Potapov AA, Davydov AG. Design of fractal radio systems: Numerical analysis of electromagnetic properties of the sierpinski fractal antenna. J. Commun. Technol. Electron. 2005;50(9):1070–1076 (in Russian).
 47. Gulyaev YuV, Nikitov SA, Potapov AA, German VA. Concepts of scaling and fractal dimension in the design of a fractal detector of radio signals. J. Commun. Technol. Electron. 2006;51(8): 909–916. DOI: 10.1134/S1064226906080079.
 48. Potapov AA. Waves, orbital angular momentum, bound states in the continuum, fractals and metasurfaces: Multi-profile radio. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies. 2024;16(8):961–1008. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.961.
 49. Potapov AA. Multi-profile radio, fractal engineering, artificial intelligence and smart radio environments: A new approach based on the topology of fractal sets and intelligent meta surfaces. Evolutions Mech. Eng. 2025;5(5):EME.000623. DOI: 10.31031/EME.2025.05.000623.
 50. Potapov AA, Kuznetsov VA, Goncharov SA. A simulation model for signature formation of complex low-observable targets. J. Commun. Technol. Electron. 2025;70(6):564–582 (in Russian).
 51. Potapov AA, Tupik VA, Margolin VI, Kostrin DK. Ion-Plasma Formation of Nanosized Coatings with Fractal Topology. IJIE: Int. Journal of Integrated Engineering. 2024;16(9):284–293. DOI: 10.30880/ijie.2024.16.09.023.
 52. Kuznetsov VA. Historical aspects of fractal theory appearance. Physics of Wave Processes and Radio Systems. 2021;24(2):113–126 (in Russian). DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.2.113-126.



Потапов Александр Алексеевич — родился в селе Лукино Ржаксинского района Тамбовской области (1951). Окончил радиотехнический факультет Рязанского радиотехнического института (1974). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1989, МФТИ) и доктора физико-математических наук (1994, ИРЭ РАН) по специальности «Радиофизика». Главный научный сотрудник (2002) ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (Москва). Президент совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (Университет Цзинань, Гуанчжоу, Китай). Область научных интересов — радиофизика, радиолокация, информационные технологии на основе фракталов и метаповерхностей, применение фрактальных и мультифрактальных методов в современных радиосистемах. Автор и соавтор свыше 1250 научных работ, из них 25 отечественных и зарубежных монографий (20 — в соавторстве) и 40 отдельных глав в книгах на русском и английском языках, 2 патентов, 8 учебных пособий. Почетный профессор (2011) Цзинаньского университета (г. Гуанджоу, Китай). За пионерские разработки в области прорывных информационных технологий и реализацию научных проектов по текстурам, фракталам и дробным операторам в радиолокации, радиотехнике и радиофизике награжден 20-ю ведомственными медалями. Заслуженный радист Российской Федерации.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7
 Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
 E-mail: potapov@cplire.ru
 ORCID: 0000-0001-9864-3546
 AuthorID (eLibrary.Ru): 21152