

Топологическая текстурно-фрактальная обработка сигналов и полей в радиофизике, радиотехнике и радиолокации: созданные методы и технологии (1979 – 2022 гг.) – фрактальная инженерия

А.А. Потапов^{1,2}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, ул. Моховая 11, корп. 7, Москва, 125009, Россия

² Совместная китайско-российская лаборатория информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, Университет Цзинань, Гуанчжоу, 510632, Китай

Аннотация

В докладе рассматриваются основные направления внедрения текстур, фракталов, дробных операторов, динамического хаоса и методов нелинейной динамики для создания новых информационных (прорывных) технологий. Исследования проводятся в фундаментальном научном направлении «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 г. по настоящее время. Актуальность проведения данных исследований связана с необходимостью более точного описания всех реальных процессов, происходящих в радиофизических и радиотехнических системах: учет эргодичности (памяти), негауссовости и скейлинга физических сигналов и полей. Применение фрактальных систем, датчиков и узлов является принципиально новым решением, существенно меняющим принципы построения интеллектуальных радиотехнических систем и устройств. Выполненные исследования являются приоритетными в мире и служат базой для дальнейшего развития и обоснования практического применения фрактально-скейлинговых и текстурных методов в синтезе принципиально новых топологических текстурно-фрактальных методов обнаружения сигналов в пространственно-временном канале распространения волн с рассеянием (новый вид радиолокации). Впервые введены понятия «фрактальная инженерия» и «фрактальный инжиниринг».

Ключевые слова

Текстура, фрактал, скейлинг, сигнатура, обнаружение и распознавание целей, радар, вычислительная метаповерхность, фрактальная инженерия, фрактальный инжиниринг.

Topological Texture-Fractal Processing of Signals and Fields in Radio Physics, Radio Engineering and Radiolocation: Developed Methods and Technologies (1979 – 2022) – Fractal Engineering

А.А. Potapov^{1,2}

¹ Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) of Russian Academy of Sciences, Mokhovaya 11-7, Moscow, 125009, Russia

² JNU-IREE RAS Joint Laboratory of Information Technology and Fractal Processing of Signals, Jinan University, Guangzhou, 510632, China

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: potapov@cplire.ru (А.А. Потапов)

ORCID: 0000-0001-9864-3546 (А.А. Потапов)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Abstract

The report discusses the main directions of the introduction of textures, fractals, fractional operators, dynamic chaos and methods of nonlinear dynamics to create new information (breakthrough) technologies. The research is carried out in the fundamental scientific direction "Fractal radio physics and fractal radio electronics: design of fractal radio systems", initiated and developed by the author in V. A. Kotel'nikov IREE RAS from 1979 to the present. The relevance of these studies is related to the need for a more accurate description of all real processes occurring in radio physical and radio engineering systems: taking into account the hereditary (memory), non-Gaussianity and scaling of physical signals and fields. The use of fractal systems, sensors and nodes is a fundamentally new solution that significantly changes the principles of building intelligent radio engineering systems and devices. The performed studies are priority ones in the world and serve as a basis for further development and justification of the practical application of fractal-scaling and texture methods in the synthesis of fundamentally new topological texture-fractal methods for detecting signals in the space-time channel of waves propagation with scattering (a new type of radar). The concepts of fractal engineering are introduced for the first time.

Keywords

Texture, fractal, scaling, signature, target detection and recognition, radar, computing metasurface, fractal engineering.

*«Ученые изучают мир как он есть;
инженеры создают мир,
которого раньше не было».*
Теодор фон Карман

1. Введение

В настоящее время в радиофизике, радиоэлектронике и обработке сигналов преимущественно, привычно и повсеместно используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссова статистика, марковские процессы и т.п. Актуальность проведения авторских исследований связана с необходимостью более точного описания реальных процессов, происходящих в современных радиофизических и радиотехнических системах. Это, прежде всего, учет эрeditarности (памяти), негассовости и скейлинга (самоподобия, автомодельности) физических сигналов и полей. Все эти понятия входят в определение фрактальных множеств или фракталов, впервые предложенных Б. Мандельбротом в 1975 году [1, 2].

Проблема, вынесенная в название работы, начала изучаться впервые в мире автором более 40 лет назад в ИРЭ АН СССР в связи с выполнением цикла фундаментальных исследований с ведущими отраслевыми НИИ и конструкторскими бюро СССР и России, посвященных созданию новых прорывных технологий для радиолокации. Основное, это обнаружение по одномерной (вероятностный статистический сигнал) и многомерной (стохастические оптические и радиолокационные изображения) выборке разнообразных малоконтрастных объектов на фоне интенсивных помех от поверхности Земли. В физическом аспекте термин «эрeditarность» эквивалентен понятиям «память», «последствие», «наследственность», и естественно ввести функционалы памяти, что и сделано автором. Например, актуальная задача обнаружения малоконтрастных объектов на фоне интенсивных помех неизбежно требует, чтобы предложить, а затем и вычислить некоторую принципиально новую характеристику, которая отличается от функционалов, связанных с энергией помех и сигнала, а определяется исключительно *топологией и размерностью* принятой смеси сигнала с помехами и шумами. При этом физики включили в свой арсенал новый математический аппарат, а математики обогатились новыми эвристическими соображениями и совместными постановками задач.

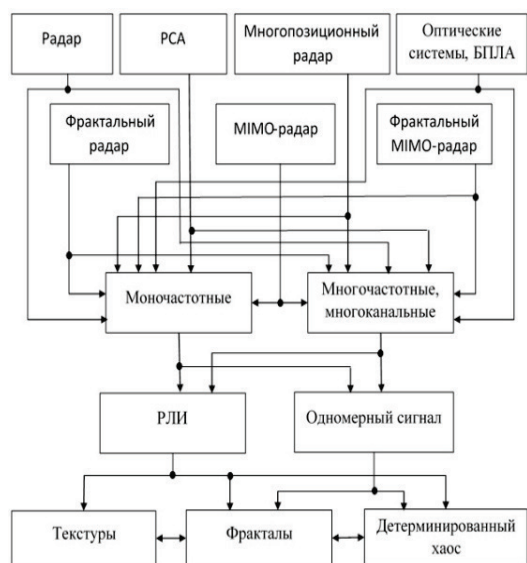
Основное назначение данной работы – познакомить читателя с созданными текстурными и фрактальными (мультифрактальными) методами, а также их применением в целом. Более подробные сведения и необходимые доказательства читатель найдет в авторских книгах и оригинальных работах по этой теме [3 - 21]. В настоящее время можно уверенно говорить о проектировании полностью фрактальных радиосистем и устройств. Замечу, что в докладе

неизбежны повторы и корреляции с прежними выступлениями автора на различных конференциях и симпозиумах; это проявление того же самого скейлинга и фрактальности совместно с желанием донести свои оригинальные идеи и методы до разной аудитории в мире.

2. Современные радиосистемы и новые топологические признаки

Для дальнейшей конкретизации проблем обнаружения радиолокационных многомерных сигналов, считаем, что первичная информация поступает от различных современных радиосистем в виде одномерного сигнала и/или радиолокационного изображения (РЛИ) – рисунок 1а. Основной идеей фрактальных ММО-радаров является использование фрактальных антенн и фрактальных обнаружителей [5 - 7, 20, 21]. Способность фрактальных антенн одновременно работать на нескольких частотах или излучать широкополосный зондирующий сигнал дает резкое увеличение числа степеней свободы, что определяет многие важные преимущества такого вида радиолокации и значительно расширяет возможности адаптации. Для отражения этих особенностей автором в [5 - 7] введен новый термин «фрактально-частотные ММО-системы (FF ММО)», что более полно отражает их физические возможности. Идеология фрактальной РЛС базируется на разработанной автором концепции фрактальных радиосистем (см. ниже) [3 - 8, 10, 14, 15, 20, 21].

Все существующие на данный момент методы и признаки обнаружения малозаметных объектов на фоне интенсивных отражений от моря, земли и метеорологических образований компактно представлены далее на рисунке 1б. Там же отмечены взаимосвязи между разнообразными признаками и методами.



(а)

Рисунок 1 – Радиосистемы исходной первичной информации (включены фрактальный радиолокатор и фрактальный ММО-радар) (а) и новые топологические признаки и методы обнаружения малококонтрастных (малозаметных) объектов на фоне интенсивных шумов и помех (б):

РСА – радиолокатор с синтезированной апертурой, БПЛА – беспилотный летательный аппарат, ТП – текстурные признаки, ЧФК – частотная функция когерентности



(б)

Введение в США в 1973 г. понятия ансамбля текстурных признаков, позволило автору в 80-е годы XX века впервые в мире рассчитать полные ансамбли из 28 текстурных признаков и провести их детальный синхронный анализ для реальных (оптических (АФС) и радиолокационных в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) на волне 8,6 мм), а также синтезированных текстур на основе авторегрессионных моделей в зависимости от времени года [3 - 6, 8, 10, 13]. Многолетние натурные эксперименты проводились автором совместно с ЦКБ «Алмаз» и другими ведущими промышленными организациями СССР. Все исследования велись на длинах волн $\lambda = 2,2$ и 8,6 мм (активное излучение) и $\lambda = 3,5$ мм (пассивное излучение). После расчета ансамблей текстурных признаков по оптическим и радиолокационным изображениям автором в 1985–1986 гг. были предложены методы и алгоритмы для обнаружения малоконтрастных целей на фоне интенсивных помех [13]. К ним относятся: метод прямого использования текстурных признаков (1985), дисперсионный метод на основе f -статистик (1985) и метод обнаружения с помощью линейно-моделированных эталонов – текстур (1986) [3 - 6, 8, 10, 13]. Созданные методы обнаружения устойчиво работали при малых отношениях сигнал/помеха q_0^2 порядка единицы или меньше единицы (в размах). Насколько известно автору, за рубежом ни одного текстурного метода обнаружения малоконтрастных объектов предложено не было. Кроме того, важным достоинством текстурных методов обработки является возможность нейтрализации спеклов на когерентных изображениях земной поверхности, полученных с помощью РСА.

Многие естественные объекты, такие как почва, растительность, облака и т.п. проявляют фрактальные свойства в некоторых масштабах [1 - 4, 9]. В настоящее время анализ естественных текстур претерпел значительные изменения из-за использования метрик, заимствованных во фрактальной геометрии. После текстуры было введено понятие фракталов, т.е., признаков, основанных на теории дробной меры, для принципиально иного подхода к решению современных радиолокационных задач. Фрактальная сигнатура в различных участках изображения поверхности является мерой текстуры, т.е., свойств пространственной корреляции рассеяния радиоволн от соответствующих участков поверхности. Методы детерминированного хаоса широко развиты, они представлены в правом столбце Рисунка 1б. Отметим лишь, что алгоритмы радиолокационного обнаружения малоконтрастных объектов на фоне лесных массивов для радиолокатора на длине волны 2,2 мм опробованы нами в 2001 г. Был впервые реконструирован странный аттрактор, управляющий радиолокационным рассеянием ММВ, и измерены его характеристики. По максимальному показателю Ляпунова $\lambda_1 > 0,6$ бит/с определено, что, интервал предсказания интенсивности отраженного сигнала больше времени корреляции τ примерно в 8 раз ($\tau \approx 210$ мс при скорости ветра 3 м/с). Расчеты показателя Херста H показали, что в двух случаях из трех процесс рассеяния ММВ лесными массивами соответствует персистентному процессу с $H > 0,5$, т.е. процессу с памятью.

3. Внедрение в радиофизику, радиотехнику и радиолокацию новых физических положений и математических понятий

Ниже конспективно рассмотрим основные положения созданной автором физической концепции на основе теории фракталов, текстур и дробных операторов.

Текстура – это матрица или фрагмент пространственных свойств участков изображений с однородными статистическими характеристиками [1 - 6, 8, 10, 13]. Тектурные признаки (ТП) основаны на статистических характеристиках уровней интенсивности элементов изображения и относятся к вероятностным признакам, случайные значения которых распределены по всем классам природных объектов. Классические радиолокационные сигнатуры включают в себя временные, спектральные и поляризационные особенности (признаки) отраженного сигнала.

Фракталы относятся к множествам с крайне нерегулярной разветвленной или изрезанной структурой. Теория фракталов рассматривает вместо целочисленных мер – дробные и базируется на новых количественных показателях в виде дробных размерностей D и соответствующих фрактальных сигнатур $D(t, f, \vec{r})$. 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). Разработанная автором классификация фракталов (рисунок 2) была в декабре 2005 г. в США лично одобрена Б. Мандельбротом (1924 – 2010 гг.).

Несколько утрируя, можно сказать, что фракталы составляли тонкую амальгаму на мощном острове науки конца XX века. В современной ситуации интеллектуальное фиаско потерпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания.

Необходимо сказать, что вся современная радиотехника базируется на классической теории целочисленной меры и целочисленного исчисления. Таким образом, исторически «за бортом» оказалась обширная область математического анализа, называемая дробным исчислением, имеющая дело с производными и интегралами произвольного (вещественного или комплексного) порядка, а также и вся теория фракталов (!). Автор с коллективом из различных городов своих помощников и учеников все это успешно исправляет в теории и на практике.

На рисунке 3 приведена полная структура авторских исследований в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН текстурных и фрактальных методов обработки малококонтрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовых помехах. Разрабатываемые автором текстурные и фрактальные цифровые методы позволяют частично преодолеть априорную неопределенность в радиофизических и радиолокационных задачах с помощью геометрии или *топологии выборки* - одномерной или многомерной [3 - 18, 20, 21]. При этом исключительное значение приобретают топологические особенности индивидуальной выборки, а не усредненные реализации, имеющие зачастую другой характер. Это, впервые введенная автором, проблема «размерностного склероза» физических сигналов и их сигнатур.

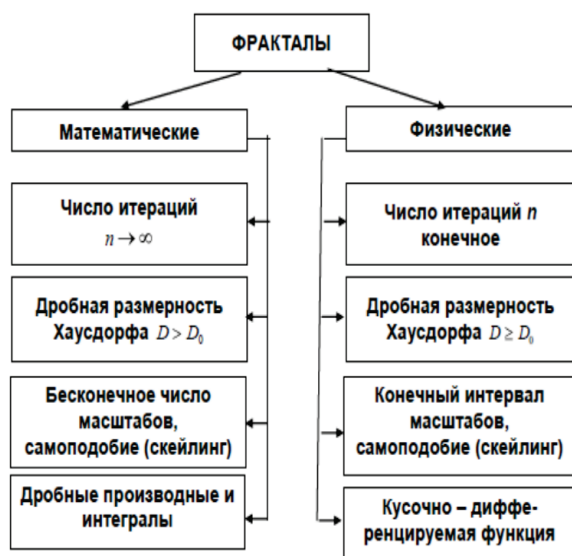


Рисунок 2 – Авторская классификация фрактальных множеств и сигнатур, одобренная и принятая Б. Мандельбротом в 2005 г., США

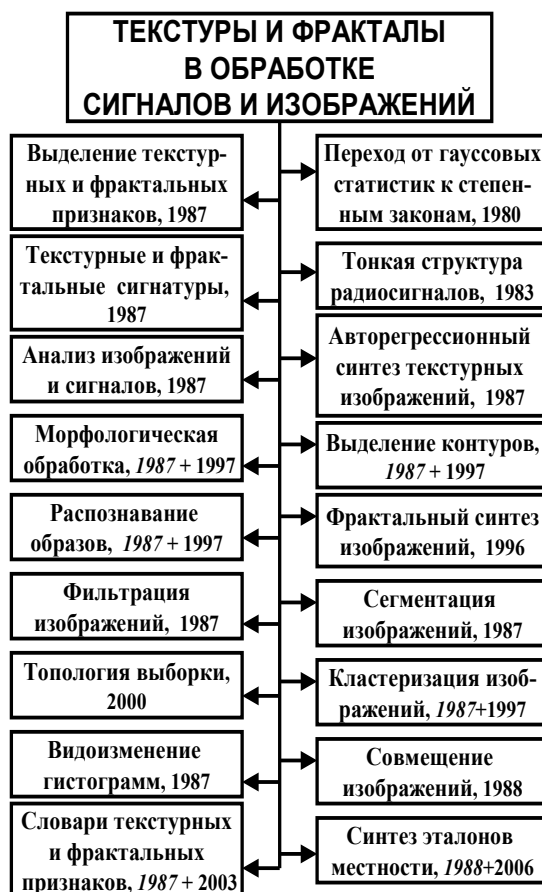


Рисунок 3 – Текстуры и фрактальные меры для малококонтрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовых шумах и помехах

В основе современной теории вероятностей лежат предельные теоремы о сходимости распределений сумм независимых случайных величин к так называемым устойчивым распределениям: гауссовым или негауссовым. Первые опираются на центральную предельную теорему, а вторые (негауссовы) – на предельную теорему, доказанную Б. В. Гнеденко (1939 г.) и W. Doeblin (1940 г.). Именно в радиофизических натурных экспериментах автором была показана в 1979 – 1980 гг. неприменимость гауссовых статистик для почти всего диапазона углов падения электромагнитной волны. Данные экспериментов полностью определяют характерный вид фрактального распределения (паретиана) и роль тяжелых или утолщенных хвостов, которые и несут всю полезную информацию при сверхмалых отношениях сигнал/помеха – рисунок 4.

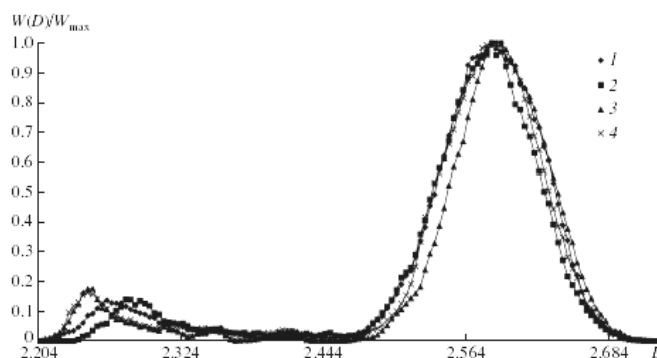


Рисунок 4 – Эмпирические обобщенные фрактальные распределения $W(D)/W_{\max}$ с тяжелыми хвостами для сцен с сильными гауссовыми помехами: 1 и 3 – сцена А, 2 и 4 – сцена Б, 1 и 2 - $q_0^2 = -10$ дБ, 3 и 4 - $q_0^2 = -20$ дБ

Все современные радиосистемы практически используют информацию, которая фиксируется главным максимумом $W(D)/W_{\max}$ (рисунок 4, справа). Предложенные автором фрактальные радиосистемы и соответствующие методы приема основаны на фрактально-скейлинговых методах обработки сигналов, волновых полей и изображений, дополнительно использующих ту часть информации (локальный максимум $W(D)/W_{\max}$, рисунок 4, слева), которая при классических методах обработки безвозвратно терялась и не учитывалась. Иначе говоря, классические методы обработки сигналов принципиально выделяют только ту составляющую информации, которая связана с целочисленной мерой. Математическим выражением самоподобия являются степенные законы [1 - 6, 13].

4. Фрактальные технологии, фрактальные радиосистемы и устройства

Глобальный фрактально-скейлинговый метод и ТТФО, благодаря нашим пионерским работам, разработан, существует, приобрел известную внутреннюю законченность, имеет общеизвестные мировые приоритеты, а потому в полной мере заслуживает серьезного анализа. Коренное отличие предложенных автором фрактальных методов от классических связано с принципиально иным (революционным) 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.

4.1. Развитие прорывных фрактальных технологий

За более, чем 40 лет научных исследований, глобальный фрактально-скейлинговый метод полностью оправдал себя, найдя многочисленные приложения – рисунок 5 и рисунок 6. Это своего рода вызов времени. Здесь говорят только факты! Все это обозначено автором как *фрактальная парадигма* [3 - 18, 20, 21]. Заметим, что на первой схеме (Рисунок 5, внизу справа) появился прямоугольник «Структурно-параметрический синтез систем текстурно-фрактальной обработки (ТТФО), 2021 г.», а на второй схеме (рисунок 6, внизу справа) – два прямоугольника –

«Фрактальное комплексирование РЛИ, 2020» и «Вычислительные метаповерхности, фотоника, 2019». Вышеуказанные очень существенные направления «ТТФО, 2021 г.» и «Фрактальное комплексирование РЛИ, 2020» выполнены совместно с соавторами-учениками из Военно-воздушной академии им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина [16 - 18]. Поясним значение этих тем, являющихся превалирующими в настоящем докладе.



Рисунок 5 – Авторская концепция фрактальных радиосистем, датчиков, устройств и радиоэлементов

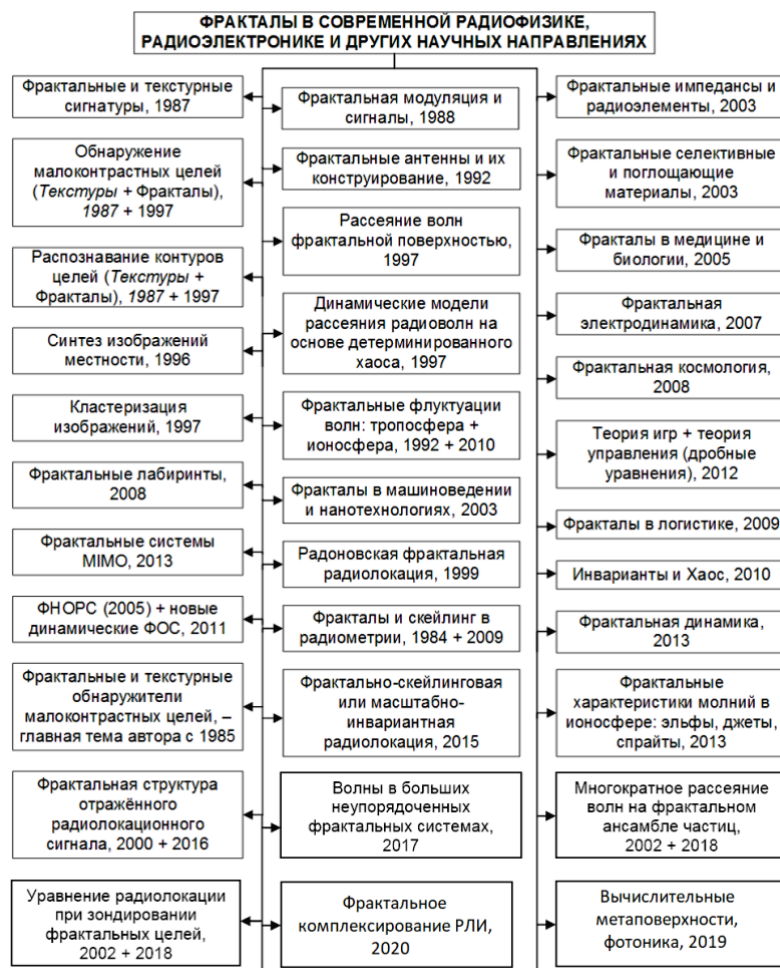


Рисунок 6 – Эскиз развития автором прорывных технологий на основе фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов для нелинейной физики и радиоэлектроники: ФНОРС – фрактальный непараметрический обнаружитель радиолокационных сигналов, ФОС – фрактальный обнаружитель сигналов

Представленная схема структурно-параметрического синтеза (рисунок 5) позволяет говорить об *оптимальности* ТТФО многомерных изображений, поскольку критерием эффективности служит максимум одной или одновременно нескольких вероятностных характеристик – классификации (сегментации), обнаружения или распознавания в зависимости от решаемых системой задач. Для такого синтеза нами впервые и специально предложен в [17] принципиально новый класс *топологических текстурно-мультифрактальных признаков*, позволяющих совместно оценивать различные фрактальные свойства текстуры. При этом решаются все вопросы совместной оценки скейлинговых, сингулярных, мультифрактальных и анизотропных свойств текстуры изображений любого вида. Этот новый класс признаков мы назвали *направленной морфологической мультифрактальной сигнатурой* (НММФС) [17].

По второй теме (рисунок 6) в 2021 г. *получен патент РФ с приоритетом от 2020 г.* и выпущен ряд статей [16, 18]. Несмотря на существование в настоящее время методов, способов и алгоритмов текстурно-фрактальной обработки изображений, задача эффективного комплексирования многомерных РЛИ до сих пор не решена – рисунок 7а,б. С учетом результатов статистического анализа значений яркости и фрактальных сигнатур двумерных РЛИ в работах [16, 18] нами предложен новый способ комплексирования РЛИ *многодиапазонной PCA*, основанный, в отличие от известных, на одновременном вычислении скользящим окном по всем исходным РЛИ локальных мультифрактальных размерностей методом итерационных покрытий, позволяющий существенно повысить информативность изображений, оцениваемую по энтропии. Применение данного способа позволяет существенно повысить информативность радиосистем, особенно в случае постановки помех и маскирования объектов в некоторых или всех частотных диапазонах.

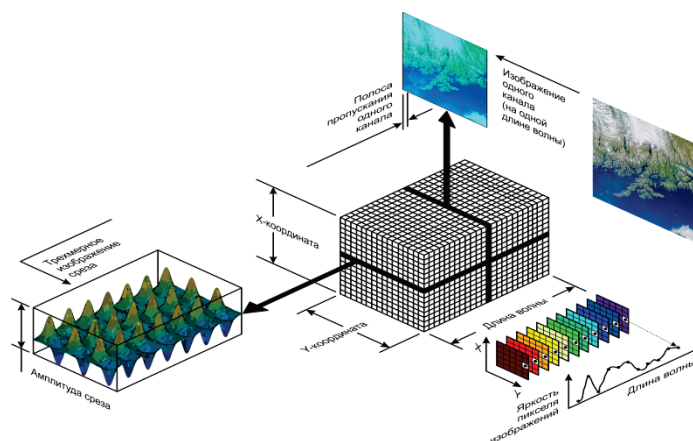


Рисунок 7а – Модель хранения и анализа мульти- и гиперспектральных данных [21]

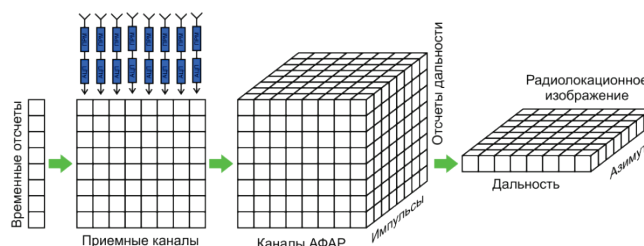


Рисунок 7б – Модель формирования куба радиолокационных данных [21]

4.2. Топологические текстурно-фрактальные обнаружители

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 [3, 4]. Основные принципы текстурно-фрактального обнаружителя были открыты и предложены автором еще в 80-х гг. XX века, а выход (впервые в мире – см. Рисунок 5 и Рисунок 6) на действующий макет ФНОРС произведен в 2003 - 2005 гг. [3 - 10]. Он демонстрировался лично в США в 2005 г. по проекту МНТЦ (ЦКБ «Алмаз» и А.А. Потапов от ИРЭ РАН) и заслужил очень высокую оценку специалистов [5, 6, 8].

Исторически фрактальные исследования начались практически одновременно в России, США и Китае в 1980-е гг. [3 - 5]. Но в работах автора была сразу же заявлена, поставлена и решалась глобальная задача обнаружения фрактального объекта на интенсивном текстурно-фрактальном фоне с гауссовыми и негауссовыми шумами и помехами [3 - 10, 13]. Отличие и методология авторского подхода были настолько глубоки и необычны, что из Центра космической плазмы и Аэроисследований США (г. Хантсвилл - «ракетный город США», шт. Алабама) было направлено 14.12.2005 г. на имя директора ИРЭ РАН академика Ю. В. Гуляева официальное благодарственное письмо с отзывом о высокой научной квалификации д.ф.-м.н. А. А. Потапова и признанием его приоритетов в области фракталов в радарх [5]; последовал также ряд иностранных статей со ссылками на наши первые русские работы по фрактальной обработке сигналов и РЛИ. И уже 16.12.2005 г. в Нью-Йорке состоялась моя встреча с Б. Мандельбротом. Таким образом, приоритет в этой области давно (более 40 лет) и прочно принадлежит в России и в мире автору и ИРЭ им. В. А. Котельникову РАН.

Работая с выборкой сигнала на фоне помех и шума в пространстве дробной меры, неизбежно приходим к алгоритмам (критериям) *адаптивной фрактальной фильтрации*. Примером адаптивной процедуры служит автоматическая регулировка усиления приемника в зависимости от текущей оценки $H = f(t)$. В другой адаптивной процедуре происходит автоматическая регулировка порога обнаружения по значениям $H = f(t)$. При этом обеспечивается стабилизация вероятности ложной тревоги. Кстати, автор тогда и предложил новые простые и сложные H -сигналы с достаточно уникальными свойствами, их модуляторы и демодуляторы.

4.3. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация (МИР) и ее постулаты

В настоящее время работы по фрактальной радиолокации в мире проводятся исключительно в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Предложенный и обоснованный автором в начале XX века новый вид (новый метод) радиолокации, а именно фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация (МИР) базируется на трех постулатах [5 - 7]:

1. Интеллектуальная обработка сигнала / изображения, основанная на теории дробной меры и скейлинговых эффектов, для расчета поля (сигнатур) фрактальных размерностей D ;
2. Выборка принимаемого сигнала в шумах относится к классу устойчивых негауссовых распределений вероятностей фрактальной размерности сигнала (т.е., работаем с распределениями с тяжелыми хвостами).
3. Максимум топологии при минимуме энергии входного случайного сигнала.

5. «Распределенный интеллект» при групповом взаимодействии БЛА и фракталы

Классификация групповых полетов беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в процессе выполнения поставленных задач приведена на рисунке 8. Там же автором введены фрактальные траектории полетов БЛА и фрактальные группировки БЛА (рисунок 2).

Интеллектуальные или популяционные алгоритмы (методы) способствуют формированию роевого интеллекта популяции, т.е., здесь «включается» синергетическая парадигма с законами сложных систем. К решению данных задач может быть применен авторский фрактально-скейлинговый метод. Допустим, сложная сеть из множества микро- (нано-) БЛА ($> 10^2 \dots 10^3$) осуществляет глобальный мониторинг территории и расположенных на ней объектов. Задачу можно рассматривать в рамках понятия распределенной измерительной среды, когда каждая

точка некоторой динамической среды способна выполнять сенсорные, измерительные и информационные функции [3 - 5, 20]. Фрактально-графовый подход позволяет изучать рост сложных сетей и дает метод манипулирования такими сетями на глобальном уровне, не прибегая к детальному описанию. При этом оказывается, что избыточное число датчиков (БЛА) не гарантирует их оптимальное распределение в/по исследуемой недетерминированной среде. Введение фрактальной топологии таких сетей (фрактальный рой) с учетом конфигурации исследуемой территории позволит более точно и меньшими средствами / или с той же точностью, но меньшими средствами (количество БЛА) осуществлять мониторинг территории с обнаружением объектов.

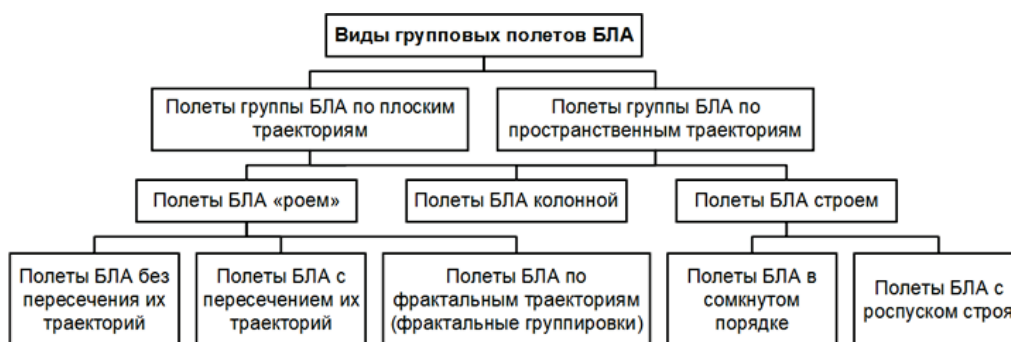


Рисунок 8 – Классификация групповых полетов БЛА

6. Фотоника, радиофотоника, вычислительные метаповерхности и ТТФО

Непрерывное совершенствование ТТФО сигналов и полей в современной радиофизике и радиоэлектронике подразумевает постоянное улучшение скорости обработки информации и поиск новых физических принципов для ее осуществления. Здесь, несомненно, будущее принадлежит фотонным и радиофотонным технологиям. Далее кратко представлены избранные результаты (рисунок 6) в области фотоники и вычислительных метаповерхностей (МП), которые были получены автором с китайскими учеными [5, 19, 21]. Путем проектирования геометрии диэлектрических МП могут быть получены оптические аналоговые вычислительные устройства с различными функциями, такие как пространственные дифференциаторы, интеграторы, решатели уравнений и т.п. Наиболее распространенными являются МП в которых структура элементов (*метаатомы* размером в несколько нанометров), размер и расстояние между элементами значительно меньше по сравнению с длиной волны возбуждающего поля. Можно сказать, что в МП *корень многих увлекательных топологических явлений в физике и экзотических манипуляций с волнами.*

В [19] мы предложили МП Лапласа, которая может выполнять почти идеально операцию Лапласа для разных конфигураций падающего светового поля. Предлагаемая МП Лапласа основана на возбуждении *связанного состояния в континууме* и демонстрирует экзотические оптические свойства – рисунок 9. Одно из применений операции Лапласа - обнаружение краев проблемных целей на изображении. Мы рассмотрим его с помощью входного изображения, состоящего из логотипа университета Цзинань, который показан на рисунке 10. Метаповерхность Лапласа может быть настроена для работы на других длинах волн путем регулировки размера структуры. Чтобы продемонстрировать это, была разработана другая МП Лапласа, работающая на длине волны 1550 нм (окно прозрачности оптического волокна). Форма структуры такая же, как на рисунке 9(б), но с другими параметрами: $a=743$ нм, $d=560$ нм, $s=69$ нм и $h=360$ нм, соответственно.

Далее мы использовали типичный QR-код в качестве входного 2D изображения, поскольку QR-коды теперь важны в нашей повседневной жизни, и обнаружение краев для них играет решающую роль в обнаружении области QR-кода. Выбранный нами QR-код показан на рисунке 11 (а), который несет информацию о китайском иероглифе, означающем «Свет». Результаты показаны на рисунке 11 (б) и рисунке 11 (в).

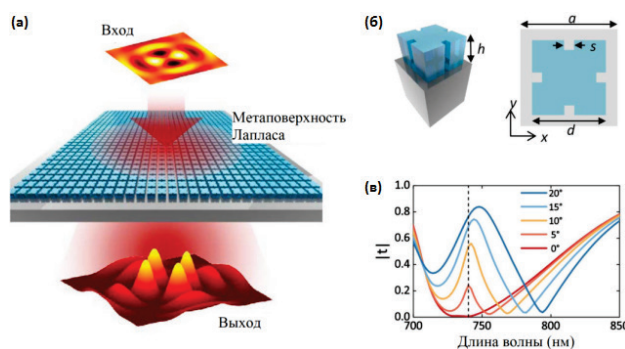


Рисунок 9 – (а) Диэлектрическая МП, преобразующая входную двумерную пространственную функцию в другую функцию как оператор Лапласа; (б) Элементарная ячейка диэлектрической МП. Слева, трехмерный вид элементарной ячейки. Она состоит из кремниевого кирпичика (голубой цвет) толщиной $h=163$ нм и стеклянной подложки (серый цвет). Справа, вид сверху на элементарную ячейку. Период составляет $a=331$ нм, а ширина кремниевого кирпича $d=251$ нм. В центре всех краев расположены четыре квадратные пустоты шириной 33 нм. (в) Спектры коэффициента пропускания $|t|$ МП Лапласа при различных углах падения вдоль направления x для p -волны [19]

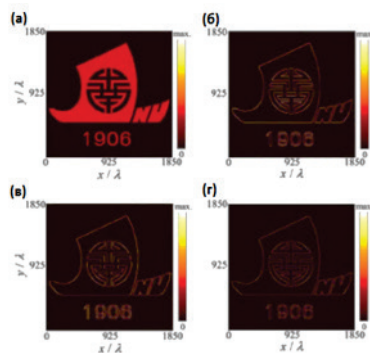


Рисунок 10 – (а) Двумерное изображение с логотипом лодки университета Цзинань. Размеры пикселей в направлениях x и y установлены равными $1,94 \lambda$; (б) Выходное изображение с МП для модулированного светового поля с поляризацией x ; (в) Выходное изображение для случая y поляризации; (г) Выходное изображение для случая неполяризованного света [19]

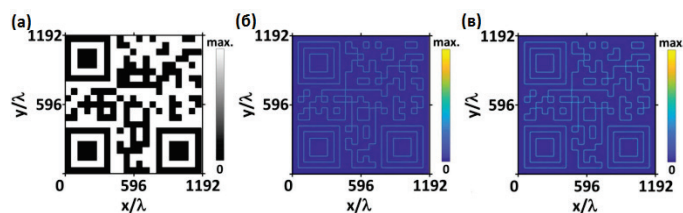


Рисунок 11 – (а) Входное изображение, состоящее из QR-кода; (б) Выходное изображение идеальной операции Лапласа; (в) Выходной сигнал из МП Лапласа. Все изображения представляют собой профиль силы света; размеры пикселей установлены как $2,88\lambda$ [19]

7. Авторские подходы к фрактальному инжинирингу и философии фрактальной инженерии

Занимаясь более 40 лет исключительно теорией и практикой фракталов [3 - 21], автор решил конспективно (это тема отдельной большой работы, которая тщательно готовится) поделиться мыслями о том, что такое *фрактальная инженерия* и *фрактальный инжиниринг*. Импульсом к этому послужила и китайская книга – первая по философии инженерии в мире - (Ли Боцун. «Гунчэн чжэсюэ иньлунь - во цзао у гу во цзай [Введение в философию инженерии - я создаю вещи, следовательно я существую]». - Чжэнчжоу: Дасян чубаньшэ, 2002.- 452 с.); с книгой

автора любезно ознакомили в Китае еще в 2012 г. Сейчас философия инженерии стремительно захватывает мир. Триада науки, техники и инженерии (на примере фракталов и дробных операторов) независимо от вышеупомянутой китайской книги по философии инженерии, представлена автором в выпуске № 1 журнала РЭНСИТ за 2012 год, а именно, все 142 страницы были отданы автору для двух его больших статей (по сути, новая книга).

Инженерия настолько широкая область, что имеет целый ряд категорий, которые объединяет одно общее, - в их основе всегда лежит процесс создания человеком чего-то нового. Вот это новое и приоритеты автор кратко и обсудит на основе своего опыта работы с фракталами и их приложениями. Абсолютно логичны в данном направлении и вопросы приоритетов (автор следует мудрому совету Б. Мандельброта, данному им лично автору при нашей продолжительной встрече в 2005 г. в Нью-Йорке!). Области применения ТТФО сигналов, полей и изображений постоянно расширяются, 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 (тогда, например, и появился впервые у других авторов термин “метод Потапова” – см. [3 - 5, 21]). Замечу, что в своей монографии [3] в 2002 г. я впервые ввел в научный обиход термины «фрактальная радиофизика» и «фрактальная радиолокация», которые впоследствии значительно расширились. Понятия «фрактальная парадигма», «фрактальный сигнал», «фрактальная модуляция», «топология выборки», «фрактальная сигнатура», «фрактальный импеданс», «фрактальная радиосистема», «фрактальные датчики», «фрактальные частотно-избирательные поверхности и объемы», «фрактальная элементная база» и т.п., автор ввел в 1987, 1988, 2000 и 2003 годах не только теоретически, но и применяя их впервые и на практике. В настоящее время все встало прочно на свои места, как и положено тому быть.

Приведу характерный пример (их 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. рисунок 12 [3 - 5, 9, 13]: «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 щелевой антенной решетки в диапазонах ММВ и СМВ) для переносного цифрового твердотельного когерентного радиолокатора (ЦТР) на параметронах со сложным фазоманипулированным сигналом сверхбольшой базы (*есть наш патент от 2001 г.*). 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». (Этого никто в мире тогда не мог сделать). 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 в 80-е гг. XX в. 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 вертолетной радиолокации на основе *преобразования Радона* [3 - 5, 9].

Вот все это и есть на деле фрактальная инженерия и фрактальный инжиниринг с элементами философии инженерии (можно сказать, то время, а именно, 80-е годы XX века, было для автора началом зарождения *русской философии фрактальной инженерии и фрактального инжиниринга*)! Это был серьезный и передовой проект в великом СССР, а не какие-то элементарные «детские безделушки», которые изогнул и разместил на балконе дома в 1995 г. американский инженер!

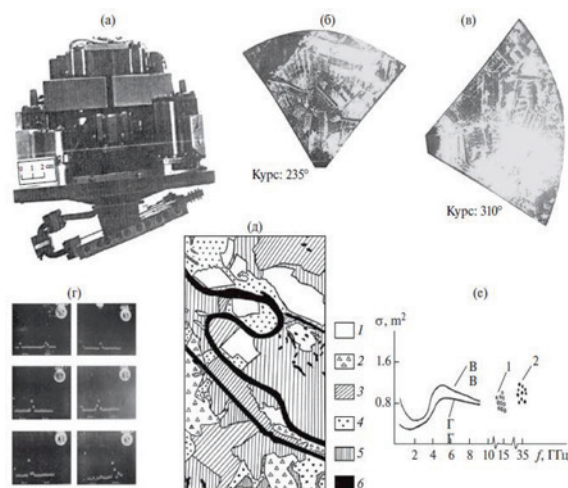


Рисунок 12 – ЦТР на параметронах со сложным ФМ сигналом сверхбольшой базы $m = 2^{17} - 1$ с фрактальной щелевой решеткой (внизу) в диапазонах ММВ и СМВ (а) и результаты испытаний: б, в – первые РЛИ на волне 8,6 мм; г – характерные формы огибающей сигнала, отраженного текстурными земными покровами; д – пример уникальной эталонной синтезированной карты местности по энергетическим, текстурным и фрактальным признакам (!); е – средняя ЭПР человека как функция частоты для горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризаций, 1 и 2 – данные автора в натурном эксперименте в качестве «лоцируемой цели» [3 - 5, 9, 13]

8. Выводы

Глобальный фрактальный метод создан автором и многосторонне продемонстрирован в [3 - 18, 20, 21] и непосредственно здесь. В результате в научном мире образовано новое смысловое пространство с его необычными для классической радиофизики, радиотехники и радиолокации 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. Все это и определяет фрактальную инженерию и инжиниринг.

Работами автора за более чем 40 лет, практически с «нуля», преодолевая трудности идущих первыми, заложены фундаментальные основы того, что будет применено в будущем. Не результаты, не конкретные решения представляют самую большую ценность, а именно метод решения, подход к нему. Физическое содержание теории дифракции становится более четким при фрактальном подходе и выделении фрактальной размерности D или фрактальной сигнатуры $D(t, f, \bar{r})$ как параметра. Учет фрактальности значительно сближает теоретические и экспериментальные характеристики индикатрис рассеяния земных покровов, что важно для задач радиолокации и дистанционного зондирования. В работе представлены идеи и основные стратегические направления в синтезе новых видов радиолокационных текстурно-фрактальных или топологических обнаружителей малококонтрастных объектов. Предложены *новые семейства топологических мультифрактальных признаков* и разработаны принципиально новые методы обнаружения малококонтрастных объектов на фоне интенсивных помех.

Открыт, предложен и обоснован *новый вид и новый метод современной радиолокации*, а именно, фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация (МИР). Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации, а также в ее математическом аппарате. Таким образом, *топологическое обнаружение* открывает двери в совершенно новую область теории статистических решений и позволяет скорректировать бытующие в этой области представления, и создать новые, что имеет важное теоретическое и практическое значение. Внедрение фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов дает «импульс» и всей современной радиоэлектронике, так как вся предыдущая и настоящая радиоэлектроника базируется исключительно (и только!) на основе теории целочисленных функций. Таким образом, это *принципиально новая радиотехника*.

В заключение следует отметить, что проблема «топологии выборки» [3 - 8, 10, 13] - одна из важнейших во всей радиоэлектронике, и при этом автор убежден, что без учета фрактальности и скейлинга вся классическая теория обнаружения и распознавания многомерных сигналов в будущем потеряет свое каузальное значение для фундаментальных понятий сигнала и шума.

По монографиям автора поставлены курсы лекций по фракталам в различных университетах России и стран ближнего зарубежья, а также, в Китае. На 2022 год результаты фундаментальных исследований автора отражены в более чем 1 200 работах и 45 книгах и главах на русском, английском и китайском языках [5, 21], сделаны доклады в 23 странах.

9. Благодарности

Учитывая то, что автор в 1968 г. поступил и в 1974 г. окончил Рязанский радиотехнический институт, радиотехнический факультет (группа 818), специальность «Радиоэлектронные устройства» (0707), диплом Я № 336933, считаю своим приятным долгом выразить искреннюю признательность РРТИ (РГРТУ им. В. Ф. Уткина) за полноценные знания в радиотехнике и радиолокации и незабываемое студенчество, тем более в юбилейный год 70-летия родного вуза (автор и РРТИ родились в один год - 1951).

10. Список источников

- [1] Mandelbrot B. Les Objects Fractal: forme, hasard et dimension. Paris: Flammarion, 1975. 190 p.
- [2] Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. N.Y.: Freeman and Comp., 1982. 468 p.
- [3] Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.
- [4] Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
- [5] Профессор Александр Алексеевич Потапов. Фракталы в действии: Биобиблиографический указатель / Под ред. академика Ю.В. Гуляева. М.: ЦПУ «Радуга», 2019. 256 с. (*Одобрено Ученым советом ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН 26.12.2018*).
- [6] 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.
- [7] Потапов А.А. Применение принципов фрактально-скейлинговой или масштабно-инвариантной радиолокации в РСА, БЛА и ММО-системах. - В кн.: Радиолокация. Результаты теоретических и экспериментальных исследований. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под ред. А.Б. Бляхмана. М.: Радиотехника, 2019. С. 15–39.
- [8] 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. М.: Техносфера, 2006. С. 374–479.
- [9] Бункин Б.В., Реутов А.П., Потапов А.А. и др. Вопросы перспективной радиолокации (Коллективная монография). М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
- [10] 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.
- [11] 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. В 3-х тт. / Под ред. А.А. Потапова. М.: ЛЕНАНД, 2016. 1128 с.
- [12] Потапов А.А., Быстров Р.П., Гвоздев А.Е., Немцов А.В. Избранные вопросы теории и практики линейной и нелинейной радиолокации. В 3-х частях / Под ред. А.А. Потапова. М.: 3 ЦЦНИИ МО РФ, 2014. 654 с.
- [13] Потапов А.А. Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03 – Радиофизика / ИРЭ РАН. М., 1994. 44 с. - (Ведущая организация НПО «Алмаз»).
- [14] Потапов А.А. Фрактальный метод и фрактальная парадигма в современном естествознании. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. 108 с.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 5. С. 457–467.
- [18] Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Структурно-параметрический синтез систем оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных радиолокационных изображений // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 1. С. 51–67.
- [19] Wan Lei, Feng Tianhua, Potapov Alexander et al. Laplace metasurfaces for optical analog computing based on quasi-bound states in the continuum // Photon. Res. 2021. V. 9. P. 1758.
- [20] Потапов А.А. Фрактальные технологии: проблемы и перспективы // Сб. тез. XXVII Байкальской Всероссийской конф. с международным участием “Информационные и математические технологии в науке и управлении” (Иркутск, Байкал, остров Ольхон, 1 - 8 июля 2022 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2022.
- [21] Potapov Alexander A. Author's Approaches to Fractal Engineering and the Philosophy of Fractal Engineering: Fractal Radio Systems and International Priorities in the Study of Fractal Applications in Radio Electronics // Proc. IEEE Conf. Antenna Measurements and Applications (IEEE CAMA) (China, Guangzhou, 14-17 November, 2022). - (In the press).