

Фракталы и скейлинг в радиолокации: Взгляд из 2015 года

А.А. Потапов

В работе представлены избранные результаты применения теории фракталов, динамического хаоса, эффектов скейлинга и дробных операторов в фундаментальных вопросах радиолокации, радиофизики, радиотехники, теории антенн и электроники. Данными вопросами автор занимается ровно 35 лет. В основе созданного автором впервые в России и в мире научного направления лежит концепция фрактальных радиосистем, топология выборки, глобальный фрактально-скейлинговый метод и фрактальная парадигма. Полученные автором результаты крупной научной и практической значимости были опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума Российской академии наук (2008, 2010, 2012, 2013) и в докладе Правительству Российской Федерации (2012).

Ключевые слова: фрактал, скейлинг, дробный оператор, радиосистема, радиолокация.

1. Введение

Как хорошо известно, советская «нелинейная» школа физиков, механиков и математиков в XX веке в области теории колебаний и радиофизики завоевала ведущее место в мировой науке. В основе данной работы лежат идеи автора о необходимости перехода в науке к «фрактальному мышлению». На деле это означает, перефразируя слова С.М. Рытова о «нелинейном мышлении» из его интервью от 19 февраля 1991 г. [1, с. 246], найти математические средства, научиться мыслить понятиями этой математической теории, сделать эти понятия своими, привыкнуть к ним. Тогда и появится новая интуиция.

Возвращаясь к первому абзацу работы, существенно отметить, что математический аппарат есть. Это – *дробное исчисление* [2 – 8]. Дробный математический анализ имеет давнюю историю и чрезвычайно богатое содержание.

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 (!).

В настоящее время в радиофизике, радиоэлектронике и обработке многомерных сигналов преимущественно, привычно и повсеместно используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссовская статистика, марковские процессы и т.п. Замечу, что теория марковских процессов достигла уже своего насыщения и исследования проводятся на уровне резкого усложнения синтезированных алгоритмов. Радиосистемы следует рассматривать с точки зрения открытых динамических систем. Улучшение классических радиолокационных обнаружителей сигналов и их математическое обеспечение, по-сути, достигло своего насыщения и предела. Это заставляет изыскивать принципиально новые пути решения данной проблемы.

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

В частности, одну из таких идей и выдвинул *первым в мире* автор в конце 70-х гг. XX в., а именно, предлагая ввести в широкую практику радиофизики, радиотехники и радиолокации (сначала именно в эти фундаментальные научные направления, которыми он тогда интенсивно занимался, участвуя в многочисленных НИР от ИРЭ АН СССР – ИРЭ РАН по радиолокации, радиотеплолокации и дистанционному зондированию с крупнейшими КБ и предприятиями СССР [9]) фракталы, скейлинг и дробное исчисление. После долгих интеллектуальных битв сейчас моя идея полностью показала свои преимущества и положительно воспринята большинством интеллектуального научного сообщества.

Последние 35 лет отмечены необычайно бурным международным развитием фракталов применительно к радиолокации и радиофизике [5 – 44]. В работе рассмотрено современное состояние работ в области проектирования конкретного облика фрактального радиолокатора. Также сделана попытка классификации ряда радиосистем, основанных на «фрактальной» идеологии. Классификация эта не представляет собой самоцель: она должна обеспечить исследование будущих фрактальных радиосистем и расчистить дорогу изучению их эволюции. В ряде случаев она сможет внести ясность во многие вопросы.

Ввиду ограниченности объёма статьи невозможно изложить разнообразные или намечаемые автором методы, работы, результаты и объекты исследования. Аналитические обзоры предыдущей деятельности напечатаны в электронном «Журнале радиоэлектроники (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)» – 2010, № 1, 100 с. (<http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.pdf>) и в журнале «Нелинейный мир» (2014, т. 12, № 4, с. 3 – 38). Как всегда, я пользуюсь старинным методом – доказательством примерами и строго проверенными фактами. Имеющаяся в данной работе информация по одному из наиболее перспективных научно-технических направлений будет чрезвычайно полезна для научных и инженерно-технических специалистов.

Замечу, что сейчас данному фундаментальному направлению список авторских работ с учениками насчитывает более 700 публикаций, в том числе 20 монографий.

2. Развитие в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН «фрактальной идеологии»

2.1. Определение фракталов

Разработанная автором классификация фракталов была в декабре 2005 г. в США лично одобрена математиком Б. Мандельбротом и приведена на рис. 1, где описаны их свойства при условии, что D_0 – топологическая размерность пространства вложения. Применение в современных информационных технологиях идей масштабной инвариантности – «скейлинга» и разделов современного функционального анализа, которые связаны с теорией множеств, теорией дробной размерности, общей топологией, геометрической теорией меры и теорией динамических систем, – открывает большие возможности и перспективы в обработке многомерных сигналов и в родственных научных и технических областях.

Другими словами, полное математическое описание процессов современной обработки сигналов и полей *невозможно* с помощью формул классической математики. Разрабатываемые автором с учениками текстурные и фрактальные цифровые методы (рис. 2) позволяют частично преодолевать априорную неопределённость в радиолокационных задачах с помощью *геометрии или топологии выборки* – одномерной или многомерной. При этом большое значение приобретают *топологические особенности* выборки, а не усреднённые реализации, имеющие зачастую другой характер. Глобальный фрактально-скейлинговый метод, благодаря моим пионерским работам, разработан, существует, приобрёл известную внутреннюю за-

конечность, имеет общеизвестные мировые приоритеты, а потому в полной мере заслуживает серьёзного анализа.



Рис. 1. Авторская классификация фрактальных множеств и сигнатур



Рис. 2. Текстурные и фрактальные методы обработки малококонтрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовских помехах

2.2. Новые информационные технологии на основе фракталов и скейлинга

Коренное отличие предложенных автором фрактальных методов от классических связано с принципиально иным подходом к основным составляющим сигнала и поля. Это позволило перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей.

Таким образом, это *принципиально новая* радиотехника. За 35 лет научных исследований, мой глобальный фрактально-скейлинговый метод полностью оправдал себя, найдя многочисленные приложения – рис. 3. Это своего рода вызов времени. Здесь за меня говорят только факты! Все это обозначено мной кратко и выразительно – *фрактальная парадигма* [8– 10, 13, 14].

Фрактальная геометрия – громадная и гениальная заслуга математика Б. Мандельброта. Но её радиофизическое/радиотехническое и практическое воплощение в основном – заслуга Российской (в настоящее время – Международной) научной школы фрактальных методов и дробных операторов под руководством проф. А.А. Потапова (постоянное место базирования – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва; см. также, сайт www.potapov-fractal.com) [4 – 44].



Рис. 3. Эскиз развития автором новых информационных технологий на основе фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга для нелинейной физики и радиотехники

Несколько утрируя, можно сказать, что фракталы составляли тонкую амальгаму на мощном остоле науки конца XX в. В современной ситуации интеллектуальное фиаско по-

терпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания. Во фрактальных исследованиях я всегда опираюсь на свои три глобальных тезиса:

1. Обработка искажённой негауссовскими шумами информации в пространстве дробной меры с использованием скейлинга и устойчивых негауссовских вероятностных распределений (1981 г.) – рис. 1 – 3.
2. Применение непрерывных недифференцируемых функций (1990 г.).
3. Фрактальные радиосистемы (2005 г.) – рис. 3 и рис. 4.



Рис. 4. Авторская концепция фрактальных радиосистем и устройств

В дальнейшем логическое объединение указанной триады проблем в общий «*фрактальный анализ и синтез*» и создаёт нам основу *фрактально-скейлингового метода* (2006 г.) и единой глобальной идеи *фрактального естествознания* и *фрактальной парадигмы* (2011 г.), предложенных и интенсивно развиваемых автором.

3. Концепция фрактального радиолокатора

В настоящее время работы по фрактальной радиолокации проводятся исключительно ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (см., например, работы [4 – 44] и ссылки в них). В соответствии с требованиями, которые предъявляются к перспективным радиолокаторам, рассмотрим обобщённую функциональную схему системы – рис. 5. Она, с одной стороны, достаточно проста, а с другой, – содержит все принципиально необходимые элементы. Также здесь может идти речь и об одноканальной радиолокационной станции (РЛС), и о многоканальной РЛС.

Синхронизирующее устройство обеспечивает координацию работы всех элементов схемы РЛС. Генерирование и излучение электромагнитной энергии производится с помощью передающего устройства, состоящего из модулятора, генератора высокой частоты (ВЧ) и передающей антенны. Отражённые сигналы поступают к приёмной антенне. Приёмное устройство выполняет все необходимые преобразования поступающих сигналов, связанные с их разделением, усилением, выделением от шумов. Выходное устройство предназначается для выполнения заключительных операций по обработке сигналов и преобразования их к виду, требуемому получателем информации. Выходное устройство, в зависимости от результатов измерений, может оказывать то или иное воздействие на приёмник (линия *Б*), антенну (линия *В*) и передающее устройство (линии *Г* и *Д*), что позволяет автоматически изме-

нять требуемым образом вид излучаемых колебаний, условия приёма и обработки сигналов, приближая их к наилучшим для конкретной ситуации. Связь выходного устройства с приёмной антенной обеспечивает возможность автоматического измерения угловых координат и управление антенной при пеленгации цели. В свою очередь, от антенного устройства в выходное устройство вводятся данные (линия *E*) об угловом положении антенны.

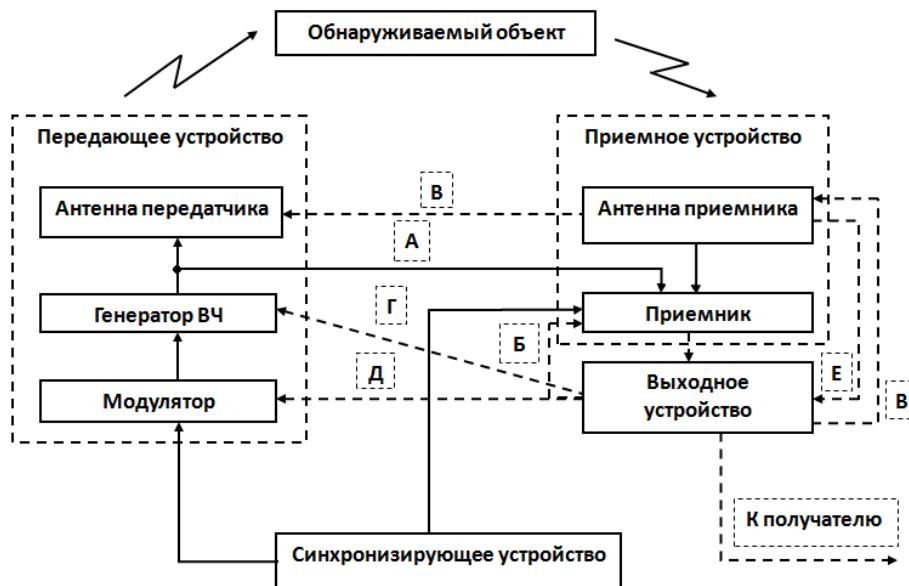


Рис. 5. Обобщённая функциональная схема классического радиолокатора

От данных рис. 5 можно перейти непосредственно к проектируемому фрактальному радиолокатору. На рис. 6 изображены практически все точки приложения проектируемых в настоящее время фрактальных элементов, узлов или процессов, которые могут быть введены в схему на рис. 5.

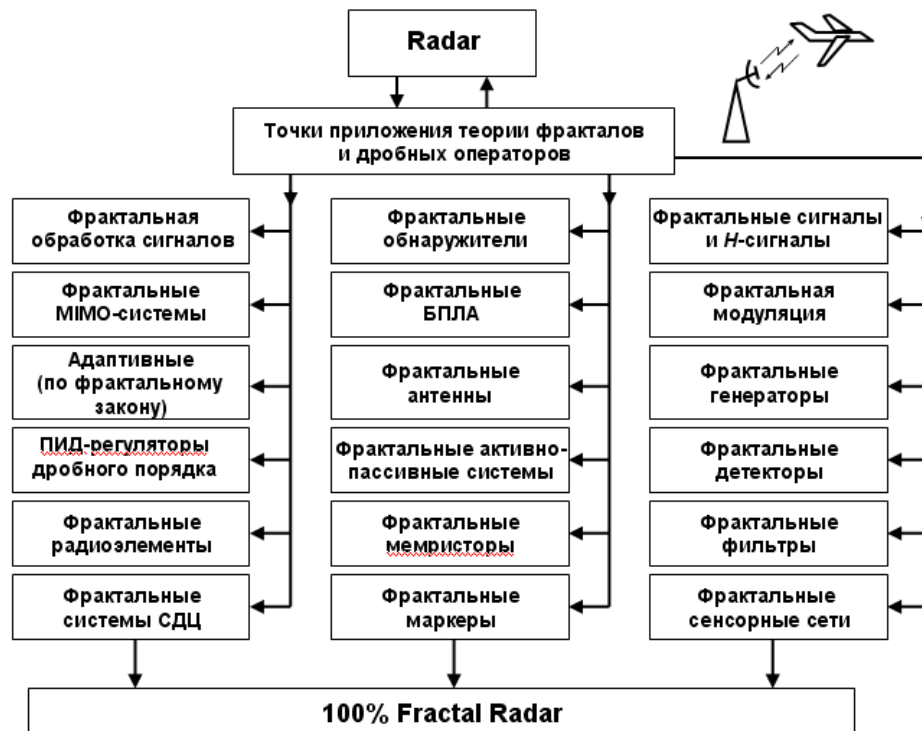


Рис. 6. Точки приложения теории фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов для внесения их в классический радиолокатор с целью перехода к полностью фрактальной РЛС

В частности, для предложенных автором фрактальных ММО-систем характерен много-частотный вариант работы, так как фрактальные антенны позволяют одновременно излучать несколько длин волн. Для БПЛА возможно построение миниатюрного фрактального радиолокатора с фрактальными элементами и современными параметронами. Фрактальная обработка на пункте управления передаваемой информации с БПЛА позволит одновременно резко улучшить и автоматизировать процессы обнаружения, кластеризации и идентификации целей и объектов. Кроме того, нанесение фрактального покрытия на БПЛА резко уменьшит вероятность его обнаружения в полёте.

Обработка принятых радиолокационных сигналов, естественно, ведётся во всех блоках РЛС, включая антенну, приёмник, измерители и может быть охарактеризована совокупностью математических операций, которые необходимо выполнить для определения тех или иных параметров сигнала. Однако, несмотря на математическую общность между всеми видами обработки в тракте РЛС, на каждом её этапе решаются свои задачи и используется, как правило, различная техника. Таким образом, наряду с общей задачей определения оптимальных алгоритмов обработки сигнала в целом, которая решается при проектировании РЛС, возникает задача выбора оптимальных методов обработки сигналов и способов их реализации на различных её этапах.

Процесс обработки радиолокационных сигналов и полученных при этом данных можно разделить на два этапа: этап извлечения первичной радиолокационной информации и этап обработки данных по первичной информации. Первый этап связан с обработкой непосредственно сигналов и извлечением из них первичной радиолокационной информации и носит обычно название этапа первичной обработки сигналов. Второй этап предусматривает дальнейшую обработку полученных данных и часто носит название этапа вторичной обработки.

На первом этапе обработка радиолокационных сигналов возлагается на ряд радиотехнических устройств, таких как антенна, приёмник, устройства фильтрации и измерения параметров сигналов. Отметим, что устройства фильтрации и измерения параметров сигналов занимают, как правило, значительное место в общем комплексе радиотехнической аппаратуры РЛС и определяют многие её основные характеристики. Поэтому эти устройства часто объединяют в системы первичной обработки сигналов. На рис. 7 приведены основные виды синтезированных в течение 2011 – 2013 гг. избранных семейств/кластеров схем принципиально новых динамических фрактальных обнаружителей сигналов (ФОС) – и это, конечно, ещё не все...



Рис. 7. Основные виды предложенных автором новых фрактальных обнаружителей сигналов

Принципы первого в мире фрактального обнаружителя сигналов были открыты и предложены мной в работах ИРЭ АН СССР с ЦКБ «Алмаз» ещё в 1989 г. [2, 3] (!). Выход (также впервые в мире) на действующий макет фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов (ФНОРС) произведён в 2004 – 2005 гг. Отмечена высокая устойчивость предложенных алгоритмов. Один из главных выводов, сделанных нами ещё в 80-е годы XX века: *работа по точечной оценке фрактальной размерности D приводит к абсурдным результатам*. В то же время почти все авторы, пытающиеся использовать фрактальную обработку (и, часто не понимая её физический смысл), дают исключительно точечные оценки, да ещё со среднеквадратическим отклонением (абсурд!).

В своих работах мы ввели фрактальные сигнатуры и фрактальные кепстры, и проблема точности цифровой фрактальной обработки в режиме реального времени была решена [8 – 44]. В случае комплексирования классического обнаружителя с фрактальным обнаружителем повышается вероятность правильного обнаружения и распознавания. На данном этапе эта задача уже не имеет глубокого научного интереса, а относится практически к рядовым инженерным техническим решениям. Этот этап мы закрыли, сделав вывод, что более интересна в научном плане, для открытия и фиксации новых радиофизических эффектов, композиция двух фрактальных обнаружителей с различными пространственными координатами. Данные рис. 7 иллюстрируют неисчерпаемые возможности методов фрактального обнаружения сигналов. Тем более, введение их в схемы действующего множества радиолокаторов различного назначения требует минимальных изменений, т.е. необходим лишь ввод сигнала промежуточной частоты. А далее – по усмотрению. Таким образом, на основе общих логических правил и данных рис. 7 возможен эвристический синтез множества других типов фрактальных обнаружителей.

Очень важный вопрос – синтез принципиально нового «не энергетического» фрактального обнаружителя сигналов по их сингулярностям и топологии принятой выборки. Т.е., я предлагаю *максимально «уйти» от энергии принимаемого сигнала*. Ранее было также подробно рассмотрено нами использование преобразования Радона в современной радиолокации [38 – 40]. Динамические фрактальные обнаружители, рассмотренные выше, и фрактальные антенны могут широко использоваться и в *нелинейной радиолокации* [31].

4. О перспективных направлениях фрактальных исследований

На основе исключительно собственных избранных работ [4 – 44] (см. также сайт автора – <http://www.potapov-fractal.com>) попытаемся дать картину наиболее **перспективных направлений фрактальных исследований** в области прогресса современных фундаментальных и прикладных наук:

1. Исследование возможностей текстурных (пространственных и спектральных), фрактальных и энтропийных признаков для радиолокационных задач обнаружения.
2. Синтез новых моделей рассеяния радиолокационных сигналов земными покровами на основе теории детерминированного хаоса, странных аттракторов и фрактальных вероятностных распределений – устойчивых распределений.
3. Исследование волновых явлений (распространение и рассеяние волн, процессы диффузии) во фрактальных неоднородных средах на основе операторов дробного интегрирования. Дальнейшее развитие фрактальной электродинамики.
4. Синтез моделей каналов радиолокационных и телекоммуникационных систем на основе пространственных фрактальных обобщённых корреляторов и фрактальных частотных функций когерентности.

5. Исследование возможностей распознавания формы или контуров целей с помощью фрактальных, текстурных и энтропийных признаков. Работа на сингулярностях входной функции.

6. Исследование потенциальных возможностей и ограничений фрактальных методов обработки радиолокационных и связанных сигналов, в том числе фрактальной модуляции и демодуляции, фрактального кодирования и сжатия информации, фрактального синтеза изображений, фрактальных фильтров. Переход к фрактальным радиосистемам. Фракталы в акустоэлектронике (2012 г.).

7. Исследование адаптивной пространственно-временной обработки сигналов на основе дробной размерности и дробных операторов.

8. Поиск и исследование новых комбинированных методов обнаружения и распознавания классов малоконтрастных целей в интенсивных негауссовских помехах.

9. Исследование возможностей создания новых сред для передачи информации, многодиапазонных фрактальных поглощающих материалов, конструирование фрактальных антенн и фрактальных частотно-селективных поверхностей и объёмов. Дальнейшее развитие теории и техники фрактальных импедансов.

10. Синтез новых классов фракталов и мультифракталов с обобщением понятия меры множеств.

11. Изучение вида или топологии выборки одномерного (многомерного) сигнала для задач, например, искусственного интеллекта с целью создания словарей фрактальных признаков на основе фрактальных примитивов, являющихся элементами фрактального языка с фрактальной грамматикой, т.е. исследование *проблемы «размерностного склероза»* физических сигналов и сигнатур. Эти понятия, введённые автором, предполагают исследование топологических особенностей каждой конкретной индивидуальной выборки, а не усреднённых реализаций, имеющих зачастую другой характер.

12. Прогноз механизмов формирования и характеристик шероховатости с целью управления геометрическими параметрами микрорельефа для получения заданных физико-химических и эксплуатационных свойств изделий при современных неравновесных технологиях обработки их поверхностного слоя. Фракталы в нанотехнологиях. (В 2008 г. автор предложил новую концепцию, а именно, *«Скейлинг шероховатого фрактального слоя и нанотехнологии»*).

13. Развитие фрактальной неинерциальной релятивистской радиолокации в искривлённом пространстве-времени связанных структур [11, 15], т.е. фрактальной геометрии пространства-времени детерминированных структур.

(В настоящее время в США данное фундаментальное научное направление получило яркое название *«Фрактальная космология – Fractal cosmology»*. Наши две большие работы с соавторами значатся в списке основных публикаций (arXiv: Cornell University, USA) по этому главному теоретическому направлению.)

5. Официально признанные результаты фрактальных исследований

Результаты нашей научной деятельности в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по фрактально-скейлинговой обработке информации в интенсивных помехах, а также по фрактальным радиосистемам и фрактальным радиоэлементам опубликованы в четырёх отчётных докладах *Президиума Российской академии наук* (Научные достижения РАН.- М.: Наука, 2008, 2010, 2012, 2013 гг.) и в *"Докладе Правительству Российской Федерации. Об итогах реализации в 2011 году Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008 – 2012 гг. В трёх томах"*.- М.: Наука, 2012, в разделах *«Локационные системы»*. Приведём ниже текст этих официально признанных достижений:

– В книге «Отчётный 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) приведён 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.

– В книге «Отчётный доклад Президиума Российской академии наук. Научные достижения Российской академии наук в 2009 году» (М.: Наука, 2010. 616 с.) в подразделе «Локационные системы. Геоинформационные технологии и системы», раздел «Нанотехнологии и информационные технологии» (с. 24) 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 учёте их скейлинговых эффектов и негауссовской статистики. Это позволяет выйти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей (ИРЭ РАН)» – 2009 г., опубликовано в 2010 г.

– В книге «Отчётный 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 книге «Доклад Правительству Российской Федерации. Об итогах реализации в 2011 году Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008 – 2012 гг. В трёх томах» (М.: Наука, 2012. 1016 с.) на 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.

– В книге «Отчётный 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. Твёрдотельная электроника», раздел «Нанотехнологии и информационные технологии» (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.

6. Заключение

Проблема фракталов в радиолокации, радиофизике и радиотехнике на самом деле необъятна. Здесь я освещаю только принципиальные основополагающие вопросы. Автор имеет полное основание думать, что обширный и ценный материал, уже полученный им, и результаты дальнейших исследований будут использованы в перспективных радиосистемах. Я считаю проблему «топологии выборки» [5, 8, 13, 14, 30] одной из важнейших во всей радиоэлектронике, и при этом я также убеждён, что без фрактальности и скейлинга вся теория обнаружения сигналов теряет свое каузальное значение для понятий сигнала и шума.

По сравнению с предыдущими работами данная статья добавляет новые черты интерпретации фрактальной радиолокации и радиофизики. Специфика радиолокационных задач нашла здесь особое воплощение. По-видимому, это всё и есть те самые прорывные информационные технологии, столь необходимые России сегодня. Запад этого ещё не достиг.

Литература

1. Сергей Михайлович Рытов: Жизнь, воспоминания, интервью, записки, стихи, документы / под ред. А.А. Гиппиуса. М.: ЛЕНАНД, 2012. 552 с.
2. *Oldham K.B., Spanier J.* The Fractional Calculus. N.Y.: Academic Press, 1974. 234 p.
3. *Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
4. *Потапов А.А.* Краткое историческое эссе о зарождении и становлении теории дробного интегрирования // Нелинейный мир. 2003. Т. 1, № 1-2. С. 69–81.
5. *Потапов А.А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
6. *Потапов А.А., Черных В.А.* Дробное исчисление А.В. Летникова в физике фракталов. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 688 с.
7. *Потапов А.А.* Очерки по развитию дробного исчисления в работах А.В. Летникова // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ), 2012. Т. 4, № 1. С. 3–102.
8. *Потапов А.А.* Размышления о фрактальном методе, методе дробных интегропроизводных и фрактальной парадигме в современном естествознании (Из записных книжек автора) // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ), 2012. Т. 4, № 1. С. 103–142.
9. *Потапов А.А.* Спецтема: автореф. диссертации ... канд. техн. наук (01.04.03) / МФТИ. М., 1989. 28 с.; *Потапов А.А.* Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн: дис. ... докт. физ.-мат. наук (01.04.03) / ИРЭ РАН. М., 1994. 436 с.
10. *Потапов А.А.* Операторы дробного исчисления, скейлинг и фракталы как основа нового фундаментального направления в науке и технике: фрактальная парадигма // Сложные системы. 2012. № 2(3). С. 5–45.
11. *Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А.* Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / Под ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003. 720 с.
12. *Потапов А.А.* О фрактальных радиосистемах, дробных операторах, скейлинге, и не только... / Глава в кн.: Фракталы и дробные операторы (Коллективная монография) / С предисловием акад. Ю.В. Гуляева и чл.-корр. РАН С.А. Никитова.- Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2010. С. 417–472.

13. *Потапов А.А.* Фрактальный метод и фрактальная парадигма в современном естествознании. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. 108 с.
14. *Потапов А.А.* Фрактальный метод, фрактальная парадигма и метод дробных производных в естествознании // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Математическое моделирование. Оптимальное управление. 2012. № 5(2). С. 172–180.
15. *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, 2015. 1200 с.
16. *Потапов А.А.* Фракталы, скейлинг и дробные операторы в обработке информации (Московская научная школа фрактальных методов в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 1981 – 2011 гг.) // Сб. науч. тр. «Необратимые процессы в природе и технике» / под ред. В.С. Горелика и А.Н. Морозова.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН. 2012. Вып. IV. С. 5–117.
17. *Foukzon J., Men'kova E., Potapov A.A.* The Solution Classical Feedback Optimal Control Problem for m -Persons Differential Game with Imperfect Information // Open Journal of Optimization. 2013. V. 2. № 1. P. 16–25. URL: <http://www.scirp.org/journal/ojop>
18. *Потапов А.А.* Глобальный фрактально-скейлинговый метод и фрактальная парадигма в моделировании физико-технических процессов и сред // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. (Материалы междунар. конф. «Колмогоровские чтения – VI. Общие проблемы управления и их приложения (ОПУ – 2013), посв. 110-летию со Дня рождения А.Н. Колмогорова (Тамбов, 07 – 11 октября 2013 г.)). 2013. Т. 18. № 5. С. 2645–2646.
19. *Potapov A.A.* Fractal Paradigm and Fractal-Scaling Methods in Fundamentally New Dynamic Fractal Signal Detectors // Proc. the Eighth Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Millimeter and SubMillimeter Waves - MSMW'13. Ukraine, Kharkov, June 24 – 28. Kharkov: IRE NASU, 2013. P. 644–647.
20. *Potapov A.A., German V.A.* Detection of Artificial Objects with Fractal Signatures // Pattern Recognition and Image Analysis. 1998. V. 8, № 2. P. 226–229.
21. *Потапов А.А.* Фракталы в дистанционном зондировании // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 6. С. 3–65.
22. *Потапов А.А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. Фрактальный анализ сигналов // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 3. С. 261–270.
23. *Потапов А.А.* Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоконтрастных целей // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 9. С. 1101–1119.
24. *Потапов А.А., Булавкин В.В., Герман В.А., Вячеславова О.Ф.* Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур // ЖТФ. 2005. Т. 75, № 5. С. 28–45.
25. *Потапов А.А.* Синергетические принципы нелинейной динамики и фракталы в разработке новых информационных технологий для современных радиосистем // Радиотехника. 2005. № 8. С. 73–88.
26. *Потапов А.А.* Колебания, волны, структуры и системы на примерах глобального фрактально-скейлингового метода (множества меры нуль, сингулярности, скейлинг, топология выборки, спрайты, джеты, эльфы, мемристоры, осцилляторы, фрактальные лабиринты, робастные антенные решетки и фрактальные обнаружители) // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 4. С. 3–38.
27. *Potapov A.A.* The Global Fractal Method, Fractal Paradigm and the Fractional Derivatives Method in Fundamental Radar Problems and Designing of Revolutionary Radio Signals Detectors // Zbornik radova Konferencije MIT - Matematicke i informacione tehnologije, Vrnjackoj

- Banji od 5. do 9. septembra i u Becicima od 10. do 14. septembra 2013. godine. Kosovska Mitrovica: Prirodno-matematicki fakultet Ulverziteta u Pristini (Serbia), 2014. P. 539 – 552.
28. *Потапов А.А.* Фрактально-скейлинговые методы в радиолокации // Юбилейная НТК ОАО «Концерн «Вега». Москва, 16 – 17 октября. М.: ОАО «Концерн «Вега», 2014. С. 9.
 29. *Потапов А.А.* О фрактальных радиолокаторах и их схемотехнике // Труды восьмой Всероссийской конф. «Необратимые процессы в природе и технике», Москва, 27 – 29 января 2015 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. Часть I. С. 104–111.
 30. *Потапов А.А.* Топология выборки // Нелинейный мир. 2004. Т. 2. № 1. С. 4–13.
 31. Нелинейная радиолокация / под ред. А.А. Горбачева, А.П. Колданова, А.А. Потапова, Е.П. Чигина (Библиотека журнала «Нелинейный мир»: Научная серия «Фракталы. Хаос. Вероятность»). М.: Радиотехника, 2005. Ч.1; 2006. Ч.2; 2007. Ч.3.
 32. *Потапов А.А.* Методы обработки малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов интегральными операторами и дробными фрактально-скейлинговыми методами // Сб. «Инновационные разработки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук». М.: «Република», 2013. С. 15. (Сборник посв. 60-летию со дня образования ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).
 33. *Потапов А.А.* Фрактальные антенны, нанотехнологии, резонансы и плазмоны // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 5–12.
 34. *Потапов А.А.* К теории функционалов стохастических полей обратного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 261–310.
 35. *Потапов А.А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. Основы теории рассеяния волн фрактальной поверхностью // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 5. С. 517–544.
 36. *Потапов А.А., Лактюнькин А.В.* Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью // Нелинейный мир. 2008. Т. 6. № 1. С. 3 - 36.
 37. *Рехвиашвили С.Ш., Потапов А.А.* Мемристор и целочисленный квантовый эффект Холла // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 2. С. 207–210.
 38. *Опаленов Ю.В., Потапов А.А.* Стохастические сигналы и преобразование Радона при получении растровых радиолокационных изображений микроволновым цифровым радиолокатором с фрактальной обработкой информации // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 12. С. 1447–1458.
 39. *Опаленов Ю.В., Потапов А.А.* Фракталы, преобразование Радона в радиолокаторах с обработкой на несущей частоте и перспективы их применения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2001. № 4. С. 3–15.
 40. *Опаленов Ю.В., Потапов А.А.* Способ синтеза радиолокационного изображения и устройство для его осуществления // Патент на изобретение № 2211461 от 27.08.2003. Приоритет от 18.06.2001.
 41. *Потапов А.А.* О фрактальном обнаружении объектов на радиолокационных изображениях, полученных РСА, и новые виды динамических фрактальных обнаружителей // Сб. научных трудов первой междунар. научно-практической конф. «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии (PICS&T'2013)», Харьков, Украина, 9 – 11 октября. Харьков: ХНУРЭ, 2013. С. 260–263.
 42. *Потапов А.А., Шифрин Я.С., Кузеев Р.Р.* Генетические и самоаффинные методы проектирования фрактальных антенн // Антенны. 2014. № 3 (202). С. 25–48.
 43. *Леонов К. Н., Потапов А. А., Ушаков П. А.* Использование инвариантных свойств хаотических сигналов в синтезе новых помехоустойчивых широкополосных систем передачи информации // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 12. С. 1209–1229.
 44. *Potapov A.A.* Oscillator with Fractional Differential Positive Feedback as Model of Fractal Dynamics // J. Computational Intelligence and Electronic Systems. 2014. V. 3, № 1-2.

Потапов Александр Алексеевич

д.ф.-м.н., профессор, академик Российской академии инженерных наук им. А.М. Прохорова и Российской академии естественных наук, главный научный сотрудник, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, главный редактор международного журнала «Нелинейный мир», (125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7), Президент совместной китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (Китай, Гуанджоу), тел. 8(495) 629-34-06, e-mail: potapov@cplire.ru

Fractals and scaling in radiolocation: a view from 2015**A.A. Potapov**

The selected results of application of the theory of fractals, dynamical chaos, scaling effects and fractional operators in fundamental problems of radiolocation, radio physics, radio engineering, antennas theory and electronics are presented in this paper. The author has been investigating these issues exactly for 35 years. The fractal radio systems conception, sampling topology, global fractal-scaling approach and the fractal paradigm lie in the basis of the scientific direction established by the author for the first time in Russia and all over the world.

The results of great practical and scientific importance obtained by the author were published in four summary reports of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (2008, 2010, 2012, 2013) and in the report for the Government of the Russian Federation (2012).

Keywords: fractal, scaling, fractional operator, radio system, radiolocation.