

¹Ковальчук В. В., доктор,
²Сербов Н.Г., к.т.н., доцент, проректор,
³Трушков Г. В.

ФРАКТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

¹Одесский колледж компьютерных технологий Одесского экологического университета,
e-mail: lslvv@rambler.ru

²Одесский экологический университет

³Одесская Военная Академии

Введение. Полное описание процессов современной обработки полей, на основе представления сигналов в пространстве целочисленной меры и гладких функций, сегодня невозможно в рамках классической математики [1]. Но применение идей масштабной инвариантности (т.н. скейлинга), в формализме теории дробной размерности, законов общей топологии, геометрической теорией меры и теорией динамических систем, открывают новые горизонты в обработке многомерных сигналов в фундаментальных и прикладных исследованиях, в том числе, и в современных информационных технологиях [1]. Используя теорию фракталов, задача о возможных формах применения дробных операторов вызывает повышенный практический интерес в области радиофизики, радиоэлектроники, теории управления.

Антенные устройства и частотно-избирательные поверхности являются неотъемлемой частью современных информационных технологий, в частности, радиосистем. Опыт анализа и синтеза фрактальных антенн доказывает их широкополосность и многодиапазонность [2,3]. Поэтому такие фрактальные антенны чрезвычайно эффективны при разработке многочастотных радиолокационных и телекоммуникационных систем.

Цель статьи состоит в практическом применении основных идей теории фракталов, теории детерминированного хаоса, теории дробной меры и скейлинговых инвариантов в современных информационных технологиях, в частности, практическая направленность исследований состоит в повышении информативности приемо-передающих систем. Опираясь на концептуальные положения, а не детали (см. работы [2,3]), рассмотрим примеры «фрактальной техники вычислений» для современных физических и прикладных задач, позволяющих выйти на проектирование конкретных фрактальных радиосистем различного назначения.

Изложение основного материала. Идея фрактальной цифровой обработки малококонтрастных изображений, в том числе и фракталов на фрактальном фоне, вначале касалась вопросов фильтрации сверхслабых радиосигналов и изображений при существенно негауссовских помехах [2]. История применения фрактального подхода для изучения информационно-измерительных систем (ИИС) условно укладывается в три этапа [3].

На первом этапе акценты были смещены на экспериментальную проверку фрактальности различных природных и искусственных образований. Фракталы относятся к множествам с крайне нерегулярной разветвленной или изрезанной структурой. Именно тогда впервые применено понятие дробной размерности и масштабной инвариантности. Заметим, что интерес к дробному математическому анализу возник почти одновременно с появлением классического анализа (Г. Лейбниц, 1695). Но именно О. Хевисайд (1920) применил дробное дифференцирование в теории линий передач. После этого другие теоретики признали преимущества такого подхода и стали развивать его в соответствии с принятыми математическими концепциями (Н. Винер, Дж. Карсон, 1926) [4]. Началась разработка методов фрактальной фильтрации объектов в различных интенсивных негауссовских помехах и шумах. Предложенная в 2005 г. классификация фракталов приведена в работе [3], где описаны их свойства при условии, что D_0 – топологическая размерность пространства, в котором рассматривается фрактал с дробной размерностью D .

Второй этап посвящен усовершенствованию уже известных алгоритмов фрактальной цифровой обработки сигналов и изображений: аэрофотосъемка (далее - АФС) и радиолокационные изображения – РЛИ. Развиваются фрактальные методы обнаружения, распознавания, повышения контрастности, т.е. фрактальной обобщенной фильтрации. Интересно отметить, что результаты цифровой фрактальной обработки изображений поверхности Земли, кроме устойчивого разделения по типам земных покровов, позволяют идентифицировать невидимые (скрытые) до этой обработки особенности. В частности, данные кластеризации дистанционного зондирования различных земных покровов. Это позволяет говорить о применении созданных методов фрактального распознавания для выявления участков изображения, невидимых при классических методах кластеризации по полю яркостей.

Экспериментальное доказательство эффективной кластеризации однородных протяженных

связных областей можно также провести с помощью фрактальной фильтрации.

Цифровые фрактальные методы позволяют частично преодолевать априорную неопределенность в радиолокационных задачах с помощью информации о геометрии (топологии) выборки - одномерной или многомерной [5]. При этом большое значение приобретают топологические особенности индивидуальной выборки, а не усредненные реализации, имеющие зачастую совершенно другой характер. Весьма плодотворным оказалось введение в практику измерений понятий фрактальных сигнатур и фрактальных кепстров. Следует заметить, что в методах фрактальной обработки необходим учет скейлинговых эффектов реальных радиосигналов и электромагнитных полей.

Третий этап характеризуется переходом к проектированию фрактальной элементной базы и некоторых фрактальных узлов, а в перспективе фрактальных радиосистем в целом. Практические приложения по экспериментальным вероятностным распределениям мгновенной фрактальной размерности радиофизических процессов, дополняют текстурные и позволяет более надежно производить операцию кластеризации объектов [5].

Идея масштабной инвариантности (т.н. скейлинг) доказала свою эффективность в современной флуктуационной теории фазовых переходов и критических явлений. Сегодня этот подход применяется также для решения радиофизических и радиотехнических задач.

Введение дробной меры и скейлинговых инвариантов вызывает необходимость работы преимущественно со степенными распределениями. Это т.н. фрактальными распределения с «тяжелыми хвостами» (далее - ТХ). Распределения с ТХ входят в класс устойчивых распределений. Данные распределения являются следствием обратных связей, усиливающих события. Отметим, что для распределений с ТХ выборочные средние неустойчивы и малоинформативны из-за неприменимости закона больших чисел. Степенные законы распределения представляют собой одну из отличительных черт сложности. Простые системы обычно имеют экспоненциальное и гауссовское распределения. Природа степенных законов распределения связана с сильной взаимозависимостью событий (эффект не «домино», а «цепной реакции»). Отметим, что устойчивое распределение с ТХ является отличительной чертой многих сложных открытых систем, обменивающихся с окружающей средой веществом, энергией и информацией с перераспределением энтропии.

Антенные устройства и частотно-избирательные поверхности (ЧИП) являются неотъемлемой частью радиосистемы. Опыт анализа и синтеза фрактальных антенн доказывает их широкополосность и многодиапазонность. Поэтому такие фрактальные антенны чрезвычайно эффективны при разработке многочастотных радиолокационных и телекоммуникационных систем. На основе алгоритмов численного решения сингулярных интегральных уравнений проводят анализ электродинамических свойств разнообразных фрактальных антенн (монополи и диполи с применением классической кривой Серпинского и дерева Кейли различного порядка итераций). Работа фрактальных антенн достигнута 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 также позволяют создать многополосные варианты, уменьшенный размер, и оптимальную или «шикарную» технологию антенн. Несомненным достоинством фрактальных антенн (монополей и диполей) является тот факт, что они могут иметь меньшие резонансные частоты по сравнению с классическими (или евклидовыми) антеннами тех же размеров. Врожденные широкополосные качества фрактальных антенн идеальны для интеллектуальных приложений. В отличие от традиционных методов, когда синтезируются гладкие диаграммы направленности антенны, в основе теории фрактального синтеза заложена идея реализации характеристик излучения с повторяющейся структурой на произвольных масштабах. Это дает возможность создавать новые режимы во фрактальной электродинамике, а также получать принципиально новые свойства. В частности, размещение фрактальных элементов на корпусе объекта может существенно исказить сигнатуру или радиолокационный портрет данного объекта.

Примеры. Рассмотрим примеры построения некоторых фрактальных антенн (ФА).

Пусть ФА представляет собой ряд отрезков проводников разной длины. С каждой новой итерацией к антенне наращиваются отрезки определенной длины, так что для каждой нечетной итерации длина остается прежней, а с каждой четной итерацией – длина уменьшается в 2 раза - т.н. дерево Кейли 6-го порядка. Выяснив распределение токов по апертуре ФА, оказалось, что с каждой следующей резонансной частотой в формировании параметров антенны свой вклад вносят именно новые участки апертуры.

Исследование фрактальных кольцевых структур, позволило создать кольцевые ФА, где легко учитываются свойства симметрии и подобия. Например, в качестве базового элемента ФА структуры первой итерации А1 можно предложить кольцо радиуса 11 мм, толщиной 0,4 мм по оси

0X и 0,2 мм вдоль радиуса. Алгоритм построения структуры фрактальной апертуры, выглядит следующим образом. Внутри базового элемента нулевой итерации размещены 7 колец с радиусом в три раза меньше исходного элемента (Рис.1). Остальные параметры (ширина и толщина кольца базового элемента) оставлены без изменений. Центры 6 маленьких окружностей расположены на расстоянии $R \cdot 2/3$, в вершинах шестиугольника. Центр 7-й окружности совпадает с центром основной антенны. Назовем это построение первым циклом итерации алгоритма построения, а антенну кратко обозначим аббревиатурой А1.

Запитана антенна от коаксиального провода радиуса 0,25 мм, выполненного из идеально проводящего материала. Апертура антенны расположена на высоте 0,7 мм от идеально проводящей плоскости, играющей роль Земли и приведена на рис. 1. Зависимость коэффициента отражения от частоты для представленной антенны показана на рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны показана на рис. 3. Результаты моделирования диаграммы направленности (ДН) антенны на некоторых частотах представлены на рис. 4. Достаточно хорошие результаты расчета КСВ (меньше 2), представленные на рис.5, также говорят о наличии повторяемости электродинамических параметров антенны А1 на разных частотах.

Из полученных результатов видно, что выбранная структура антенны действительно проявляет широкополосные и диапазонные свойства. Ширина полос пропускания фрактальной монополярной антенны А1 приведена в табл. 1. Представленные выше данные позволяют сделать вывод о том, что выбранная структура антенны действительно проявляет широкополосные и диапазонные свойства. Это подтверждает приведенное во второй колонке табл. 1 процентное соотношение диапазона излучения антенны к частоте излучения.

Для построения кольцевого монополя второй итерации А2 может быть использован тот же алгоритм, что и для модели А1 – рис. 1. В радиус каждой окружности вставлено шесть окружностей втрое меньшего радиуса, центры которых расположены в вершинах шестиугольника на расстоянии $R \cdot 2/3$ от первоначального радиуса. Седьмая окружность расположена в центре базовой окружности. Таким образом, полученная модель предложенной фрактальной антенны выглядит как на рис. 6. Запитка антенны выполнена так же, как и в предыдущих случаях, коаксиальной линией диаметра 0,5 мм. Толщина антенны, 0,4 мм, ширина колец 0,2 мм. Радиус внешней окружности $R = 11$ мм, $R_1 = R/3$, $R_2 = R/9$.

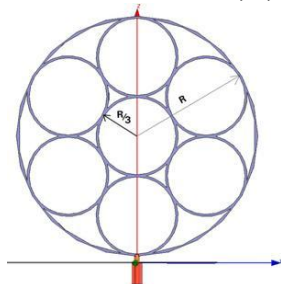


Рис.1. Модель монополярной антенны А1.

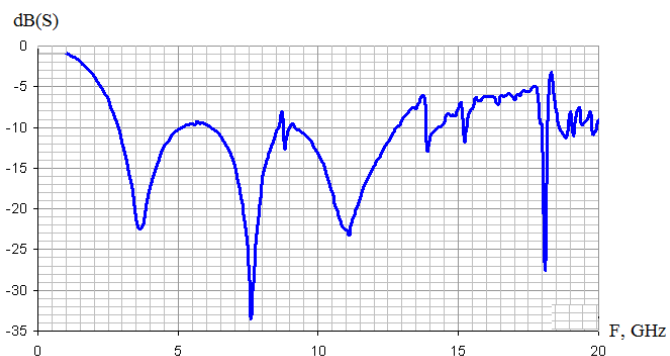


Рис.2. Частотная (F) зависимость коэффициента отражения (B) фрактальной апертуры А1.

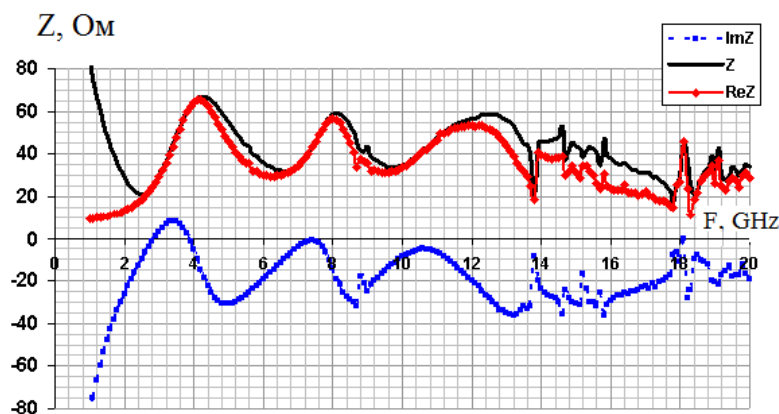


Рис. 3. Частотная зависимость импеданса Z для монополярной антенны А1.

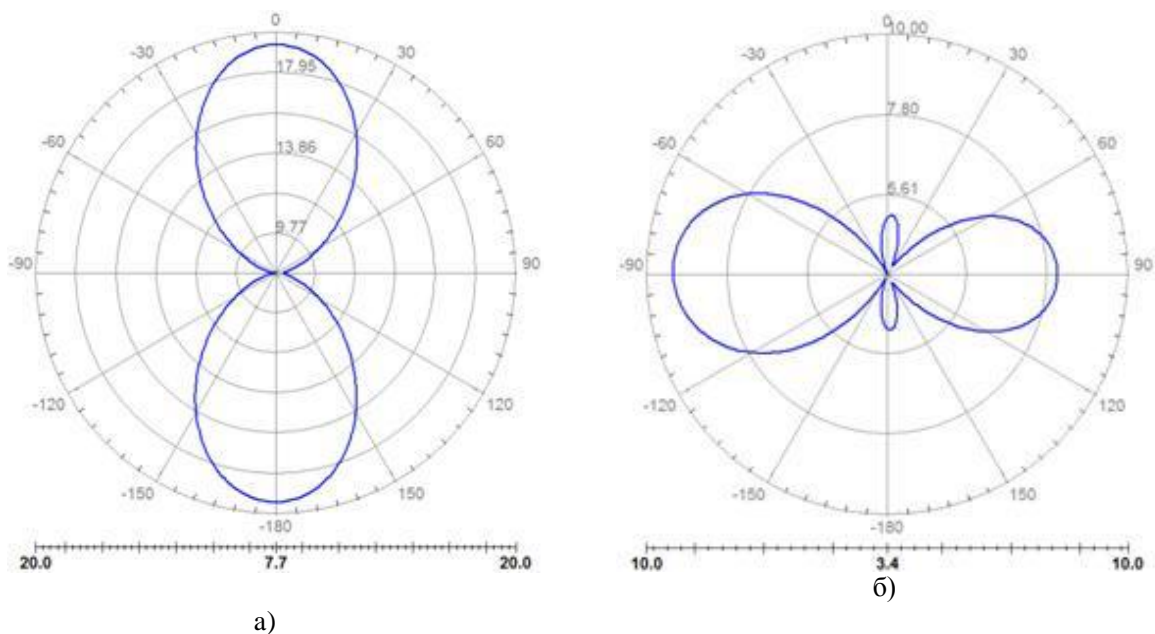


Рис.4. ДН антенни на сетке частот в диапазоне 0,1 - 20 ГГц
а) 4,1 ГГц; б) 7,7 ГГц

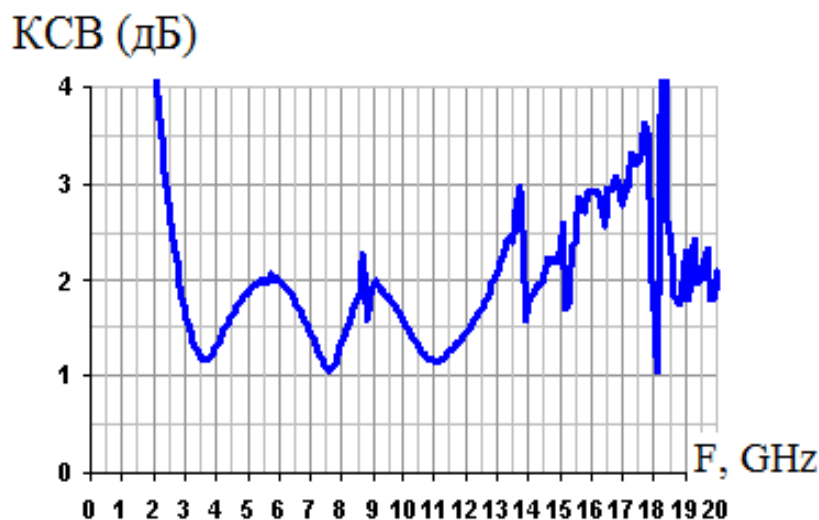


Рис. 5. Зависимость КСВ антенны А1 от частоты.

Проведя моделирование коэффициента отражения (рис. 7) можно сделать вывод, что в обеих итерациях антенны прослеживается повторяемость полос пропускания антенны через равные промежутки частот. Рассчитанные значения коэффициента отражения и значения импеданса показывают, что антенна должна обладать хорошими пропускающими свойствами на частотах вблизи 4,0 ГГц, 7,6 ГГц и 10,6 ГГц, а также 12,4 ГГц. График зависимости импеданса от частоты представлен на рис. 8.

Таблица 1.

Полоса пропускания на резонансных частотах антенны А1.

Частота, ГГц	$2\Delta f / f$, %
3,90	100
7,5	66
11,1	72

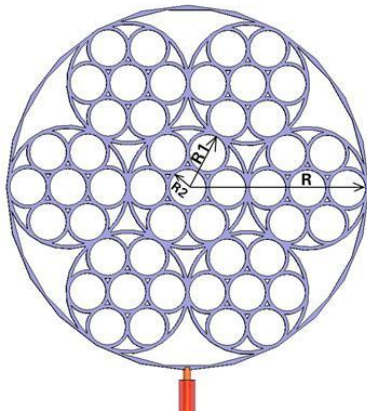


Рис.6. Модель монопольної антени A2.

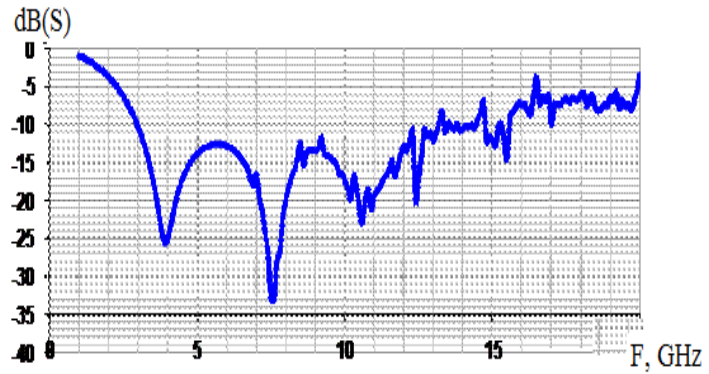


Рис.7. Частотна (F) залежність коефіцієнта відбиття (S) фрактальної апертури A2.

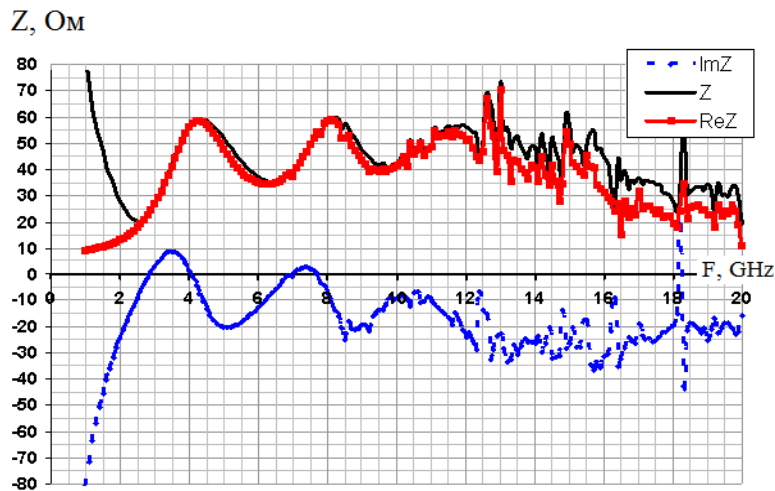


Рис. 8. Частотна (F) залежність імпеданса (Z) для монопольної антени A2

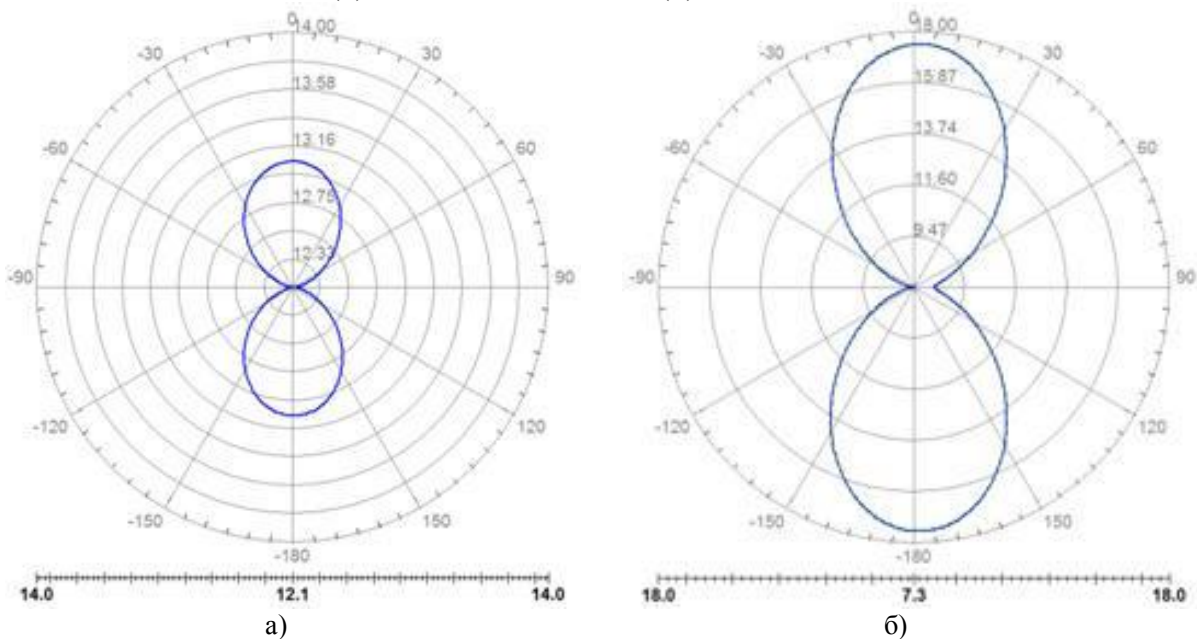


Рис.9. ДН антени на сітці частот в діапазоні 0,1 - 20 ГГц
а) 2,9 ГГц; б) 7,7 ГГц.

Как видно из графика зависимости импеданса, анализируемая антенна A2 имеет резонансы на частотах 2,9 ГГц (4,1); 7,1 ГГц (7,7). Для этих частоты были смоделированы диаграммы

направленности, которые представлены на рис. 9. Зависимость КСВ антенны А2 от частоты представлена на рис. 10.

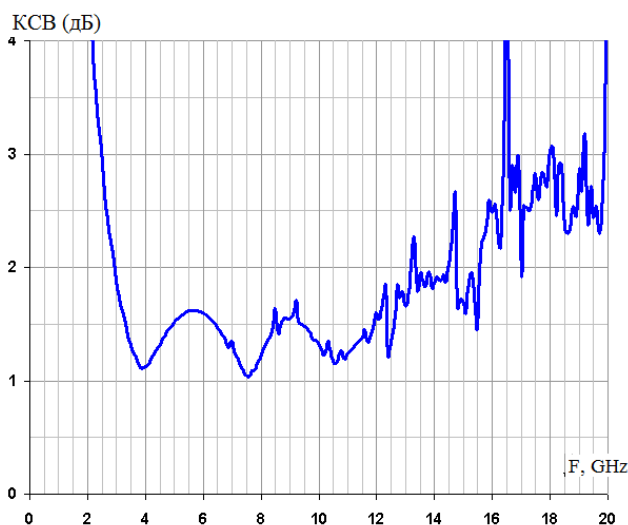


Рис. 10. Зависимость КСВ от частоты для фрактальной антенны А2.

Значения КСВ на резонансной частоте находятся достаточно близко друг к другу (соотношение $f_n/f_{n-1} < 2$); а значения КСВ менее 2 позволяют сделать вывод о хорошей согласованности структуры антенны А2.

Выводы. Приведены результаты практического применения основных идей теории фракталов в современных информационных технологиях, в частности, практическая направленность исследований состоит в повышении уровня насыщенности и степени информативности приемопередающих систем. Детально описаны некоторые примеры фрактальных антенн. Проведено сравнение рассчитанных значений коэффициента отражения и значения импеданса, представлены смоделированные диаграммы направленности фрактальных антенн.

Итак, уникальной особенностью фрактальных антенн является теоретически бесконечное уплотнение ограниченной области пространства геометрией антенны, и как результат - дополнительные резонансные частоты в диапазоне длин волн, часто значительно превышающих геометрические размеры фрактальной структуры.

В качестве перспектив заметим, что на сегодняшний день не существует строгой электродинамической теории, объясняющей и предсказывающей достаточно уникальные свойства структур, построенных на основе фрактальных множеств. Но все попытки использовать геометрические фракталы в реальных задачах радиофизики подразумевают под собой ограничение числа итераций построения фрактала, что, по сути, означает использование предфрактала. Под *предфракталом* следует понимать структуру с конечным порядком итерации или множество, имеющее свойство самоподобия в конечных масштабах.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Mandelbrot B.V. Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond.– N. Y.: Springer-Verlag, 2004.- 308 p.
2. Потапов А.А., Черных В.А. Дробное исчисление, теория фракталов и скейлинга.– М.: Физматлит, 2009.- 820 с.
3. Нигматуллин Р.Р. Фракталы, дробные операторы и дробная кинетика в диэлектрической спектроскопии и волновых процессах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы.- 2007. - Т. 10, № 3. - С. 30 – 49.
4. Потапов А.А., Черных В.А. Дробное исчисление А.В. Летникова, теория фракталов и скейлинг.– М.: Физматлит, 2009.- 820 с.
5. Ковальчук В.В. Кластерная модификация полупроводниковых гетероструктур. – К.:«Hi-Tech», 2007.- 309 с.
6. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А. Новейшие методы обработки изображений. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.