АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

КАРИБАЕВ БЕЙБИТ АБДИРБЕКОВИЧ

Электродинамические характеристики анизотропных фрактальных антенн

Общая характеристика работы

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию проволочной антенны на основе анизотропного фрактала (фрактал Жанабаева, далее – «ZhF»), а также сравнению основных электродинамических и радиотехнических характеристик данной антенны с другими фрактальными антеннами, имеющими изотропные, треугольные структуры. Результаты проведенных физических экспериментов, компьютерного симулирования описаны и сопоставлены теоретической моделью. Получена формула для описания всех поколений ZhF фрактала с использованием ступенчатых функций Хэвисайда. Построена теория, позволяющая сопоставлять частотные, пространственные характеристики различных фрактальных антенн. Уникальная структура антенны на базе ZhF фрактала и связанная с ней максимальная эффективность характеристик дает возможность применять ее для широкого спектра прикладных задач в области использования антенно-фидерных устройств.

Актуальность темы

Важным элементом любых приемо-передающих беспроводных устройств являются антенны, от типа и конструкций которых сильно зависит качество передачи и приема информации. В настоящее время основная часть беспроводных приемно-передающих радиофизических устройств телекоммуникации и связи функционирует в области высоких частот. Поэтому мобильные устройства и другие приемо-передатчики, предназначенные для различных технологий беспроводной связи, требуют использования широкополосных, малогабаритных антенн.

Освоение широкой полосы спектра частот обусловлено современными тенденциями в развитии беспроводной связи, повышения скорости передачи информации, повышения уровня помехозащищенности, а также защищенности передаваемой информации. Современные электронные радиоустройства имеют тенденцию миниатюризации, предъявляющее соответствующие требования ко всем видам электронных компонентов, в том числе и к антеннам. При этом параллельно предусматривается повышение производительности малогабаритных радиоустройств. Существует большой

интерес к созданию инновационных конструкций многодиапазонных антенн для беспроводной связи. Интеграция материалов с конструкции антенн по-прежнему привлекает внимание, особенно в уменьшении размеров и повышении их характеристик.

В последнее время особое внимание уделяется фрактальным антеннам в области радиотехники и телекоммуникаций, о чем свидетельствуют многочисленные научные публикации. К примеру, в наиболее известных журналах в области антенных устройств «IEEE Transactions on antennas and propagation» и «IEEE Antennas and wireless propagation letters» ежегодно публикуются не менее 8-10 статей, не учитывая другие научно-технические журналы, которые могут опубликовать статьи по этой теме. Прежде всего, это связано с тем, что антенны на основе геометрических фракталов обладают весьма интересными свойствами в области многодиапазонности по сравнению антеннами с формами Евклидовой геометрии, базирующей объектами целочисленной размерности. Самоподобность фрактальной структуры позволяет таким антеннам резонировать на несколько частотных диапазонах, а исполненные в виде патч (полосковых) имеют сверхширокую полосу пропускания. Исследователи и разработчики в области антенно-фидерных устройств рассматривают фрактальную геометрию, как одним из технических решением проблемы миниатюризации при создании малогабаритных устройств беспроводных связи. В результате многочисленных экспериментов и моделирования установлено, что антенны с фрактальными формами позволяют получить практически те же электрические и радиофизические характеристики, что и традиционные, но при намного меньших размерах. Компактность с сохранением ее характеристик достигается из-за эффективного заполнения плоскости за счет деления структуры антенны на сегменты, так называемые предфракталы, из которых, в свою очередь появляются новые предфракталы и таким образом до заполнения всей плоскости. Из анализа работ видно, что миниатюризация антенны наиболее эффективно реализуется лишь для несколько начальных номеров итерации (появления предфракталов) фрактальной структуры (до 4-5), приближаясь к определенному пределу.

Появление и стремительное развитие нового направления (90-е годы XX века) формировал область фрактальной электродинамики (термин был введен D.L. Jaggard). Кроме научных интересов имеют место и практические приложения для решения ряд задач телекоммуникаций и радиолокации. Одним из таких является компания “Fractal Antenna Systems” – мировой лидер в области радиочастотных и электромагнитных инноваций [www.fractenna.com].

Несмотря на огромное количество публикации и проделанных исследовательских работ, возникает естественный вопрос, какая именно топология фракталов может обеспечить эффективность электродинамических, радиофизических характеристик? Известны исследования антенн на основе изотропных (типа Минковского), треугольных (типа Коха) и других промежуточных (между чисто

изотропными и анизотропными) фракталов. В работе Жанабаева З.Ж. [Жанабаев З.Ж., 1988] был предложен новый геометрический фрактал, так называемый «анизотропный фрактал», у которого деформация (фрактализация) элементов происходит только в одном направлении. Следует отметить, что термин «анизотропный фрактал» используется также в другой поздней работе [Li J., Ostoja-Starzewski M., 2009], где рассматривается пористая среда, имеющая различные возможные фрактальные размерности в разных направлениях. В данной диссертационной работе рассматривается фрактализация сплошной среды лишь в одном направлении с конкретной размерностью. С точки зрения специфики топологии у антенны на базе этого фрактала интуитивно обнаруживается возможность реализации более лучших характеристик направленности излучения, более простой технологии автоматизации сборки-раскрытия антенн и т.д.

Анализ литературных источников показывает, что создание и внедрение новых видов антенн является актуальной, а применение фрактальной геометрии для решения данной проблемы становится перспективным, кроме того исследования в данном направлении проводятся только зарубежными авторами.

Исследование, проделанное в рамках данной работы, связано с перспективными направлениями современной радиотехники и телекоммуникации, где используются новые поколения антенн и методы оценки характеристики.

Целью работы является экспериментальное исследование электродинамических, радиотехнических характеристик диполь антенны на основе ZhF фрактала, сопоставление ее эффективности по сравнению с другими фрактальными антеннами, а также теоретическое объяснение выявленных закономерностей.

Задачи исследования

1 математически описать структуру ZhF фрактала;

2 провести расчеты по теоретическим моделям, описывающие электродинамические параметры и направленные свойства проволочных фрактальных диполь антенн с учётом размерности фрактальных структур;

3 экспериментально исследовать, измерить и сопоставить с теоретическими электродинамические и радиотехнические характеристики проволочных антенн с разными фрактальными формами;

4 экспериментально подтвердить корректность измерений по отношению сигнал/шум, принятых фрактальными антеннами;

5 оценить ширину диаграмм направленности фрактальных антенн и основное направление их излучения;

6 объяснить физический смысл теоретической модели, используемой для расчетов.

Объекты исследования: проволочные диполь антенны на основе фрактальных кривых до третьего номера предфрактала: анизотропный фрактал Жанабаева З.Ж. (ZhF), изотропный фрактал Минковского (MF) и треугольный фрактал Коха (KF).

Предмет исследования:

Электродинамические, электрические, направленные и частотные свойства фрактальных антенн в диапазоне 0,1÷3,0 ГГц, описываемые закономерностями фрактальной геометрии; особенности формы и направленности главных лепестков диаграмм направленности и их теоретические объяснения.

Метод исследования

1 теоретическое и численное исследование моделей, описывающее направленные и частотные характеристики проволочных фрактальных антенн;

2 компьютерное 3D моделирование (simulation) электрических и направленных свойств проволочных фрактальных антенн методом конечного элемента в программной среде HFSS Ansoft - High Frequency Structural Simulator;

3 экспериментальное исследование и определение характеристик антенн с помощью программно-аппаратного комплекса высокочастотных измерительных приборов и устройств (анализатор спектра, СВЧ генератор, векторный анализатор цепей и широкополосная рупорная антенна);

4 обработка, анализ и сопоставление полученных результатов вышеперечисленных методов исследований с целью выявления наиболее эффективного вида фрактальной антенны.

Основные положения, выносимые на защиту

1 Анизотропный геометрический фрактал ZhF и его предфракталы, имеющие локальную фрактальную размерность аналитически описываются через ступенчатые функции Хэвисайда.

2 Резонансные частоты проволочных фрактальных антенн (ZhF, MF, KF), полученные теоретически для $n+1$, n предфракталов и измеренные экспериментально соответствуют в пределах погрешности не более 3-5%.

3 Проволочные фрактальные антенны являются узкополосными с повышенной шириной диаграмм направленности. Ширина ДН антенны ZhF превышает ширину антенна на MF, KF не менее, чем в 1,5 раза.

4 Среднее значение принятой мощности радиоволн на резонансных частотах ZhF антенны в перпендикулярном и параллельном режимах приема сигнала больше на 10 - 15%, чем для MF и KF антенн при одинаковых регулярных длинах и расстояниях до излучателя.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые

1 предложен новый вид фрактала ZhF для конструирования антенн, выведено его аналитическое уравнение, которое описывает все уровни предфракталов.

2 экспериментально и теоретически показано, что частотные характеристики проволочных фрактальных диполь антенн, зависят от дробной размерности самой фрактальной структуры.

3 выявлены режимы поперечного (нормального) и осевого излучения диаграмм направленности проволочных фрактальных антенн в первых двух резонансных частотах.

4 выявлено смещение резонансов проволочных фрактальных антенн в область низких частот с ростом номера предфрактала, а также появление дополнительных высокочастотных резонансов за счет данного смещения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Благодаря большой плотности элементов (предфракталов) и их миниатюрности, кроме этого многодиапазонным и относительно широкополосным свойствам перспективно применение антенн на базе фрактальных кривых в средствах устройств беспроводной связи, радиолокации, радионавигации, а также в спутниках малого и среднего размера. Впервые показаны и объяснены режимы поперечного и осевого излучения проволочных фрактальных антенн с прямоугольными предфракталами. Данный эффект может быть новым решением для устройств, которые содержат отдельные разнополярные антенны.

Практическая значимость работы заключается в обоснованной эффективности и возможной универсальной применимости предложенной новой фрактальной антенны на основе фрактала ZhF, имеющая локальная фрактальная размерность, тогда как размерность Хаусдорфа остальных геометрических фракталов постоянная. Данная специфичность позволяет в антенне содержать разные длины излучателя и даст технологические преимущества изготовления с точки зрения автоматического раскрытия и собирания.

Результаты созданной теоретической модели проволочных фрактальных антенн могут служить для более глубокого дальнейшего детального изучения, исследования, так как общая теория фрактальных антенн на данный момент в мире практически не развита. Это объясняется трудностью теоретических решений уравнений Максвелла для фрактальных токов и практическим отсутствием соответствующих теоретических разработок и результатов, обусловленные неприменимостью дифференциалов и интегралов к фракталам. Предложенная модель предоставляет возможность учитывать основные закономерности фрактальной геометрии антенн. Таким образом, установленные в данной работе теоретические и экспериментальные закономерности имеют прикладное значение для совершенствования антенной техники.

Материалы исследования, а также использованные и созданные программно-аппаратные комплексы для получения излучательных свойств рассматриваемых антенн в ходе работы, ключевые моменты 3D моделирования в среде программных пакетов и полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы в учебных процессах при подготовке специалистов в области антенно-фидерных устройств и в дальнейших научных исследованиях.

Источниками исследования являются основные теоретические положения фрактальной геометрии, антенно-фидерных устройств, электричества и магнетизма, а также результаты оригинальных научных работ, приведенных в списке использованных источников.

Личный вклад автора заключается в том, что основные результаты физического эксперимента, численного анализа и компьютерных расчетов, моделирования были получены лично соискателем. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научными консультантами.

Достоверность результатов

Достоверность научных выводов работы подтверждается воспроизводимостью экспериментальных результатов, соответствием данных компьютерного моделирования с экспериментальными результатами, согласованностью полученных результатов с теоретическими предпосылками и выводами, полученными другими авторами в близких по содержанию работах, использованием апробированных методик численного анализа.

Апробация работы

По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 7 – в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 1 – в рецензируемом журнале (Journal of engineering sciences and technology (JESTEC)), 5 публикаций в сборниках тезисов докладов на международных конференциях, в т.ч. 1 зарубежной (6th International Conference on Telecommunications and Remote Sensing. Delft, Netherlands) и 1 доклад в сборнике международной конференции (The IEEE 12th International Conference «Application of Information and Communication Technologies».- Almaty, Kazakhstan).

Связь темы диссертации с планами научных работ

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследовании» по теме «№3837/ГФ4 Разработка многодиапазонной фрактальной антенны для сверхширокополосных беспроводных систем» по приоритету: «Информационные и телекоммуникационные технологии»

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и содержит два приложения. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, иллюстрируется 97 рисунком, приведено 57 формулы, 8 таблицы, список использованных источников содержит 142 наименований.