

РАЗРАБОТКА ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕНН ДЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Колесов В.В., Крупенин С.В., Потапов А.А.

Институт радиотехники и электроники РАН

Введение

Большинство традиционных радиотехнических систем работает в относительно узкой полосе частот и в качестве несущего колебания для передачи информации использует гармонические сигналы. Частотная селекция является сегодня основным способом разделения этих каналов, а большинство радиотехнических систем являются узкополосными и работают в полосе частот, намного меньшей, чем их несущая частота.

Известно, что ширина полосы частот определяет информативность радиотехнических систем, т.к. количество информации, передаваемой в единицу времени, прямо пропорционально полосе. Для повышения информационных возможностей системы необходимо расширять ее полосу частот. В связи со стремительной информатизацией общества и постоянным увеличением информационных потоков эта проблема становится все более актуальной для радиосвязи, радионавигации и радиолокации. Актуальность проблемы определила быстрое развитие в последние годы информационных технологий, использующих широкополосные и сверхширокополосные (СШП) сигналы.

Проблема перехода к СШП сигналам особенно актуальна для радиолокации, поскольку использование СШП сигналов позволяет значительно увеличить количество информации о цели и перейти к получению ее радиоизображения, что недоступно для традиционных узкополосных сигналов. Однако процесс радиолокационного наблюдения при использовании СШП сигналов значительно отличается от аналогичного процесса при использовании узкополосных сигналов. Основные отличия таковы: изменение формы радиолокационного сигнала в процессе наблюдения за целью, зависимость характеристик антенны от формы сигнала, изменение величины эффективной поверхности рассеяния цели во времени.

Не менее актуально использование СШП сигналов в радиосвязи. Использование СШП технологии позволяет организовать работу нескольких независимых каналов связи в общей полосе частот, при этом СШП сигналы позволяют легко устранить недостатки связных систем, связанные с многолучевым распространением радиоволн.

Неотъемлемой частью любой радиосистемы являются антенно-фидерные устройства. В настоящее время одной из основных тенденций развития многодиапазонных и сверхширокополосных антенн является использование электромагнитных фрактальных структур. Такие антенны необходимы при разработке многочастотных, широкополосных и сверхширокополосных радиолокационных и телекоммуникационных систем.

Фрактальные структуры самоподобны при различных масштабах и не обладают единым характеристическим размером, поскольку в одном объекте наблюдается бесконечное число масштабов и размеров. Благодаря такому свойству фрактальные структуры многодиапазонны и широкополосны в «электромагнитном» смысле. При проектировании фрактальных антенн, как правило, используются различные структуры: салфетка Серпинского, снежинка и кривая Коха, кольцевые и эллиптические фракталы, различные дендриты.

Целью настоящей работы является численное моделирование фрактальных антенн, построенных на основе как классических геометрических фракталов (салфетка Серпинского, снежинка Коха), так и нерегулярных древовидных хаотических структур (дендритов, фрактальных кластеров).

В настоящей работе исследуются электромагнитные характеристики следующих фрактальных структур: фрактальная антенна Серпинского 8-ой итерации, фрактальная антенна Коха 4-ой итерации и антенна на основе двумерной нерегулярной фрактальной структуры. Численный расчет параметров антенн проводился с помощью программы электромагнитного моделирования СВЧ структур Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator), решающий модуль которой использует тангенциальный метод конечных элементов для решений уравнений Максвелла.

Электродинамические параметры исследуемых антенн рассчитывались с помощью метода конечных элементов с адаптивным измельчением расчетной сетки. Сетка определяется разбиением расчетного пространства на тетраэдры. Узлами сетки являются вершины и центры ребер тетраэдров. Узловые значения представляют собой тангенциальные (параллельные ребрам или граням тетраэдра) составляющие электромагнитного поля, вычисленные из уравнений Максвелла. Для численного решения уравнений Максвелла используются традиционные матричные методы. Картина поля в расчетном пространстве получается путем интерполяции по узловым точкам. Программа поддерживает два варианта интерполяции: нулевого и первого порядка. В соответствии с картиной поля рассчитываются S-параметры и входной импеданс структуры. Расчет представляет собой итеративный процесс, каждая итерация которого включает: решение уравнений Максвелла в узлах текущей сетки, расчет картины поля и S-параметров структуры, адаптивное измельчение сетки в областях наибольшей ошибки. Сходимость итеративного процесса задается максимальным изменением S-параметров за итерацию.

Фрактальные антенны на основе салфетки Серпинского и снежинки Коха

Численное моделирование проводилось для фрактальной антенны Серпинского 8-ой итерации. Длина стороны главной треугольной формы салфетки Серпинского составляет 256 мм. Коэффициент масштаба

равен 2, что соответствует уменьшению размера треугольника каждой итерации в два раза. Металлизация в виде салфетки Серпинского расположена на тонкой диэлектрической подложке (толщина 1.5 мм, диэлектрическая проницаемость 2.5). Антенна находится над идеально проводящей плоскостью углом вниз так, что плоскость антенны перпендикулярна проводящей плоскости. Антенна запитывается в нижней точке с помощью коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом.

На рис. 1 представлены частотные зависимости полного входного сопротивления и входного коэффициента отражения фрактальной антенны Серпинского в диапазоне от 0.1 до 10 ГГц. Обе зависимости демонстрируют логопериодические свойства в пяти диапазонах. Антенна имеет периодические резонансы на частотах 0.21, 0.73, 1.48, 2.9 и 5.7 ГГц. Центры диапазонов соответствуют нулевой мнимой части входного сопротивления антенны и локальному минимуму действительной части. Ширины диапазонов, соответствующие пяти резонансным частотам, определенные по уровню коэффициента отражения -10 дБ, равны 0.08, 0.09, 0.4, 0.6 и 1.2 ГГц, соответственно. Частотное разнесение между диапазонами f_n/f_{n+1} , где n – номер диапазона, равно 0.29, 0.49, 0.51 и 0.51, для первых четырех диапазонов соответственно. Нарушение периодичности в нижних диапазонах можно объяснить эффектом усечения, связанным с конечным числом итераций в физическом фрактале [1].

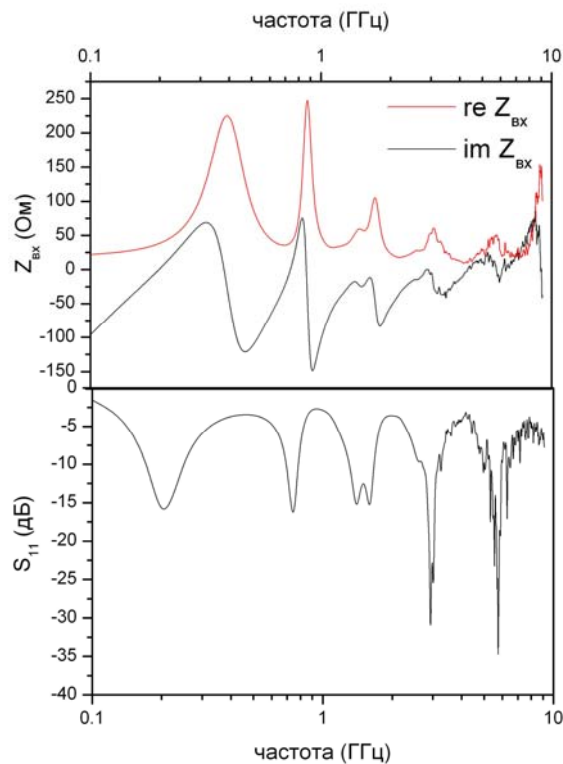
Диаграммы направленности фрактальной антенны Серпинского для пяти частотных диапазонов характеризуются двумя лепестковыми структурами относительно двух взаимноперпендикулярных вертикальных плоскостей. Глубокий провал, перпендикулярный проводящей плоскости, типичен для конфигурации монополя. Азимутальные сечения диаграммы направленности характеризуются гантелевидной формой с более интенсивной компонентой, перпендикулярной плоскости антенны.

Форма диаграммы направленности значительно искажена на высоких частотах, тем не менее, двухлепестковая структура в вертикальных сечениях просматривается вплоть до четвертого диапазона. Искажение формы диаграммы направленности на высоких частотах можно объяснить следующим образом: при запитывании вершины антенны электромагнитная волна распространяется по структуре в направлении плоского торца салфетки Серпинского; при встрече с кластером, сравнимым по размерам с длиной волны λ , волна излучается. Структура имеет много разрывов, которые усиливают излучение и придают некоторые особенности этому процессу. При больших λ малые фрагменты антенны вносят небольшой вклад в общее излучение, и ток распространяется по всей структуре. При уменьшении λ электромагнитная волна рассеивается на все более мелких фрагментах структуры и не достигает удаленных от точки запитки областей антенны. Таким образом, на высоких частотах антенна теряет свойства самоподобия. Распределения электрического поля в плоскости антенны свидетельствуют о локализации поля на фрагментах антенны, геометрические размеры которых соответствуют длине волны возбуждения: так, на высоких частотах поле локализовано преимущественно вблизи точки запитки.

Более точный расчет электродинамических свойств фрактальных антенн Серпинского, в том числе с изменяющимся углом раствора, был проведен в [5].

Исследовалась фрактальная антенна Коха 4-ой итерации с длиной стороны главной треугольной формы 256 мм. Параметры диэлектрической подложки: диэлектрическая проницаемость 4.17, толщина 1.6 мм. Плоскость антенны расположена на высоте 3.4 мм от заземленной квадратной плоскости. Антенна запитывается с помощью коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом, точка питания размещена на расстоянии 34 мм от центра снежинки Коха.

На рис. 2 представлены частотные зависимости полного входного сопротивления и входного коэффициента отражения фрактальной антенны Коха в диапазоне от 0.1 до 10 ГГц. Зависимости обнаруживают множество частотных диапазонов с различной степенью согласования и уровнем коэффициента отражения. В отличие от фрактальной антенны Серпинского расположение частотных диапазонов антенны Коха не является логопериодическим.



Фрактальная антенна Коха имеет более узкую диаграмму направленности по сравнению с антенной Серпинского. Так же, как и для антенны Серпинского, наблюдается искажение формы диаграммы направленности на частотах выше 3 ГГц.

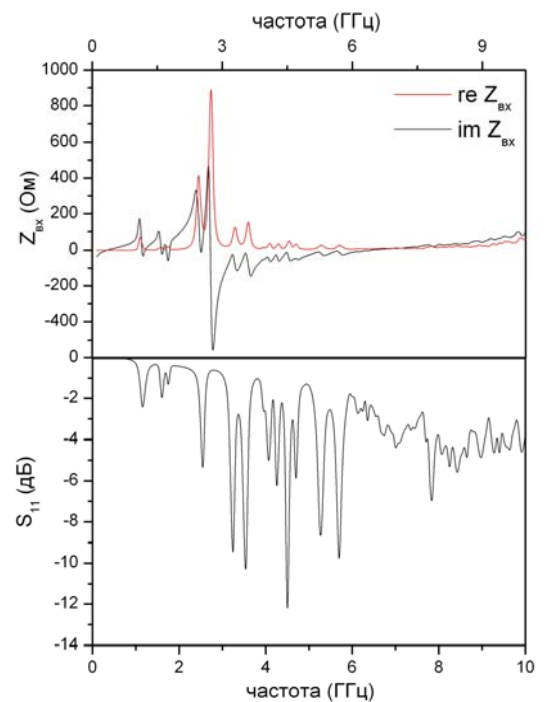
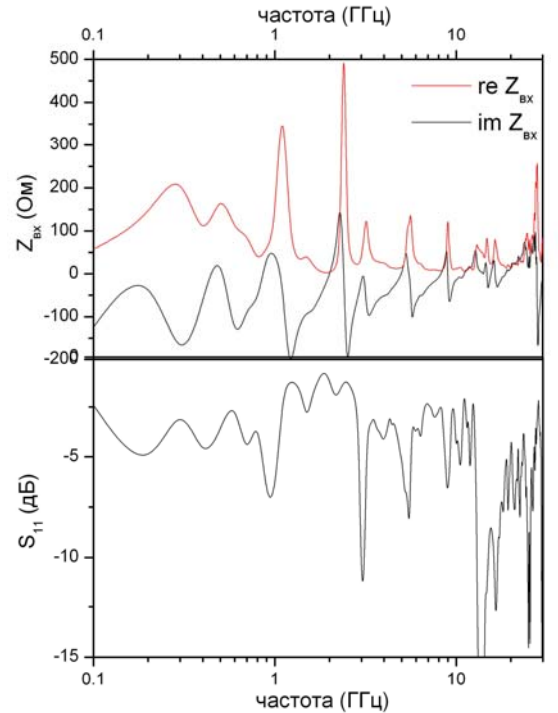
Антенна на основе нерегулярной фрактальной структуры

Разработана методика формирования воспроизводимой нерегулярной фрактальной структуры, которая представляет собой псевдослучайный фрактальный кластер с топологической размерностью, равной 2, и задаваемой фрактальной размерностью. Методика основывается на модели кластер-кластерной агрегации, позволяющей генерировать случайные фрактальные кластеры заданной фрактальной размерности [2]. Данный алгоритм реализует так называемую иерархическую модель, являющуюся идеализированной версией кластер-кластерной модели, введенной еще в 1971 году [4]. В иерархической модели наборы кластеров из равного числа частиц: 2, 4, 8, ..., 2^N , ..., строятся последовательно. На каждом шаге кластеры группируются парами. Отличие алгоритма [2] от иерархической модели заключается в том, что данный алгоритм позволяет априори задавать фрактальную размерность кластера. Это достигается путем связывания определенным соотношением минимального расстояния между центрами масс двух группируемых кластеров и фрактальной размерностью результирующего агрегата. Элемент случайности при подобном построении кластера вводится следующим образом: при наличии нескольких способов агрегации с равными расстояниями между центрами масс группируемых кластеров окончательный вариант определяется случайным образом. Таким образом, алгоритм [2] позволяет генерировать случайные фрактальные кластеры с задаваемой фрактальной размерностью.

Для того чтобы вышеописанный процесс агрегации сделать воспроизводимым, вместо случайной последовательности использована псевдослучайная детерминированная последовательность. Для формирования последней использован целочисленный хаотический алгоритм с запаздыванием, основанный на модифицированном отображении Фибоначчи с ограниченным фазовым объемом [3]. Данный дискретный алгоритм при соответствующем выборе параметров формирует длинные неперiodические сегменты псевдослучайных последовательностей с равномерным распределением вероятностей, которые по статистическим и корреляционным параметрам близки к характеристикам случайного равновероятного процесса. Очевидно, что замена случайной последовательности на псевдослучайную с близкими корреляционными характеристиками не скажется на статистических свойствах фрактального кластера. Модифицированная таким образом модель кластер-кластерной агрегации позволяет генерировать детерминированные фрактальные кластеры с задаваемой фрактальной размерностью.

Конструкция антенны на основе фрактального кластера аналогична конструкции вышеописанной фрактальной антенны Серпинского. Металлизация в форме фрактального кластера с фрактальной размерностью 1.5 нанесена на диэлектрическую подложку толщиной 1 мм и диэлектрической проницаемостью 2.8. Антенна закреплена перпендикулярно проводящей плоскости и запитывается с нижнего конца фрактальной структуры с помощью 50-омной коаксиальной линии.

На рис. 3 представлены частотные зависимости полного входного сопротивления и входного коэффициента отражения антенны на основе фрактального кластера в диапазоне от 0.1 до



30 ГГц. Зависимости демонстрируют наличие более десяти диапазонов внутри исследованного частотного интервала. Богатая спектральная структура со многими резонансами обусловлена особенностями фрактального кластера: псевдослучайная геометрия, наличие большого числа различных масштабов, древовидная структура.

Заключение

Показано, что фрактальная антенна Серпинского является многодиапазонной, так как полное входное сопротивление и диаграмма направленности сохраняют подобие в нескольких частотных диапазонах. Фрактальная антенна Коха также многодиапазонна, но, в отличие от антенны Серпинского, не проявляет логопериодических свойств. Для обеих антенн наблюдается эффект усечения, связанный с конечным числом фрактальных итераций. Он проявляется в заметном искажении диаграмм направленности и распределений поля на высоких частотах.

Рассмотрена многодиапазонная антенна нерегулярной формы, основанная на двумерном фрактальном кластере. Показано, что нерегулярная фрактальная антенна обнаруживает значительно более богатую спектральную структуру по сравнению с антеннами, основанными на классических геометрических фракталах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 03-07-90133, 04-07-90161 и 04-07-08013.

Литература

1. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005.
2. Thouy R., Jullien R. A Cluster-Cluster Aggregation Model with tunable fractal dimension // J. Phys. A: Math. Gen., 1994, V.27, pp.2953-2963.
3. Гуляев Ю.В., Беляев Р.В., Воронцов Г.М. и др. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации // РЭ, 2003, т.48, №10, с.1157-1185.
4. Жульен Р. Фрактальные агрегаты // УФН, 1989, т.157, №2, с.339-357.
5. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Давыдов А.Г. О проектировании фрактальных радиосистем. Численный анализ электродинамических свойств фрактальной антенны Серпинского // РЭ, 2005, т.50, №9, с.1070-1076.

FRactal ANTENNAS DEVELOPMENT FOR ULTRA WIDEBAND COMMUNICATION SYSTEMS

Kolesov V., Krupenin S., Potapov A.

Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Science

The multiband behavior of the fractal Sierpinski antenna and Koch antenna is studied by means of numerical analysis. Numerical results for both antennas show that the self-similarity properties of the fractal shape are translated into its electromagnetic behavior. Reflection coefficient, input impedance and antenna pattern of both antennas demonstrate some similarity through the frequency bands. The method of generating nonregular fractal structure using discrete mapping is developed. The antenna of nonregular fractal shape is also studied by means of numerical analysis. The number of frequency bands for the nonregular fractal antenna in the studied frequency range exceeds the number of bands for the antennas based on the Sierpinski gasket and Koch snowflake. Multiband properties of the studied fractal antennas may be employed in multifrequency radar and telecommunication systems development.