

# Проектирование антенн на основе геометрии фракталов

**Современные устройства связи нуждаются в новых видах антенн, которые, обладая миниатюрными размерами, обеспечивают улучшенные характеристики. Это должны быть низкопрофильные мультиволновые и широкополосные антенны с высоким коэффициентом усиления. Применение геометрии фракталов в разработке — это один из путей создания устройств, обладающих требуемыми свойствами. В данной статье делается попытка изучения существующих фрактальных антенн различного дизайна и их классификации, а также дополнительного понимания этих уникальных структур. Также рассмотрено применение наиболее используемых имитационных программных средств для их проектирования.**

**Ахмед Азиз Худхайр Аль-Заб**  
(Ahmed Azeez Khudhair Al-Zabee)  
engahmedazeez1@yahoo.com

**Саба Квазим Джаббар**  
(Qasim Jabbar)

**Дешенг Ванг (Desheng Wang)**

**Перевод: Алексей Гречишников**

В настоящее время разрабатывается огромное количество разнообразных мультифункциональных устройств беспроводной связи, имеющих малые размеры. Данное оборудование предъявляет особые требования к антеннам, которые, являясь портативными, в то же время должны быть мультиволновыми и работающими в широком диапазоне частот [1]. Миниатюризация антенн — это важное направление в современных системах связи, таких как беспроводные телекоммуникационные сервисы и связанные с ними приложения для передачи голосовых и информационных данных.

Широкополосные мультиволновые низкопрофильные антенны применяются как в коммерческом, так и в военном оборудовании и приложениях. Мы можем встретить их, например, в персональных устройствах связи, таких как мобильные телефоны и радиостанции, портативных спутниковых системах связи и так далее. Одним из путей получения таких антенн является использование при их разработке фрактальной геометрии. Это область математики, изучающая сложные иррегулярные структуры, которые не могут быть описаны с применением обычной Евклидовой геометрии.

## Фрактальная геометрия и фрактальные антенны

Термин «фрактал» переводится с латыни как «частичный», «разделенный», «раздробленный». Обычно его трактуют как самоподобное множество, часть целого, которая повторяется своей структурой на микроуровне. Этот термин придумал в 1974 г. Бенуа Мандельброт (Benoît Mandelbrot), который

признан отцом фрактальной геометрии. Фракталы — это геометрические формы, которые не могут быть определены в рамках Евклидовой геометрии. В природе их можно найти сплошь и рядом: это и облака, и морские раковины, горы, молнии и т. д. С помощью фрактальной геометрии можно исследовать форму множества вещей в таких областях, как, например:

- медицина (форма легких, кишечника, кровеносная система);
- метеорология (облака, вихри, снег, волны, турбулентные потоки, формы молний);
- вулканология (предсказание извержений вулканов и землетрясений);
- астрономия (структура Вселенной, лунные кратеры, эволюция галактик).

Фрактальная геометрия как особое направление математики возникла при изучении форм природных объектов (рис. 1) и является мощным средством описания любых геометрических фигур (рис. 2). Также она находит применение для описания форм электромагнитных полей. Сегодня это один из методов разработки многодиапазонных и широкополосных антенн с заданными характеристиками. Применение фракталов позволяет более эффективно заполнять пространство, отведенное для антенны.

В современных беспроводных системах применение фрактальных антенн имеет следующие преимущества:

- Передача большого количества данных за короткий временной промежуток, а значит, улучшенные широкополосные характеристики.
- Фрактальная антенна представляет собой оптимальное решение, когда антенна



Рис. 1. Источники вдохновения для разработки геометрии фракталов

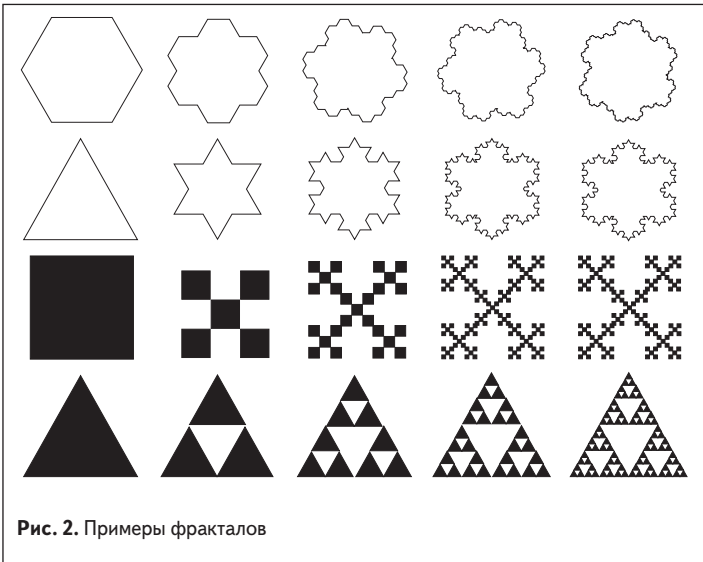


Рис. 2. Примеры фракталов

должна быть сконструирована для конкретной рабочей частоты, иметь хорошие характеристики именно для данного диапазона и плохо реагировать (или совсем не реагировать) на частоты нерабочего диапазона.

- Поскольку современные средства связи, например мобильные телефоны, обладают компактными размерами, применение фрактальных антенн позволяет нейтрализовать побочные отрицательные эффекты миниатюризации.

## Основные параметры при проектировании антенн

Существует несколько важных характеристик, которые следует учитывать при разработке антенны для конкретного устройства, а именно: частота и размер, направленность, особенности конструкции, особенности использования.

### Частота и размер

Антенны, используемые для ВЧ, отличаются от антенн, используемых для УКВ и СВЧ. Длина волны различна на разных частотах, поэтому антенны должны быть разного размера, чтобы излучать сигналы на соответствующей длине волны. В качестве примера интересны антенны, работающие в микроволновом диапазоне, особенно на частотах 2,4 и 5 ГГц. На частоте 2,4 ГГц длина волны составляет 12,5 см, а при 5 ГГц — 6 см.

### Направленность

Антенны могут быть всенаправленными, секторными или узконаправленными. Всенаправленные антенны излучают один и тот же сигнал по всей антенне по всем 360°. Наиболее популярными типами всенаправленных антенн являются дипольные и плоские. Излучение секторных антенн распространяется только в определенной области. Луч может охватывать сектор 180° или 60°. Узконаправленными называют антенны, в которых ширина луча намного меньше, чем в секторных антеннах. Они имеют самый высокий коэффициент усиления и поэтому используются для линий дальней связи. Это, например, волновые, параболические, логопериодические, зигзагообразные, синфазные и многие другие антенны.

## Особенности конструкции

Антенны могут быть построены различными способами, начиная от простых проводов и заканчивая параболическими конструкциями. При рассмотрении антенн, подходящих для использования WLAN с частотой 2,4 ГГц, можно использовать классификацию, приведенную ниже.

## Применение

Можно выделить две основные категории для применения антенн: базовые станции и связь типа «точка–точка». Каждая из этих категорий предполагает применение антенн разных типов. Базовые станции должны обеспечивать доступ для многих устройств. Для них целесообразно использование всенаправленных или секторных антенн, охватывающих только определенную область. В случае соединений типа «точка–точка», напротив, эффективным будет использование узконаправленных антенн.

## Классификация фрактальных антенн

Термин «фрактальная антенна» используется для обозначения антенн, разработанных с использованием концепций фрактальной геометрии. Применение этого инструмента позволяет создавать антенны нового поколения, обладающие характеристиками, которые считались недостижимыми в середине 1980-х годов [9]. Их можно разделить на три основные категории, классифицируя по форме антенны, методу построения и форме фрактала.

### Идентификация по форме

В этой категории критерием идентификации является форма антенны. Фрактал — это самоподобная структура, состоящая из повторяющихся форм. Для их создания можно использовать итерационные методы. Процесс создания фрактальных фигур можно описать тремя различными способами:

1. Генератор последовательностей (итераций).

Зададим произвольную ломаную с конечным числом звеньев, называемую генератором. Для создания фрактала будем рекурсивно подставлять генератор на каждом шаге итерации. В получившейся ломаной вновь заменим каждый отрезок генератором, и так до бесконечности. Например, таким образом может быть построен простейший фрактал, называемый «множество Кантора». Для его получения используют многократное удаление средней трети отрезка (см. рис. 3).



Рис. 3. Генератор последовательностей (итераций)

2. Итерированная функциональная система.

Итерированная функциональная система (IFS) — это конечное семейство сжатий  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ , где  $S_m$  — сжатие, переводящее набор форм в геометрически подобные множества с вероятностью  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ . Здесь  $P_i$  — относительный вес для каждого сжатия  $S_i$ , а  $P_i$  должно удовлетворять следующему выражению:

$$\sum_{i=1}^m P_i = 1 \quad (1)$$

Уникальный фрактал может быть определен одной IFS. Преобразование включает в себя несколько функций, таких как вращение, перемещение и отражение. Поэтому можно видеть, что генератор последовательностей — фактически самый простой сценарий преобразования IFS с  $S = S_1 = \dots = S_m$  и равномерным распределением вероятностей. При неравномерном распределении вероятностного множества  $P$  получаются «нерегулярные» формы, как это можно видеть на рис. 4 [10].

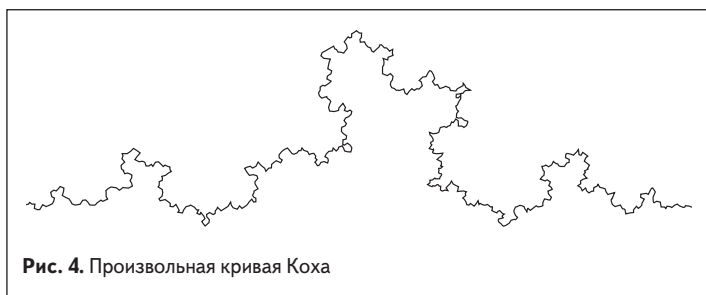


Рис. 4. Произвольная кривая Коха

В некоторой литературе эти структуры упоминаются как «случайные фракталы» со статистическим самоподобием.

### 3. Итерационная формула.

Итерационная формула использует бесконечное суммирование одного математического выражения для создания фрактальной структуры. Это обычно приводит к негладкой кривой как результат суммы бесконечных преобразований. Так, на рис. 4 показан фрактал, сгенерированный по следующей формуле:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{3}{2}\right)^{-k} \sin\left(\frac{3}{2}\right)^{-k} t. \quad (2)$$

### Идентификация по методу построения

Это еще один групповой тип классификации, где фракталы разделяются по следующим трем основным категориям:

1. Линейный тип: основан на последовательности линейных уравнений (фракталы Гельберта, Коха, Серпинского, «Дракон»...).
2. Нелинейный тип: на основе итерации комплексных чисел (фракталы Мандельброта, Жюлиа и т. п.).
3. Случайный тип: основан на введении случайного параметра в итерацию, чтобы получить неправильные формы (например, горы или облака).

### Идентификация по базовой форме

Данный метод классификации основан на базовой форме, используемой при построении фрактала. Поскольку при разработке антенн эта классификация является наиболее часто применяемой, на ней стоит остановиться более подробно, рассмотрев несколько фрактальных форм, широко используемых при проектировании:

- Фрактал как антенна в целом: основная идея — систематическое изгибание проводника для получения фрактала так, что общая длина дуги остается постоянной, но размер соответственно уменьшается с добавлением каждой последовательной итерации, в результате чего в конечном итоге получается стандартный диполь или петлевая антенна.
- Частичное использование фрактальных элементов. Фракталы могут использоваться для миниатюризации отдельных частей антенны. При этом общая длина антенны за счет лучшего заполнения отведенного для нее места будет оставаться достаточно большой. В этом случае фрактал выступает в роли базового элемента (примитива) в линии передачи.

## Типы фрактальных антенн

Представим краткий обзор некоторых наиболее распространенных фрактальных фигур, которые были признаны полезными при разработке инновационных конструкций антенн [8].

### Структуры Коха

Данная форма была описана в 1906 г. шведским математиком Хельге фон Кохом еще до появления самого термина «фрактал». Существует несколько вариантов данного семейства структур:

- Кривая Коха (рис. 5). Построение данной кривой из сегмента может быть выполнено в несколько последовательных шагов:
  - Единичный отрезок (сегмент) делится на три части равной длины.
  - Средняя часть заменяется равносторонним треугольником, в котором удаляется сегмент, лежащий в основании. В результате образуется ломаная, состоящая из четырех звеньев, длина каждого из которых составляет 1/3 длины исходного отрезка. На следующем

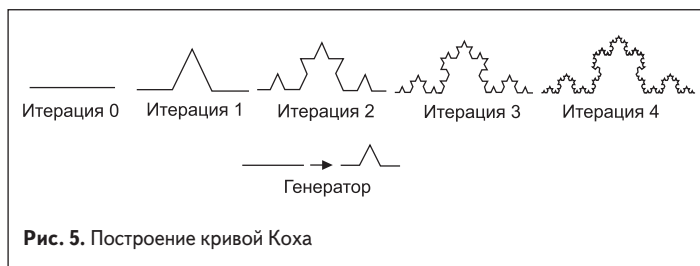


Рис. 5. Построение кривой Коха

шаге повторяем операцию для каждого из четырех получившихся звеньев.

- «Снежинка» Коха. Построение «снежинки» Коха такое же, как и кривой Коха. Отличие заключается в том, что в качестве основы снежинки используется не отрезок, а треугольник. На рис. 6 показана фигура, получающаяся в результате нескольких итераций.

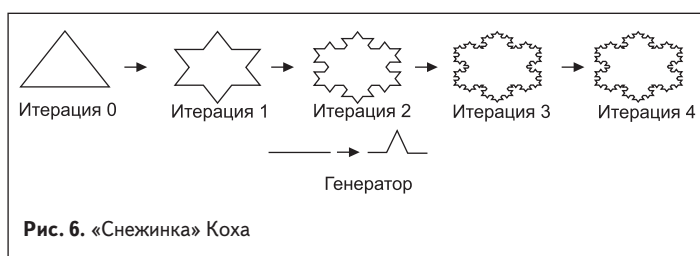


Рис. 6. «Снежинка» Коха

### Структуры Серпинского

Данные формы были описаны польским математиком Вацлавом Серпинским. Данное семейство включает в себя разнообразные фракталы, рассмотрим два из них:

- Треугольник Серпинского. Данная фигура получается из равностороннего треугольника в результате следующих преобразований:
  - Берется равносторонний треугольник, который является основой для построения фрактала.
  - Данный треугольник разбивается на 4 равносторонних треугольника и в получившейся фигуре удаляется центральная часть.
  - Для каждого из получившихся меньших треугольников предыдущий шаг повторяется.

На рис. 7 можно видеть треугольник Серпинского, полученный в результате четырех описанных циклов построения.

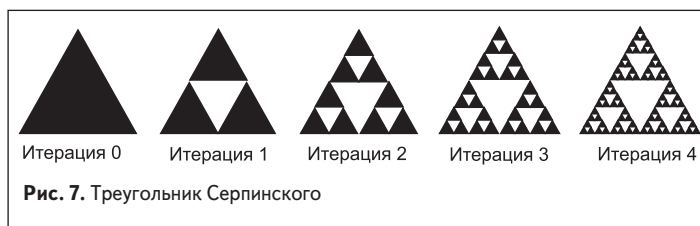


Рис. 7. Треугольник Серпинского

- «Ковер» Серпинского. Фигура получается из квадрата в результате следующих шагов:
    - Берется квадрат и прямыми, параллельными его сторонам, делится на 9 равных квадратов.
    - Центральный квадрат удаляется.
    - Предыдущие шаги построения повторяются.
- На рис. 8 показан «ковер» Серпинского, полученный в результате первых четырех циклов построения.

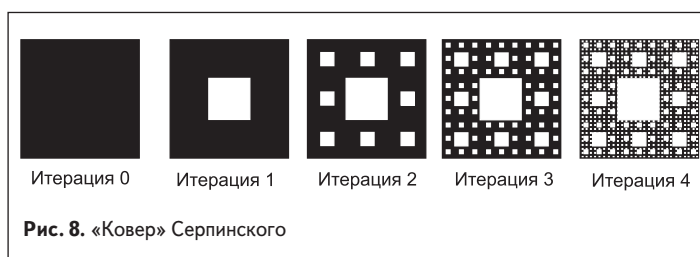


Рис. 8. «Ковер» Серпинского

**«Дракон»**

Такое имя было дано фракталу из-за того, что после некоторого количества итераций получающаяся в результате фигура очертаниями напоминает дракона (рис. 9).

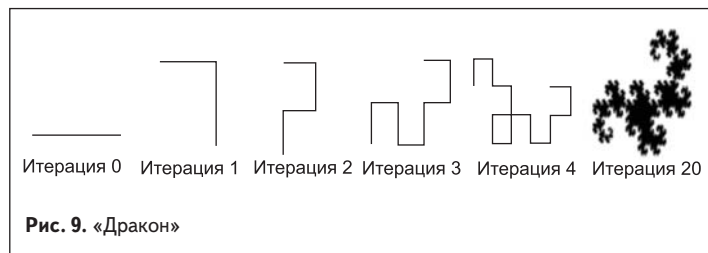


Рис. 9. «Дракон»

**«Дерево»**

Фракталы данного семейства похожи на деревья. Они содержат одинаковую структуру, размер которой уменьшается на каждом последующем шаге (рис. 10). Существует несколько разных типов таких фракталов:

- «Н-дерево». Как можно видеть на рис. 11, базовая структура, на основе которой строится данный фрактал, похожа на букву «Н». На каждом этапе построения создается четыре копии базовой формы меньшего размера (степень сокращения «R»).

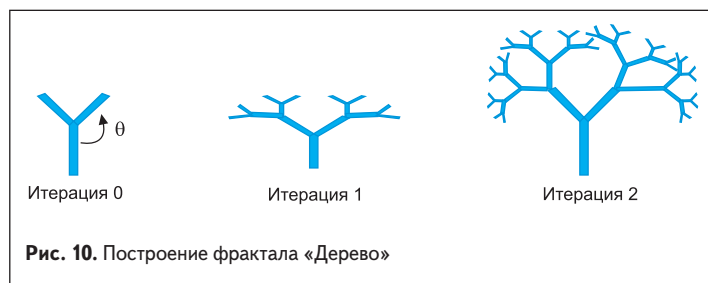


Рис. 10. Построение фрактала «Дерево»

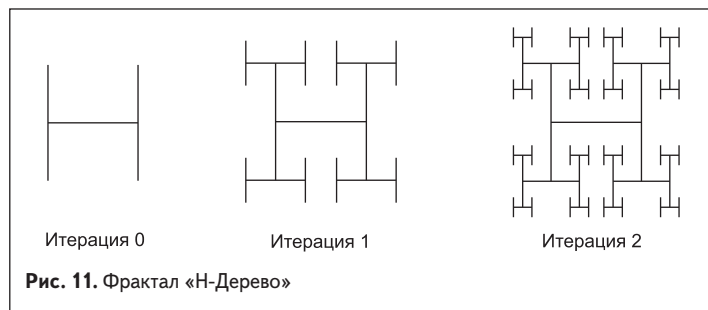


Рис. 11. Фрактал «Н-Дерево»

- «Дерево Пифагора». Для доказательства теоремы Пифагора строится фигура, в которой на сторонах прямоугольного треугольника расположены квадраты. Если этот процесс продолжить, получится фрактал, получивший название «дерево Пифагора» (рис. 12).

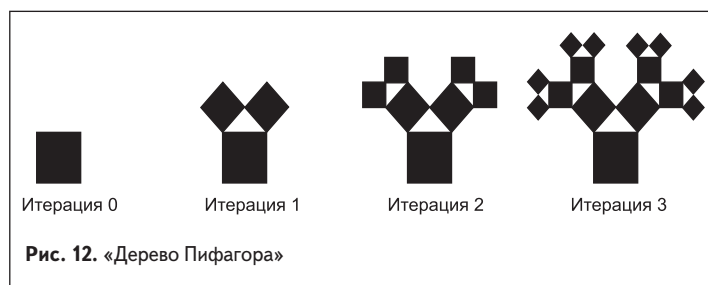


Рис. 12. «Дерево Пифагора»

**«Сетка Аполлония»**

В основе фракталов могут лежать не только прямые отрезки, но и любые другие фигуры, в частности круги. Фрактал получил свое название в честь греческого математика Аполлония Пергского и представляет собой предельное множество всевозможных последовательностей окружностей, каждая из которых касается трех уже построенных (рис. 13).

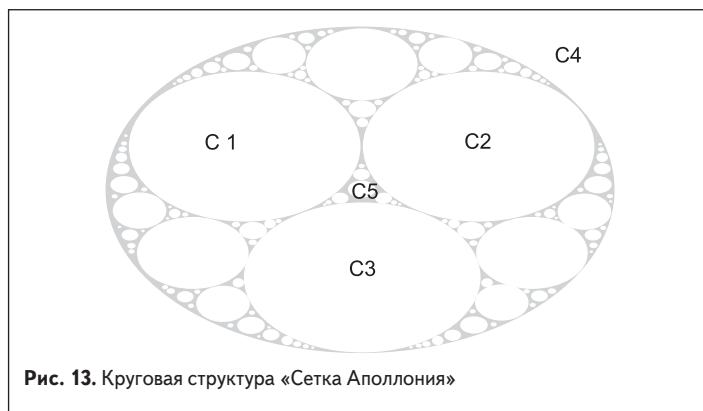


Рис. 13. Круговая структура «Сетка Аполлония»

**Множество Кантора**

Фрактал был получен немецким математиком Георгом Кантором [5]. Он строится из отрезка  $[0, T]$  последовательным удалением его центральной части определенного размера (например, трети). Операция повторяется для каждого из получившихся двух сегментов, и так до бесконечности. На рис. 14 представлено множество Кантора после шести первых итераций.



Рис. 14. Одномерное множество Кантора

**Кривая Гильберта**

Кривая Гильберта впервые была описана в 1891 г. немецким математиком Давидом Гильбертом. Построение заполняющей кривой Гильберта с размерностью Хаусдорфа, равной 2, показано на рис. 15.

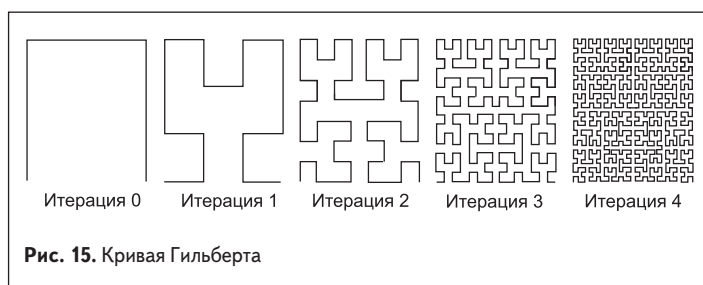


Рис. 15. Кривая Гильберта

**Кривая Минковского**

Эта фигура была получена немецким математиком Германом Минковским. Процесс построения данного фрактала показан на рис. 16.

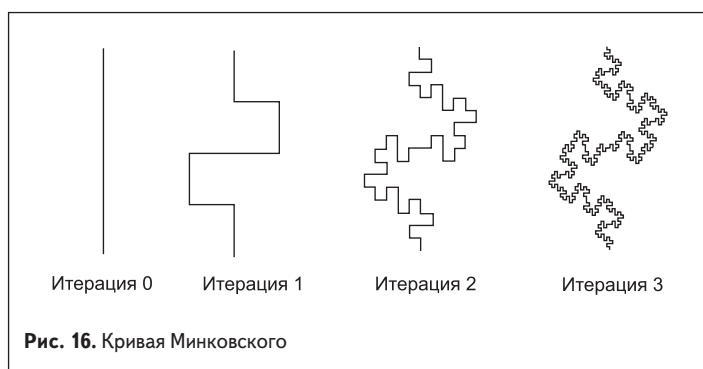


Рис. 16. Кривая Минковского

## Свойства фрактальных антенн

Преимущества фрактальных антенн обусловлены несколькими факторами [12, 13], а именно — коэффициентом усиления, диаграммой направленности, направленностью, поляризацией, обратными потерями, полосой пропускания.

### Коэффициент усиления

Коэффициент усиления антенны, по существу, является показателем общей эффективности антенны. Если антенна на 100% эффективна, она будет иметь коэффициент усиления, равный его направленности. Существует множество факторов, которые снижают общую эффективность антенны. Наиболее значимые из них, которые влияют на усиление антенны, — согласование импеданса, потери в сети, материальные потери и случайные потери. Для достижения требуемого коэффициента усиления приходится принимать во внимание все перечисленные факторы.

### Диаграмма направленности

Диаграмма направленности описывает, как антенна направляет излучаемую ею энергию. Все антенны, если они на 100% эффективны [13], будут излучать одну и ту же полную энергию при равной входной мощности независимо от диаграммы направленности.

### Направленность

Направленность  $D$  — важный параметр, показывающий способность антенны к фокусировке излучаемой энергии. Это отношение максимального уровня излучения к излучению эталонной антенны. Эталонная антенна обычно представляет собой изотропный излучатель, в котором излучаемая энергия одинакова во всех направлениях и имеет направленность 1. Направленность определяется по следующей формуле:

$$D = F_{max} / F_0, \quad (3)$$

где  $F_{max}$  — максимальный уровень излучения,  $F_0$  — уровень излучения изотропной антенны.

### Поляризация

Поляризация антенны описывает ориентацию и форму вектора электрического поля излучаемой электромагнитной волны. Существует три типа базовой поляризации: линейная; эллиптическая и круговая. Обычно большинство антенн имеют линейную или круговую поляризацию. Антенны с линейной поляризацией излучают в одной плоскости с направлением распространения волны. В случае круговой поляризации излучение антенны имеет форму круга.

### Обратные потери

Обратные потери — это отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны. Значение обратных потерь описывает уменьшение амплитуды отраженной энергии по сравнению с прямой энергией. Они могут быть вычислены по следующей формуле:

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2} \right|, \quad (4)$$

где  $Z_1$  — импеданс по направлению к нагрузке,  $Z_2$  — импеданс по направлению к нагрузке.

### Полоса пропускания

Полоса пропускания — это частотный диапазон, при работе в котором антенна удовлетворяет определенному набору критериев эксплуатационных характеристик. Важной проблемой, связанной с шириной полосы пропускания антенны, является неравномерность амплитудно-частотной характеристики антенны (АЧХ). Неравномерность АЧХ характеризует степень ее отклонения от прямой, параллельной оси частот.

Полоса пропускания рассчитывается по формуле  $BW_b = f_H / f_L$ , где  $f_H$  — верхняя частота отсечки;  $f_L$  — нижняя частота отсечки.

Антенна считается широкополосной, если  $f_H / f_L \geq 2$ .

## Плюсы и минусы фрактальных антенн

Преимущества:

- миниатюризация;
- улучшенный входной импеданс;
- широкополосность и мультиволновость, что позволяет использовать одну антенну вместо нескольких;
- мультичастотность (постоянная работа в большом частотном диапазоне);
- уменьшение взаимного влияния антенн.

Недостатки технологии:

- пониженный коэффициент усиления;
- сложность проектирования;
- ограничения численных методов, используемых для анализа;
- преимущества от использования фрактальной структуры начинают уменьшаться после первых нескольких итераций.

## Анализ и разработка

Как уже было сказано, фракталы — это объекты, которые имеют повторяющуюся самоподобную структуру [7]. Такая структура может быть получена рекурсивным выполнением генератора последовательностей. Для анализа и разработки антенн применяются численные методы [6]. Наиболее широко при моделировании антенн используются три из них, а именно: методы моментов (МоМ), конечно-разностная временная область (FDTD) и метод конечных элементов (FEM).

### Методы моментов

МоМ впервые были предложены Харрингтоном в 1968 г. [14]. Этот метод использует уравнение Максвелла в интегральной форме для представления электромагнитных полей через некоторую заданную на поверхности величину (электрический или магнитный ток) и вычисляет связь между текущими элементами. Применение МоМ обычно приводит к плотной матрице, и использование памяти пропорционально  $N^2$ , где  $N$  — число узлов в исследуемой области после дискретизации.

### Метод конечно-разностной временной области

Метод FDTD основан на теории, согласно которой электрическое и магнитное поле взаимосвязаны в соответствии с дифференциальными уравнениями Максвелла: временная производная электрического поля зависит от ротора магнитного поля, в то время как производная магнитного поля зависит от ротора электрического поля, как в уравнениях (5) и (6):

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma_M \vec{H}, \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \sigma_M \vec{E}. \quad (6)$$

Для выполнения расчета данным методом требуется много временных шагов, однако за один прогон моделирования он может покрыть широкий частотный диапазон. Преимуществом FDTD является также то, что нет необходимости вычислять все уравнения одновременно, этот метод является надежным в численных расчетах и помогает эффективно решать сложные задачи. Однако он не подходит для узкополосных антенных структур, так как в этом случае каждый временной интервал должен быть увеличен, и для выполнения расчета может потребоваться длительное время моделирования. Кроме того, расчет может не сходиться в конечном решении, что способно привести к неточным результатам.

### Метод конечных элементов

FEM является мощным инструментом для нахождения приближенного решения уравнений в частных производных. Этот метод был впервые применен в области гражданской и авиационной техники для решения комплексного структурного анализа. Позднее он получил широкое применение в других областях, в том числе в области электромагнитной инженерии. Этот метод начинается с дискретизации всего домена в несколько поддоменов, а затем используется интерполирующая функция (обычно многочлен первого или более высокого порядка) для представления неизвестных внутри этих поддоменов.

## Численные методы для разработки ЭМА

Под термином «электрически малая антенна» (ЭМА) подразумевается антенна, максимальный размер которой намного меньше соответствующей длины волны на резонансной частоте [15]. Для создания ЭМА были предложены методы, которые используют антенну неправильной формы, многослойную подложку или подложку с неоднородными свойствами. Вследствие этого упомянутые выше методы решения не могут быть эффективно использованы, за исключением специальных случаев.

Например, применение МоМ нецелесообразно, поскольку размер антенны ограничен, как и место ее расположения, имеет непланарную структуру или неоднородный субстрат.

Поскольку ЭМА обычно имеет узкую полосу пропускания, всегда существует возможность найти компромисс между размером антенны и рабочей полосой/эффективностью/усилением. При использовании FDTD придется исследовать длинную последовательность временных интервалов, потому что этот метод основан на временной области, которая обратно пропорциональна частотной области.

В то же время необходимо отметить, что несколько коммерческих программ моделирования ЭМА используют другие методы для преодоления таких ограничений и повышения эффективности вычислений, а также точности упомянутых численных методов. Например, метод быстрого множественного умножения (FMM) был применен для ускорения итерационного решения в МоМ, а метод конечной интеграции (FIT) был разработан для включения в FDTD. В таблице приводится сравнение различных методов.

Таблица. Особенности различных методов моделирования антенн

	МоМ	FEM	FDTD
Дискретизация	Только плоские структуры	Содержимое области (тетраэдр)	Содержимое области (куб)
Метод решения	Конечная разность, линейные уравнения, полная матрица	Конечная разность, линейные уравнения, раздельные матрицы	Последовательность временных интервалов
Граничные условия	Не требуются	Требуются	Требуются
Число операций для матрицы размерности N	~ N <sup>3</sup>	~ N <sup>2</sup>	~ N

## Разработка фрактальных антенн

Использование геометрии фракталов как естественного расширения Евклидовой геометрии в разработке антенн приводит к появлению у них уникальных свойств, а именно — малых размеров для конкретной полосы частот и многодиапазонность.

Конструкция фрактальной антенны зависит от нескольких важных условий, которые являются доминирующими для итоговой спецификации [15, 16], поэтому при рассмотрении конструкции антенны можно ограничиться следующими факторами:

- количество поддерживаемых полос частот (две, три, мультиполосная);
- типы подложки для некоторых типов антенн;
- тип энергопитания;
- математические расчеты;
- используемые формы (гексагональные, восьмиугольные и т. д.) или начальная топология;
- приложение, необходимое для разработки;
- количество итераций или этапов роста фрактала.

В процессе проектирования из базовой формы антенны на каждом новом шаге создаются структуры более высокого порядка. Размеры базовой структуры определяют резонансную частоту, после чего, в зависимости от числа поддерживаемых полос частот, определяется необходимое число итераций роста фрактала. Минимальное количество частот, полученных на каждой итерации, больше, чем порядок итерации. Типичные фрактальные формы, обладающие повышенным сопротивлением излучению, определяют хорошую эффективность антенны.

## ПО для моделирования

Для обеспечения эффективности полученной антенны необходимо тщательно выбирать программное обеспечение (ПО) для ее моделирования. Выбор, главным образом, зависит от геометрии структуры и требуемой точности решения [17]. Хороший разработчик должен иметь возможность использовать различные инструменты САПР с глубоким пониманием ограничений используемых в них численных методов и при-

меняемого интерфейса моделирования. Далее мы расскажем подробнее о некоторых самых популярных программных продуктах.

### Ansoft HFSS

HFSS (High Frequency System Simulator — система моделирования высокочастотных систем) [19]. Она считается самым передовым ПО и обычно используется для разработки и проектирования сложных радиоэлектронных схем. Кроме того, в ней имеются необходимые функции и инструменты для проектирования фильтров, линий передачи и моделирования антенн. Вот некоторые из ее особенностей:

- используется собственный метод проектирования и анализа на основе метода конечных элементов;
- автоматизированный процесс проектирования значительно упрощает разработку, поскольку пользователю достаточно просто указать требуемую геометрию, свойства конструкционного материала и другие параметры;
- генерируется несколько вариантов решений, удовлетворяющих требуемым спецификациям;
- поддерживается проектирование линейных схем.

### Microwave Studio CST

Этот пакет CAD разработан специально для моделирования электромагнитных полей в 3D и разработки антенн. ПО уникально благодаря наличию компонентов — фильтров, используемых при проектировании высокочастотных устройств. Как и большинство 3D-платформ, его можно использовать для анализа многоуровневых структур и электромагнитных свойств высокочастотных конструкций [20]. ПО поставляется со следующими функциями:

- PBA (Perfect Boundary Approximation — уточненная граничная аппроксимация) для расчета тонких структур и адаптации реальной геометрии. Это значительно улучшает эффективность расчетов, повышая точность проектирования.
- Фильтры для импорта файлов САПР из других 3D, а также экспорт параметров SPICE, что сокращает время, необходимое для разработки рабочего прототипа.
- Поддержка проектов линейных или нелинейных моделей материалов.
- Полный пакет включает мастер расчетов, который может быть сконфигурирован для использования определенных методов решения (МоМ, FDTD) в зависимости от требований пользователя.

### Zeland IE3D

Это одна из самых популярных программ автоматизированного проектирования или разработки, используемых производителями для проектирования антенн. ПО поставляется с набором функций, необходимых для моделирования трехмерной геометрии, анализа электромагнитной структуры и целостности сигнала. Функции [21] и инструменты, которые делают данный пакет особенно привлекательным:

- Полная автоматизация повторяющихся задач, которые могут привести к различным ошибкам. В эту группу входят такие задачи, как трехмерное моделирование геометрии, объединение моделей и анализ получившейся конструкции.
- Использование метода моделирования МоМ, а также импорт проектов из другого программного обеспечения для 3D-проектирования.
- Интуитивный характер интерфейса и рабочего пространства. То есть пользователю не нужно иметь глубоких знаний в области электромагнитного моделирования и взаимодействия, что облегчает весь процесс проектирования.

Использование МоМ в Zeland IE3D дает превосходную точность для анализа частотной области. Однако интерфейс IE3D не совсем подходит для рассмотрения очень мелких деталей. Таким образом, IE3D будет хорошим выбором, если структура проста (например, прямоугольная или круговая). В родственном этому ПО пакете Zeland Fidelity для анализа применяется метод FDTD. В основном Fidelity также подходит для обычных фигур, например таких, как цилиндрические, диэлектрические, резонаторные. И МоМ, и FDTD не подходят для больших антенных структур, таких как антенна-рефлектор или большие антенные решетки.

### FEKO

У платформы FEKO есть два основных метода решения, первый из которых основан на МоМ, а другой — на GTD (геометрическая

теория дифракции). Часть FEKO, которая основана на GTD, не может быть заменена на IE3D, HFSS или CST, поскольку она гораздо лучше решает проблемы рассеяния с участием больших объектов произвольной формы, таких как самолеты, вертолеты, ракеты, танки и корабли, на радиолокационных частотах. Из-за этого данный метод в основном, подходит для больших структур, таких как рефлекторные антенны. Отличительные особенности и функции FEKO:

- подходит для быстрого проектирования новых прототипов с использованием уже существующих параметров проекта, имеющихся в базе данных;
- поддерживает импорт файлов в другом формате в рабочее пространство/базу данных, а также позволяет экспортировать работы, выполненные в нем, в другие приложения 3D CAD или CAE.

### Antenna Magus

Этот инструмент обладает огромной базой данных, которая используется в качестве основы для быстрого моделирования различных антенн. Также пользователю предоставляется информация о том, как определенные спецификации проекта могут быть использованы для разработки идеальной антенны [17]. Antenna Magus ускоряет процесс проектирования, предоставляя следующие функции:

- выбор подходящей топологии антенны;
- получение информации об антеннах;
- проверка модели и оценка ее характеристик.

Эти уникальные функции делают его хорошим инструментом для использования с другими дизайнерскими платформами, такими как FEKO.

### COMSOL Multiphysics

Это самое последнее программное обеспечение в области проектирования. В нем реализовано множество передовых технологий, что даже позволяет назвать его пионером мультифизики. COMSOL может доминировать в мире численного анализа, поскольку легко позволяет моделировать множественные структуры с различными физическими свойствами, что хорошо подходит для анализа конечных элементов [22].

### Краткое сравнение особенностей представленного ПО

Пакеты Ansoft HFSS и CST имеют наилучший интерфейс, который позволяет пользователю включать в моделирование очень мелкие детали структуры. HFSS основан на методе конечных элементов, а CST — на методе, который аналогичен FDTD. Оба пакета подходят для малых или средних объектов [8]. Преимущество CST состоит в том, что в процессе работы можно получить результаты для широкого диапазона частот, поскольку расчет начинается во временной области, и затем его результаты уточняются при помощи преобразования Фурье. Проектирование устройств с помощью HFSS дает высокую гарантию того, что измеренные характеристики будут такими же, как при моделировании. Точность конечного элемента немного меньше точности при использовании MoM. Таким образом, для простых форм, таких как прямоугольная антенна, разница между HFSS и Zeland IE3D невелика. Но результат, полученный с помощью Zeland IE3D, будет более точен. Однако для сложных форм точность HFSS и CST будет намного лучше, чем IE3D, поскольку в этом случае приходится упрощать геометрию моделируемой структуры.

### Заключение

Огромный и даже неожиданный прогресс в области беспроводной связи вызвал потребность в компактных интегрированных антеннах. Возможности фракталов, такие как экономия пространства и эффективное использование всего ограниченного объема, обеспечивают явное преимущество интегрированных фрактальных антенн по сравнению с теми, которые созданы на основании Евклидовой геометрии. Компактные антенны используются в персональных портативных беспроводных устройствах, таких как сотовые телефоны, ноутбуки и PDA [23]. Фрактальная антенна имеет еще одну важную особенность — многодиапазонность. Это позволяет разрабатывать и выпускать различный ассортимент устройств — от двухрежимных телефонов до приборов, интегрирующих услуги связи и определения местоположения, такие как GPS. Данная особенность находит применение как в коммерческой, так и в военной сфере. ■

Оригинал статьи опубликован в *International Journal Of Computers & Technology* (ноябрь 2016, Vol. 15, № 13), [www.cirworld.com](http://www.cirworld.com).

### Литература

1. Chowdary P., Satish Rama, A. Mallikarjuna Prasad, P. Mallikarjuna Rao, Jaume Anguera. Design and performance study of sierpinski fractal based patch antennas for multiband and miniaturization characteristics // *Wireless Personal Communications*. 2015. № 3.
2. Abdelati R. E. H. A., E. L. Abdelkebir, Othmane Benhammouch, Ahmed Oulad Said. Fractal antennas: A novel miniaturization technique for wireless networks // *Transactions on Networks and Communications*. 2014. № 5.
3. Mandelbrot Benoit B. The fractal geometry of nature. Vol. 173. Macmillan, 1983.
4. Addison Paul S. Fractals and chaos: an illustrated course. CRC Press, 1997.
5. Falconer Kenneth. Fractal geometry: mathematical foundations and applications. John Wiley & Sons, 2004.
6. Romeu Jordi, Jordi Soler. Generalized Sierpinski fractal multiband antenna // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2001. № 8.
7. Werner Douglas H., Suman Ganguly. An overview of fractal antenna engineering research // *IEEE Antennas and propagation Magazine*. 2003. № 1.
8. Balanis C. Chapter 4 Linear Wire Antennas. Antenna Theory Analysis and Design, Third ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
9. Azari Abolfazl. A new fractal antenna for super wideband applications. InPIERS Proceedings, 2010.
10. Krzysztofik Wojciech J. Take advantage of fractal geometry in the antenna technology of Modern Communications // In 2013 11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS). 2013.
11. Lizzi L., Azaro R., Oliveri G., Massa A. Multiband fractal antenna for wireless communication systems for emergency management // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2012. № 26(1).
12. Luo Qi. Design synthesis and miniaturization of multiband and reconfigurable microstrip antenna for future wireless applications. 2013.
13. Dinesh V., Karunakar G. Analysis of microstrip rectangular carpet shaped fractal antenna // In *Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES)*. 2015.
14. Cohen Nathan. Fractals new era in Military antenna design // *Journal of RF design*. 2005.
15. Sanchez-Hernandez David A. Multiband integrated antennas for 4G terminals. Artech House, 2008.
16. Patil Sarang, Vandana Rohokale. Multiband smart fractal antenna design for converged 5G wireless networks // In *Pervasive Computing (ICPC)*. 2015.
17. Raval Bhargavi T., Pratima R. Pimpalgaonkar, Mukesh R. Chaurasia, Trushit Upadhyaya. Review of Ultra-Wideband and Design Studies of Patch Antenna for Ultra-Wideband Communication.
18. Reha Abdelati, Abdelkebir El Amri, Othmane Benhammouch, Ahmed Oulad Said. CPW-fed KOCH SNOWFLAKE fractal antenna for UWB wireless applications // *Transactions on Networks and Communications*. 2014. № 2.
19. Kumar Yadwinder, Surinder Singh. A Compact Multiband Hybrid Fractal Antenna for Multistandard Mobile Wireless Applications // *Wireless Personal Communications* 2015. № 1.
20. Mishra R. K., R. Ghatak, D. R. Poddar. Design formula for sierpinski gasket pre-fractal planar-monopole antennas [antenna designer's notebook] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2008. № 3.
21. Srivastava Dinesh Kumar, Anshika Khanna, Jai Prakash Saini. Design of a wideband gap-coupled modified square fractal antenna // *Journal of Computational Electronics*. 2016. № 1.
22. Takebe Kozaburo, Hidetoshi Miyashita, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, Sang-Seok Lee. Electromagnetic wave absorption characteristics of H-shaped fractal antenna for multi-band microbolometer // In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. 2014.
23. Varadhan Chitra, Jayaram Kizhekke Pakkathillam, Malathi Kanagasabai, Ramprabhu Sivasamy, Rajesh Natarajan, Sandeep Kumar Palaniswamy. Triband antenna structures for RFID systems deploying fractal geometry // *IEEE antennas and wireless propagation letters*. 2013.