



Фракталы - это геометрические формы, рекурсивно повторяющиеся в увеличивающемся либо уменьшающемся масштабах, главным отличием которых является дробная размерность. Такие геометрические объекты были известны задолго до Бенуа Мандельброта, но именно он первым указал на их родство с природно-естественными формами, систематизировал и обобщил этот класс объектов, введя в 1975 г. понятие фрактала (от латинского *fractus* - "расколотый", "сломаный", "нерегулярный"). С его легкой руки [1] открытие фракталов привело к революции не только в геометрии, но и в физике, химии, биологии. Фрактальные технологии нашли применение для сжатия данных, фильтрации сигналов, синтеза трехмерных компьютерных моделей природных ландшафтов. Неудивительно, что во всеобщий фрактальный бум оказалась вовлеченной и теория антенн.

**Говорит Роман Андреевич (РА):**

Когда с десяток лет назад мне удалось приспособить старый дырявый тазик для приема ДМВ, пришлось долго возиться с определением наилучшего места подключения кабеля, да и соседи замучили наивными вопросами о том, зачем я таким оригинальным способом украсил свой балкон. В данном случае вроде есть теория, к тому же и выглядит красиво. Пожалуй, стоит поэкспериментировать с фрактальными антеннами, может что путное и выйдет.



# Фрактальные антенны

В.И. Слюсарь, г. Киев

Среди множества антенных конструкций, используемых сегодня в средствах связи, вынесенный в заголовок статьи тип антенн является сравнительно новым и принципиально отличается от известных решений. Первые публикации, рассматривавшие электродинамику фрактальных структур, появились еще в 80-е годы XX века. Начало же практическому использованию фрактального направления в антенной технике более 10 лет назад положил американский инженер Натан Коэн [2], ныне профессор Бостонского университета и главный технический инспектор компании "Fractal Antenna Systems". Проживая в центре Бостона, дабы обойти запрет городских властей на установку наружных антенн, он решил замаскировать антенну любительской радиостанции под декоративную фигуру из алюминиевой фольги. За основу он взял известную в геометрии кривую Кох (рис.1) [2-4], описание которой в 1904 г. предложил шведский математик Нильс Фабиан Хельге фон Кох (1870 - 1924).

Процесс построения кривой Кох состоит в следующем (рис.2). Исходный отрезок длиной  $z$  делят на 3 равные части, и вместо центральной подставляют излом в виде угла равностороннего треугольника со стороной  $z/3$ . Таким образом получают трехсегментную структуру (образующий шаблон), центральный элемент которой замещен треугольником без основания. Далее процесс повторяют над каждым сегментом в отдельности: во второй итерации на отрезках  $z/3$  строят треугольники со сторонами  $z/9$ , на них - треугольники со сторонами  $z/27$  (третья итерация) и так далее. Каждый шаг синтеза увеличивает длину результирующей кривой в  $4/3$  раза. Однако при этом габаритная высота фрактала не меняется.

Прообразы современных фрактальных технологий появились в антенной технике еще в середине 60-х годов прошлого века, когда были созданы логопериодические и спиральные антенны. Будучи образованными из самоподобных фрагментов, эти антенны, с позиций сегодняшнего дня, также можно обобщить на класс фрактальных, хотя в строгом математическом смысле они являются лишь фракталами первого рода. Быть может, на этом фоне новшество Коэна так и осталось бы декоративной причудой, если бы не выяснилось, что фигура Кох, наклеенная на небольшой лист бумаги, обладает пространственно-частотной избирательностью, не уступающей обычным антеннам.

В настоящее время теория фрактальных антенн находится на этапе становления. В основном исследователи экспериментальным путем, методом проб и ошибок, пытаются применить известные в геометрии и алгебре фракталы к антенным конструкциям. В результате многочисленных экспериментов установлено, что подобного типа антенны позволяют получить практически тот же коэффициент усиления, что и обычные, при меньших габаритных размерах. Например, на рис.3 показаны относительные высоты нескольких итераций фрактала Кох



Рис.1

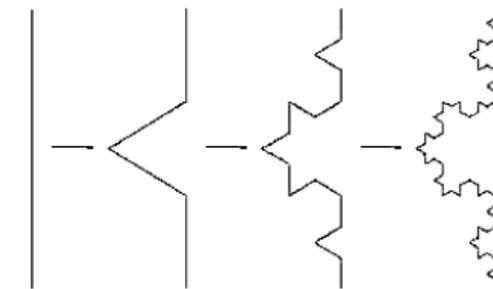


Рис.2

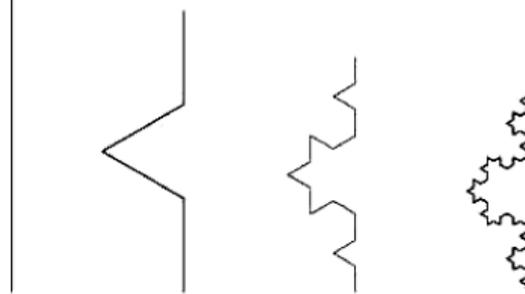


Рис.3

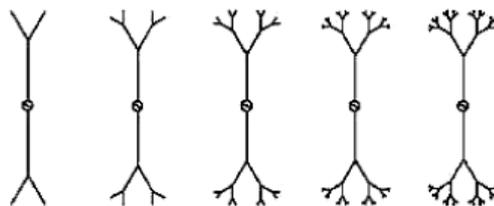


Рис.4

для одной и той же резонансной частоты в сравнении с плечом обычного полуволнового диполя [4].

Эффект миниатюризации антенн наиболее существенно проявляется лишь для нескольких первых итераций фрактала (обыч-

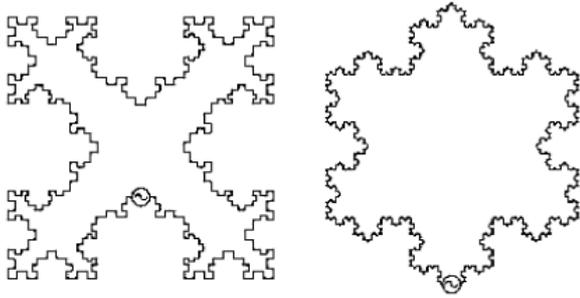


Рис.5

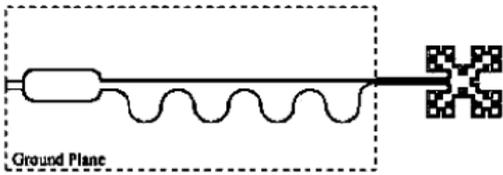


Рис.6

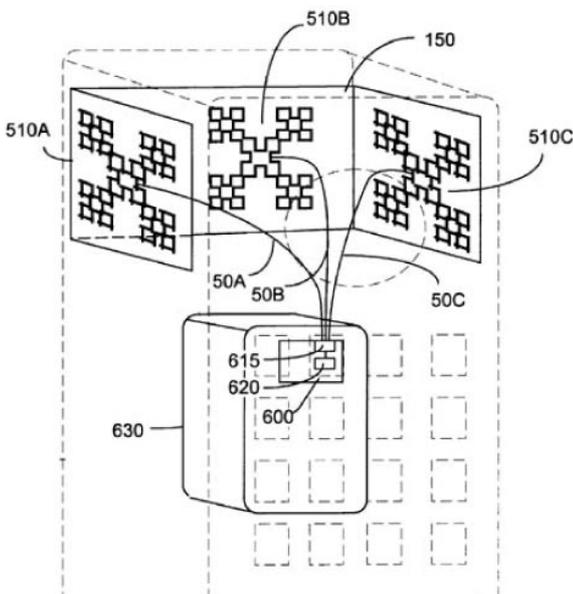


Рис.7

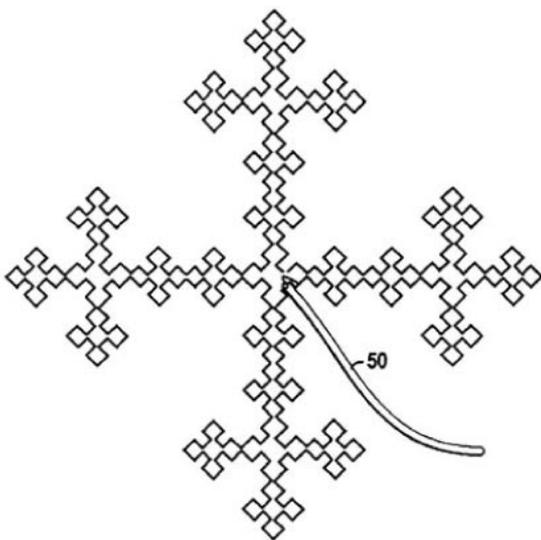


Рис.8

но 5-6), асимптотически приближаясь к некоторому пределу.

Весьма близким по своим свойствам к антенне на основе фрактала Кох является диполь, сформированный по закону ломаной Германа Минковского (1864-1909) [3, 4]. При построении этой антенны вместо системы треугольников на прямой формируют меандры убывающих размеров. При первом изгибе прямолинейного диполя в виде "прямоугольного солитона" его усиление возрастает. Последующие итерации практически не меняют коэффициент усиления, но диапазон рабочих частот диполя расширяется, а сама антенна становится гораздо компактнее. Как и в случае кривой Кох, эффективными являются лишь первые 5-6 шагов: чтобы гнуть провод дальше придется уменьшить его диаметр, а это повысит сопротивление антенны и приведет к потере усиления.

Другой тип фрактала, который можно использовать в качестве диполя, - рекурсивное дерево (рис.4) [4]. Фрактал образуют из простого монополя путем последовательного разбиения его вершин на две ветви под заданным углом (до 60°). Каждая новая итерация увеличивает количество проводящих путей на краях антенны и при неизменной высоте дерева понижает резонансную частоту. Характеристика направленности древовидного диполя в дальней зоне очень близка к ДН прямого диполя.

Дальнейшим развитием антенн типа "двумерное дерево" являются "трехмерные деревья", получаемые, например, путем последовательного разбиения вершин прямого монополя на четверки ветвей в двух ортогональных плоскостях. Наряду с минимизацией габаритов при использовании такого типа антенн становятся излишними дополнительные меры по маскировке их под естественные деревья, как это нередко делалось до сих пор в случае традиционных антенных систем [5].

Все рассмотренные дипольные антенны являются довольно узкополосными. Например, ширина полосы частот на уровне -3 дБ у обычного диполя составляет 2,4% от несущей, для кривой Кох в 5-й итерации этот параметр возрастает до 3,1%, использование двумерного древовидного фрактала 5-й итерации позволяет расширить полосу приема до 4,2% и лишь в варианте трехмерного дерева до 12,7%.

Помимо дипольных структур в качестве узкополосных антенн можно использовать фрактальные рамки, построенные на основе рассмотренных выше кривых Кох и Минковского (рис.5). Традиционные рамочные антенны при малых размерах имеют низкое входное сопротивление, что усложняет их согласование с питающим фидером. Фрактальные же технологии позволяют заметно увеличить сопротивление рамочной антенны на частотах ниже резонансной, упрощая решение задачи ее согласования для нужд радиопеленгации и частотного мониторинга, а также увеличить апертурную эффективность.

Рассмотренные до сих пор варианты антенн ориентированы на проволочную технологию изготовления. Однако их формирование можно осуществлять также печатным монтажом на диэлектрической основе. Вариант подключения микрополосковой петли Минковского через согласующий трансформатор, обеспечивающий поворот фазы на 180° в одной из ветвей, показан на рис.6.

В одном из своих изобретений упомянутый в начале статьи Натан Коэн [6] предлагает размещать внутри мобильной телефонной трубки несколько фрактальных антенн Минковского (рис.7), коммутируемых на вход приемного устройства в зависимости от ориентации их диаграмм направленности на базовую станцию. Как положительный момент при этом отмечается заметное экранящее действие внутреннего содержимого трубки на излучение антенны в направлении головы пользователя. Кстати, в этом же изобретении предложен вариант антенны с вертикальной ориентацией диагонали креста Минковского, что поразительно напоминает внешний вид крестов православных храмов (рис.8).

При комплексном применении фрактальных технологий можно уменьшить расход материалов и массу антенных систем, особенно, если излучатели объединены в антенную решетку. В последнем случае миниатюризация антенных элементов на фрактальной основе позволяет существенно снизить их взаимное влияние за счет увеличения межэлементного зазора.



Другой эффект, получаемый вследствие компактности фрактальных излучателей в антенных решетках, состоит в возможности более плотной упаковки антенных элементов в интересах расширения сектора сканирования. Например, в габаритах пятиэлементной эквидистантной решетки Дольфа-Чебышева с полуволновым межосевым интервалом размещения квадратных излучателей можно расположить семь элементов Минковского (рис.9).

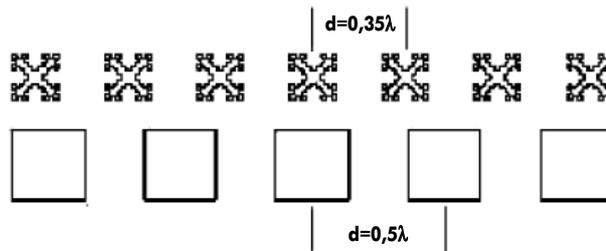


Рис.9

В дополнение к рассмотренным классам сравнительно узкополосных фрактальных конструкций следует остановиться на еще одном типе антенн, в которых самоподобие геометрии приводит к ярко выраженным широкодиапазонным свойствам. Характерным



Рис.10

примером в этом ряду является решетка Серпинского [2-4], на которой впервые были изучены многодиапазонные свойства фрактальных антенн. Данная фигура названа по имени польского математика Вацлава Серпинского (1882-1969), который в 1916 г. впервые исследовал ее свойства.

Процесс формирования такого фрактала (рис.10) на первом шаге состоит в удалении из исходного треугольника центрального треугольного сегмента с вдвое меньшей высотой. В образующихся новых треугольниках на втором шаге снова удаляют центральные части, и далее последовательно повторяют данную процедуру требуемое количество раз.

Свойство самоподобия фрактальных структур обусловило высокую повторяемость их электромагнитных параметров в различных частотных диапазонах. В силу этого, например, в патенте США [7] предложено использовать решетку Серпинского в качестве автомобильной антенны, размещенной на лобовом стекле салона (рис.11). Выполненная из токопроводящей оптически прозрачной пленки, такая конструкция позволяет при необходимости вести прием во всех известных диапазонах частот ЧМ-вещания, осуществлять радиотелефонную и транкинговую связь, беспроводный доступ к широкополосным сетям.

В сотовых радиотелефонах получила распространение так-

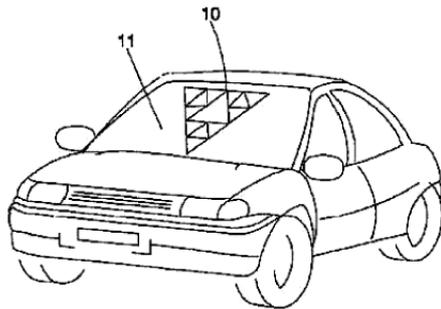


Рис.11

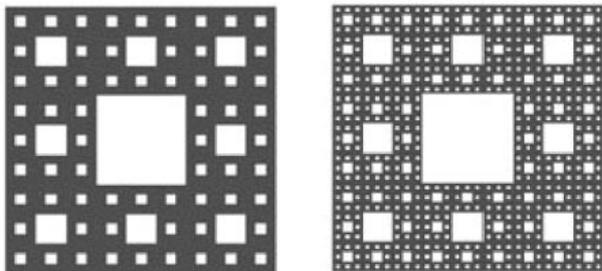


Рис.12

же многодиапазонная фрактальная антенна на основе ковры Серпинского, формируемого, в отличие от рассмотренного решетки, изъятием из исходного квадрата убывающих по величине квадратных сегментов (рис.12). Такая антенна достаточно компактна: она имеет размер меньше обычного слайда (24x36 мм). Ее можно не только устанавливать на плате, но и напылять на внутреннюю поверхность корпуса. Для изготовления таких антенн как правило используют фаббер-технологии трехмерного прототипирования, позволяющие прецизионно формировать миниатюрные антенны любой сложности [8]. Благодаря развитию теории фрактальных антенн серьезное продвижение намечилось и в реализации проектов создания систем на одном чипе с интеграцией на кристалл либо корпус процессора обработки сигналов компактных антенных излучателей. Такие решения довольно перспективны для стандарта HIPERLAN-2 (17,2 ГГц) и других сетей беспроводного доступа. Как и в случае фрактальных деревьев, рассмотренные многодиапазонные антенны можно обобщить на трехмерный случай. Например, развитием ковры Серпинского является фрактальный куб, а решетка - пирамида.

Учитывая отсутствие полноценной теории, роль экспериментов в исследовании этих и других уникальных конструкций остается чрезвычайно важной. Поэтому в заключение, можно призвать всех радиолюбителей приобщиться к решению проблемы анализа и синтеза фрактальных антенных систем. Как знать, может быть на этом пути вас ждут новые открытия.

*Литература*

1. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. - San Francisco, Freeman. - 1983.
2. Yang X., Chiochetti J., Papadopoulos D. and Susman L. Fractal Antenna Elements and Arrays//Applied Microwave & Wireless. - May 1999. - p. 34-46.
3. Горобець Ю. І., Кучко А. М. Вступ до фізики фрактальних структур//Навч. посібн. - Київ. - 2000.
4. John Gianvittorio Fractal Antennas: Design, Characterization, and Applications.- University of California, Los Angeles. - 2000. - 109 p.
5. Федоров П. Н. Мачты-деревья//Конструктор. - 2001. - №2.- С.18.
6. N. Cohen. U.S. Patent № 6140975A. H01Q 1/48. Fractal Antenna Ground Counterpoise, Ground Planes and Loading Elements. - Oct. 31, 2000.
7. WO Patent № 01/82410 A1. H01Q 1/32, 1/36, 5/00. Multilevel Advanced Antenna for Motor Vehicles. - Nov. 1, 2001.
8. Слюсарь В. И. Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант//Конструктор. - 2002. -№ 1. - С. 5-7.