ФРАКТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЙ ТИП "ЛОМАНЫХ" АНТЕНН

Фрактальные антенны – относительно новый класс электрически малых антенн (ЭМА), принципиально отличающийся своей геометрией от известных решений. По сути, традиционная эволюция антенн базировалась на евклидовой геометрии, оперирующей объектами целочисленной размерности (линия, круг, эллипс, параболоид и т. п.). Главное отличие фрактальных геометрических форм – их дробная размерность, что внешне проявляется в рекурсивном повторении в возрастающем либо уменьшаемом масштабах исходных детерминированных или случайных шаблонов. Фрактальные технологии получили распространение при формировании средств фильтрации сигналов, синтезе трехмерных компьютерных моделей природных ландшафтов, сжатии изображений. Вполне естественно, что фрактальная "мода" не обошла стороной и теорию антенн. Тем более, что прообразом современных фрактальных технологий в антенной технике явились предложенные в середине 60-х годов прошлого века логопериодические и спиральные конструкции. Правда, в строгом математическом смысле такие конструкции на момент разработки не имели отношения к фрактальной геометрии, являясь, по сути, лишь фракталами первого рода [1]. Сейчас исследователи, в основном методом проб и ошибок, пытаются использовать известные в геометрии фракталы в антенных решениях. В результате имитационного моделирования и экспериментов установлено, что фрактальные антенны позволяют получить практически тот же коэффициент усиления, что и обычные, но при меньших габаритах, что важно для мобильных приложений. Рассмотрим результаты, полученные в области создания фрактальных антенн самых различных типов.

В.Слюсар

Первые публикации по электродинамике фрактальных структур относятся к 80-м годам прошлого века. В публикациях по истории фрактальных антенн обычно упоминается работа ученых Университета штата Пенсильвания Я.Кима и Д.Джаггарда (Y.Kim and D.L.Jaggard) [2]. Первенство в теоретических исследованиях возможности применения фрактальных форм для формирования многополосных по частоте антенн приписывают ученому Технологического университета Каталонии К.Пуенте (C.Puente) [3, 4]. Начало же практическому применению фрактальных антенн в 1995 году положил, как принято считать, американский инженер Натан Коэн (N.Cohen) [1]. Чтобы обойти запрет бостонских властей устанавливать на домах наружные антенны, он замаскировал антенну своей радиостанции под декоративную фигуру, выполненную на основе фрактальной ломаной, описанной шведским математиком Хельге фон Кохом (Helge von Koch) в 1904 году [1, 5, 6].

Опубликованные Коэном результаты исследований характеристик новой антенной конструкции [7] привлекли внимание специалистов. Благодаря усилиям многих исследователей сегодня теория фрактальных антенн превратилась в самостоятельный, довольно развитый аппарат синтеза и анализа ЭМА.

ЗАПОЛНЯЮЩИЕ ПРОСТРАНСТВО КРИВЫЕ. ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛА КОХА

Первой конструкцией фрактальной антенны с наиболее полно изученными электромагнитными и направленными свойствами стала антенна на основе префрактальной кривой Коха. При построении линии Коха исходный отрезок длиной z, именуемый инициатором фрактала, делится на три равные части. Центральный участок заменяют равносторонним треугольником со стороной z/3. В результате образуется ломаная, состоящая из четырех звеньев длиной z/3 каждый (рис.1). Этот процесс повторяется для каждого отдельного сегмента ломаной линии: во второй итерации на отрезках z/3 строятся треугольники со сторонами z/9, на них – треугольники со сторонами z/27 (третья итерация) и т.д. Предельная кривая и

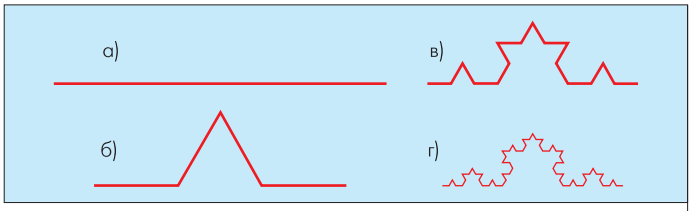


Рис.1. Построение кривой Коха: а) первая, б) вторая, в) третья и г) четвертая итерации

есть кривая Коха. Каждый шаг синтеза увеличивает длину результирующей кривой в соответствии с выражением [2]:

$$L = z\left(\frac{4}{3}\right)^n, \qquad (1)$$

где n – число итераций, z – высота образующего шаблона (длина исходного отрезка).

Этот эффект миниатюризации антенн является существенным лишь при пяти-шести первых итерациях фрактала.

Строго говоря, в антенных решениях используются не подлинные фракталы, а лишь несколько первых их итерационных форм, получивших в геометрии название кривых, заполняющих пространство (Space-Filling Curves, SFC) [8, 9] или плоскость (Plane-Filling Curves, PFC) [10]. Реже используется термин "префракталы". Все эти понятия применительно к антенным конструкциям могут употребляться как синонимы. Такова исторически сложившаяся терминология теории фрактальных антенн, хотя она и не соответствует принятым математическим определениям.

SFC могут применяться в качестве шаблонов для изготовления монополей и плеч диполей, формирования топологии печатных антенн, частотно-селективных поверхностей (Frequency Selection Surfaces, FSS) или обечаек зеркальных рефлекторов, построения контуров рамочных антенн и профилей апертуры рупоров, а также фрезеровки пазов в щелевых антеннах. В англоязычной литературе соответствующие антенны нередко называют "space-filling antenna" (SFA) (антенны, заполняющие пространство).

В случае проволочных антенн самопересечение SFC допускается только в начальном (или конечном) пункте [9]. Иначе говоря, фрактальная линия может иметь вид замкнутого контура, но ни одна из ее частей не может быть замкнутым фрагментом. Отсутствие точек самоконтакта в SFC-объектах позволяет говорить о них как о "самоизбегающих" кривых [11]. Отсюда, кстати, происходит еще одно название этих ломаных линий – FASS-кривые (space-Filling self-Avoidance Simplicity Similarity – самоуклоняющиеся кривые подобных сегментов, заполняющих пространство) [10].

Существует и другое ограничение всех типов фрактальных антенн [9]: сегменты используемых в них SFC-линий должны быть короче одной десятой рабочей длины волны антенны в свободном пространстве. При этом желательно, чтобы общее число связанных SFC-сегментов в антенных топологиях превышало 10.

Экспериментальные данные, полученные специалистами компании Cushcraft для кривой Коха, четырех итераций меандра и спиральной антенны, позволяют сопоставить электрические свойства антенны Коха с другими излучателями с периодической структурой [12]. Все сопоставленные излучатели обладали многочастотными свойствами, что проявилось в наличии периодических резонансов на графиках импедансов. Однако для многодиапазонных приложений более всего пригоден фрактал Коха, у которого с ростом частоты пиковые значения реактивных и активных сопротивлений уменьшаются, тогда как у меандра и спирали они возрастают.

В целом следует отметить, что теоретически представить механизм взаимодействия фрактальной приемной антенны и падающих на нее электромагнитных волн сложно из-за отсутствия аналитического описания волновых процессов в проводнике со сложной топологией. В такой ситуации основные параметры фрактальных антенн целесообразно определять путем математического моделирования. Численному исследованию электромагнитных процессов, протекающих во фрактальных антеннах и при их взаимодействии с предметами окружающей среды, посвящено достаточно много работ. Их подробный обзор и анализ выходит за рамки данной статьи. Общий недостаток всех известных публикаций по результатам исследований фрактальных антенн – отсутствие указаний на статистическую обработку результатов экспериментов. В частности, в них не приводятся сведения о доверительных интервалах для измеренных параметров, что не позволяет судить о точности полученных в итоге эмпирических соотношений. В целом же, статистическая теория фрактальных антенн при расчете их численными методами пока еще ждет своих разработчиков.

Пример построения первой самоподобной фрактальной кривой продемонстрировал в 1890 году итальянский математик Джузеппе Пеано (Peano) [8, 13, 14]. Предложенная им линия в пределе полностью заполняет квадрат, обегая все его точки (рис.2). В дальнейшем были найдены и другие подобные объекты, получившие по имени первооткрывателя их семейства обобщающее название "кривые Пеано". Правда, вследствие чисто аналитического описания кривой, предложенного Пеано [13], возникла некоторая путаница в классификации SFC-линий. На самом деле наименование "кривые Пеано" следовало бы давать лишь оригинальным кривым, построение которых соответствует аналитике, опубликованной Пеано (рис.3) [13]. Поэтому для конкретизации

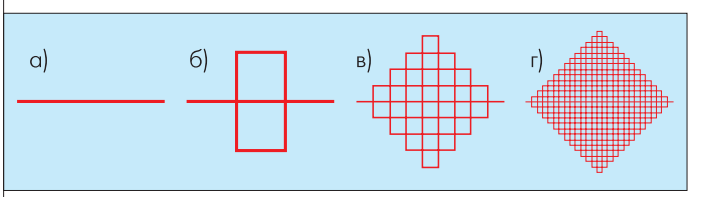


Рис.2. Итерации кривой Пеано: а) исходная линия, б) первая, в) вторая и г) третья итерации

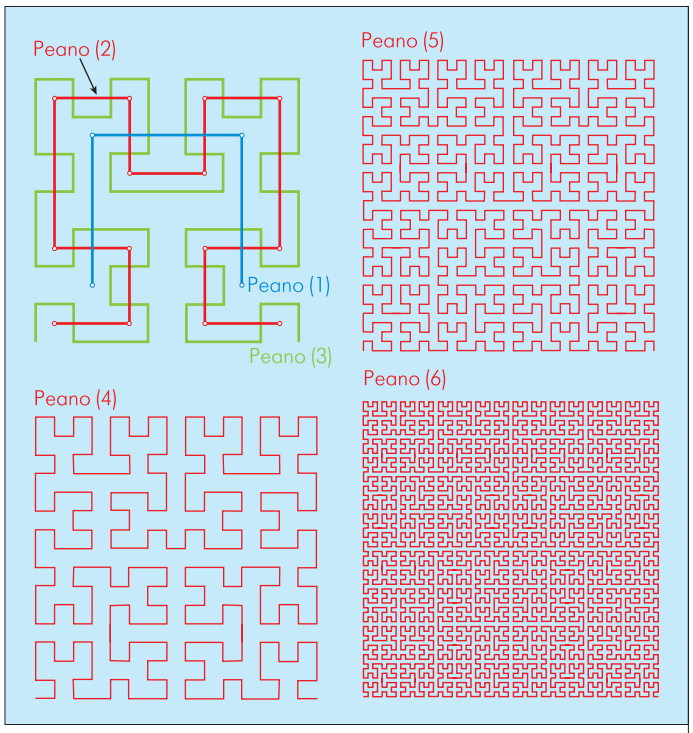


Рис.3. Итерации ломаной, предложенной Гильбертом в 1891 году [8]. Нередко трактуется как рекурсивная кривая Пеано [15]

рассматриваемых объектов антенной техники при описании той или иной формы фрактальной антенны следует, по возможности, упоминать и имена авторов, предложивших соответствующую модификацию SFC. Это тем более важно, что согласно подсчетам [16], число известных разновидностей SFC приближается к трем сотням, причем эта цифра не является предельной.

Следует отметить, что кривая Пеано (см. рис.2) в исходном виде вполне пригодна для изготовления щелей в стенках волновода, печатных и других апертурных фрактальных антенн, но не приемлема для построения проволочной антенны, поскольку имеет соприкасающиеся участки. Поэтому специалистами компании Fractus была предложена ее модификация [9], получившая название "Peanodec" (рис.4).

Представленная на рис.1 антенна по фракталу Коха – лишь один из вариантов, реализуемый при использовании равностороннего инициирующего треугольника рекурсии, т.е. угол θ при его основании (indentation angle или "угол углубления") равен 60°. Такой вариант фрактала Коха принято называть стандартным. Вполне естественно задаться вопросом, можно ли использовать модификации фрактала с иными значениями этого угла. Утвердительный и обстоятельный ответ на данный вопрос содержится в работе ученого Пенсильванского университета К.Дж.Виной (K.J.Vinoy) [10]. Виной предложил рассматривать угол при основании инициирующего треугольника в качестве параметра, характеризующего антенную конструкцию. Изменяя этот угол, можно получать аналогичные рекурсивные кривые разной размерности (рис.5). Кривые сохраняют свойство самоподобия, однако результирующая длина линии может быть различной, что влияет на характеристики антенны. Виной первым исследовал корреляцию между свойствами антенны и размерностью обобщенного фрактала Коха D, определяемой в общем случае зависимостью

$$D = \frac{\log 4}{\log\left(2\left(1+\cos\theta\right)\right)}.$$

Было показано, что по мере увеличения угла θ размерность фрактала также увеличивается, и при θ→90° приближается к 2. Следует отметить, что используемое в теории фрактальных антенн понятие размерности несколько противоречит понятиям, принятым в геометрии, где эта мера применима только к бесконечно рекурсивным объектам.

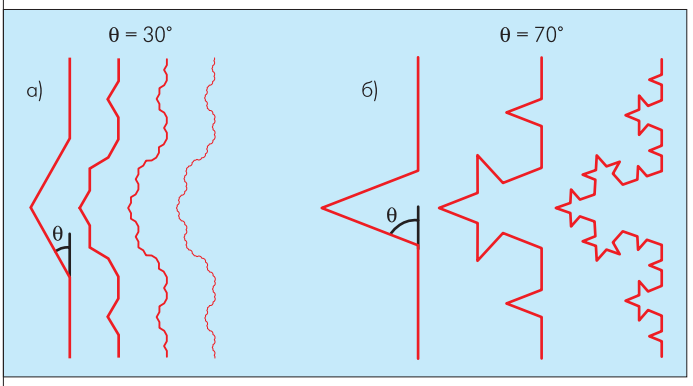


Рис.5. Построение кривой Коха с углом θ а) 30° и б) 70° при основании треугольника в генераторе фрактала

С увеличением размерности нелинейно возрастает и общая длина ломаной линии, определяемая соотношением [17]:

$$L_{n,\theta} = \left(\frac{2}{1+\cos\theta}\right)^{n} L_0, \qquad (2)$$

где L_0 – длина линейного диполя, расстояние между концами которого то же, что и у ломаной Коха, n – номер итерации. Переход от θ = 60° к θ = 80° на шестой итерации позволяет увеличить общую длину префрактала более чем в четыре раза.

Как и следовало ожидать, между рекурсивной размерностью и такими свойствами антенны, как первичная резонансная частота, внутреннее сопротивление на резонансе и мно-

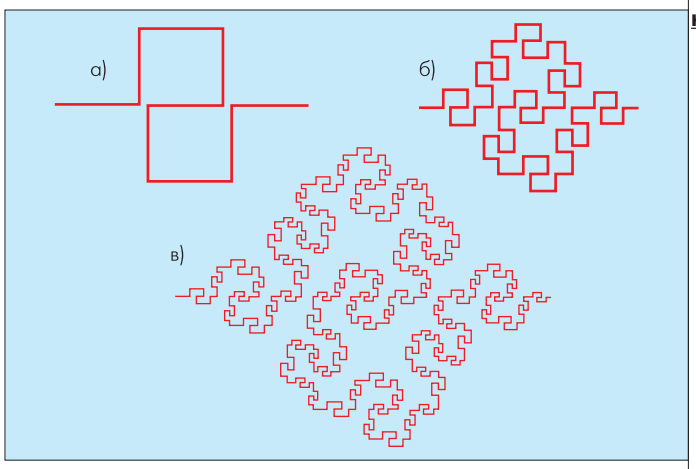


Рис.4. Вариант модификации кривой Пеано ("Peanodec"): а) первая, б) вторая в) третья итерации [9]

годиапазонные характеристики, существует прямая связь. На основе компьютерных расчетов Виной [10] получил зависимость первой резонансной частоты диполя Коха f_k от размерности префрактала D, номера итерации n и резонансной частоты прямолинейного диполя f_D той же высоты, что и ломаная Коха (по крайним точкам):

$$f_K = f_D \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{n-1}{n}\right)\frac{\ln D}{D}\right]. \qquad (3)$$

При расчетах он использовал модель диполя с радиусом проводника 0,1 мм, сегментированного на прямолинейные отрезки длиной 0,5 мм. Общая высота диполя (интервал между его концами) была равна 10 см. Из расчетов Виной следует, что для реализуемых на практике рассмотренных параметров диполя Коха резонансную частоту можно снизить до 30% от значения резонансной частоты 10-см прямолинейного диполя [10].

Несмотря на огромную работу, проделанную Виной, остается неясным, сохранится ли в силе зависимость (3) при других значениях диаметра проводника. Во всяком случае, Виной утверждает, что нормирование резонансной частоты диполя Коха относительно частоты прямолинейного диполя позволяет нивелировать влияние радиуса проводника, которое, как он надеется, одинаково для обоих диполей. Однако не исключено, что при итерациях большего порядка из-за взаимного влияния близко расположенных сегментов фрактала могут возникнуть паразитные электродинамические эффекты, сужающие область применения выражения (3). Это подтверждает и работа ученых Политехнического университета Каталонии [17], которые объяснили замедление эффекта снижения резонансной частоты с увеличением числа итераций префрактала "просачиванием" электромагнитных волн между близко расположенными изломами линии. По их гипотезе, поверхностная волна сегментов префрактала, размеры которых много меньше длины волны, "отрывается" от конфигурации проводника антенны (рис.6) и достигает точки подключения фидера быстрее, чем если бы она распространялась, строго следуя геометрии электропроводного материала.

Одна из серьезных проблем, ограничивающая практическое использование стандартного диполя Коха, – уменьшение его внутреннего сопротивления с увеличением числа итераций. Согласно Виной, этот недостаток можно преодолеть,

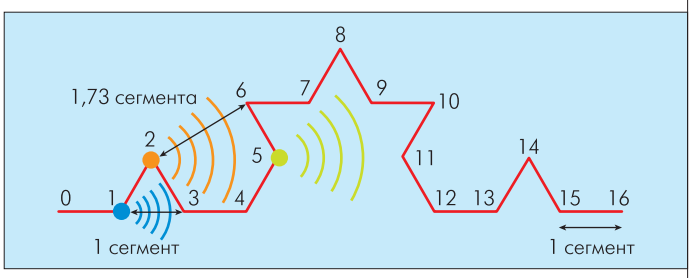


Рис.6.Эффект "просачивания" электромагнитной волны

варьируя значение угла θ. В общем случае для внутреннего сопротивления диполя Коха на первой резонансной частоте справедливо приближенное соотношение, приведенное в [10]:

$$R_K = R_0 \cdot \left[1 - \left(1 + 0{,}9 \cdot \ln n\right)\frac{\ln D}{D}\right]^2, \qquad (4)$$

где R_0 – внутреннее сопротивление линейного диполя (D=1), которое в рассматриваемом случае равно 72 Ом.

Выражения (3) и (4) можно использовать для определения геометрических параметров антенны с требуемыми значениями резонансной частоты и внутреннего сопротивления.

Многополосные свойства диполя Коха также весьма чувствительны к значению угла θ. С увеличением θ номиналы резонансных частот сближаются, а, следовательно, растет их число в заданном спектральном диапазоне (рис.7). При этом, чем выше номер итерации, тем сильнее это сближение.

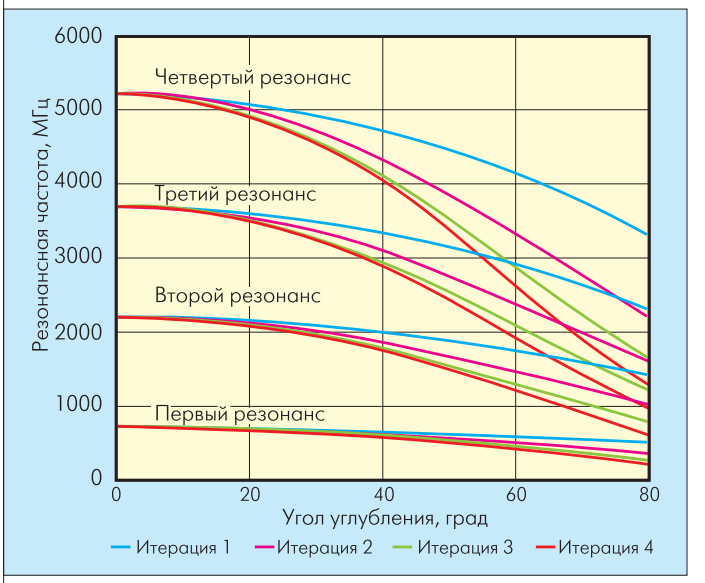


Рис.7. Эффект сужения интервала между резонансными частотами

В Университете штата Пенсильвания был исследован еще один важный аспект диполя Коха – влияние несимметричности его запитки на степень приближения внутреннего сопротивления антенны к 50 Ом [10]. В линейных диполях точка питания часто располагается асимметрично [18]. Этот же подход может быть использован и для фрактальной антенны в виде кривой Коха, внутреннее сопротивление которой меньше нормативных значений. Так, в третьей итерации внутреннее сопротивление стандартного диполя Коха (θ = 60°) без учета потерь при подключении фидера в центре составляет 28 Ом. При перемещении фидера к одному из концов антенны можно получить сопротивление 50 Ом.

Все рассмотренные до сих пор конфигурации ломаной Коха синтезировались рекурсивно. Однако, согласно Виной, если нарушить это правило, в частности, задавая разные углы θ на каждой новой итерации, свойства антенны можно изменять с большей гибкостью [10]. Для сохранения

подобия целесообразно выбрать регулярную схему изменения угла θ. Например, изменять его по линейному закону $\theta_n = \theta_{n-1} - \Delta\theta \cdot n$, где n – номер итерации, Δθ – приращение угла в основании треугольника. Вариантом такого принципа построения ломаной является следующая последовательность углов: $\theta_1 = 20^\circ$ для первой итерации, $\theta_2 = 10^\circ$ для второй и т.д. Конфигурация вибратора в этом случае не будет строго рекурсивной, однако все его сегменты, синтезированные в одной итерации, будут иметь одинаковые размеры и форму. Поэтому геометрия такой гибридной ломаной воспринимается как самоподобная. При малом числе итераций наряду с отрицательным приращением Δθ может применяться квадратичное либо иное нелинейное изменение угла θ_n.

Рассмотренный подход позволяет задавать распределение резонансных частот антенны и значения ее внутреннего сопротивления. Однако перестановка порядка изменения значений углов θ в итерациях не дает эквивалентного результата. Как отмечено в работах [10, 19], для одной и той же высоты ломаной линии различные комбинации одинаковых углов, к примеру $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$ и $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$ (рис.8), дают одинаковую развернутую длину префракталов. Но, против ожидания, полное совпадение параметров не обеспечивает тождества резонансных частот и идентичность многополосных свойств антенн. Причина – изменение внутреннего сопротивления сегментов ломаной, т.е. ключевую роль играет конфигурация проводника, а не его размеры.

Перспективное применение антенн с топологией Коха – MIMO-системы связи (системы связи со многими входами и выходами). Для миниатюризации антенных решеток абонентских терминалов в таких средствах коммуникации специалисты Лаборатории электромагнетизма Университета Патраса (Греция) [20] предложили фрактальное подобие перевернутой L-антенны (ILA). Суть идеи сводится к изгибу вибратора Коха на 90° в точке, делящей его на сегменты с соотношением длин 2:1. Для мобильных средств связи с частотой несущей ~2,4 Гц габариты такой антенны в печатном исполнении составляют 12,33×10,16 мм (~λ/10×λ/12), полоса пропускания – ~20% и КПД – 93% [20]. Диаграмма направленности по азимуту почти равномерна, коэффициент усиления в пересчете ко входу фидера составляет ~3,4 дБ. Правда, как отмечено в статье [20], работа таких печатных элементов в составе решетки (рис.9) сопровождается снижением их КПД по сравнению с единичным элементом [21]. Так, на частоте 2,4 ГГц КПД согнутого на 90° монополя Коха снижается с 93 до 72%, а на частоте 5,2 ГГц – с 90 до 80%. Несколько лучше обстоит дело с взаимным влиянием антенн высокочастотной полосы: на частоте 5,25 ГГц развязка между элементами, образующими центральную пару антенн, составляет 10 дБ. Что касается взаимного влияния в паре соседних разнодиапазонных элементов, то в зависимости от частоты сигнала развязка изменяется от 11 дБ (на 2,45 ГГц) до 15 дБ (на частоте 5,25 ГГц). Причина ухудшения эффективности работы антенн – взаимное влияние печатных элементов.

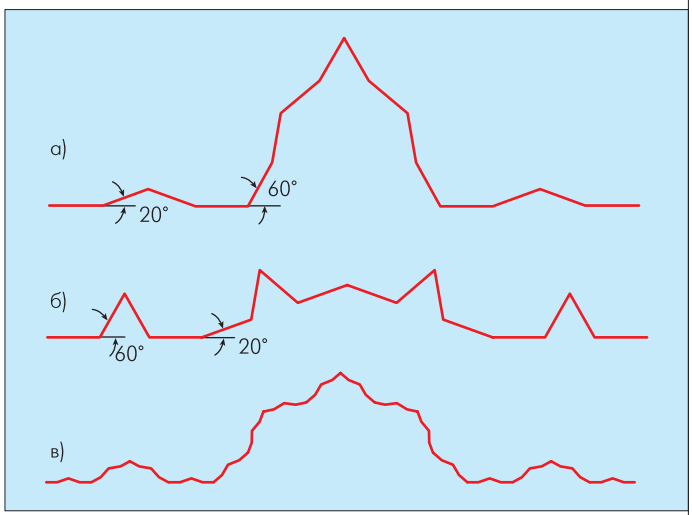


Рис.8. Обобщенные префракталы Коха второй итерации с отрицательным приращением Δθ (а), положительным приращением Δθ (б) и третьей итерации с отрицательным приращением Δθ = 40°, 30°, 20° (в)

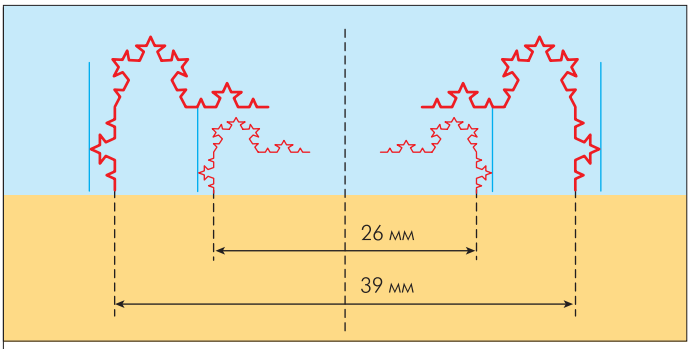


Рис.9. Пример двухдиапазонной (2,45 и 5,25 ГГц) антенной решетки

Таким образом, возможность выбора множества разнообразных параметров антенной системы на основе ломаной Коха позволяет при проектировании удовлетворять различные требования, предъявляемые к значению внутреннего сопротивления и распределению резонансных частот. Однако, поскольку взаимозависимость рекурсивной размерности и характеристик антенны может быть получена только для определенной геометрии, справедливость рассмотренных свойств для других рекурсивных конфигураций нуждается в дополнительном исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yang X., Chiochetti J., Papadopoulos D. and Susman L.** Fractal Antenna Elements and Arrays//Applied Microwave & Wireless. May 1999, p. 34–46.— http://www.amwireless.com/archives/1999/May1999/may1999-p34.pdf.
2. **Kim Y. and Jaggard D.L.** The Fractal Random Array.– Proc. of the IEEE, Sept. 1986, v.74, N 9, p.1278–1280,.
3. **Puente C.** Fractal Design of Multiband Antenna Arrays.– Elec. Eng. Dept. Univ. Illinois, Urbana-Champaign, ECE 477 term project, Dec.1993.
4. **Puente C., Pous R.** Diseco Fractal de Agrupaciones de Antenas, IX Simposium Nacional URSI, Las Palmas. – Sept. 1994, v.I, p. 227–231.
5. **Gianvittorio J. P.** Fractal Antennas: Design, Characterization, and Applications.– University of California, Los Angeles, 2000, 109 p. – http://www.antlab.ee.ucla.edu/~johng/fractals/master_thesis.pdf.

6. **Helge von Koch.** Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction geometrique elementaire.– Arkiv for Matematik, 1904, N1,. p.681–704.
7. **Cohen N.** Fractal Antennas: Part 1.– Communications Quarterly, Summer 1995, p.7–22.
8. **Sagan H.** Space-Filling Curves. – Springer-Verlag, New York. 1994, 193 p.
9. WO Patent № 01/54225 A1. International Patent Classification7 H01Q 1/36. Space-Filling Miniature Antennas// Puente Baliarda, Carles; Rozan, Edouard, Jean Louis; Anguera Pros, Jaime. –July 26, 2001.
10. **Vinoy K.J.** Fractal Shaped Antenna Elements for Wide- and Multi-band Wireless Applications. – Thesis of PhD Dissertation. The Pennsylvania State University. 2002, 169 p. – http://etda.libraries.psu.edu/theses/ approved/ WorldWideFiles/ETD-190/Thesis_Vinoy.pdf.
11. **Werner D.H., Kuhirun W., and Werner P.L.** A New Design Methodology for Modular Broadband Arrays Based on Fractal Tilings – IEEE Topical Conference on Wireless Communications Technology. Honolulu, Oct 15-17, 2003, – http://hcac.hawaii.edu/tcwct03/papers/ s19p02.pdf.
12. **Best S.R.** The Koch Fractal Monopole Antenna: The Significance of Fractal Geometry in Determining Antenna Performance.– Proceedings of the 2001 Antenna Applications Symposium. Allerton Park Monticello, Illinois. Sept.19–21, 2000. –www.ecs.umass.edu/ece/allerton/ papers2001/2001-p194.pdf.
13. **Peano G.** Sur une courbe, qui remplit toute une aire plane.– Math. Ann. 36 (1890), p. 157–160.
14. Тороджадзе М., Бендукидзе А. Кривые Пеано.– Научно-популярный физико-математический журнал "Квант".–1974, N8, с.13–16.
15. **Jacobs E.P.** Fractales ou comment const un monstre mathema. – http://www.mathkang.org/pdf/fractales.pdf.
16. **Maas A.** Raumfuellende Kurven. – Technische Universitaet Muenchen Institut fuer Informatik. – Arbeit im Rahmen des Hauptseminars Oktalbaeume und Hierarchische Basen. Juni 12, 2003. 16p. –wwwzenger. informatik.tu-muenchen.de/lehre/seminare/oktal/SS03/ ausarbeitungen/maas.pdf.
17. **Gonzalez-Arbesu J.M., Rius J.M. and Romeu J.** Comments on: On the relationship between fractal dimension and the performance of multiresonant dipole antennas using Koch curves.– IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – June 2004, v.52, Issue 6, p.1626–1627. – http://eprints.iisc.ernet.in/archive/00004202/01/reply_to_ comments.pdf.
18. **Stutzman W.L. and Thiele G.A.** Antenna theory and Design. – New York: John Wiley, 1981.
19. **Vinoy K.J.; Abraham J.K.; Varadan, V.K.** Reply to comments on "On the Relationship between Fractal Dimension and the Performance of Multi-Resonant Dipole Antennas using Koch Curves".– IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – June 2004, v.52, Issue 6, p.1627–1628. – http://eprints.iisc.ernet.in/ archive/00004202/01/reply_to_comments.pdf.
20. **Tsachtsiris G., Soras C., Karaboikis M. and Makios V.** A Printed Folded Koch Monopole Antenna for Wireless Devices.– Microwave and Optical Technology Letters. – March 5, 2004, v.40, N5, p.374–378.
21. **Karaboikis M., Soras C., Tsachtsiris G. and Makios V.** Four-element Printed Monopole Antenna Systems for Diversity and MIMO Terminal Devices.– Proceedings of the 17th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications,– Dubrovnik. Oct.1–3, 2003, p. 193–196.