

РАДИОТЕХНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.396.677.8

Цалиев Т.А.
Цалиев Т.А.
Tsaliev T.A.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАКТАЛЬНЫХ ДИПОЛЕЙ

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАКТАЛЬНИХ ДИПОЛІВ

ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FRACTAL DIPOLES

Аннотация. Рассмотрены свойства проволочных антенн, размеры которых соизмеримы с длиной волны, построенных в виде ломаных фрактальных конструкций. Путем компьютерного моделирования рассчитаны и на этой основе проанализированы частотные зависимости входного импеданса, коэффициента направленного действия (КНД) и модуля коэффициента отражения. Приведены диаграммы направленности антенн на резонансных частотах.

Анотація. Розглянуті властивості дровових антен, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі, побудованих на основі ломаних фрактальних конструкцій. Шляхом комп'ютерного моделювання розраховані й проаналізовані частотні залежності вхідного імпедансу, коефіцієнта спрямованої дії (КСД) та модуля коефіцієнта відбиття. Побудовані діаграми спрямованості антен на резонансних частотах.

Summary. Properties of wire antennas, which sizes are commensurable with the wavelength, constructed on the basis of linear fractal designs. On the basis of computer modeling frequency dependences of antenna impedance, directivity and the reflectivity are designed and analyzed. Patterns of antennas on resonant frequencies are resulted.

Решение проблемы построения новых конструкций антенн, исследование их характеристик жизненно необходимо в процессе все более ускоряющегося развития радиоэлектронных средств различного назначения. Так развитие беспроводных технологий и общее стремление к миниатюризации радиоэлектронных устройств определили особый научный, практический интерес и актуальность технического применения антенн фрактальной геометрии.

Понятие фрактала, как структуры, состоящей из частей, которые в каком-то смысле подобны целому, было впервые предложено американским ученым Бенуа Б. Мандельбротом [1]. Первые упоминания о применении фрактальных множеств в создании антенных решеток появились в работе [2]. Разнообразные примеры использования фрактальной технологии в радиосистемах упоминаются в многочисленных работах А.А. Потапова и его учеников [3,4].

Начало практического применения фрактального направления в антенной технике было заложено, в частности, в работах и патентах Натана Коэна [5,6]. В работе [7] автором была рассмотрена возможность построения малоразмерных антенных элементов с круговой поляризацией излучаемого поля на основе фрактальных элементов в форме рамок треугольной, квадратной и круговой формы.

В этой связи можно указать на перспективы практического применения фрактальных антенн в таких направлениях, как беспроводные сети (WiFi, WiMAX), мобильная связь (CDMA, GSM), мобильное телевидение, радиочастотная идентификация (RFID).

Однако до настоящего времени недостаточно изучены многочисленные разновидности фрактальных антенных элементов (префракталов [3]) в виде диполей разнообразной формы – их основные характеристики: частотные зависимости входного импеданса, коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента отражения, направленные свойства.

Целью настоящей статьи является исследование указанных выше характеристик проволочных антенных элементов, построенных на основе часто упоминаемых фрактальных кривых, в том числе их сравнение с аналогичными характеристиками обычного симметричного вибратора (диполя).

1. Геометрия конструктивных фракталов. Как известно [1], фракталы являются элементами фрактальных множеств, которые могут быть образованы различным образом: *детерминированные* (т.е. построенные по определенному, заданному алгоритму) и *случайные* фрактальные множества.

Главным отличием элементов фрактального множества является дробная (фрактальная) размерность h_f [1], причем эта размерность больше, чем топологическая размерность h_t такого элемента (так, для прямой линии $h_t = 1$, а для линейных фракталов $1 < h_f \leq 2$), т.е. $h_f > h_t$.

Элементы фрактального множества (иногда называемые *конструктивными* [8] или *физическими* фракталами [3]) обладают свойством самоподобия и обычно строятся на основе рекурсивной процедуры, причем свойство точного самоподобия характерно лишь для *регулярных* [9] фракталов. Для построения конструктивных фракталов необходимо задание *инициатора фрактала* и *генератора фрактала*, повторяющегося при каждом уменьшении масштаба.

Регулярные фракталы могут, в частности, создаваться по такому алгоритму: отрезок прямой линии (инициатор фрактала, нулевая итерация) разбивается на m *одинаковых* частей. Одна из них затем заменяется ломаной линией – генератором фрактала (образуя фрактал первой итерации – ломанную кривую, состоящую из N отрезков). Затем каждый из прямолинейных отрезков этой кривой опять разбивается на m частей и процедура (в уменьшенном масштабе) повторяется, образуя следующую итерацию фрактала.

Фракталы, образуемые при этом, составляют однородное [1] конструктивное фрактальное множество. Все элементы однородного фрактального множества характеризуются [1] *одинаковой фрактальной размерностью*, определяемой из выражения

$$h_f = \frac{\ln(N)}{\ln(m)}, \quad (1)$$

где m – количество звеньев инициатора; N – количество звеньев (частей), образующих сам фрактал. Здесь и далее фрактальная размерность обозначена символом h_f (в математике обычно применяют символ D , однако в антенной теории D обычно означает КНД).

На рис. 1...4 показана конфигурация исследуемых в данной работе диполей – антенн фрактальной геометрии. Инициатор фрактала во всех рассмотренных случаях представляет собой прямолинейный отрезок длиной $L = \lambda_0 / 2$, где λ_0 – длина волны, распространяющейся в свободном пространстве (длина инициатора соответствует длине полуволнового диполя на частоте $f_0 = 300$ МГц). Маленьким кружком на этих рисунках отмечено положение точки возбуждения диполя.

На рис. 1 изображена система координат, а также симметричный вибратор (рис. 1, а), а также фрактальных диполей, образованных в результате первой (рис. 1, б) и второй (рис. 1, в) итераций триадной кривой Коха. Так принято называть кривую по имени шведского математика Хельге фон Кох (Helge von Koch), впервые описавшего ее.

При первой итерации инициатор фрактала (нулевая итерация) разбивается на три ($m = 3$) равных отрезка длиной $b = L / m$ и средний отрезок заменяется (первая итерация) на равносторонний треугольник без основания – генератор фрактала. Затем итерационная процедура повторяется, каждый прямолинейный отрезок полученной кривой опять разбивается на три одинаковые части и т.д.

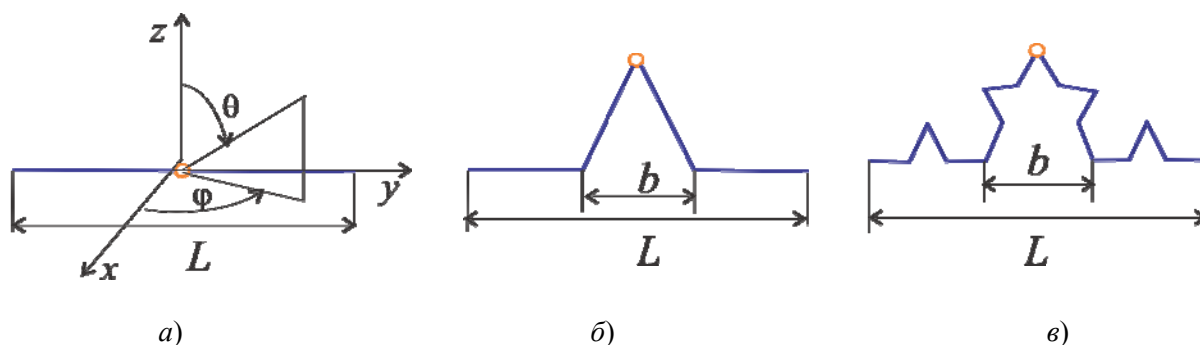


Рисунок 1 – Симметричный вибратор и фрактальные диполи Коха

Симметричный вибратор в данном случае можно считать нулевой итерацией (инициатором) фрактальных элементов рассматриваемых в данной статье. Фрактальная размерность элемента нулевой итерации совпадает с топологической и равна единице.

Видно, что периметр фрактального элемента первой итерации в $4/3$ раза больше длины инициатора и фрактальная размерность множества его элементов, построенных на основе кривой фон Коха, равна

$$h_f = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = \frac{\ln(16)}{\ln(9)} = \dots = 1,262.$$

Периметр префрактала в каждой последующей итерации также в $4/3$ раза больше предыдущего. Для удобства упоминания в дальнейшем будем обозначать фракталы Коха символом K_m^N .

На рис. 2 изображены модели фрактальных диполей образованных в результате первой (рис. 2, а) и второй (рис. 2, б) итераций в виде кривой, называемой Б. Мандельбротом [1] «квадратичной кривой Коха» или «кривой подобной Пеано». Здесь инициатор также делится на три части, однако средний отрезок заменяется теперь квадратом без основания со стороной $b = L/3$. Будем обозначать такие квадратичные фракталы символом P_m^N .

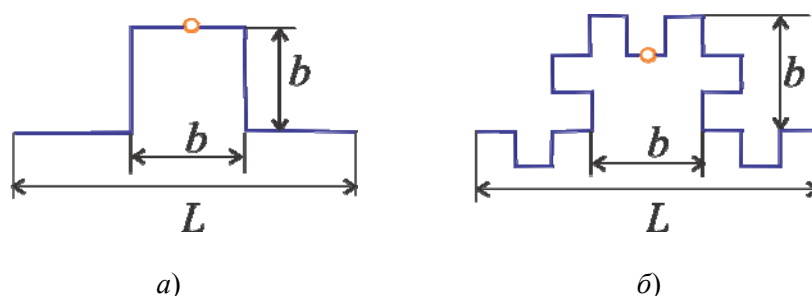


Рисунок 2 – Фрактальные диполи P_m^N

Здесь периметр фрактального элемента первой итерации (префрактала) в $5/3$ раза больше длины инициатора, а фрактальная размерность множества элементов, построенных на основе данной кривой, равна

$$h_f(P_3^5) = \frac{\ln(5)}{\ln(3)} = h_f(P_9^{25}) = \frac{\ln(25)}{\ln(9)} = \dots = 1,465.$$

Для диполей, изображенных на рис. 1 и 2, характерна зеркальная симметрия, причем плоскость симметрии проходит через точку возбуждения диполя и перпендикулярна плоскости, в которой лежит данная кривая.

Обратим также внимание на тот факт, что при построении префрактальных кривых в антенных приложениях следует избегать случаев самокасания и самопересечения линий. Если в случае первой итерации (рис. 2, а) не столь важно в каком направлении будет ориентирован генератор фрактала, условно говоря, внутрь (*in*) или наружу (*out*).

Однако, начиная со второй итерации, становится понятно, что избежать самокасаний можно только чередуя ориентацию генераторов: например, «*out-in-out*» (рис. 2, б) или «*in-out-in*» и так далее. Следовательно, с помощью рассмотренной выше итерационной процедуры можно образовать, по крайней мере, два сравнительно простых фрактальных подмножества без самокасания и самопересечения.

Б. Мандельброт в монографии [1] привел примеры фрактальных квадратичных кривых с генератором фрактала в виде квадрата без основания, таких как фрактал Минковского (рис. 3), а также фракталы (рис. 4), названных им кривыми «типа Пеано» или заполняющими плоскость (*Plane-Filling Curves, PFC*) (будем обозначать подобные фракталы символами M_m^N и PFC_m^N соответственно).

Изображенные на рис. 3 модели диполей построены на основе фрактальной кривой первой (M_4^8 ; рис. 3, а) и второй (M_{16}^{64} ; рис. 3, б) итераций. Здесь периметр фрактального элемента первой

итерации в 2 раза больше длины инициатора, а фрактальная размерность множества элементов, построенных на основе кривой Минковского, равна

$$h_f(M_m^N) = \frac{\ln(8)}{\ln(4)} = \frac{\ln(64)}{\ln(16)} = \dots = 1,5.$$

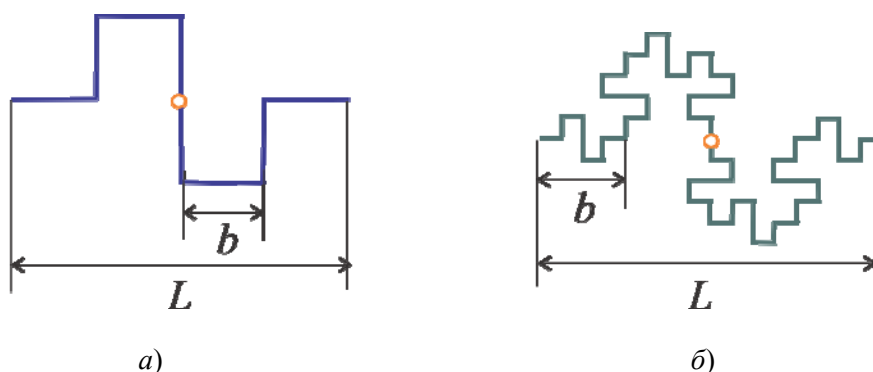


Рисунок 3 – Фрактальные диполи Минковского

Другие модели диполей построены на основе PFC_8^{32} (рис. 4, а) и PFC_{14}^{98} (рис. 4, б), их размерности равны соответственно

$$h_f(PFC_8^{32}) = \frac{\ln(32)}{\ln(8)} = 1,667 \text{ и } h_f(PFC_{14}^{98}) = \frac{\ln(98)}{\ln(14)} = 1,737.$$

Особенностью моделей диполей, изображенных на рис. 3 и 4, является то, что для них характерна осевая симметрия, причем ось вращения проходит через точку возбуждения диполя и перпендикулярна плоскости, в которой расположена сама кривая.

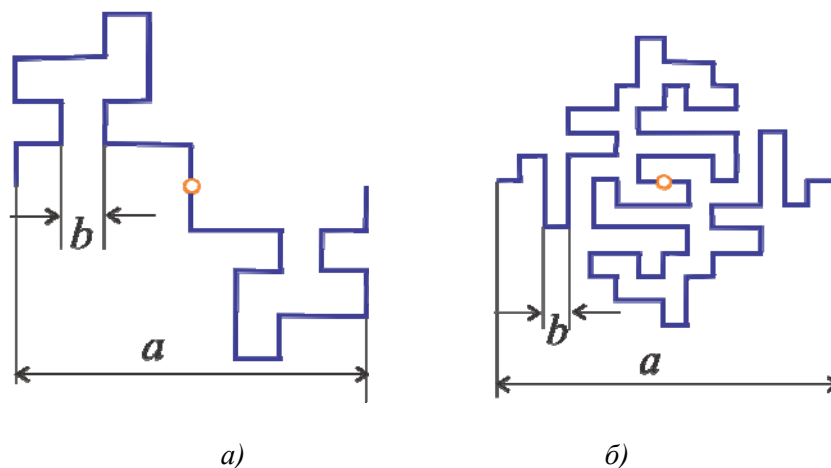


Рисунок 4 – Фрактальные диполи на основе PFC

2. Методика исследования. В процессе компьютерного моделирования в среде программного комплекса FEKO [10] исследовались характеристики моделей фрактальных диполей изображенных на рис. 1... 4. С этой целью, среде FEKO задавались характерные размеры, требуемое число отрезков и координаты угловых точек соответствующих фрактальных кривых.

В расчетном модуле комплекса FEKO для решения интегрального уравнения, в тонко проволочном приближении, используется метод моментов, согласно которому производится разбиение линейных проводящих элементов на малые по сравнению с длиной волны сегменты. Это обеспечивает приемлемую точность при определении амплитудно-фазового распределения токов на таких элементах и впоследствии позволяет достаточно корректно рассчитать требуемые характеристики антенных элементов в заданной полосе частот.

В приводимых ниже результатах компьютерного моделирования частота возбуждения варьировалась в пределах от 5 до 900 МГц с интервалом 2 МГц. Точность получаемых результатов зависит от размера Δ сегмента разбиения, который, по крайней мере, должен удовлетворять условию $\Delta < \lambda/10$, где λ – длина волны. Поэтому радиус проводника всех антенных элементов выбирался равным $\lambda_0/300$, а длина сегмента разбиения $\Delta = \lambda_0/60$, что обеспечивает нужную точность даже на максимальной частоте.

Корректность сравнения результатов достигалась путем надлежащего выбора геометрических параметров исследуемых моделей, а именно так, чтобы длина L инициатора для каждого фрактального диполя соответствовала длине полуволнового симметричного вибратора $L = \lambda_0/2$, где λ_0 – фиксированная длина волны, соответствующая частоте $f_0 = 300$ МГц.

3. Результаты численного моделирования. Частотные зависимости *входного импеданса* исследуемых моделей фрактальных диполей показаны на рис. 5...8 (размерности сопротивлений указаны в омах). Графические изображения, приведенные на каждом из рисунков, позволяют сравнивать характеристики фрактальных элементов первой и второй итерации между собой, а также с аналогичными характеристиками симметричного вибратора (диполя).

Частотные зависимости входного импеданса всех рассматриваемых диполей характеризуются чередованием частот «последовательного» и «параллельного» резонансов ($\text{Im} Z = 0$), причем минимальной среди них является частота первого последовательного резонанса. В области параллельного резонанса имеют место резкие изменения импеданса, которые в значительной мере зависят от поперечных размеров проводника. Поэтому в дальнейшем будем анализировать характеристики исследуемых антенных элементов преимущественно в области последовательного резонанса.

При последовательном резонансе величина $\text{Re} Z$ мала, тогда как в области параллельного резонанса она максимальна. По скорости изменения $\text{Im} Z$ в области последовательного резонанса, а также по виду зависимости $\text{Re} Z$ в области параллельного резонанса, можно приближенно сравнивать ширину рабочей полосы частот.

На графиках, изображенных на рис. 5, наглядно проявляются особенности фрактальных диполей Коха. С ростом номера итерации имеет место:

- смещение всех резонансных точек в область более низких частот;
- возрастание максимумов $\text{Re} Z$;
- рост числа резонансных точек и их «сближение»;
- сужение полосы рабочих частот в области параллельного резонанса.

В области последовательного резонанса изменение ширины рабочей полосы частот (наклон кривой $\text{Im} Z$) менее заметно.

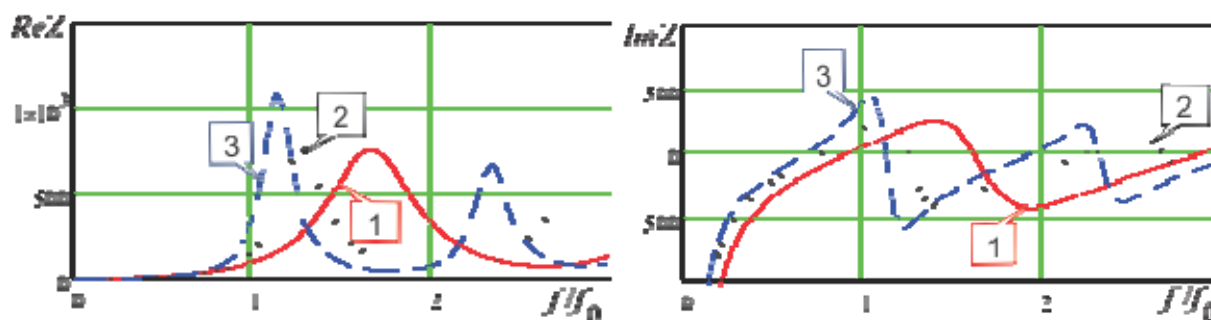


Рисунок 5 – Частотная зависимость входного импеданса:

1 – симметричный вибратор; 2 – K_3^4 ; 3 – K_9^{16}

Для квадратичных префракталов (рис. 6) отмеченные выше особенности проявляются в большей степени:

- смещение всех резонансных точек в область более низких частот увеличилось;
- максимумы $\text{Re} Z$ резко возросли;
- более сужена ширина полоса частот в области параллельного резонанса сузилась;
- наклон кривой $\text{Im} Z$ при последовательном резонансе меняется резко;
- более выражено «сближение» резонансных точек.

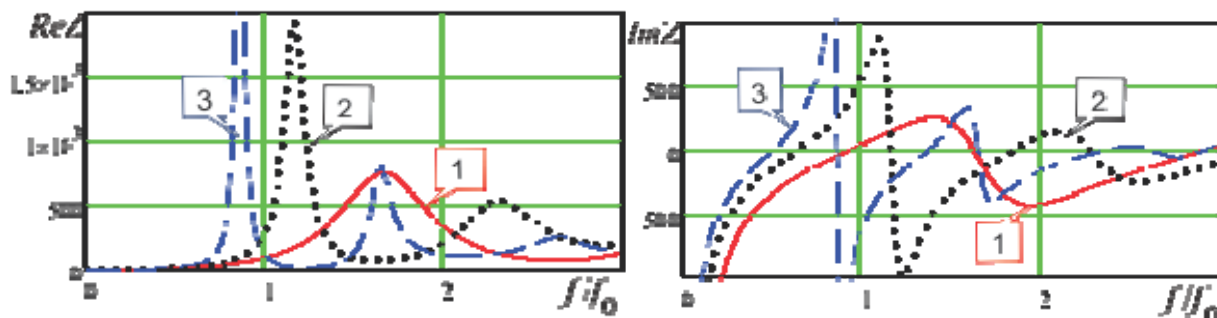


Рисунок 6 – Частотная зависимость входного импеданса:

1 – симметричный вибратор; 2 – P_3^5 ; 3 – P_9^{25}

Можно отметить общую закономерность – увеличение числа звеньев префрактала (рис. 7 и 8) приводит:

- к еще большему смещению резонансных точек и росту их числа;
- к еще большему росту максимумов ReZ и сужению полосы частот в этой области;
- к еще большему «сближению» резонансных точек.

Однако нельзя утверждать, что все эти эффекты просто обусловлены увеличением периметра префрактала. По-видимому, определенный вклад вносят также факторы взаимного влияния элементов фрактала.

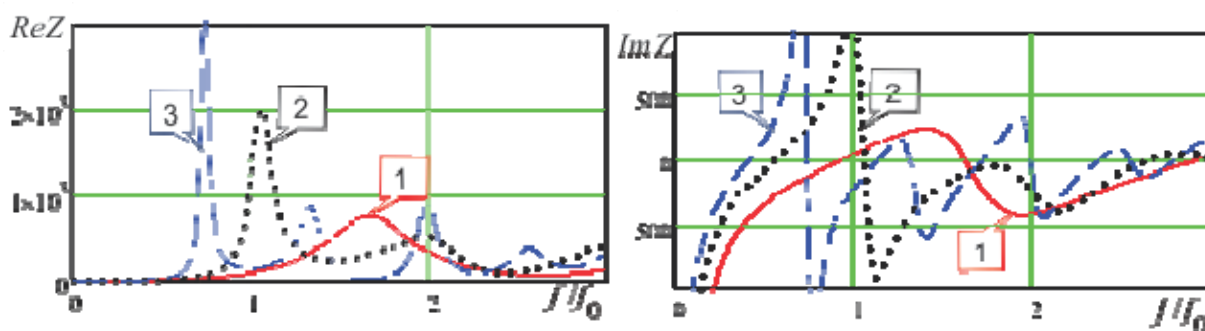


Рисунок 7 – Частотная зависимость входного импеданса:

1 – симметричный вибратор; 2 – M_4^8 ; 3 – M_{16}^{64}

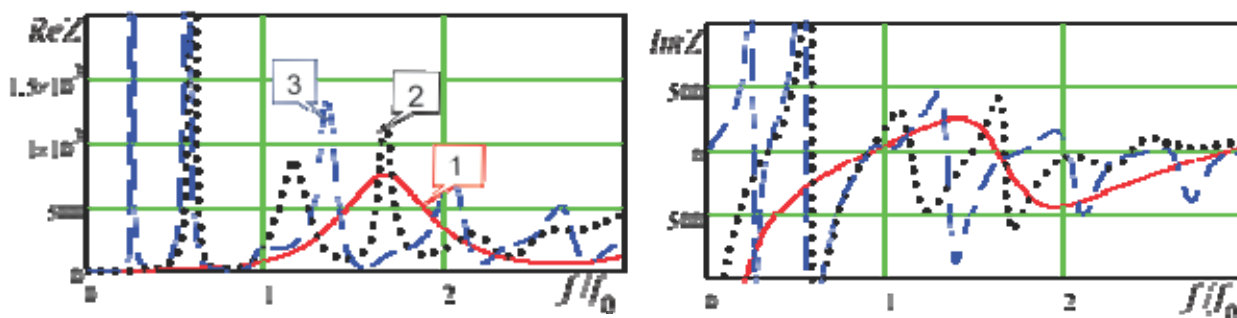


Рисунок 8 – Частотная зависимость входного импеданса:

1 – симметричный вибратор; 2 – PFC_8^{32} ; 3 – PFC_{14}^{98}

Особый интерес представляют графики, изображенные на рис. 9...12.

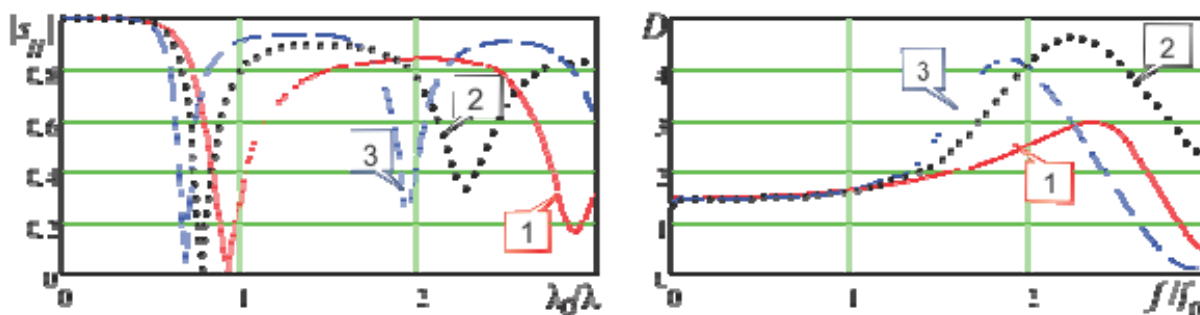


Рисунок 9 – Модуль коэффициента отражения и КНД ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0$):

1 – симметричный вибратор, $R_n = 73 \text{ Ом}$; 2 – K_3^4 , $R_n = 45 \text{ Ом}$; 3 – K_9^{16} , $R_n = 35 \text{ Ом}$

Так частотная зависимость коэффициента отражения $|s_{11}|$ (левый рисунок) определяет: величину R_n , обеспечивающую минимум $|s_{11}|$, положение и величину смещения точек последовательного резонанса.

Зависимости $|s_{11}|$ от частоты, представленные на рис. 9, позволяют нагляднее оценить изменения свойств фрактальных диполей, соответствующих разным итерациям кривой. Анализируя их можно отметить такие особенности:

- положение резонансных точек никак не связано с характерными размерами инициатора либо элементов фрактального диполя (в отличие от симметричного вибратора);
- с увеличением номера итерации величина сопротивления (R_n), при котором достигается минимум коэффициента отражения в области первого резонанса, уменьшается;
- с ростом резонансной частоты наблюдается заметное увеличение R_n .

Частотные зависимости, изображенные на рис. 9 справа, иллюстрируют характер изменения КНД фрактальных диполей Коха в горизонтальной плоскости:

- при $f/f_0 \leq 1$ их КНД совпадает с КНД симметричного вибратора, а направленные свойства проявляются только при $f/f_0 > 1$;
- максимальное значение КНД имеет место в области второго последовательного резонанса;
- полоса рабочих частот, определяемая по КНД, гораздо шире, чем та же полоса, определяемая по $|s_{11}|$.

При этом стоит подчеркнуть, что максимум КНД симметричного вибратора соответствует значениям $L \cong 1,18\lambda$; $R_n = \text{Re } Z = 145 \text{ Ом}$; $\text{Im } Z = -425 \text{ Ом}$ и $|s_{11}| = 0,84$.

В отличие от этого, для фрактального диполя Коха K_3^4 при отношении $L/\lambda \cong 1,13$; $R_n = 90 \text{ Ом}$; $\text{Im } Z \cong 0$; $|s_{11}| < 0,1$ и $D = 4,65$, а для K_9^{16} при $L/\lambda \cong 0,95$ эти же величины составляют: $R_n \cong 75 \text{ Ом}$; $|s_{11}| < 0,1$ и $D = 4,25$.

Для квадратичных префракталов аналогичные зависимости (рис. 10) в сравнении с (рис. 9) имеют некоторые отличия:

- увеличилось смещение всех резонансных областей и положений максимумов КНД;
- КНД совпадает с КНД симметричного вибратора только при $f/f_0 \leq 0,3$;
- сопротивления нагрузки, при которых коэффициент отражения в области первого резонанса минимален, почти в два раза меньше;
- количество резонансов возросло, а «сближение» резонансных точек более выражено.

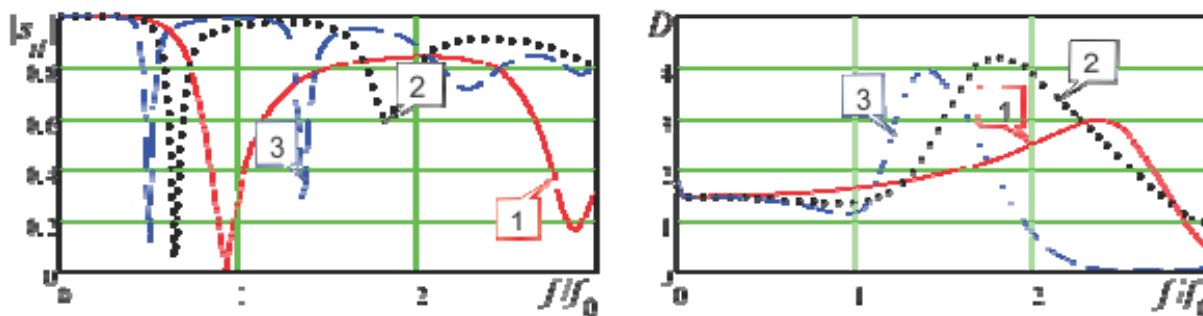


Рисунок 10 – Модуль коэффициента отражения и КНД ($\theta = 90^\circ$; $\varphi = 0$):

1 – симметричный вибратор $R_H = 73 \text{ Ом}$; 2 – P_3^5 $R_H = 25 \text{ Ом}$; 3 – P_9^{25} $R_H = 20 \text{ Ом}$

Можно отметить такую закономерность – увеличение числа звеньев префрактала (рис. 11 и 12) приводит:

- к росту числа резонансных областей и к еще большему их сдвигу в область нижних частот;
- к сужению полосы частот, определяемому по КНД;
- максимумы КНД в горизонтальной плоскости примерно соответствуют областям *второго* последовательного резонанса.

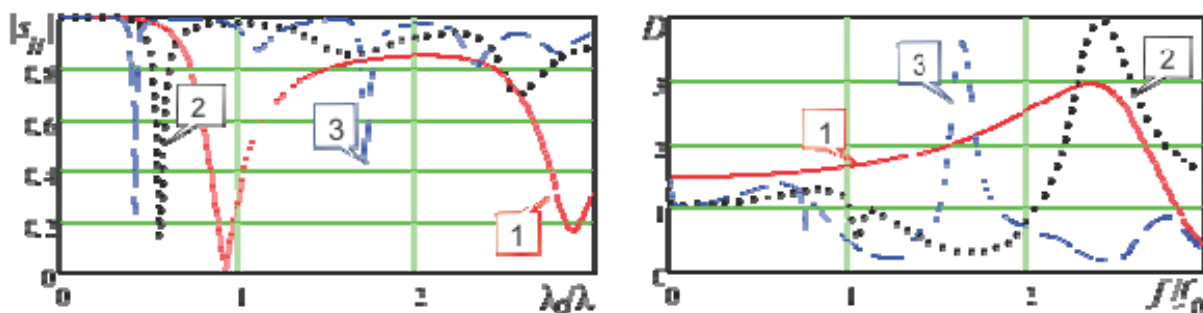


Рисунок 11 – Модуль коэффициента отражения и КНД ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0$):

1 – симметричный вибратор, $R_H = 73 \text{ Ом}$; 2 – M_4^8 , $R_H = 20 \text{ Ом}$; 3 – M_{16}^{64} , $R_H = 12 \text{ Ом}$

Сравнивая рис. 10 и 11 отметим интересный факт, что для фрактальных диполей Минковского (обладающих осевой симметрией) независимо от номера итерации максимум КНД расположен примерно в области *третьего* последовательного резонанса (в отличие от фрактальных диполей P_3^5 и P_9^{25} , обладающих зеркальной симметрией).

Расчеты показали, что для PFC_8^{32} (рис. 12) первый резонанс наступает при $L/\lambda \cong 0,17$ и $R_H = 20$. Однако, с увеличением числа звеньев, что имеет место для фрактального диполя PFC_{14}^{98} , кривая еще более смещается влево, выходя за пределы рисунка, и в рассматриваемом диапазоне частот первый последовательный резонанс оказывается при $L/\lambda \cong 0,21$ и $R_H = 12 \text{ Ом}$.

В горизонтальной плоскости (xOy) максимум КНД для диполей на основе PFC снижается (по сравнению с фракталами Минковского). Кроме того для PFC_8^{32} сама область максимума смещена в область *пятого* резонанса, а направленность фрактала на основе PFC_{14}^{98} слабо выражены.

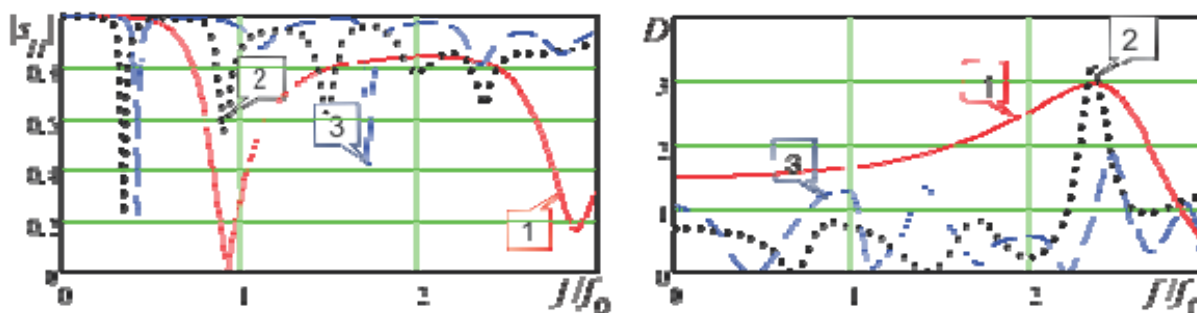


Рисунок 12 – Модуль коэффициента отражения и КНД ($\theta = 90^\circ$; $\varphi = 0$):

1 – симметричный вибратор $R_H = 73$ Ом; 2 – PFC_8^{32} $R_H = 20$ Ом; 3 – PFC_{14}^{98} $R_H = 12$ Ом

При рассмотрении частотных зависимостей коэффициента отражения, изображенных слева на рис. 9...12, видно, что в области первых резонансов у фрактальных диполей рабочая полоса частот (по абсолютной величине) меньше чем у симметричного вибратора.

Однако, если рассматривать относительную полосу частот, то такой вывод не всегда верен. На это указывают данные табл. 1, где приведены сведения о частотах первых двух последовательных резонансов (f_{01}, f_{02}) и относительной полосе рабочих частот (Δf), определяемой в процентах по уровню КСВ = 2.

Таблица 1 – Частотные параметры фрактальных диполей

Тип диполя	Итерация	f_{01} , МГц	Δf_{01}	f_{02} , МГц	Δf_{02}
фрактальный K_3^4	1	240	10,2	690	12,17
фрактальный K_9^{16}	2	210	7,73	585	6,3
фрактальный P_3^5	1	196	5,1	553	9,7
фрактальный P_9^{25}	2	151	3,57	411	3,41
фрактальный M_4^8	1	168	4,17	530	25,13
фрактальный M_{16}^{64}	2	124	3,47	341	12,9
фрактальный PFC_8^{32}	1	169	4,02	463	16,8
фрактальный PFC_{14}^{98}	1	212	2,8	273	6,2
симметричный вибратор	0	290	6,2	870	9,14

Исходя из этого можно указать на определенные преимущества фрактальных диполей по сравнению с симметричным вибратором. Отметим среди них такие, как понижение резонансных частот (в особенности для фракталов второй итерации), расширение полосы частот в области второго последовательного резонанса (а для фракталов K_3^4 , K_9^{16} и в области первого резонанса).

Фрактальные диполи с большим значением фрактальной размерности и повышенным числом звеньев (такие, как M_{16}^{64} и PFC_{14}^{98}) при $f/f_0 > 1$ в направлениях близких к нормали ($\theta \sim 0^\circ$ и $\theta \sim 180^\circ$) формируют излучение преимущественно эллиптической поляризации. Эти особенности иллюстрируют рис. 13 и 14. На рис. 13 показаны частотные зависимости КНД для поля правой круговой поляризации в направлении $\theta = 0$ (для сравнения там же показана аналогичная зависимость для турникетной антенны).

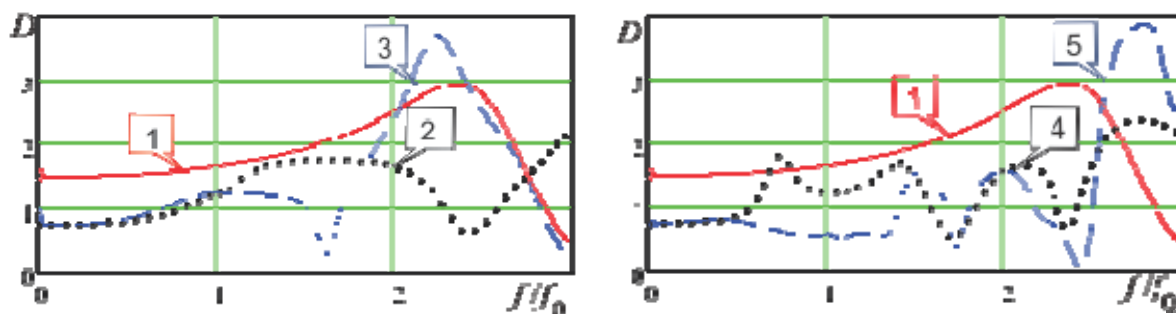


Рисунок 13 – КНД в плоскости xOz ($\theta = 0$):

1 – турникет; 2 – M_4^8 ; 3 – M_{16}^{64} ; 4 – PFC_8^{32} ; 5 – PFC_{14}^{98}

Приведенные зависимости показывают, что после второй итерации фрактальные диполи, по сравнению с турникетным антенным элементом, имеют более высокое значение максимального КНД.

Кроме того, фрактальные диполи на основе M_{16}^{64} и PFC_{14}^{98} отличаются от турникета тем, что при формировании поля круговой поляризации им требуется только один источник возбуждения, при этом максимальный КНД примерно на 25% больше. На этой основе возможно создание двухчастотных антенн, обеспечивающих на нижней частоте слабо направленное излучение линейной поляризации в горизонтальной плоскости и на более высокой частоте – направленное излучение поля эллиптической поляризации в вертикальной плоскости

На рис. 14 показаны зависимости коэффициента эллиптичности k_e от частоты и от координатного угла θ (положительные и отрицательные значения соответствуют правой и левой эллиптической поляризации).

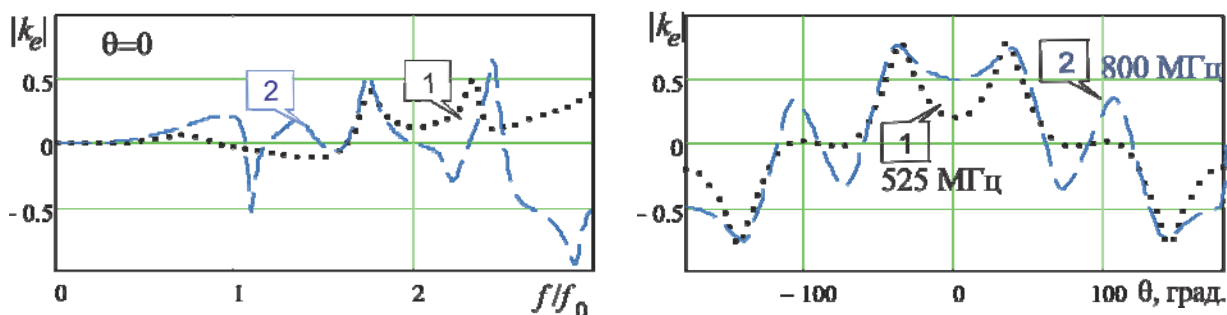


Рисунок 14 – Коэффициент эллиптичности: 1 – P_8^{32} ; 2 – P_{14}^{98}

Об изменениях направленных свойств рассмотренных моделей фрактальных диполей можно судить по графикам, изображенным на рис. 15...18. Видно, что в области первого резонанса диаграмма направленности (ДН) фрактальных диполей, обладающих зеркальной симметрией, мало отличается от ДН симметричного вибратора (рис. 19).

Однако стоит отметить одну особенность, в большей степени проявляющуюся у диполей P_3^5 и P_9^{25} : повышенный уровень излучения вдоль оси инициатора фрактала, а по форме ДН в этой плоскости начинает приближаться к эллипсу. В области второго последовательного резонанса главный лепесток ДН сужается, и появляются боковые лепестки, уровень которых возрастает с увеличением номера итерации.

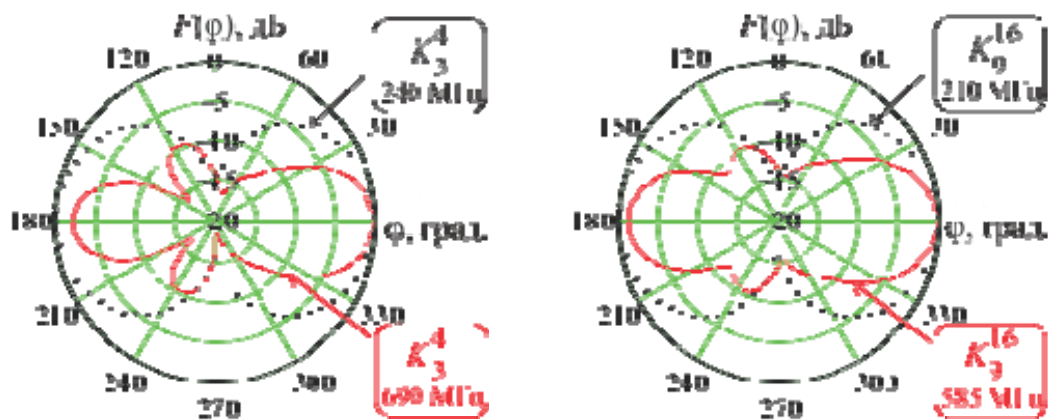


Рисунок 15 – Диаграммы направленности в плоскости xOy

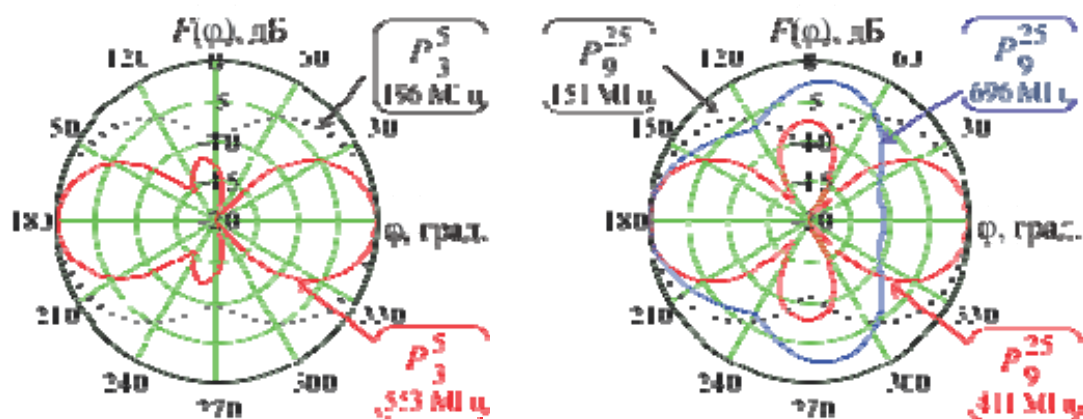
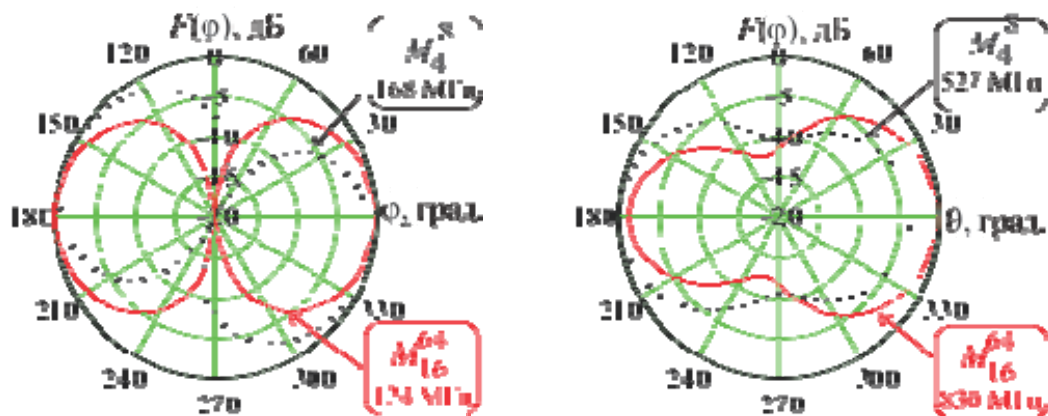


Рисунок 16 – Диаграммы направленности в плоскости xOy :

Диаграммы направленности фрактальных диполей с осевой симметрией изображены на рис. 17 и 18. Интересной особенностью их является то, что в плоскости xOy на частотах первого резонанса главные лепестки ДН могут быть немного асимметричными, а сама диаграмма повернута вокруг оси z (рис. 17, *a* и рис.18, *a*), причем вариации частоты оказывают влияние на ориентацию ДН.

Об их направленных свойствах в плоскости xOz можно судить по диаграммам для поля правой круговой поляризации, изображенным на рис. 17, *б* и 18, *б*.



а) б)
Рисунок 17 – Диаграммы направленности в плоскости xOy (а) xOz (б)

Из них видно, что для диполей сформированных на основе кривых Минковского и *PFC* излучение поля круговой поляризации происходит на частотах высших резонансов преимущественно в направлении нормали к плоскости расположения излучающей структуры и по мере увеличения фрактальной размерности излучение становится все более однонаправленным (рис. 18, б).

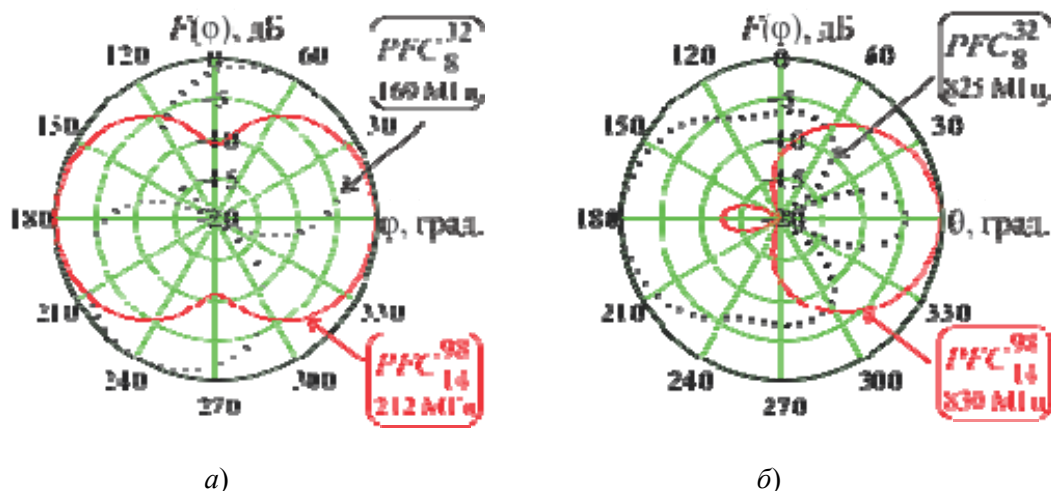


Рисунок 18 – Диаграммы направленности в плоскости x_0y (а), x_0z (б)

Причем, как и в случае плоских спиралей, ДН для поля ортогональной поляризации ориентирована в обратном направлении.

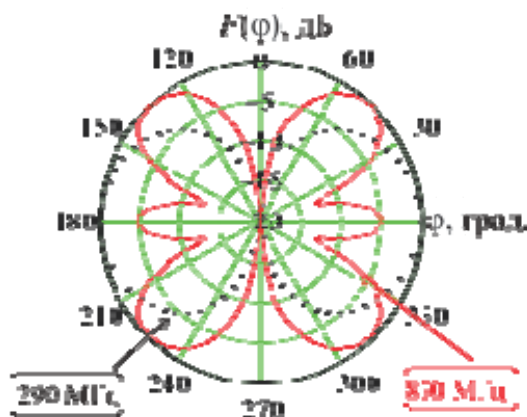


Рисунок 19 – Диаграммы направленности симметричного вибратора в плоскости x_0y

В заключение нужно отметить, что в данной работе описаны результаты компьютерного моделирования электродинамических характеристик фрактальных диполей, выполненных в виде плоских проволочных конструкций на основе первых двух итераций фрактальных кривых Коха, Минковского, Пеано, а также описанных Мандельбротом. Сделать более совершенными знания о свойствах рассмотренных здесь фрактальных диполей, как моделей антенных элементов, помогает сравнение их характеристик между собой и с аналогичными характеристиками линейного симметричного вибратора.

Основываясь на результатах данной работы можно указать возможные направления дальнейших исследований, например, исследование аналогичных характеристик фрактальных диполей построенных на основе последующих итераций упомянутых выше кривых, при вариации геометрических параметров генераторов фракталов на основе рассмотренных в данной работе или иных топологий.

Интерес представляет также создание на их основе однонаправленных антенных элементов и сочетания нескольких таких элементов, в том числе с плоским экраном.

Литература

1. *Mandelbrot B.B.* The Fractals Geometry of Nature / B. B. Mandelbrot – N.Y.: Freeman, 1982. – 468 p. (Рус. пер.: Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы; пер. с англ. / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.).
2. *Kim Y.* The Fractal Random Array [Текст] /Y. Kim, D.L. Jaggard // Proc. IEEE. – 1986. – 74(9). – Pp.1278-1280 (Рус. пер.: Ким Й., Джаггард Д.Л. Фрактальные случайные решетки; пер. с англ. / Й. Ким, Д.Л. Джаггард //ТИИЭР. – 1986. – Т. 74. – № 9. – С. 124-126.
3. *Потапов А.А.* Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике: Современное состояние и развитие [Электронный ресурс] / А.А. Потапов. – Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №1. – Режим доступа: www. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.html>.
4. *Матвеев Е. Н.* Многодиапазонные и широкополосные свойства фрактальных антенн и частотно-избирательных структур на их основе [Техт] : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук : 01.04.03 / Е. Н. Матвеев; [Московский физико-технический институт]. – М., 2009. – 23 с.
5. *Cohen N.* Fractal Antennas: Part I. / N. Cohen /Communications Quarterly, summer 1995. – pp.7-22.
6. Fractal antennas and fractal resonators. US Patent No.: US 76,750,856 B2 / Nathan Cohen filed: Jul. 17, 2007, date of patent: Jul. 6, 2010.
7. *Цалиев Т.А.* Малоразмерные антенны круговой поляризации [Техт] / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – С. 37–47.
8. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов / Морозов А.Д. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
9. *Газале М.* От фараонов до фракталов / М. Газале. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 272 с.
10. *Банков С.Е.* Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.
11. *Шредер, М.* Фракталы, хаос, степенные законы; пер. с англ. / Шредер М. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
12. *Федер Е.* Фракталы; пер. с англ. / Федер Е. – М.: Мир, 1991. – 254 с.