

РАДИОТЕХНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.396.677.8

Цалиев Т.А.
Цалиев Т.А.
Tsaliev T.A.

ЩЕЛЕВЫЕ ФРАКТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ЩІЛИННІ ФРАКТАЛЬНІ АНТЕННІ ЕЛЕМЕНТИ

SLOT FRACTAL ANTENNA ELEMENTS

Аннотация. Рассмотрены свойства щелевых антенных элементов построенных в виде линейно-ломаных фрактальных конструкций, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Путем компьютерного моделирования рассчитаны и на этой основе проанализированы частотные зависимости входного импеданса, коэффициента усиления и модуля коэффициента отражения. Приведены диаграммы направленности антенн на резонансных частотах.

Анотація. Розглянуті властивості щілинних антенних елементів побудованих на основі лінійно-ломаних фрактальних конструкцій, розміри яких порівняні з довжиною хвилі. Шляхом комп'ютерного моделювання розраховані й проаналізовані частотні залежності вхідного імпеданса, коефіцієнту підсилення) та модуля коефіцієнта відбиття. Побудовані діаграми спрямованості антен на резонансних частотах.

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

В предыдущей работе автора [1] (в которой исследовались характеристики проволочных фрактальных антенных элементов) отмечался научный интерес, проявляемый к исследованиям электродинамических характеристик антенн фрактальной геометрии, актуальность и перспективы практического применения таких антенн, а также разъяснялась терминология применяемая к понятиям фрактала, фрактальных множеств и фрактальной размерности. Поэтому здесь мы не будем без особой необходимости повторять все изложенные ранее тезисы.

Отметим только, что данная статья по существу представляет собой продолжение исследований и в ней (в отличие от [1]) рассматриваются характеристики простейших фрактальных излучающих антенных элементов конструктивно выполненных в виде щелей соответствующей геометрической конфигурации, расположенных в плоском идеально проводящем экране.

Разнообразные примеры использования фракталов и фрактальной технологии, в том числе в радиосистемах, упоминаются в работах многих авторов, например [2...6]. Однако до настоящего времени основные электродинамические характеристики щелевых фрактальных антенных элементов не изучались.

Цель настоящей статьи состоит в исследовании основных электродинамических характеристик щелевых антенных элементов, построенных на основе фрактальных кривых и анализе их особенностей в сравнении с аналогичными характеристиками линейного щелевого излучателя.

1. **Геометрическая конфигурация щелевых фракталов.** В дальнейшем будем рассматривать излучающие элементы в виде узких щелей соответствующей формы, прорезанных в бесконечно тонком идеально проводящем плоском экране. Такой антенный элемент в строгом смысле нельзя считать линейным геометрическим объектом, поскольку его поперечный размер t не равен нулю. Однако, полагая, что $t \ll L$, т.е. что поперечный размер щели гораздо меньше его продольного размера, будем при определении геометрической конфигурации моделей щелевых антенных элементов употреблять основные понятия и терминологию линейных конструктивных фрактальных множеств.

Элементы фрактального множества, называемых конструктивными [4] или физическими фракталами [5] обладают свойством самоподобия. Они обычно строятся на основе рекурсивной процедуры, причем свойство точного самоподобия характерно лишь для регулярных фракталов.

При построении конструктивных фракталов обычно заданы *инициатор* и *генератор фрактала*, который повторяется при каждой итерации (последовательном шаге уменьшения масштаба). Фракталы, образуемые при этом, составляют однородное [2] конструктивное фрактальное множество.

Характерной особенностью элементов фрактального множества [2,5] является дробная (фрактальная) размерность h_f , которая больше, чем их топологическая размерность h_t .

Все элементы однородного фрактального множества характеризуются [2] одинаковой *фрактальной размерностью*, определяемой из выражения

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

где m – количество звеньев инициатора; N – количество звеньев (частей) фрактала образованного в результате итерационной процедуры.

На рис. 1 и рис. 2 показана конфигурация исследуемых в данной статье антенных элементов фрактальной геометрии, в виде щелей прорезанных в круговом бесконечно тонком идеально проводящем экране радиусом $R = \lambda_0 / 3$.

Во всех рассмотренных далее случаях инициатор фрактала представляет собой прямолинейную полуволновую щель шириной $t = 1$ мм, (продольный размер инициатора $L = 50$ мм, что составляет половину длины волны λ_0 , распространяющейся в свободном пространстве на частоте $f_0 = 3000$ МГц).

На рис. 1 изображен инициатор (рис. 1, а), а также ряд щелевых фрактальных излучателей построенных на основе первой (рис. 1, б) и второй (рис 1, в) итераций триадной кривой Коха.

При первой итерации инициатор фрактала разбивается на три ($m = 3$) равных части длиной $b = L / m$ и средняя линейная часть щели заменяется равносторонней треугольной щелью без основания – генератором фрактала (первая итерация). Затем указанная процедура повторяется: каждая прямолинейная часть полученной фигуры опять разбивается на три одинаковые части и т.д.

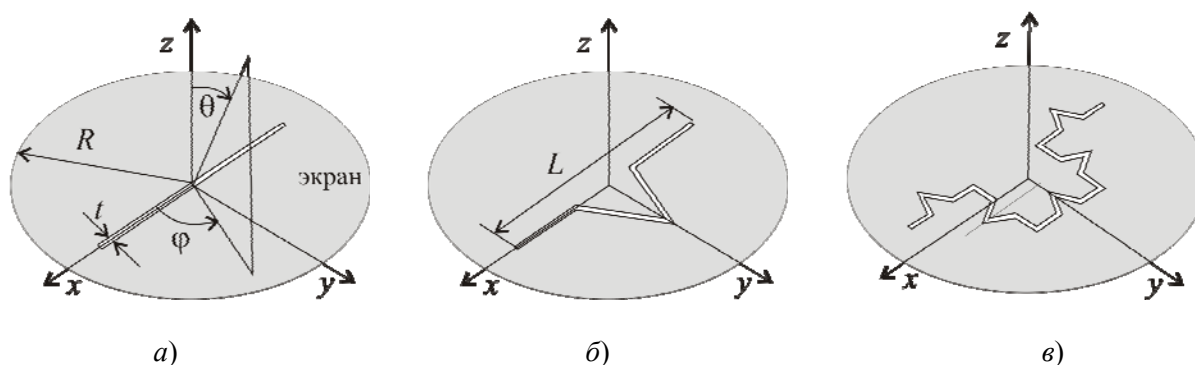


Рисунок 1 – Линейный щелевой излучатель и щелевые фракталы Коха

Инициатор – линейный щелевой излучатель можно считать нулевой итерацией фрактального множества элементов рассматриваемых в данной статье. Причем фрактальная размерность элемента нулевой итерации совпадает с его топологической размерностью и равна единице.

Фрактальная размерность фрактального множества линейных элементов K_m^N , построенного на основе кривой фон Коха, равна 1,262. Для удобства упоминания в дальнейшем будем обозначать щелевые (*slot*) антенные элементы, сформированные на основе фрактальной кривой Коха символом sK_m^N .

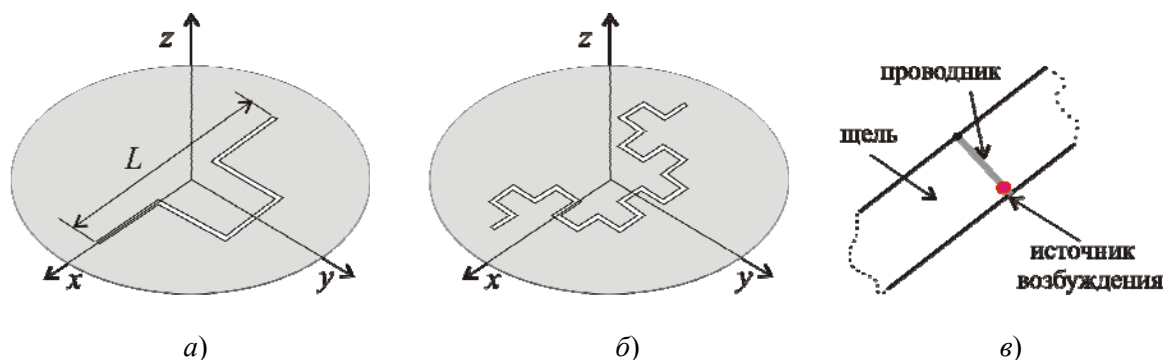


Рисунок 2 – Щелевые фракталы Пеано и схема возбуждения щели

При построении фрактальной «кривой подобной Пеано» [2] инициатор также делится на три части, причем средний отрезок заменяется квадратом без основания со стороной $b = L/3$. Фрактальная размерность множества линейных элементов в этом случае равна 1,465.

На рис. 2, а и рис. 2, б изображены модели щелевых антенных элементов подобного множества, образованных после первой (рис. 2, а) и второй (рис. 2, б) итераций. Обозначим щелевые фрактальные элементы, построенные на этой основе, символом sP_m^N .

Во всех конструкциях щелевых фрактальных элементов возбуждающий элемент выполнен в виде тонкого проводящего отрезка, соединенного одним концом с краем щели, при этом источник возбуждения включен между вторым его концом и противоположным краем щели, как показано на рис. 2, в.

Отметим, что при формировании фрактальных антенных элементов желательно избегать случаев самокасания и самопересечения. С этой целью в процессе образования геометрической конфигурации модели следует определенным образом чередовать ориентацию генераторов [1] (например, как показано на рис. 2, б).

2. Методика исследования. В процессе компьютерного моделирования в среде программного комплекса FEKO [7] исследовались характеристики моделей щелевых фрактальных антенных элементов, изображенных на рис. 1, 2. При подборе требуемой формы щелевых излучателей на этапе моделирования параметров в среде FEKO задавались характерные размеры и координаты всех угловых точек требуемого контура фрактального элемента.

В расчетном модуле компьютерной программы для решения задачи дифракции плоские проводящие элементы представляются в виде сетки из тонких проводников с ячейками треугольной формы, малых по сравнению с минимальной длиной волны размеров. Корректность результатов решения зависит от размера Δ стороны треугольной сетки, который, по крайней мере, должен удовлетворять условию $\Delta < \lambda/10$, где λ – минимальная длина волны.

Варьируя этот размер нетрудно установить то значение Δ , уменьшение которого уже не приводит к заметным отличиям в полученных результатах и во всей заданной полосе частот обеспечивается приемлемая точность требуемых электродинамических характеристик.

В приводимых ниже результатах проведенного компьютерного моделирования расчеты выполнялись на фиксированных частотах в диапазоне от 500 МГц до 10 ГГц с интервалом 50 МГц.

Корректность сравнения результатов достигалась путем надлежащего выбора геометрических параметров исследуемых моделей, а именно так, чтобы длина L инициатора для каждого фрактального щелевого элемента соответствовала длине полуволнового линейного щелевого излучателя, а ширина щели во всех случаях была одинаковой

3. Результаты численного моделирования. Частотные зависимости входного импеданса $Z(f)$ исследуемых моделей фрактальных щелевых излучателей sK_m^N (рис. 1) и sP_m^N (рис. 2) показаны на рис. 3 и рис. 4, что позволяет сравнивать характеристики всех фрактальных элементов первой и второй итерации между собой.

Приводимые зависимости характеризуются, как обычно, чередованием частот «параллельного» и «последовательного» резонансов ($\text{Im} Z(f) = 0$), причем минимальной оказывается частота параллельного резонанса (и это отличает их от характеристик фрактальных диполей, показанных в [1]).

Характер поведения зависимостей $\text{Re} Z(f)$ а также $\text{Im} Z(f)$ дают возможность оценить ширину рабочей полосы частот в соответствующей области.

В области «параллельного» резонанса величина $\text{Re} Z$ максимальна, имеют место резкие изменения $\text{Im} Z(f)$, в значительной мере зависящие от поперечных размеров щели, тогда как в области «последовательного» резонанса эта величина мала, а $\text{Im} Z(f)$ меняется более плавно.

Отметим, что с ростом номера итерации изменяется вид частотных зависимостей входного импеданса, как это имеет место для фрактальных диполей Коха sK_m^N , изображенных на рис. 3.

Здесь, как и в случае фрактальных диполей [1], наблюдается:

- смещение всех резонансных частот в низкочастотную область;
- рост максимумов действительной части входного импеданса;
- «сгущение» резонансных точек и увеличение их числа в рассматриваемом частотном интервале;
- сужение полосы рабочих частот в области параллельного резонанса.

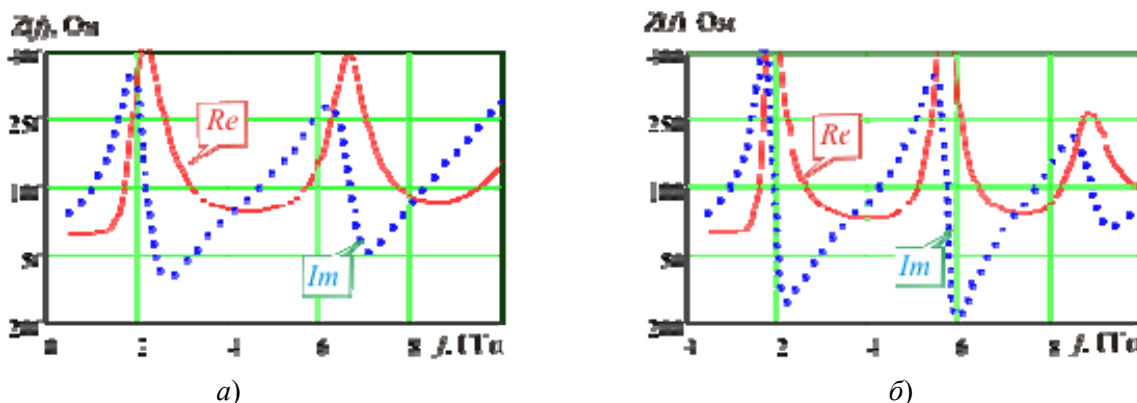


Рисунок 3 – Частотная зависимость входного импеданса: а) для sK_3^4 ; б) для sK_9^{16}

На рис. 4 изображены аналогичные зависимости, построенные для квадратичных щелевых фрактальных элементов sP_m^N , из которых следует, что указанные ранее особенности при рассмотрении характеристик триадных щелевых элементов sK_m^N здесь проявляются в еще большей степени.

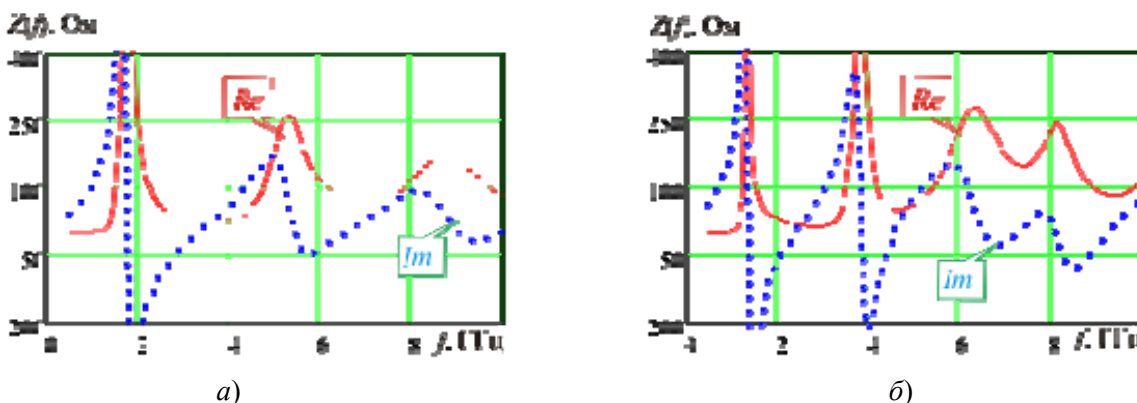


Рисунок 4 – Частотная зависимость входного импеданса: а) для sP_3^5 ; б) для sP_9^{25}

Анализируя все эти рисунки можно отметить общую закономерность – перечисленные выше особенности с увеличением номера итерации и, соответственно, с увеличением числа звеньев фрактальных элементов, становятся более выраженными.

Частотные зависимости модуля коэффициента отражения $|s_{11}|$, по которым можно оценить положение и величину смещения резонансных частот, соответствующих разным итерациям фрактального элемента, показаны на рис. 5 и рис. 6.

Построение этих графиков осуществлялось таким образом, чтобы в каждом случае сопротивление нагрузки R_n , подключенной к входу такого элемента, соответствовало величине активного входного сопротивления на частотах первого параллельного и первого последовательного резонанса, обеспечивая тем самым минимум $|s_{11}|$.

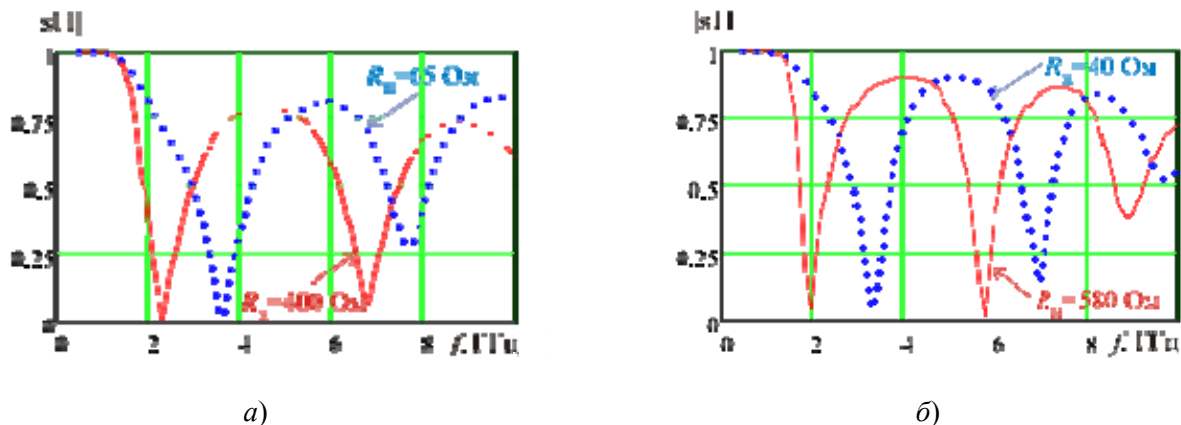


Рисунок 5 – Модуль коэффициента отражения, фракталы Коха: а) sK_3^4 ; б) sK_9^{16}

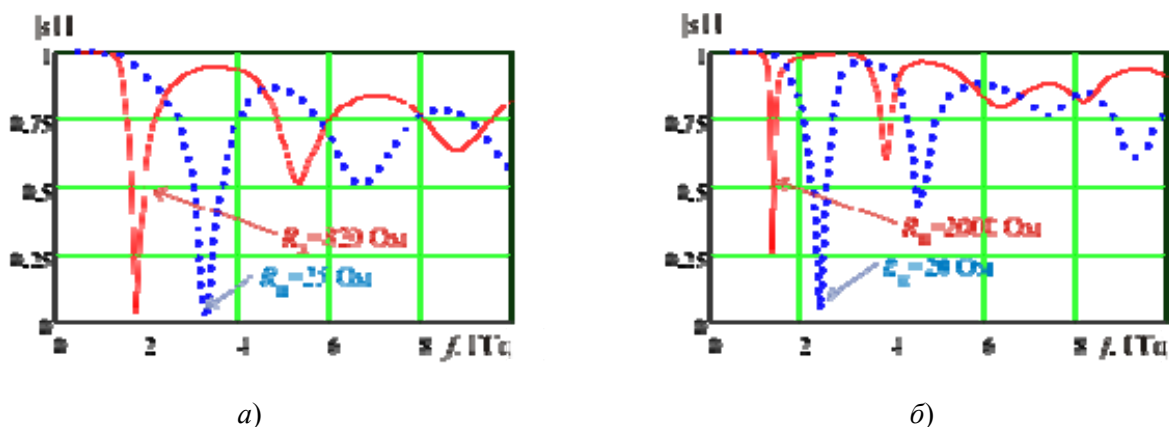


Рисунок 6 – Модуль коэффициента отражения, фракталы Пеано: а) sP_3^5 ; б) sP_9^{25}

Анализируя эти графики можно отметить такие особенности:

- положение резонансных точек напрямую не связано с характерными размерами инициатора либо звеньев фрактального элемента (в отличие от линейного щелевого излучателя (см. рис. 7);
- с увеличением номера итерации величина сопротивления нагрузки (R_n), при котором достигается минимум коэффициента отражения в области параллельного резонанса, растет.

На рис. 7 показаны графики, отображающие частотные зависимости входного импеданса (рис.7, а) и модуля коэффициента отражения (рис. 7, б) линейного полуволнового щелевого излучателя (изображенного на рис. 1, а) для того чтобы иметь возможность сравнивать их с аналогичными характеристиками фрактальных щелевых излучателей

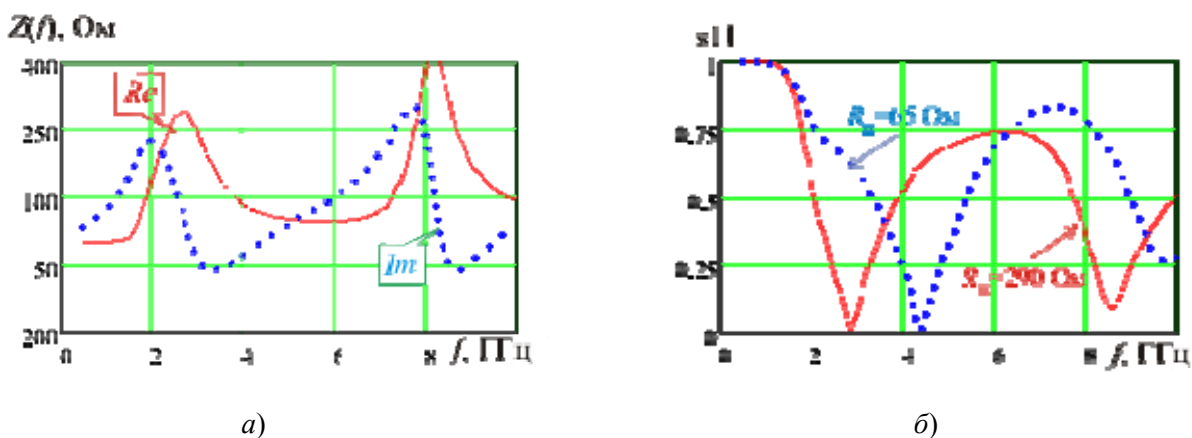


Рисунок 7 – Частотные характеристики линейного щелевого элемента

При рассмотрении частотных зависимостей коэффициента отражения (изображенных на рис. 6, а, б и на рис. 7, б) видно, что в области первого резонанса у фрактальных диполей рабочая полоса частот заметно меньше чем у обычного щелевого излучателя.

На это указывают и данные табл. 1, где приведены сведения о частоте первого резонанса (f_{01}) и относительном смещении резонансной частоты Δf .

Таблица 1 – Частотные параметры фрактальных диполей

Тип щелевого излучателя	№ итерации	f_{01} , ГГц	Δf , %
Фрактальный sK_3^4	1	2,25	21
Фрактальный sK_9^{16}	2	1,97	30,8
Фрактальный sP_3^5	1	1,75	38,5
Фрактальный sP_9^{25}	2	1,35	52,6
Линейный	0	2,85	0

Данные таблицы указывают на заметные отличия свойств щелевых излучателей. Как положительный фактор можно отметить заметное снижение резонансных частот (в особенности для второй итерации), однако при этом существенно сужается полоса частот в области низшего резонанса особенно для элемента sP_9^{25} .

Указанные особенности также хорошо отображают графические зависимости коэффициента бегущей волны, изображенные на рис. 8.

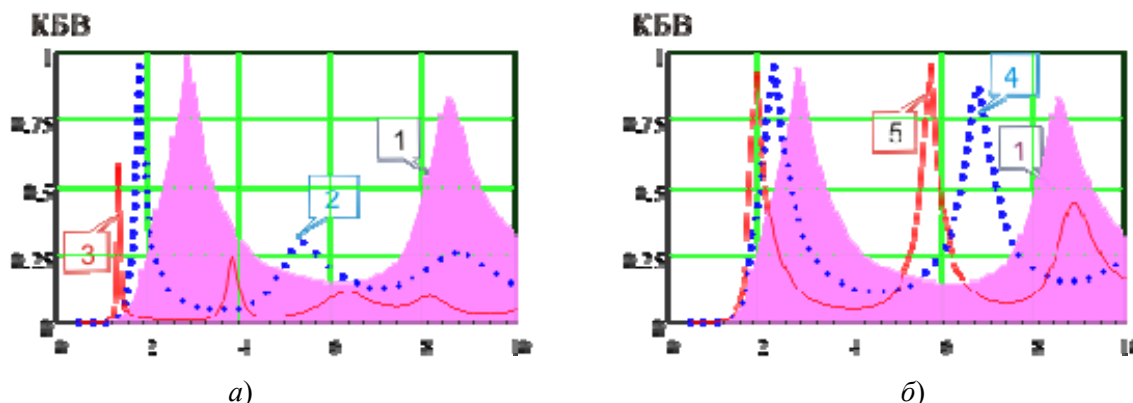


Рисунок 8 – Частотная зависимость КБВ: 1 – линейная щель, $R_H = 290 \text{ Ом}$;

2) sP_3^5 , $R_H = 820 \text{ Ом}$; 3) sP_9^{25} , $R_H = 2000 \text{ Ом}$; 4) sK_3^4 , $R_H = 400 \text{ Ом}$; 5) sK_9^{16} , $R_H = 580 \text{ Ом}$

Влияние эффектов рассогласования иллюстрируют графики, изображенные на рис. 9, отображая характер изменения коэффициента усиления (КУ) фрактальных излучателей в рассматриваемом диапазоне частот в направлении нормали к плоскости экрана ($\theta = 0^\circ$).

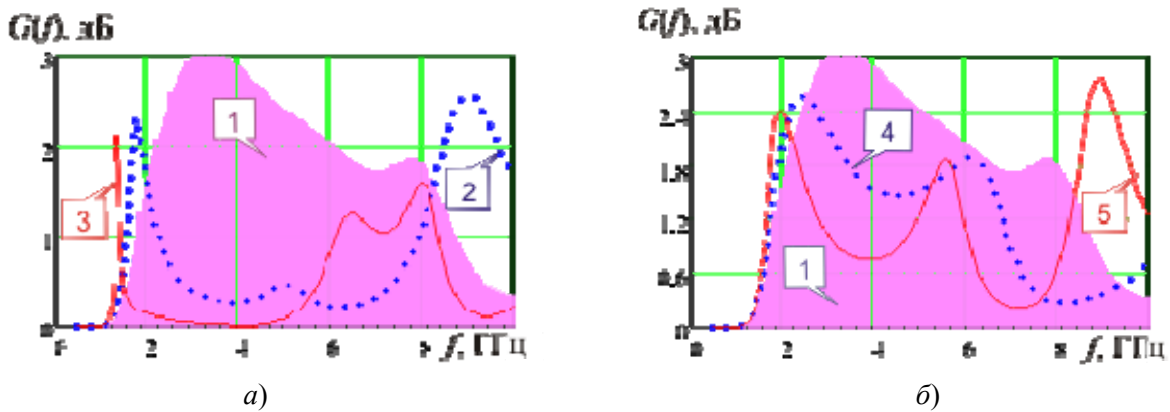


Рисунок 9 – Частотная зависимость КУ: 1 – линейная щель, $R_H = 290 \text{ Ом}$; 2 – P_3^5 , $R_H = 820 \text{ Ом}$; 3 – P_9^{25} , $R_H = 2000 \text{ Ом}$; 4 – K_3^4 , $R_H = 400 \text{ Ом}$; 5 – K_9^{16} , $R_H = 580 \text{ Ом}$

При определении коэффициента усиления тепловые потери не учитывались, а расчет производился по формуле $G = D(1 - |p|^2)$, где D – означает КНД.

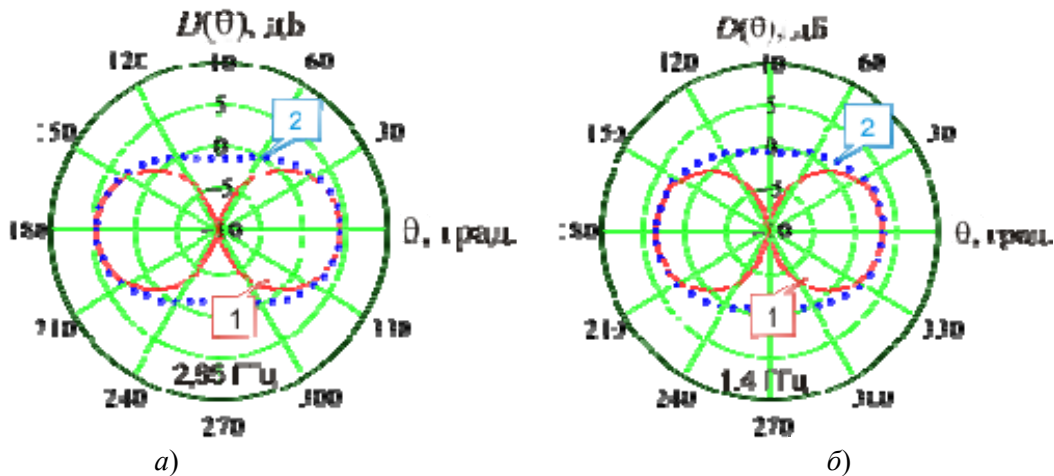


Рисунок 10 – Диаграммы направленности щелевых излучателей:

а) линейного, б) фрактального SP_9^{25}

Все рассмотренные типы щелевых излучателей имеют слабо выраженные направленные свойства, которые, в частности, иллюстрируют диаграммы направленности (ДН) на частоте первого резонанса, изображенные на рис. 10 (1 – плоскость E , 2 – плоскость H). Видно, что в области первого резонанса диаграммы направленности линейной щели (рис. 10, а) мало отличаются от ДН фрактальных антенных элементов (рис. 10, б).

На рис. 11 показаны нормированные распределения плотности поверхностного тока на частоте первого резонанса.

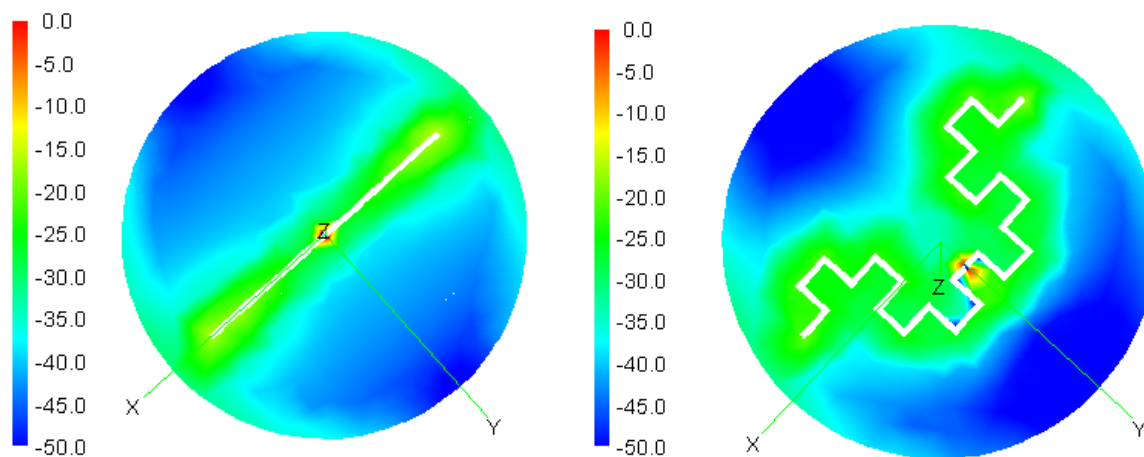


Рисунок 11 – Распределение плотности электрического тока на экране

Видно, что в обоих случаях плотность тока на краю экрана примерно на 30...50 дБ меньше, чем в области возбуждения. Следовательно, влиянием конечности размеров экрана на полученные результаты можно пренебречь.

В заключение нужно отметить, что в данной работе приведены результаты компьютерного моделирования электродинамических характеристик излучающих антенных элементов – симметрично возбуждаемых щелей, прорезанных в плоском проводящем экране, конфигурация которых основана на геометрии фрактальных кривых. Сравнение характеристик исследованных антенных элементов позволяет расширить область знания о свойствах таких нетрадиционных антенных элементов.

Основываясь на результатах данной работы можно определить направления возможных дальнейших исследований таких, например, таких как характеристики фрактальных антенных конструкций иной формы или построенных на основе итераций более высокого порядка, а также в виде сочетаний активных и пассивных фрактальных антенных элементов, что вероятно позволит устранить некоторые из имеющихся недостатков.

Литература

1. Цалиев Т.А. Электродинамические характеристики фрактальных диполей [Текст] / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2012. – № 2. – С. 1–14.
2. 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.)
3. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные законы; пер. с англ. / М. Шредер. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
4. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов / Морозов А.Д. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
5. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике: Современное состояние и развитие [Электронный ресурс] / А.А. Потапов. – Журнал радиотехники. – 2010. – №1. – Режим доступа: [www. URL: http://jre. cplire.ru/jre/jan10/4/text.html](http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.html).
6. Цалиев Т.А. Малоразмерные антенны круговой поляризации [Текст] / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2012. – № 1. – С. 37–47.
7. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.