

РАДИОТЕХНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.396.677.8

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИММЕТРИЧНЫХ Δ -ФРАКТАЛЬНЫХ ДИПОЛЕЙ

Цалиев Т.А.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИМЕТРИЧНИХ Δ -ФРАКТАЛЬНИХ ДИПОЛІВ

Цалієв Т.А.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS SIMMETRIC Δ -FRACTAL DIPOLES

Tsaliev T.A.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

Аннотация. В работе рассмотрена совокупность геометрических свойств (топология) конструкций, названных дельта-фракталами. Исследованы характеристики симметричных вибраторов (диполей), сформированных на основе линейных Δ -фракталов. Проведен анализ частотных зависимостей входного импеданса, коэффициента стоячей волны и КНД. На этом основании сделан вывод о том, что фактором, определяющим практическое преимущество фрактальных диполей, является существенное понижение их резонансных частот, что способствует созданию малоразмерных конструкций антенн. Это «многодиапазонные» антенные элементы с повышенной добротностью и относительно узкой рабочей полосой частот, что является отличительным признаком многих фрактальных конструкций.

Ключевые слова: фрактальное множество, линейный фрактал, Δ -фракталы, входной импеданс, коэффициент стоячей волны, КНД.

Анотація. У роботі розглянута сукупність геометричних властивостей (топологія) конструкцій, названих дельта-фракталами. Досліджені характеристики симетричних вібраторів (диполів), сформованих на основі лінійних Δ -фракталів. Проведений аналіз частотних залежностей вхідного імпедансу, коефіцієнта стоячої хвилі й КСД. На цій основі зроблений висновок про те, що фактором, який визначає практичну перевагу фрактальних диполів, є суттєве зниження їх резонансних частот, що сприяє створенню малорозмірних конструкцій антен. Це «багатодіапазонні» антенні елементи з підвищеною добротністю й відносно вузькою робочою смугою частот, що є відмітною ознакою багатьох фрактальних конструкцій.

Ключові слова: фрактальна множина, лінійний фрактал, Δ -фрактали, вхідний імпеданс, коефіцієнт стоячої хвилі, КСД.

Abstract. The paper considers the totality of geometric properties (topology) of designs called as delta-fractals. The characteristics of the dipoles formed on the basis of linear Δ -fractals. The analysis of the frequency dependency of the input impedance, VSWR and directivity. On this basis it was concluded that the factor determining the practical advantage of fractal dipoles, are significant decrease their resonance frequencies, which facilitates the creation of small-size antenna design. There are "multi-band" antenna elements with high quality factor and a relatively narrow operating frequency band that is the hallmark of many kinds of fractal structures.

Key words: fractal sets, line fractal, Δ -fractals, input impedance, VSWR, directivity.

Развитие радиоэлектронных средств порождает ряд актуальных проблем, в том числе в процессе разработки антенн. Использование фрактальных фрагментов при конструировании антенны позволяет реализовать ряд преимуществ, таких как малые электрические размеры и многодиапазонность. Антенны фрактальной топологии находят применение в беспроводных сетях, устройствах мобильной связи и системах радиочастотной идентификации.

Основами теории фрактальных множеств послужили работы французского математика Бенуа Мандельброта [1]. Многочисленные аспекты теории и практики фракталов рассмотрены, например, в [2...4]. Одним из первых фрактальные элементы в антенной технике начал применять американский инженер Натан Коэн [2].

Элементы конструктивных фрактальных множеств формируются на основе итерационной процедуры и часть из них, в зависимости от топологии, можно рассматривать как дискретно-линейные фракталы, поскольку они имеют форму ломаных линий, образованных из отрезков прямых (множества Коха, Минковского, Пеано и др.).

Основой известных конструкций фрактальных антенн являются дискретно-линейные фрактальные элементы начальных порядков итерации, часто называемые предфракталами [3].

Фрактальная топология просматривается и в некоторых конструкциях малоразмерных диполей [5], например, описанных в [6] «zigzag-dipoles» или упомянутых в [3] зигзагообразных вибраторах. Однако до настоящего времени влияние особенностей фрактальной топологии подобных антенных элементов на их электродинамические характеристики мало изучено. Исключение составляет работа автора [7], где рассматривались характеристики Δ -фрактальных монополей.

Цель данной работы состоит в рассмотрении топологии дельта-фракталов (Δ -фракталов), компьютерном моделировании и анализе электродинамических характеристик симметричных диполей на их основе.

Топология фрактальных кривых. Элементы фрактальных множеств (ЭФМ), называемые *геометрическими* или *конструктивными* фракталами [1,3,4], обладают такими свойствами:

- масштабной инвариантностью (самоподобие);
- содержат произвольно малые масштабы;
- фрактальная кривая при любом количестве итераций не сводится к прямой линии.

Алгоритм формирования элементов дискретно-линейного фрактального множества, например, может быть таков: отрезок прямой линии длиной l (инициатор фрактала - итерация нулевого порядка) делится на m *одинаковых* частей. После этого один или несколько сегментов (обычно в середине инициатора) заменяются ломаной линией – генератором фрактала, образуя при этом фрактал первой итерации – новую ломаную, состоящую из N отрезков.

Далее каждый из сегментов этой кривой разбивается на m частей и процедура (в уменьшенном масштабе) повторяется, формируя следующую итерацию. Суммарная длина образованной ломаной линии при $n \rightarrow \infty$ (где n - номер итерации) стремится к бесконечности.

Широко известным [1] примером дискретно-линейных фракталов являются элементы множества Коха (кривая Коха). Вначале итерационной процедуры инициатор – отрезок линии длиной l , разбивается на три равных сегмента. Затем средний из них замещается двумя такими же сегментами – сторонами равностороннего треугольника (генератором), образуя в целом итерацию первого порядка – кривую, состоящую теперь из четырех сегментов.

Итерации следующих порядков сводятся к повторению подобной процедуры для каждого сегмента полученной ранее кривой. Элементы такого множества обладают одинаковой фрактальной размерностью (обозначим ее как d_f), определяемой, в данном случае, из выражения

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

где m – количество звеньев инициатора; N – количество звеньев (частей), образующих сам фрактал. Фрактальная размерность элементов множества Коха (обозначим ее как d_f^{1K1}) больше топологической размерности инициатора (прямолинейного отрезка), ее можно определить, например, при $n = 2$:

$$d_f^{1K1} = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = 1,262.$$

Анализ свойств малоразмерных антенн на основе множества кривых Коха и подобных ему, в частности, выполнен автором [7].

Рассмотрим теперь некоторые особенности топологии элементов Δ -фрактальных множеств, знание которой необходимо при создании малоразмерных проволочных антенн. Остановимся на одном из возможных алгоритмов формирования элементов конструктивно-линейного Δ -фрактального множества описанного в [7].

Выберем в качестве инициатора двухзвенную ломанную кривую, состоящую из двух одинаковых звеньев – прямолинейных отрезков длиной L , лежащих в одной плоскости (рис. 1, а). Параметром формируемых Δ -фракталов является угол α , который определяет их топологические особенности.

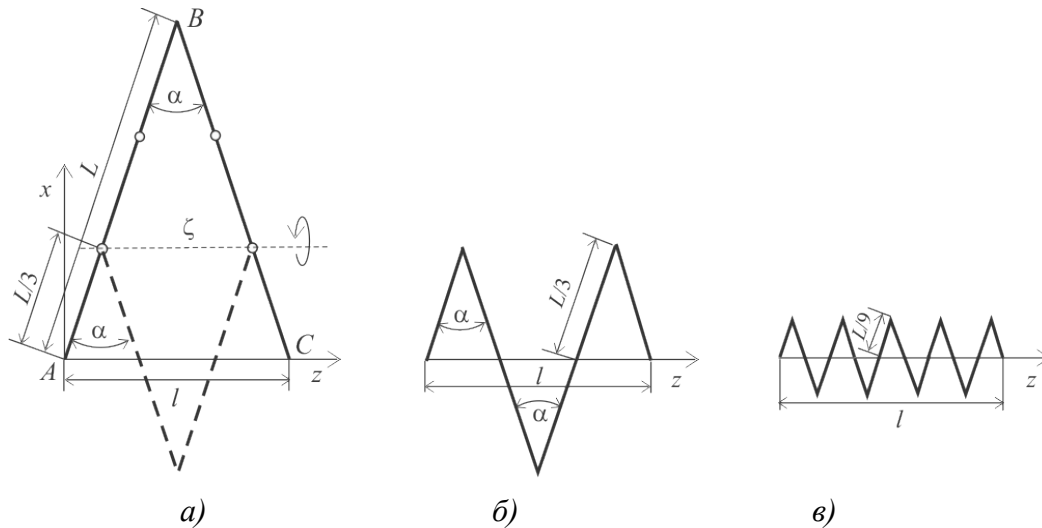


Рисунок 1 – Топология Δ -фракталов

Итерация первого порядка заключается в том, что каждое из двух звеньев инициатора делится на три равных отрезка длиной $L/3$, затем четыре верхних отрезка (без какого-либо изменения формы и размеров) поворачиваются вокруг оси ζ на угол, равный 180° , занимая положение, показанное пунктирной линией на рис. 1, а.

Кривая, получаемая в результате такой процедуры (рис. 1, б), содержит теперь шесть звеньев длиной $L/3$ и, состоит из трех одинаковых двухзвенных элементов подобных инициатору. Причем второй из них смещен относительно первого и повернут на 180° вокруг оси z . Повторив такую же процедуру для каждого из этих трех двухзвенных элементов, образуем ЭФМ второго порядка итерации – кривую, содержащую уже 18 звеньев длиной $L/9$ (рис. 1, в). Она содержит теперь три уменьшенные копии фрактала первой итерации.

Такая итерационная процедура может быть бесконечно продолжена, причем после каждого изменения число звеньев кривой утраивается. Создаваемое множество можно назвать [9] троичным Δ -фракталом и обозначено как Δ_3 . Индекс при этом указывает на то, что в итерационном процессе каждое звено ломаной делится каждый раз на три равные части.

Такое множество обладает всеми перечисленными ранее признаками конструктивных фракталов:

- оно содержит *произвольно малые масштабы*;
- фрактальная кривая при любом количестве итераций *не сводится к прямой*;
- ему свойственна *масштабная инвариантность* (самоподобие).

Для ЭФМ Коха любого порядка итерации фрактальная размерность постоянна и равна 1,262.

В отличие от других фрактальных множеств, у которых фрактальная размерность выражается дробным числом, Δ_3 -фракталы характеризуются целочисленным значением фрактальной размерности

$$d_3^{|\Delta|} = \frac{\ln(6)}{\ln(3)} = \frac{\ln(18)}{\ln(18)} \dots = 1.$$

Целочисленную фрактальную размерность также же имеет и фрактальное множество кривых Пеано [1].

Отличительной особенностью Δ -фрактального множества является то, что фрактальная размерность всех его элементов постоянна, равна топологической размерности и совпадает с топологической размерностью инициатора.

Другая его особенность состоит в том, что для ЭФМ любого порядка итерации суммарная длина звеньев ломаной, неизменна и равна длине инициатора. Заметим, что суммарная длина ЭФМ Коха (и подобных ему) с увеличением порядка итерации бесконечно растет, а суммарная длина элементов множества Кантора стремится к нулю.

Причем фрактальная размерность элементов, для первого из этих множеств, всегда больше топологической размерности инициатора, а для второго, наоборот – меньше нее.

Методика исследования. Рассматриваемые далее антенные конструкции представляют собой диполи, каждое из плеч которых формируется на основе Δ_3 -фрактала первого, второго либо третьего порядка итерации. На рис. 2 показаны вариации внешнего вида исследуемых моделей диполей для итераций разного порядка: (а) – первая итерация при $\alpha = 90^\circ$; (б) – вторая итерация при $\alpha = 60^\circ$; (в) – третья итерация при $\alpha = 45^\circ$; (г) – плоскостной диполь.

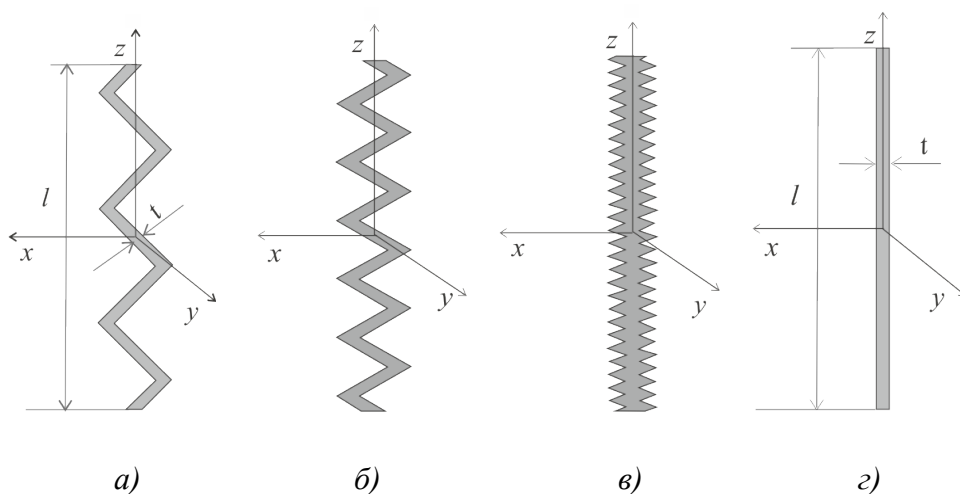


Рисунок 2 – Топология исследуемых моделей

Модели диполей образованы из идеально проводящей бесконечно тонкой ленты шириной $t = 5$ мм (рис. 2). Продольный размер l всех диполей равен $\lambda_0 / 2$, где λ_0 – длина волны,

соответствующая расчетной частоте 1 ГГц. Возбуждение диполей осуществляется источником, находящимся в средней части (начало координат).

Расчет электродинамических свойств диполей основан на методе моментов комплекса программ FEKO [8], предусматривающем разбиение поверхности элементов на малые, по сравнению с длиной волны, проволочные сегменты. В результате решения системы линейных алгебраических уравнений рассчитывалось распределение поверхностного тока, и на его основе – частотные зависимости входного импеданса и коэффициента стоячей волны, а также КНД. Для достижения требуемой точности длина Δl проволочного сегмента выбрана, равной $\lambda_0 / 40$, что обеспечило достаточную точность расчетов в диапазоне частот 200...1800 МГц с интервалом 5 МГц. Для сравнения рассчитывались аналогичные характеристики плоскостного симметричного вибратора (рис. 2, з) соответствующих размеров.

Результаты компьютерного моделирования. На рис. 3 представлены графики частотной зависимости входного импеданса антенн после первой итерации. Здесь и далее использованы такие обозначения конструктивных вариантов: 1 – плоскостной вибратор; 2...5 – фрактальные диполи (2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$; 4 – $\alpha = 60^\circ$; 5 – $\alpha = 90^\circ$).

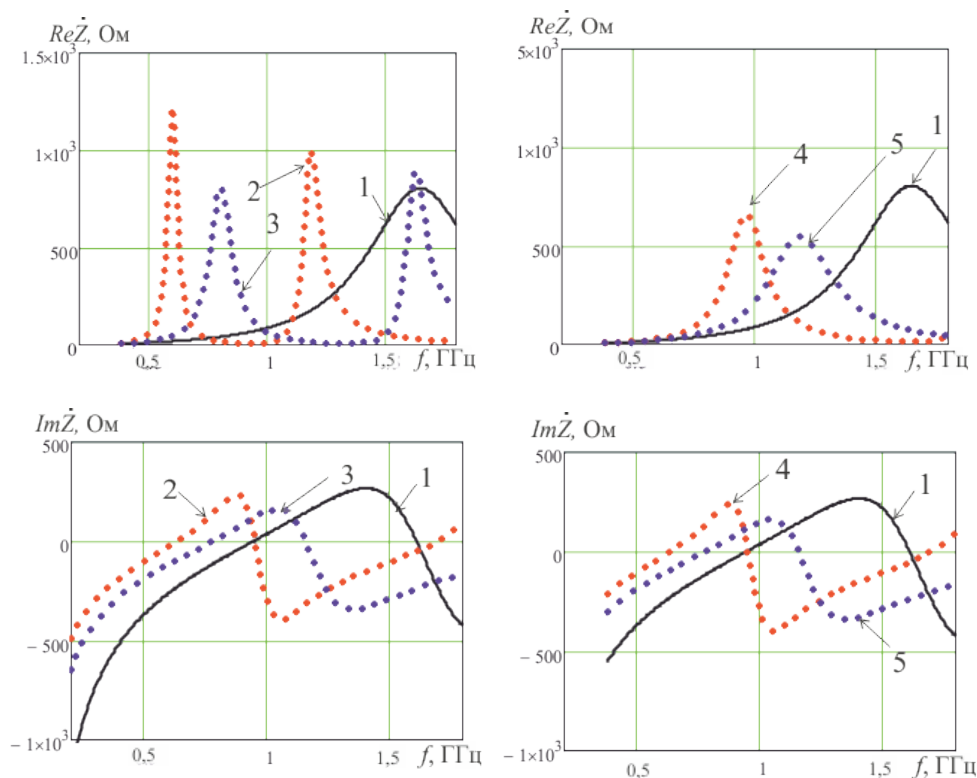


Рисунок 3 – Частотные зависимости входного импеданса (первая итерация)

Обратив внимание на положение частот первого (f_{01}) и второго (f_{02}) резонансов, заметим, что резонансные частоты (на которых $ImZ_{вх} = 0$) смещены в область более низких частот. Величина смещения $\delta_{01} = (f_{01} - f_0) / f_{10}$ и $\delta_{02} = (f_{02} - f_0) / f_{20}$ относительно частот первого ($f_{10} = 1,0$ ГГц) и второго ($f_{20} = 2,0$ ГГц) резонансов бесконечно тонкого симметричного вибратора длиной $l = \lambda_0 / 2$ указана в табл. 1.

Таблица 1 – Данные расчетов после первой итерации фракталов

Параметр фракталов	Первая итерация					
	$f_{01}, \text{ГГц}$	$f_{02}, \text{ГГц}$	$\delta f_{01}, \%$	$\delta f_{02}, \%$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$
$\alpha = 30^\circ$	0,39	0,64	-61	-68	13,5	3140
$\alpha = 45^\circ$	0,51	0,85	-49	-57,5	20	1900
$\alpha = 60^\circ$	0,63	1,02	-37	-49	32	1380
$\alpha = 90^\circ$	0,77	1,31	-23	-34	50	1030

Причем уменьшение α приводит не только к возрастанию относительного смещения резонансов (поскольку суммарная длина проводника каждого плеча диполя возрастает), но и к росту добротности антенн при $\alpha < 90^\circ$. Об этом можно судить по активной части (R_{02}) входного импеданса в табл. 1.

При этом заметны определенные особенности: с уменьшением параметра α активное входное сопротивление в первом резонансе падает, в то время как во втором резонансе оно растет. Результаты второй итерации, отображающие аналогичные частотные зависимости входного импеданса, представлены на рис. 4 и табл. 2.

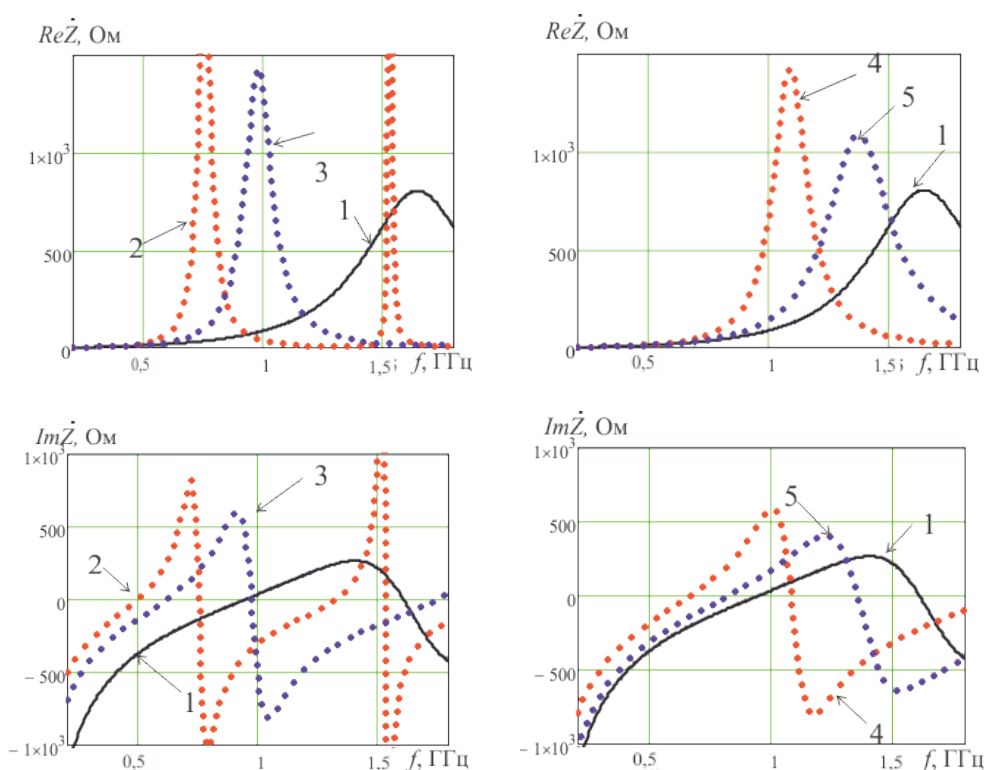


Рисунок 4 – Частотные зависимости входного импеданса (вторая итерация)

Сравнивая эти рисунки с предыдущими можно указать на такие особенности: эффект отмеченного ранее смещения резонансных областей уменьшился, добротность антенн второй итерации уменьшилась.

Таблица 2 – Данные расчетов после второй итерации фракталов

Параметр фракталов	Вторая итерация					
	$f_{01}, \text{ГГц}$	$f_{02}, \text{ГГц}$	$\delta f_{01}, \%$	$\delta f_{02}, \%$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$
$\alpha = 30^\circ$	0,55	0,83	-45	-58,5	28	1030
$\alpha = 45^\circ$	0,65	1,01	-35	-49	39	1042
$\alpha = 60^\circ$	0,69	1,1	-31	-45	38	1060
$\alpha = 90^\circ$	0,84	1,33	-17	-33,5	60	800

Кроме того заметно общее увеличение активного входного сопротивления в первом резонансе и снижение его во втором резонансе.

Результаты, представляющие частотные зависимости входного импеданса после третьей итерации, показаны на рис. 5. Здесь все кривые еще более сглажены.

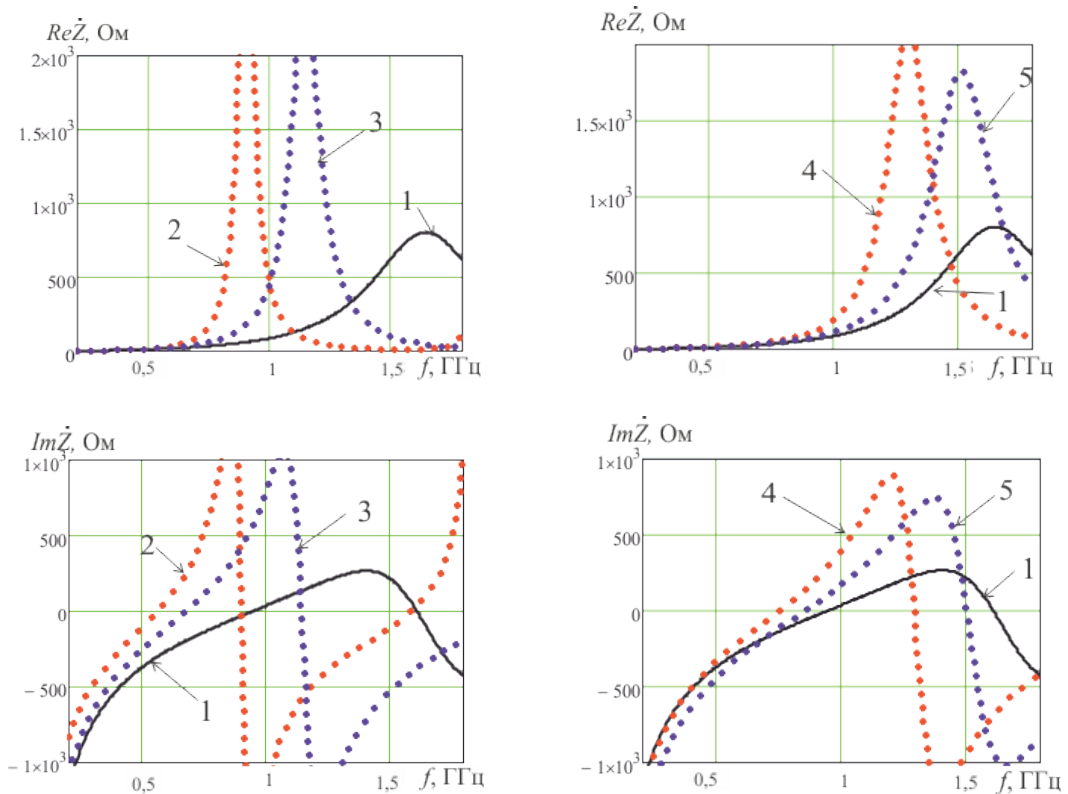


Рисунок 5 – Частотные зависимости входного импеданса (третья итерация)

С повышением порядка итераций кривые, изображенные на рис. 3...5, по своей форме приближаются к характеристикам плоскостного диполя. Такой эффект, по всей вероятности, связан с плоскостной конструкцией диполей построенных на основе Δ -фракталов. Для тонкопроволочных конструктивных вариантов эта особенность, скорее всего, начнет проявляться при итерациях более высокого порядка. Тем не менее, снижение резонансных частот имеет место во всех рассмотренных случаях, составляя для первого резонанса от 15% при $\alpha = 90^\circ$ до 46% при $\alpha = 30^\circ$ (табл. 3).

Таблица 3 – Данные расчетов после третьей итерации фракталов

Параметр фракталов	Третья итерация					
	$f_{01}, \text{ГГц}$	$f_{02}, \text{ГГц}$	$\delta f_{01}, \%$	$\delta f_{02}, \%$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$
$\alpha = 30^\circ$	0,54	1,06	-46	-47	50	390
$\alpha = 45^\circ$	0,59	1,12	-41	-44	55	424
$\alpha = 60^\circ$	0,68	1,23	-32	-38,5	57	635
$\alpha = 90^\circ$	0,85	1,3	-15	-35	62	720

Таблица 4 – Данные расчетов для плоскостного диполя

Ширина	Симметричный плоскостной диполь					
	$f_{01}, \text{ГГц}$	$f_{02}, \text{ГГц}$	$\delta f_{01}, \%$	$\delta f_{02}, \%$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$
$t = 5 \text{ мм}$	0,94	1,66	-6	-17	70	803
$t = 10 \text{ мм}$	0,93	1,44	-7	-28	68	480

На рис. 6 последовательно представлены результаты расчетов частотных зависимостей КСВ на входе антенн после первых трех итераций. При этом величина активного сопротивления нагрузки R_n при каждом расчете выбиралась равной значению входного импеданса R_{01} на частоте первого резонанса (см. табл. 1...4).

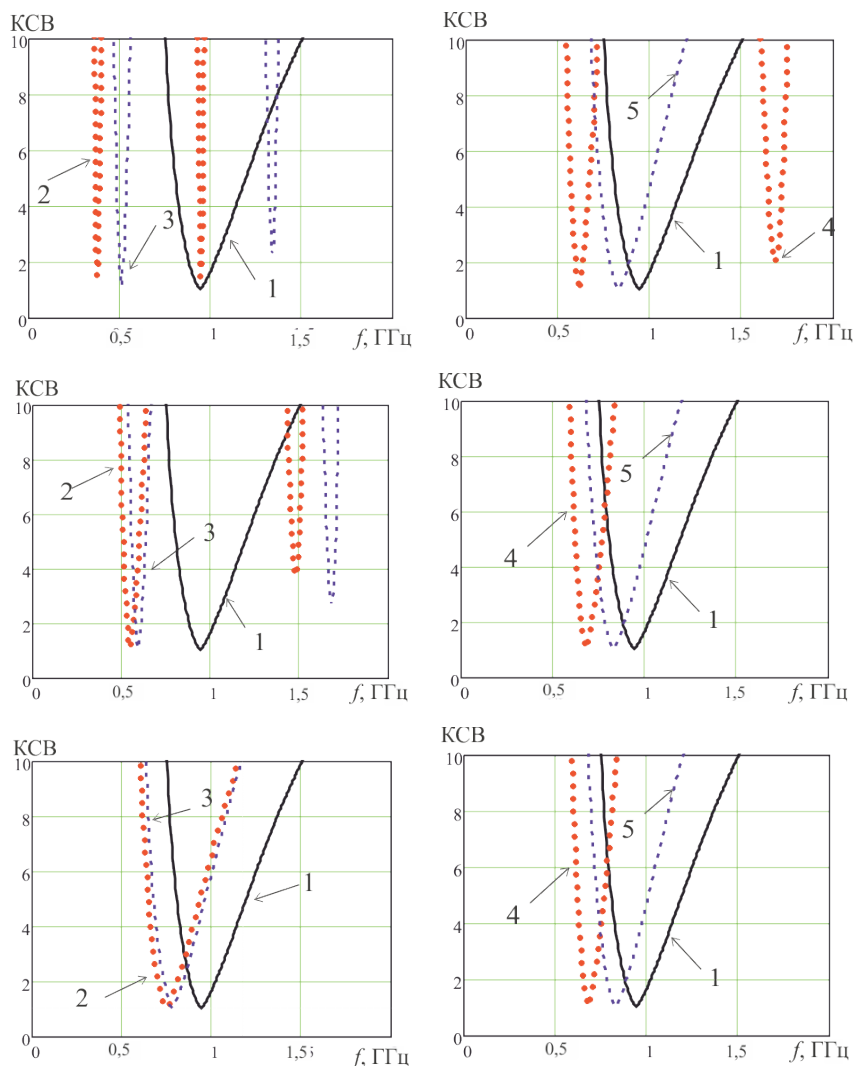


Рисунок 6 – Частотные зависимости коэффициента стоячей волны на входе

На этих графиках видно, что полоса частот фрактальных конструкций, в которой $KCB \leq 2$, при первой итерации заметно уже, чем у плоскостного диполя, а при следующих итерациях расширяется. Данные об относительной ширине полосы частот $\Delta = (f_{\max} - f_{\min}) / f_0$ при первом и втором резонансе, в пределах которой $KCB \leq 2$ сведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5 – Данные расчетов относительной ширины полосы частот

Тип антенны	1-я итерация		2-я итерация		3-я итерация	
	$\Delta_{01}, \%$	$\Delta_{02}, \%$	$\Delta_{01}, \%$	$\Delta_{02}, \%$	$\Delta_{01}, \%$	$\Delta_{02}, \%$
$\alpha = 30^\circ$	2,37	4,4	7,3	10,58	13,3	20,1
$\alpha = 45^\circ$	4,54	6,9	5,1	12,9	12,7	21,4
$\alpha = 60^\circ$	6,72	10,3	7,4	13,3	12,4	19,8
$\alpha = 90^\circ$	11,7	16,9	12,0	19,6	12,9	20,0

Таблица 6 – Данные расчетов относительной ширины полосы частот

Плоскостной диполь $t = 5$ мм		Плоскостной диполь $t = 10$ мм	
$\Delta_{01}, \%$	$\Delta_{02}, \%$	$\Delta_{01}, \%$	$\Delta_{02}, \%$
14,9	24,7	18,3	29,2

Из этих данных видно, что по ширине полосы частот фрактальные диполи начальных итераций существенно уступают плоскостному диполю (в особенности при $\alpha = 30^\circ$). Однако это различие постепенно уменьшается, составляя (при одинаковых значениях t) около 11...17% после третьей итерации.

Заключение. В данной работе частично рассмотрена топология формообразований, называемых троичными Δ -фракталами, а также приведены результаты исследования электродинамических характеристик диполей, конструкция которых построена на основе этих фракталов.

Направленные свойства всех таких антенных элементов отличаются незначительно. Из-за ограничений на объем статьи подробные данные о направленных свойствах (КНД) не представлены.

На основе анализа результатов в виде кривых на рис. 2...6 и данных в табл. 1...6 можно сделать вывод, что фактором, определяющим практическое преимущество фрактальных диполей, является существенное понижение их резонансных частот, что способствует созданию малоразмерных конструкций антенн. Это узкополосные «многодиапазонные» (см. рис. 6) антенные элементы с повышенной добротностью и относительно узкой рабочей полосой частот, что является отличительным признаком многих фрактальных конструкций.

Основываясь на данных, приведенных выше, можно предположить, что антенные элементы, конструкция которых основана на фрактальной топологии, найдут применение при создании многодиапазонных малоразмерных антенн, в том числе предназначенных для различных радиосистем дециметрового и сантиметрового диапазонов волн.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mandelbrot B.B. The Fractals Geometry of Nature / B. B. Mandelbrot – N.Y.: Freeman, 1982. – 468 p.
2. 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.
3. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. Часть 2 [Электронный ресурс] / В.И. Слюсар // Электроника НТБ. – 2007– № 6. – Режим доступа: www. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/611>.
4. Божокин С. В. Фракталы и мультифракталы. / С. В. Божокин, Д. А. Паршин – Ижевск: РХД, 2001. – 128 с.
5. Цалиев Т.А. Электродинамические характеристики фрактальных диполей [Электронный ресурс] / Цалиев Т.А. – Одеса: Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. –2012.– № 2 – С. 3-15. – Режим доступа: www. URL: http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/476 /475.
6. Hisamatsu Nakano, Hitoyuki Tagami, Akihiro Yoshizawa, and Junji Yamauchi. Shortening ratios of modified Dipole Antennas IEEE Trans. AP-32, 1984. – № 4. – P. 385-386.
7. Цалиев Т.А. Линейные Δ -фракталы и электродинамические характеристики фрактальных монополей [Электронный ресурс] / Цалиев Т.А. – Одеса: Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014. – № 2. – С. 5-18. – Режим доступа: www. URL: http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/820/817.
8. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. - М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.

REFERENCES:

1. Mandelbrot B.B. The Fractals Geometry of Natureю N.Y.: Freeman, (1982).
2. 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.
3. Slyusar V.I. Fractal antennas. A fundamentally new type of "broken" antennas. www. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/611>.
4. Bozhokin S.V., Parshin D.F. Fractals and multifractals. Izhevsk: RHD, (2001).
5. Tsaliev T.A. Electrodinamic characteristics of fractal dipoles. Odessa: Pros. of the O.S. Popov ONAT, (2012), №2. http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/476 /475
6. Hisamatsu Nakano, Hitoyuki Tagami, Akihiro Yoshizawa, and Junji Yamauchi. Shortening ratios of modified Dipole Antennas IEEE Trans. AP-32, 1984, №4.
7. Tsaliev T.A. Linear Δ fractals and electrodynamic characteristics of fractal monopole. Odessa: Pros. of the O.S. Popov ONAT, (2014), №2. http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/820/817
8. Bankov C.E., Kurushin A.A. Calculation of the radiated structures by means of FEKO. Moscow: JSC "NPP " Rodnik", (2008).