

УДК 621.396.677.8

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНО-КРИВОЛИНЕЙНЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ МОНОПОЛЕЙ

Цалиев Т. А., Куцук К. В.

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

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНО-КРИВОЛІНІЙНИХ ФРАКТАЛЬНИХ МОНОПОЛІВ

Цалієв Т. А., Куцук К. В.

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

ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE DISCRETELY-CURVILINEAR FRACTAL MONOPOLE

Tsaliev T. A., Kutsuk K. V.

*O. S. Popov Odessa national academy of telecommunication,
1 Kovalska St., Odessa, Ukraine, 65029
tamerlan.tsaliev@gmail.com, kirkuck@gmail.com*

Аннотация. В статье рассмотрена совокупность геометрических свойств (топология) дискретно-криволинейных фракталов. Исследованы характеристики антенн-монополь на основе дискретно-криволинейного кольцевого фрактала. Проведен анализ частотных зависимостей входного импеданса и коэффициента стоячей волны. Установлено, что основным преимуществом фрактальных монополь в сравнении с кольцевым монополем является понижение на 10...15 % значений резонансных частот, следовательно, в том же частотном диапазоне такие конструкции обладают меньшими габаритными размерами.

Ключевые слова: фрактальное множество, дискретно-криволинейный фрактал, входной импеданс, коэффициент стоячей волны.

Анотація. У статті розглянута сукупність геометричних властивостей (топологія) дискретно-криволінійних фракталів. Досліджені характеристики антен-монополь на основі дискретно-криволінійного кільцевого фрактала. Проведено аналіз та порівняння частотних залежностей вхідного імпедансу та модуля коефіцієнта стоячої хвилі. Установлено, що основною перевагою фрактальних монополь порівняно з кільцевим монополем є зниження на 10...15 % значень резонансних частот, отже, у тому самому частотному діапазоні такі конструкції мають менші габаритні розміри.

Ключові слова: фрактальна множина, дискретно-криволінійний фрактал, вхідний імпеданс, коефіцієнт стоячої хвилі.

Abstract. In this paper we consider a set of geometric properties (topology) of discretely-curvilinear fractals. The characteristics of antenna monopoles formed on the basis of discretely-curvilinear ring fractal were investigated. Analysis of the frequency dependence of the input impedance and standing wave ratio was performed. It has been established that a major advantage of fractal monopole compared to the ring monopole is decrease to 10...15 % for resonance frequencies, therefore in the same frequency range such constructions have smaller dimensions.

Key word: fractal set, discrete curvilinear fractal, input impedance, standing wave ratio.

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

Основами теории фрактальных множеств послужили работы французского математика Бенуа Мандельброта [1]. Многочисленные аспекты теории и практики фракталов рассмотрены в [2...6]. Одним из первых фрактальные элементы в антенной технике применил американский инженер Натан Коэн [7].

Элементы конструктивных фрактальных множеств, зависимости от их топологии, можно рассматривать как дискретно-линейные, т.е. образованные из отрезков прямых (множества Коха, Минковского, Пеано), или как дискретно-криволинейные (состоящие из криволинейных элементов). Формирование элементов конструктивных фрактальных множеств основано на итерационной процедуре.

Основа конструкций известных фрактальных антенн представлена линейными (дискретно-линейными) фрактальными элементами начальных порядков итерации, часто называемых предфракталами.

Однако дискретно-криволинейные фрактальные конструкции и антенные элементы, образованные на их основе, до настоящего времени практически не изучались.

Цель данной статьи состоит в рассмотрении топологии криволинейных фракталов, а также в анализе электродинамических характеристик антенных элементов на их основе путем компьютерного моделирования.

Топология фрактальных кривых. Простейшим примером дискретно-линейных фракталов является кривая Коха (рис. 1). Итерационный процесс в данном случае сводится к следующему [2]: вначале выбирается инициатор – отрезок прямой длиной $l = 1$ (рис. 1, а), который разбивается на m равных отрезков. Далее средний из них замещается сторонами равностороннего треугольника (генератором), образуя итерацию первого порядка (рис. 1, б) – кривую, состоящую из четырех прямолинейных отрезков.

При итерации второго порядка подобная процедура повторяется для каждого отрезка этой ломаной (рис. 1, в). Продолжив итерации можно образовать следующие элементы фрактального множества (кривой) Коха.

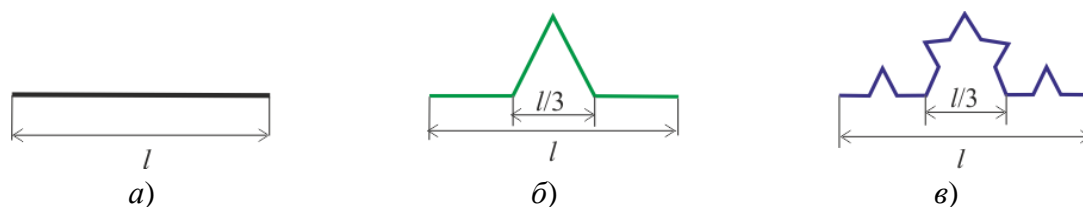


Рисунок 1 – Построение элементов фрактальной кривой Коха

Как известно [1] наряду с топологической размерностью, важным параметром фракталов является их фрактальная размерность (h_f), которая рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$h_f = -\frac{\ln\left(\frac{N}{m}\right)}{\ln\left(\frac{s_{n-1}}{s_n}\right)},$$

где N – число сегментов; s_{n-1} – длина сегмента фрактала $n-1$ порядка итерации; m – число сегментов; s_n – длина сегмента фрактала n порядка итерации.

Для множества Коха при любом порядке итерации фрактальная размерность элементов постоянна, ее можно определить, например, при $n = 2$

$$h_f = -\frac{\ln\left(\frac{12}{3}\right)}{\ln\left(\frac{1/9}{1/3}\right)} = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} 1,262.$$

Принято считать [2], что регулярным фрактальным множествам присущи следующие свойства:

- масштабная инвариантность (самоподобие);
- фрактальная размерность обычно превышает топологическую размерность;
- они содержат произвольно малые масштабы.

Фрактальное множество можно сформировать и на основе замкнутой кривой. Примером является «снежинка» Коха, образованная на основе правильного треугольника (рис. 2, а), каждая сторона которого является инициатором. На рис. 2 показаны результаты после итераций первого (рис. 2, б) и второго (рис. 2, в) порядка. Фрактальная размерность «снежинки» Коха также равна 1,262.

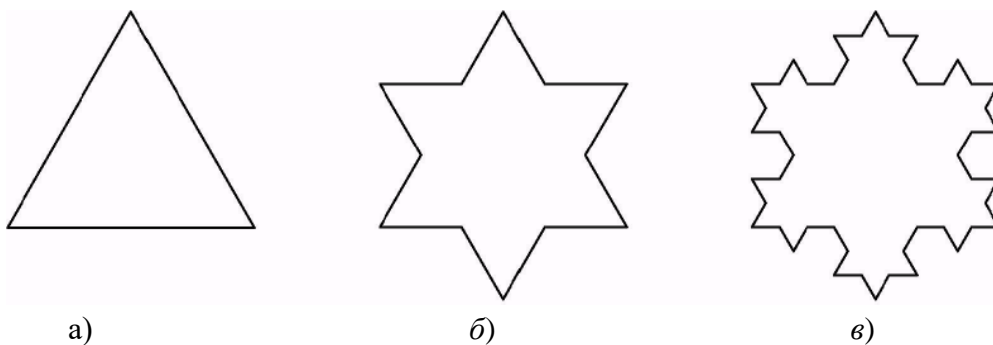


Рисунок 2 – Построение «снежинки» Коха

Предложим в качестве сегментов для формирования элементов фрактального множества использовать криволинейные отрезки и назовем получаемые конструкции дискретно-криволинейными фракталами. Один из возможных алгоритмов их построения аналогичен способу формирования кривой Коха.

Возьмем, например, в качестве инициатора, часть кривой (дугу окружности), опирающуюся на воображаемый отрезок h (хорду) длиной l (рис. 3, а). Разбивая эту дугу на три равные части и замещая средний элемент двумя сторонами криволинейного

треугольника (генератор), при первой итерации получим два возможных варианта фрактала (рис. 3, б, в). Сравнивая их с кривыми Коха (рис. 1), заметим, что использование криволинейных отрезков приводит к разнообразию вариантов форм-фактора фрактальных элементов.

Продолжая описанную процедуру можно сформировать фрактальные элементы более высоких порядков итерации. Отметим, что дискретно-криволинейные фракталы и элементы множества Коха обладают одинаковой фрактальной размерностью. При этом множество кривых Коха представляет собой частный случай описываемого множества дискретно-криволинейных фракталов, когда радиус дуги, опирающейся на конечный отрезок – хорду h , бесконечен.

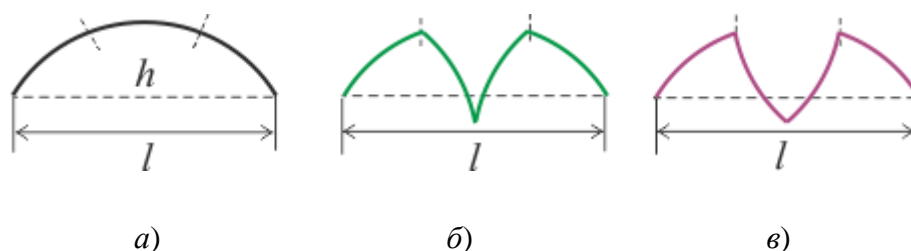


Рисунок 3 – Построение дискретно-криволинейных фракталов

Аналогично приведенному выше примеру дискретно-криволинейные фрактальные конструкции могут быть сформированы и на основе замкнутой фигуры. Так, выбрав в качестве исходной кривой окружность, и разделив ее, например, на три равных сегмента, можно реализовать два варианта «троичного» кольцевого фрактала (рис. 4, на котором пунктирными линиями условно показаны хорды h и дуги-инициаторы).

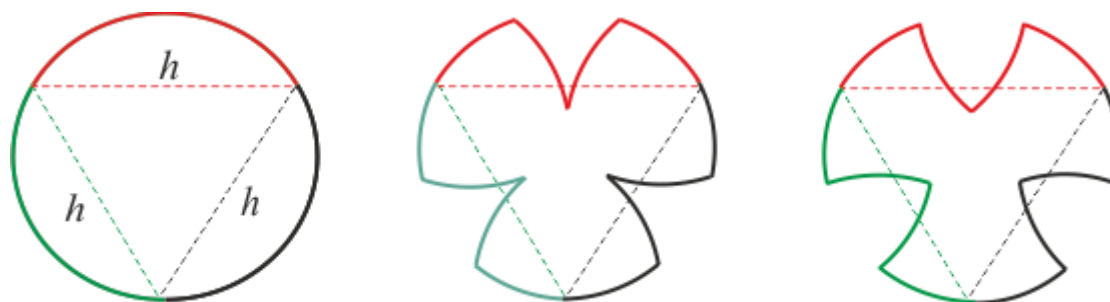


Рисунок 4 – Построение троичных дискретно-кольцевых фракталов

Аналогично, разделив исходную окружность на четыре сегмента, можно сформировать «четверичные» фракталы и другие, более сложные фрактальные элементы.

Особенностью фракталов, создаваемых на основе замкнутых кривых, является возможность произвольного выбора числа сегментов исходной кривой и, соответственно, количества инициаторов. Обозначим эти фракталы символами C_n^k (circle – круг, окружность), где n – число сегментов образующих кольцевой фрактал; k – порядок итерации. Исходную окружность (нулевую итерацию) будем обозначать как C^0 . Фрактальная размерность рассмотренного выше кольцевого фрактального множества также равна 1,262.

В качестве примера, характеризующего возможности применения дискретно-кольцевых фракталов в антенной технике, исследуем свойства фрактальных антенн-монопольей.

Методика исследования. Рассматриваемые конструкции представляют собой монополи (рис. 5), образованные на основе «троичного» (рис. 5 а, б) либо «четверичного» (рис. 5 в, г) дискретно-кольцевых предфракталов первого (а, в) и второго (б, г) порядка итерации.

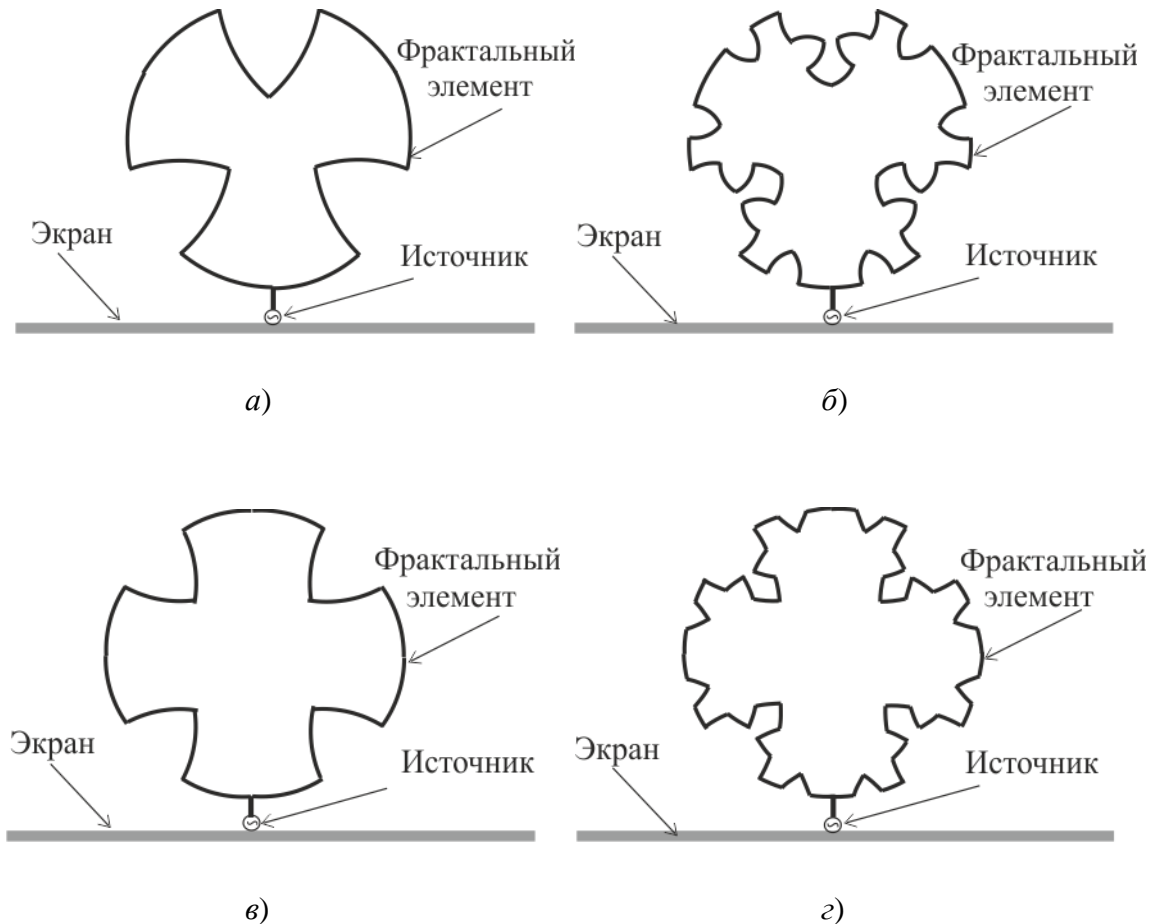


Рисунок 5 – Фрактальные дискретно-кольцевые монополи

Диаметр исходной окружности (фрактала нулевой итерации) равен $\lambda_0/4$, где λ_0 – длина волны соответствующая частоте 2 ГГц. Возбуждение монополей осуществляется источником, находящимся в нижней части короткого проводника длиной $\lambda_0/50$, соединяющего экран с фрактальным элементом.

Расчет электродинамических свойств основан на методе моментов, предусматривающем разбиение антенных элементов на малые по сравнению с длиной волны сегменты и последующее решение системы линейных алгебраических уравнений. Это дает возможность с достаточной точностью определить амплитудно-фазовое распределение токов и корректно рассчитать требуемые параметры антенн.

Для достижения требуемой точности длина Δl проволочного сегмента разбиения должна удовлетворять условию $\Delta l < \lambda/10$, где λ – длина волны. В соответствии с этим, Δl

выбрана равной $\lambda/50$, что обеспечивает требуемую точность во всем выбранном диапазоне частот (от 500 МГц до 5 ГГц, с интервалом в 10 МГц).

При анализе свойств антенн исследовались частотные зависимости входного импеданса и коэффициента стоячей волны. Для сравнения результатов рассчитывались аналогичные характеристики проволочного кольцевого монополя соответствующих размеров.

Результаты компьютерного моделирования. На рис. 6 и 7 представлены частотные зависимости входного импеданса исследуемых антенн. Графики, приведенные на данных рисунках, позволяют сравнивать характеристики «троичных» и «четверичных» фрактальных кольцевых монополей итераций первого и второго порядка, обозначенных, как C_{12}^1 , C_{16}^1 и C_{48}^2 , C_{64}^2 , с аналогичными параметрами проволочного кольцевого монополя (C_0).

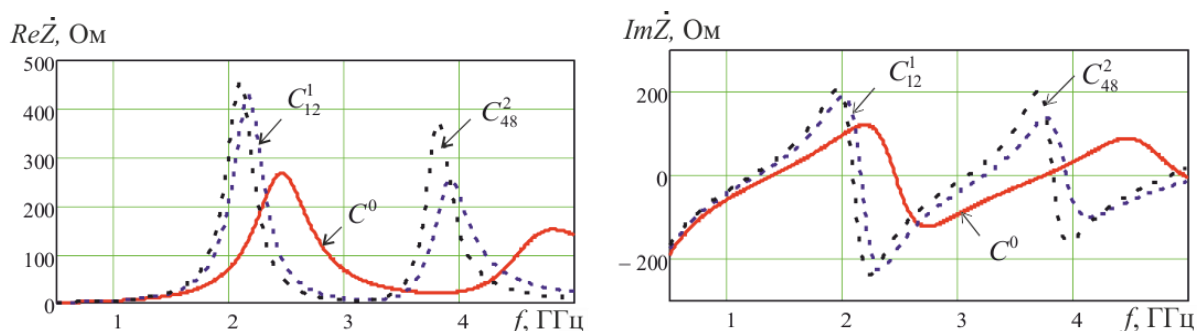


Рисунок 6 – Частотная зависимость входного импеданса «троичных» монополей

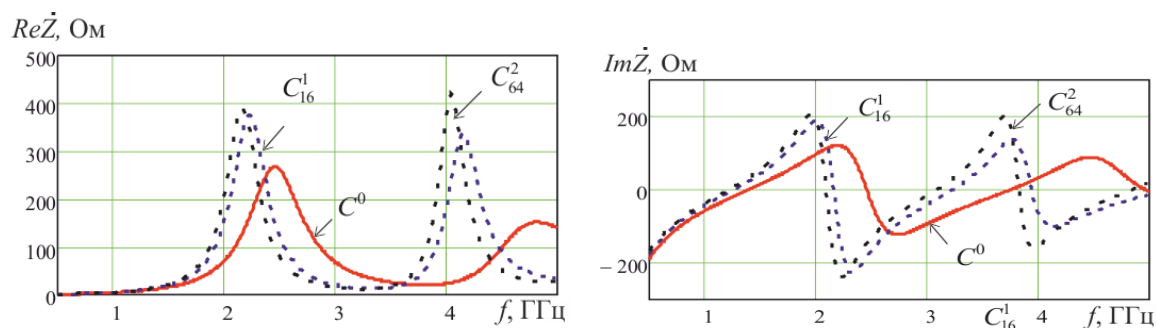


Рисунок 7 – Частотная зависимость входного импеданса «четверичных» монополей

Приведенные на этих рисунках зависимости указывают на характерные отличия свойств фрактальных монополей и проволочного кольцевого монополя:

- смещение резонансов в область более низких частот;
- сближение («сгущение») резонансных областей;
- возрастание максимальных значений действительной мнимой части входного импеданса.

Сравнивая зависимости, представленные на рис. 6 и 7 можно отметить, что повышение количества инициаторов при формировании фрактальных элементов приводит лишь к незначительному смещению резонансных точек и некоторому росту $Re \dot{Z}$ в области

параллельного резонанса. Дальнейшее увеличение их числа, по-видимому, не даст заметного эффекта.

На рис. 8 представлены частотные зависимости КСВ на входе антенн при выборе сопротивления нагрузки R_n , равным значению входного импеданса на частоте первого резонанса. На этих графиках видно, что полоса частот, в которой $КСВ \leq 2$, у рассматриваемых фрактальных антенн несколько меньше, чем у проволочного кольцевого монополя.

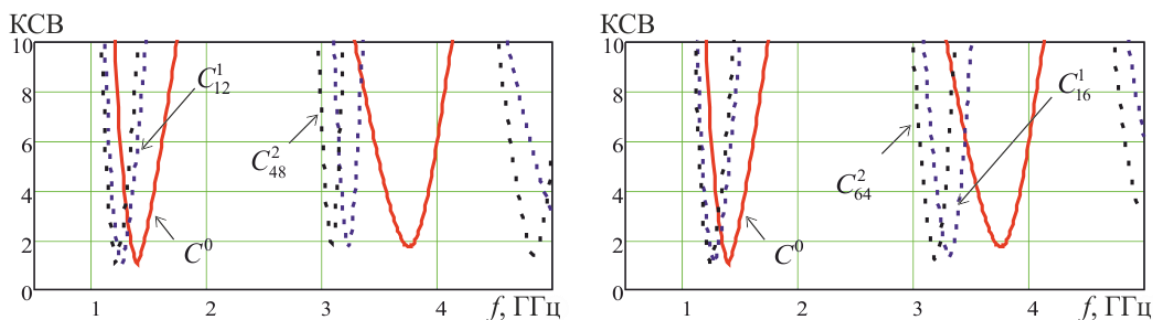


Рисунок 8 – Частотная зависимость КСВ на входе монополей

В табл. 1 сведены результаты, отображенные на рис. 6...8, такие, как частоты первого f_{01} и второго f_{02} резонансов, соответствующие им значения $Re \dot{Z}$, величина смещения δf_0 резонансной частоты относительно кольцевого монополя и относительная ширина полосы частот $\Delta = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0}$, в пределах которой $КСВ \leq 2$.

Таблица 1 – Параметры кольцевых антенн-монополей

Тип фрактала	Первый резонанс				Второй резонанс		
	f_{01} , ГГц	δf_{01} , %	$Re \dot{Z}$, Ом	Δ , %	f_{02} , ГГц	δf_{02} , %	$Re \dot{Z}$, Ом
C^0	1,4	-	12	7,2	2,46	-	267
C^1_{12}	1,26	10,1	10	6,35	2,15	12,6	428
C^2_{48}	1,21	12,95	9,4	5,78	2,09	15	455
C^1_{16}	1,24	9,53	10	6,4	2,23	9,4	376
C^2_{64}	1,21	10,1	9,26	6,4	2,16	12,2	390

Анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет установить, что основным преимуществом фрактальных монополей в сравнении с кольцевым монополем является понижение на 10...15 % значений резонансных частот, следовательно, в том же частотном диапазоне такие конструкции обладают меньшими габаритными размерами.

Следует также отметить рост добротности, присущий фрактальным конструкциям, и связанное с этим некоторое сужение рабочей полосы частот, что можно отнести к недостаткам.

Заключение. В статье рассмотрены топологические свойства дискретно-криволинейных и кольцевых фрактальных конструкций, а также приведены результаты исследования электродинамических характеристик монополей в виде проволочных дискретно-криволинейных предфракталов. На основании полученных результатов проведен их анализ и сравнение с параметрами кольцевого монополя.

Основываясь на приведенные в статье данные можно наметить возможное направление дальнейших исследований – изучение свойств различных конструктивных вариантов антенн с применением дискретно-криволинейной фрактальной топологии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mandelbrot B.B. *The Fractals Geometry of Nature* / B.B. Mandelbrot – N.Y.: Freeman, 1982. – 468 p.
2. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов / Морозов А.Д. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
3. Божокин С. В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: РХД, 2001. – 128 с.
4. 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/>.
5. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн [Электронный ресурс] / В.И. Слюсар // Электроника НТБ-2007. – №. 5. – Режим доступа: www. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/593>.
6. Ахумян А.А. Микрополосковая фрактальная антенна Минковского S-диапазона [Электронный ресурс] / А.А. Ахумян, Н.Г. Погосян, А.А. Гаспарян, А.А. Кузаян // Изв. НАН РА и ГИУА. – 2011. – № 2. – Режим доступа: www. URL: <http://tech.asj-oa.am/2118/1/>.
7. 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.
8. Кириллов А.А. Повесть о двух фракталах / Кириллов А.А. – М.: МЦНМО, 2010. – 180 с.

REFERENCE:

1. Mandelbrot, Benoit B. *The Fractals Geometry of Nature*. San Francisco, CA: Freeman, 1982
2. Morozov, A. D. *Introduction to the theory of fractals*. Moscow - Izhevsk: Institute of computer science, 2002.
3. Bozokin, S. V., Parshin, D. A. *Fractals and multifractals*. Izhevsk: RCD, 2001.
4. Potapov, A. A. "Fractals, scaling and fractional operators in radioengineering and electronics: modern status and development" *Journal of radioelectronics* №1 (2010) 21 Oct. 2014 < <http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/>>.
5. Slusar, V. I. "Fractal antennas. A fundamentally new type of "broken" antennas." *Electronic NTB* №5 (2007): 78-83. 21 Oct. 2014 < <http://www.electronics.ru/journal/article/593>>.
6. Ahumian, A. A., Pogosian, N. G., Gasparian, A. A., Kuzanian, A. A. "Microstrip Mincowski fractal antenna by S-range" *News of National Academy of sciences of Armenia* № 2 (2011): 207-214. 21 Oct. 2014 < <http://tech.asj-oa.am/2118/1/>>.
7. 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.
8. Kirillov, A. A. *The story about two fractals*. Moscow: MCCME, 2010.