

УДК 621.396.677.3

ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА ШИРОКОПОЛОСНОЙ ДВУХКОЛЬЦЕВОЙ ФРАКТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

ЦАЛИЕВ Т.А., КУЦУК К.В.

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

ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДВОКІЛЬЦЕВОЇ ФРАКТАЛЬНОЇ АНТЕННИ

ЦАЛІЄВ Т.А., КУЦУК К.В.

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

FREQUENCY PROPERTIES OF BROADBAND TWO RING FRACTAL ANTENNA

TSALIEV T.A., KUTSUK K.V.

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

Аннотация. На основе компьютерного моделирования анализируются свойства двухкольцевых фрактальных антенн, геометрия которых основана на топологии круговых фрактальных озер. Приведены графики частотных зависимостей входного импеданса, коэффициента стоячей волны и КНД. Представленные результаты позволяют сделать вывод о влиянии ширины колец на частотные свойства и широкополосность исследуемых антенн.

Ключевые слова: фрактал, кольцевые антенны, входной импеданс, коэффициент стоячей волны, коэффициент направленного действия, широкополосность.

Анотація. На основі комп'ютерного моделювання аналізуються властивості двокільцевих фрактальних антен, геометрія яких заснована на топології колових фрактальних озер. Наведено графіки частотних залежностей вхідного імпедансу, коефіцієнта стоячої хвилі і КСД. Надані результати дозволяють зробити висновок про вплив ширини кілець на частотні властивості і широкополосність досліджуваних антен.

Ключові слова: фрактал, кільцеві антени, вхідний імпеданс, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт спрямованої дії, широкополосність.

Abstract. The properties of two-ring fractal antennas, the geometry of which is based on the topology of circular fractal lakes are analyzed on the basis of computer modeling. The graphs of the frequency dependences of the input impedance, standing wave ratio and directive gain are given. The presented results allow to draw a conclusion about the effect of the ring width on the frequency properties and broadband of the investigated antennas.

Key words: fractal, ring antennas, input impedance, standing wave ratio, directivity factor, broadband.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение радиоэлектронных средств во многих сравнительно новых областях, использование их при создании «интеллектуальных вещей», роботов, беспилотных летательных аппаратов, сетей *WiFi* новых поколений, освоение для этих целей все новых диапазонов частот приводит к необходимости поиска новых конструкций антенных элементов, способных совмещать в себе широкополосность и относительно небольшие размеры.

Малоразмерные антенны характеризуются слабой направленностью и основным свойством, ограничивающим диапазон рабочих частот для большинства из них, является непостоянство входного импеданса при изменении частоты.

Одной из интересных возможностей для формирования малоразмерных антенных элементов – это использование планарной геометрической конфигурации. Известные широкополосные и успешно применяемые на практике конструкции в форме плоских архимедовых либо логопериодических спиралей с симметричным и несимметричным питанием нельзя назвать целиком планарными конструкциями. Наличие линий питания, согласующих–симметрирующих элементов реально приводит к увеличению их объема.

Примером антенны, которую с уверенностью можно определить как планарную, является двухкольцевая антенна [1], состоящая из плоских проводящих колец одинаковой ширины. В такой конструкции все элементы антенны, в том числе источник питания и согласующие элементы (если необходимо) расположены в одной плоскости.

Одним из способов улучшения согласования антенн в расширенной полосе частот может быть применение фрактальных форм в конструкции элементов антенны.

Сам термин «фрактал» впервые был предложен в работе Бенуа Мандельброта (см. [2]), там же рассмотрено понятие фрактальной размерности и даются примеры различных фрактальных множеств. Фракталы различного типа рассмотрены также, в работах [3,4], а примеры использования круговых фракталов в конструкциях кольцевых антенн можно найти в работах [5...7].

Целью данной статьи является исследование частотных характеристик антенны, состоящей из двух проводящих планарных колец.

В исследуемой модели антенны кольца имеют переменную ширину, причем ограничивающие их окружности представлены как элементы фрактального множества. Топологические характеристики модели определяются масштабным коэффициентом, при этом питание антенны выполнено в виде отрезка коаксиальной линии, расположенной в плоскости колец.

Особенности формирования топологии двухкольцевой антенны (ДКА), оценка фрактальной размерности и влияния масштабного коэффициента на частотные свойства при выбранном способе возбуждения до настоящего времени никем не рассматривались.

ТОПОЛОГИЯ ПЛАНАРНЫХ КОЛЕЦ

Элементы конструктивного множества, образованные из отрезков прямых, можно называть дискретно-линейными фракталами (фракталы Коха, Минковского, Серпинского), а составленные из окружностей – круговыми фракталами, например, «ковер» Аполлония реализованный в [6].

Фрактальное множество, в частности, может представлять собой совокупность непересекающихся структур – круговых фрактальных озер, образованных замкнутыми криволинейными элементами.

Алгоритм формирования подобных элементов следующий: в качестве «основы» (инициатора) выбирается исходная окружность радиусом R_0 и длиной L_0 , которая делится на m участков длиной $l_0 = L_0/m$.

При первой итерации во внутреннее пространство инициатора добавляется «генератор» – окружность длиной $L_1 = \tau L_0$ и, соответственно, радиусом $R_1 = \tau R_0$, образованная из k элементов длиной l_0 .

Обе окружности расположены в одной плоскости, их центры лежат на одной линии, причем центр меньшей из них смещён.

При последующих итерациях (n – номер итерации) процедура повторяется, теперь в качестве «основы» выбирается генератор $n-1$ порядка.

Таким путём формируется фрактальное множество, самоподобными элементами которого, с коэффициентом подобия τ , являются окружности.

На рис. 1 в качестве примера представлен результат 3-й итерации (предфрактал), где генератором является окружность радиусом $R_3 = \tau R_2$.

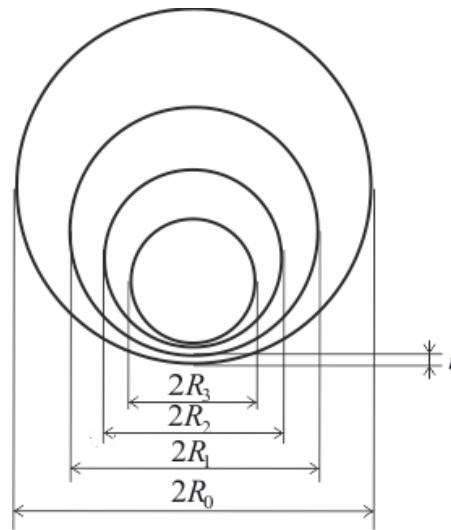


Рисунок 1 – Круговое фрактальное озеро третьего порядка итерации

Одним из параметров элементов фрактальных множеств, является дробная (фрактальная) размерность, которая в данном случае для круговых фрактальных озер сводится к следующей формуле:

$$h_f = -\frac{\ln\left(\frac{N}{N'}\right)}{\ln\left(\frac{l}{l'}\right)},$$

где N – число элементов используемых в качестве «основы»; $N' = m + k$ – число элементов разбиения; $l = L_0 \cdot \tau^{n-1}$ – длина «основы» n -го порядка итерации; $l' = L_0/m^n$ – количество элементов разбиения для n -го порядка итерации.

Для построения такого фрактального множества положим $m=10$, при этом масштабный коэффициент $\tau = (k/m) < 1$ (k, m – целые числа).

Если выбрать $m=10$ и $k=6$ ($l_1=0,1$ и $\tau=0,6$), то для предфрактала первого порядка итерации фрактальная размерность h_f равна 1,2

При изменении значения масштабного коэффициента происходит незначительное изменение фрактальной размерности, так при $k=7$ ($\tau=0,7$) фрактальная размерность становится равной 1,23, а при $k=8$ ($\tau=0,8$) она равна 1,25.

При построении представленной далее модели двухкольцевой антенны использована описанная выше топология круговых фрактальных озер. В этой модели окружности, ограничивающие планарные кольца, есть не что иное, как предфрактал третьего порядка итерации, изображенный на рис. 1.

КОНСТРУКЦИЯ АНТЕННЫ

Основными элементами планарной антенны являются два кольца, каждое из которых имеет переменную ширину (рис. 2).

Большое кольцо ограничено окружностями радиус. $R_0 = \lambda_0/4$ (где λ_0 соответствует расчётной частоте $f_0 = 2,5$ ГГц) и $R_1 = \tau R_0$ (где τ может принимать значения 0,6...0,8). При-

чём центр внутренней окружности смещён относительно внешней так, что минимальная ширина кольца $t = 2$ мм.

Малое (внутреннее) кольцо антенны ориентировано аналогично большому и имеет подобную ему форму (с коэффициентом подобия τ^2). Оно смещено относительно большого так, что центры всех окружностей, образующих кольца, находятся на одной прямой, а минимальное расстояние между краями внешнего и внутреннего колец равно $\tau \cdot t$.

На рис. 2 изображена геометрическая конфигурация модели двухкольцевой антенны построенная при $\tau = 0,6$. Толщина колец, выполненных из проводящего материала, составляет 0,25 мм.

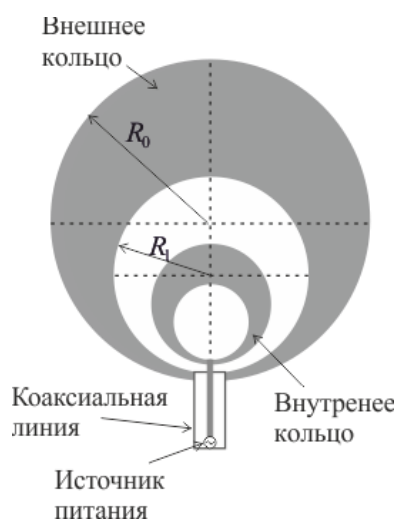


Рисунок 2 – Двухкольцевая планарная антенна $\tau=0,6$.

Пространство между большим и малым кольцами имеет вид щели переменной ширины, форма которой также подобна форме проводящих колец.

Возбуждение антенны производится в области минимального расстояния между кольцами с помощью коаксиальной линии с размерами (диаметр внутреннего проводника $d_1 = 1,4$ мм, диаметр диэлектрика $d_2 = 5$ мм) соответствующими волновому сопротивлению 75 Ом (рис. 3).

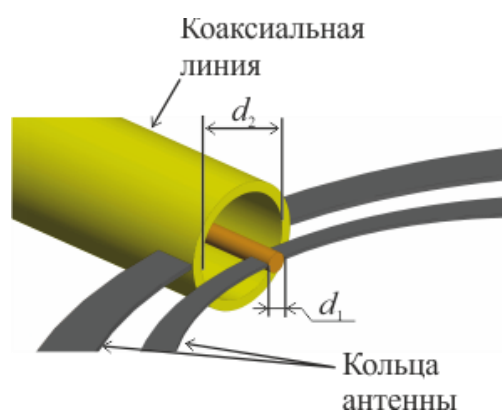


Рисунок 3 – Возбуждение антенны коаксиальной линией

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленные ниже результаты исследования электродинамических характеристик антенн получены путем численного моделирования, в процессе которого решалась дифракционная задача. При этом использован метод моментов, который сводится к разбиению поверхности антенны на элементарные треугольные участки и представление

металлических элементов как совокупности эквивалентных электрических поверхностных токов [8].

В результате, задачу нахождения амплитудно-фазового распределения плотности поверхностного тока можно привести к системе линейных алгебраических уравнений. Полученная система уравнений решается с помощью метода исключения Гаусса.

Решение дифракционной задачи позволило определить амплитудно-фазовое распределение плотности поверхностных токов на поверхности элементов антенны, что дало возможность рассмотреть частотные зависимости входного импеданса и коэффициента стоячей волны на входе антенны от частоты. Расчет распределения полей в дальней зоне, позволил определить частотные зависимости максимального коэффициента направленного действия (КНД).

В приводимых расчетах длина сторон треугольных участков была принята равной $\lambda_0/100$, что обеспечивает достоверность и корректность полученных результатов.

Расчеты всех характеристик выполнялись на дискретных частотах, равномерно распределённых в диапазоне от 1 до 10 ГГц с интервалом 50 МГц. Выбранный частотный диапазон, в частности, охватывает полосы частот соответствующие большинству современных стандартов беспроводной связи.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На приведённых ниже рисунках представлены кривые частотных зависимостей двухкольцевой антенны при различных значениях масштабного коэффициента, отмеченные цифрами: $1-\tau=0,6$; $2-\tau=0,7$; $3-\tau=0,8$.

На рис. 4 отображены частотные зависимости действительной (рис. 4, а) и мнимой (рис. 4, б) части входного импеданса исследуемых моделей антенн. О широкополосных свойствах антенны и степени согласования ее с питающей линией, можно ориентировочно судить по характеру осцилляций действительной и мнимой части входного импеданса в рассматриваемом диапазоне частот.

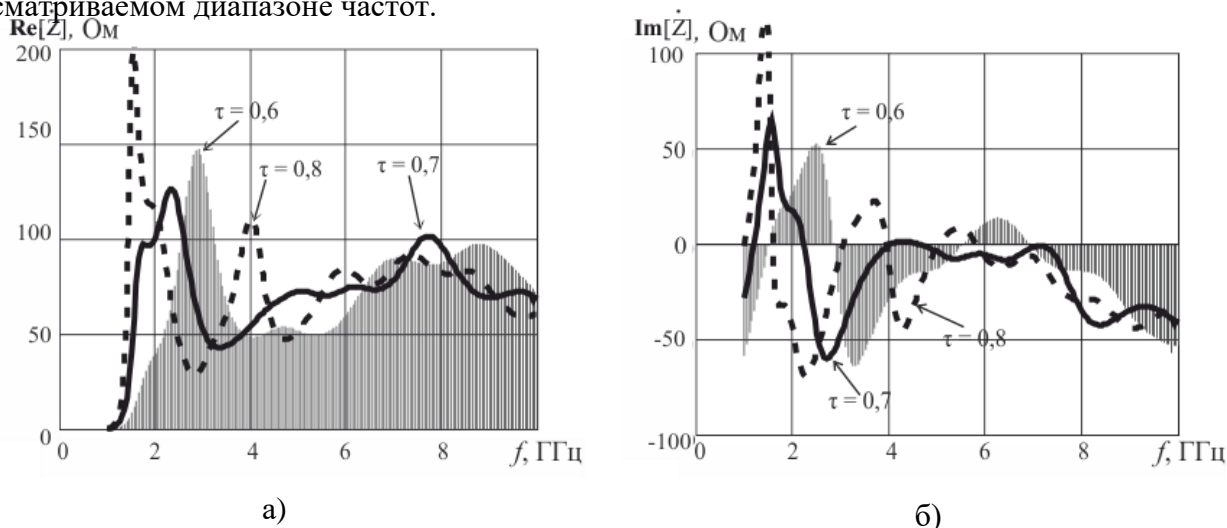


Рисунок 4 – Частотная зависимость действительной (а) и мнимой (б) части входного импеданса

Анализируя зависимости, показанные на рис. 4, отметим участки, где частотные зависимости входного импеданса «сглажены», т.е. их осцилляции минимальны. При этом для

$\tau = 0,7$ область, где мнимая часть входного импеданса близка к нулю, имеет большую ширину, чем у остальных кривых.

Следствием этого является более широкая полоса частот, в которой антенна согласована с питающей линией.

Этот факт иллюстрирует рис. 5, а, на котором отображены частотные зависимости КСВ на входе антенны при питании коаксиальной линией с волновым сопротивлением 75 Ом.

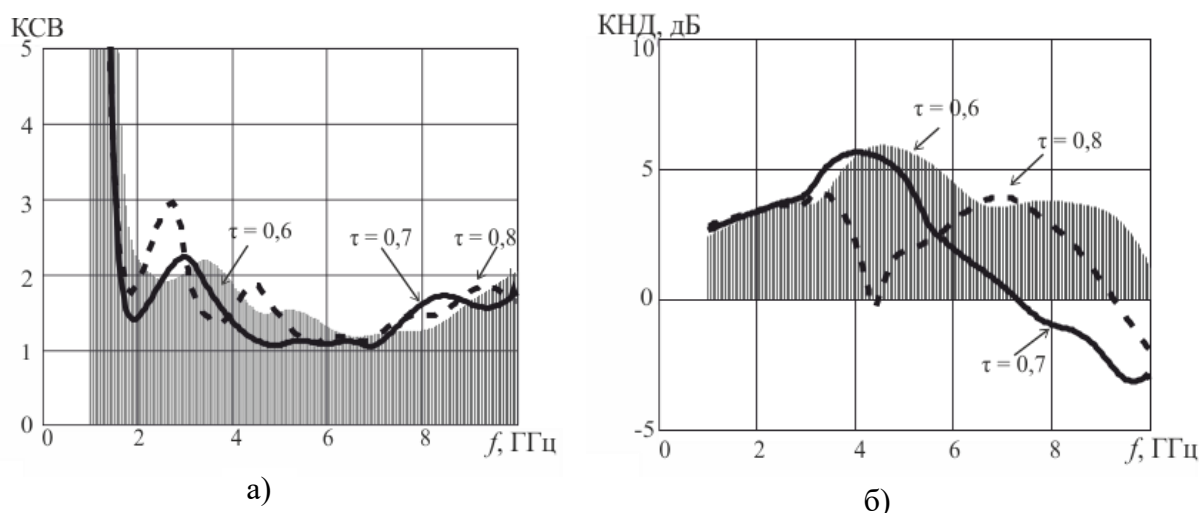


Рисунок 5 – Частотные зависимости коэффициента стоячей волны (а) и направленного действия (б)

Один из способов оценки широкополосности рассматриваемых антенн – сравнение значений коэффициента перекрытия по частоте f_{\max}/f_{\min} , при котором $КСВ < 2$ (табл. 1).

Таблица 1 – Значения коэффициента перекрытия по частоте

Коэффициент масштаба	f_{\min} , ГГц	f_{\max} , ГГц	f_{\max}/f_{\min}
$\tau = 0,6$	3,9	10	2,6
$\tau = 0,7$	3,35	10	3,03
$\tau = 0,8$	3,1	10	3,33

Данные в табл. 1 значения, позволяют видеть, что коэффициент перекрытия при $\tau = 0,7$ незначительно меньше аналогичного параметра при $\tau = 0,8$. Однако при этом у $\tau = 0,7$ наблюдается большая ширина участка, при котором $КСВ \approx 1$.

Широкополосность рассматриваемых антенн по направленным свойствам можно определить рассматривая частотную зависимость КНД.

Анализируя представленные на рис. 5, б частотные зависимости максимального КНД, можно отметить, что лучшая широкополосность по направленным свойствам наблюдается у антенны при $\tau = 0,6$.

ВЫВОДЫ

В работе описан алгоритм формирования круговых фрактальных озера и на этой основе предложена конструкция двухкольцевой антенны. С использованием компьютерного моделирования рассчитаны и построены частотные зависимости входного импеданса, КСВ и КНД, а также выполнено сравнение полученных результатов.

Рассмотренные модели антенн обладают хорошими широкополосными свойствами как по КСВ, так и КНД.

Достигнутые результаты позволяют сделать вывод, что представленную конструкцию можно применять в радиоэлектронных устройствах, а также возбуждать с помощью коаксиальной линии без дополнительных согласующих устройств. Планарность рассматриваемой конструкции и расположение ее элементов в одной плоскости упрощает ее применение в качестве элементов антенных решёток.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Куцук К.В. Двухкольцевая планарная антенна / К.В. Куцук // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. - 2016. - № 1. С. 171–175.
- 2 Mandelbrot B. B. The Fractals Geometry of Nature. N.Y.: Freeman, 1982. 468 p.
- 3 Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов / Морозов А.Д. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
- 4 Кириллов А. А. Повесть о двух фракталах / Кириллов А.А. – М.: МЦНМО, 2010. – 180 с.
- 5 Потапов А. А. Фрактальная электродинамика, скейлинг фрактальных антенн на основе кольцевых структур и мультимасштабные частотно-избирательные 3D-среды или фрактальные «сэндвичи»: переход к фрактальным наноструктурам / А. А. Потапов, Е. Н. Матвеев // Радиотехника и электроника. 2010. - Т. 55, - №10 - С. 1157-1177.
- 6 Mehetre R Tejal., Raj Kumar. Design of inscribed circle Apollo UWB fractal antenna with modified ground plane. Indian Journal of Science and Technology, 2012, Vol. 5, № 6. P. 2846-2850. [Электронный ресурс] - Режим доступа : www. URL: [https:// http://www.indjst.org](https://http://www.indjst.org).
- 7 Абдрахманова Г. И. Фрактальная сверхширокополосная антенна на основе кругового монополя / Г.И. Абдрахманова // Журнал радиоэлектроники. - 2013. - № 8. С. - 1-20.
- 8 Банков С.Е. Расчёт излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. - 245 с.

REFERENCES

- 1 Kutsuk K.V. Dvukhkoltsevaia planarnaia antenna / K.V. Kutsuk // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. – 2016. – № 1. S. 171–175.
- 2 Mandelbrot B. B. The Fractals Geometry of Nature. N.Y.: Freeman, 1982, 468 p.
- 3 Morozov A. D. Vvedeniye v teoriyu fraktalov / Morozov A.D. // Moskva-Yzhevsk: Ynstytut kompiuternykh yssledovanyi, 2002. – 160 s.
- 4 Kyryllov A. A. Povest o dvukh fraktalakh / Kyryllov A.A. // M.: MTsNMO, 2010. – 180 s.
- 5 Potapov A. A. Fraktalnaia elektrodynamiyka, skeilynh fraktalnykh antenn na osnove koltsevykh struktur y multymasshtabnye chastotno-yzbyratelnye 3D-sredy yly fraktalnye «sendvychy»: perekhod k fraktalnym nanostrukturam / A. A. Potapov, E. N. Matveev // Radyotekhnyka y elektronika. 2010. – T. 55, – №10 – S. 1157–1177.
- 6 Mehetre R Tejal., Raj Kumar. Design of inscribed circle Apollo UWB fractal antenna with modified ground plane. Indian Journal of Science and Technology, 2012, Vol. 5, № 6. P. 2846–2850. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupa : www. URL: [https:// http://www.indjst.org](https://http://www.indjst.org).
- 7 Abdrakhmanova H. Y. Fraktalnaia sverkhshyrokopolosnaia antenna na osnove kruhovoho monopolia / H.Y. Abdrakhmanova // Zhurnal radyoelektronnyky. – 2013. – № 8. S. – 1–20.
- 8 Bankov S.E. Raschet yzluchaemykh struktur s pomoshchiu FEKO / S.E. Bankov, A.A. Kurushyn // M.: ZAO «NPP «Rodnyk», 2008. – 245 s.