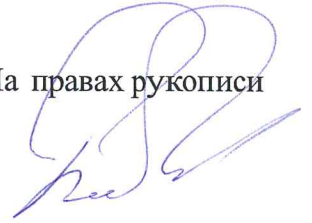


На правах рукописи



Бабичев Дмитрий Анатольевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ НА  
ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА

**05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), кафедра Микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Тупик Виктор Анатольевич

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук, профессор, Потапов Александр Алексеевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, главный научный сотрудник;
2. Кандидат физико-математических наук Колмаков Игорь Анатольевич, ООО "Специальный технологический центр", старший научный сотрудник.

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное предприятие «РАДАР ММС», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 14 декабря 2016 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат разослан 13 октября 2016 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.03



Шевченко М. Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования:**

Для беспроводных технологий систем передачи информации требуются компактные приемо-передающие антенны, к которым предъявляются следующие требования: малые габаритные размеры, заданные требования к диаграмме направленности, поляризационным и частотным характеристикам.

Среди малогабаритных антенн наибольшее распространение получили микрополосковые антенны, которые применяются для обеспечения связи стандартов GSM, Wi-Fi, GPS, Wi-Max, ГЛОНАСС.

Узконаправленную форму диаграммы направленности обеспечивают объединением микрополосковых антенн в антенные решетки с использованием нескольких диэлектрических слоев.

Тип поляризации антенны обеспечивается применением щелей, усечением углов, положением точки питания антенны и использованием специальных настроечных шлейфов в излучателе микрополосковой антенны.

Частотные характеристики антенны, в том числе возможность одновременной работы в нескольких частотных диапазонах обеспечиваются применением многослойных антенн с несколькими излучателями, щелей, закорачивающих штырей, вырезов, смещения положения точки питания, применения фрактальных излучателей. Перестроение резонансных частот достигается изменением геометрии микрополосковой антенны.

Для создания многодиапазонных антенн излучатели микрополосковых антенн выполняют в форме геометрических фракталов [1]. Преимуществом фрактального подхода является простой алгоритм формирования геометрии антенны.

Актуальной задачей является разработка антенн, обладающих одновременно малыми массогабаритными характеристиками, высоким коэффициентом усиления, многодиапазонными свойствами и заданной поляризацией.

В работе предложен способ формирования микрополосковой антенны на основе фрактального подхода, обеспечивающий работу антенны в нескольких частотных диапазонах с заданной диаграммой направленности поляризации [2, 3].

При использовании фрактального подхода указанные характеристики антенны определяются ее геометрическими параметрами.

Разработанная антенна применима в условиях необходимости выполнения требований многодиапазонности или обеспечения различных диаграмм направленности на разных частотах.

Антенны с такими характеристиками целесообразны для обеспечения навигации современных летательных аппаратов, в которых требуется непрерывное автоматическое определение скорости движения летательного аппарата по отношению к земной поверхности и направление движения и текущих координат местоположения аппарата. Составляющие вектора скорости (угол сноса и путевая скорость) определяются по значениям доплеровских сдвигов частот сигналов, отраженных от земной поверхности и принятых несколькими лучами антенны. Применение четырехлучевой антенны позволяет повысить точность определения скорости и сноса аппарата.

#### **Цель диссертационной работы:**

Целью работы является разработка микрополосковой антенны, обладающей одновременно свойствами многодиапазонности заданной диаграммы направленности и требуемой поляризации, и исследование влияния геометрических параметров на характеристики антенны.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка подхода, позволяющего введением фрактальности обеспечить заданные характеристики антенны: частотные, поляризационные, диаграмму направленности;

- разработка подхода для оценки диаграммы направленности и исследования влияния геометрических параметров на характеристики фрактальной антенны;

#### **Научная новизна работы:**

Предложен новый способ формирования микрополосковых антенн на основе фрактального подхода с использованием нескольких типов генераторов фрактальности простейшей формы.

Получены зависимости диаграммы направленности, частотных характеристик и поляризации фрактальной антенны от взаимного расположения и формы центрального и периферийных элементов антенны различной геометрической формы.

Определена зависимость коэффициента усиления фрактальной антенны от количества итераций фрактальной антенны.

#### **Основные методы исследования:**

При решении поставленных задач использовались численные методы имитационного моделирования с использованием прикладных пакетов MathCAD, Ansoft HFSS. Проверка теоретических положений выполнялась на основе экспериментальных исследований нескольких образцов разработанной антенны с использованием векторного анализатора цепей N5230C фирмы Agilent.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

- Фрактальная антенна на основе одного центрального и четырех периферийных элементов различной геометрической формы позволяет обеспечить увеличение коэффициента усиления по сравнению с 4-х элементной антенной решеткой при аналогичной площади раскрыва;
- Фрактальная антенна является многодиапазонной, расположение резонансов которой определяется геометрическими параметрами входящих в неё элементов;
- Вид поляризации фрактальной антенны определяется типом резонанса, взаимным расположением элементов антенны и формой центрального и периферийных элементов;
- Количество итераций фрактальной антенны, позволяющее увеличить коэффициент усиления, ограничено первой итерацией.

#### **Практическая значимость результатов работы**

Разработан новый тип конструкций микрополосковых антенн фрактального типа с одним центральным и четырьмя периферийными элементами различной геометрической формы, позволивший объединить в одной антенне требования

высокого коэффициента усиления, возможность работы в нескольких частотных диапазонах, а также возможность формирования различных типов поляризации.

Получены зависимости коэффициента усиления, изменения частоты резонансов и типа поляризации от геометрических параметров антенны.

### **Степень обоснованности и достоверности полученных результатов**

Обоснованность научных положений и достоверность результатов обеспечены применением общепризнанных методов исследования.

Полученные теоретические результаты не противоречат ранее полученным и описанным в литературе результатам.

Обоснованность теоретических результатов подтверждена экспериментально, а также сравнением с данными других научных исследований.

### **Реализация и внедрение результатов исследования**

Результатом проведенных исследований являются образцы фрактальной антенны.

### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

64-ая, 65-ая, 66-ая, 67-ая, 68-ая конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», секция микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры (2 февраля 2011г, 26 января 2012г, 6 февраля 2013г, 3 февраля 2014г.; 29 января 2015г., Санкт-Петербург), 13-ая научная молодежная школа по твердотельной электронике, «Физика и технология микро- и наносистем» (ноябрь 2010, Санкт-Петербург), международная конференции – Научная школа молодых ученых «Новые материалы для электромашиностроения и радиоэлектроники» XIV Молодежная научная конференция ИХС РАН» (4-6 декабря 2013г., Санкт-Петербург).

### **Публикации:**

Основные результаты диссертации опубликованы 12 работах, среди них: 2 статьи в международных рецензируемых журналах, включенных в системы цитирования Scopus и Web of Science; 5 - в научных журналах, включенных в

перечень ВАК; получены 2 патента на полезную модель; другие статьи и материалы конференций опубликованы в 3-х журналах и сборниках конференций. Результаты исследований докладывались на 9 международных, межвузовских научно-практических конференциях.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из 4-х глав с выводами, заключением. Работа изложена на 104 страницах машинописного текста, включает 157 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 75 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цели и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор методов проектирования микрополосковых антенн, в частности, рассмотрены способы увеличения коэффициента усиления, задания требуемой поляризации и частотных характеристик антенн.

Способы увеличения коэффициента усиления включают в себя применение антенных решеток и многослойных диэлектрических структур.

Способы задания поляризации в микрополосковых антеннах: введение щелей в излучателе антенны, смещение точки питания по диагонали прямоугольного излучателя антенны для задействования мод с ортогональными линейными поляризациями, применение усеченных углов в излучателе микрополосковой антенны, обеспечивающих создание на одной резонансной частоте круговой поляризации.

Способы создания многодиапазонных антенн включают в себя применение многослойных антенн, применение реактивно-нагруженных многочастотных антенн, применение фрактальных микрополосковых антенн. Применение фрактальных антенн позволяет реализовать многодиапазонный режим работы. Преимуществом фрактального подхода является простой алгоритм формирования геометрии антенны.

Исходя из вышеизложенного, актуальным может считаться задача разработки метода проектирования микрополосковых антенн, сочетающего в себе несколько вышеперечисленных преимуществ: простой алгоритм формирования антенны, возможность формирования требуемой диаграммы направленности, наличие многорезонансности и возможности управления резонансными частотами, возможность управления типом поляризации.

В плане решения поставленных задач представляет интерес фрактальный подход для разработки микрополосковых антенн. Определение характеристик излучения фрактальной антенны проведено в [4], особенности разработки и изготовления описаны в [5]. В частности, для фрактальной антенны дипольного типа создана математическая модель, позволяющая выполнить анализ характеристик излучения [6]. Расчет антенн проводится также методами численного моделирования.

Сложность применения фрактальных антенн состоит в анализе взаимосвязи геометрических параметров антенны и её рабочих характеристик [7, 8].

**Во второй главе** предложен фрактальный подход для конструирования микрополосковых антенн, обеспечивающий получение заданных характеристик:

- конструкция представляет собой центральный и четыре периферийных элемента, выполненные в едином металлическом слое, обеспечивающем электрическую связь элементов, на диэлектрической подложке с металлическим экраном;

- периферийные элементы расположены по углам центрального излучателя;

- центральный и периферийный элементы могут иметь различную геометрическую форму (квадрат, треугольник, круг);

- центральный элемент является генератором фрактала, а периферийные – подобны ему с варьируемым коэффициентом подобия.

В работе проведено исследование микрополосковых антенн указанного фрактального типа на основе квадратного, круглого и треугольного генераторов фрактала. Микрополосковая антенна на основе квадратного генератора фрактальности представлена на Рис. 1.



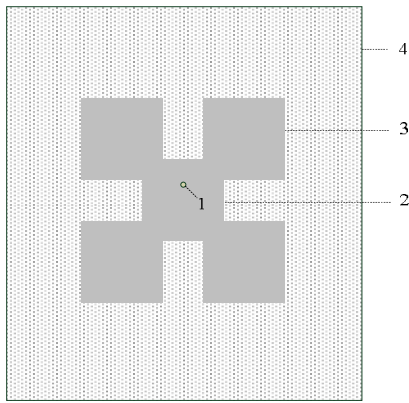
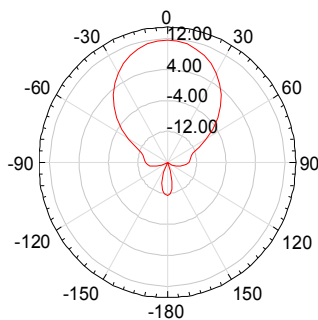


Рис. 1

Микрополосковая антенна содержит коаксиальный питающий фидер 1, соединенный с центральным элементом 2, по углам которого расположены периферийные элементы 3, расположенные на диэлектрической подложке 4. Фидер смещен на расстояние  $1/6$  длины стороны излучателя от центра излучателя краю.

Фрактальная антенна имеет многодиапазонный режим работы, различные типы поляризации и формы диаграммы направленности на разных частотах, в том числе однолучевой (с коэффициентом усиления 11 дБ), четырехлучевой (с разносом лучей 7,5дБ).

Анализ характеристик излучения фрактальной антенны с различными формами генераторов фрактала (квадратной, круглой и треугольной) выявил схожий набор характеристик излучения, что позволяет говорить о новом классе микрополосковых антенн фрактального типа. Разработанный класс антенн позволяет осуществлять проектирование антенн с заранее прогнозируемыми результатами.



$$\varphi=0^0$$

Рис. 2 ДН круглого излучателя

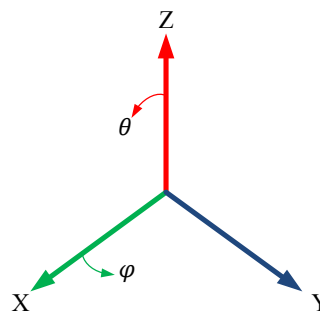
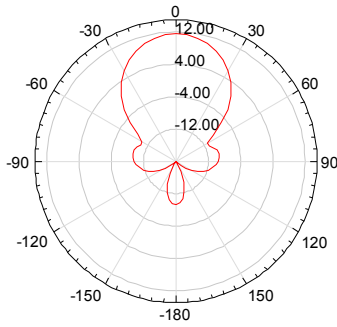


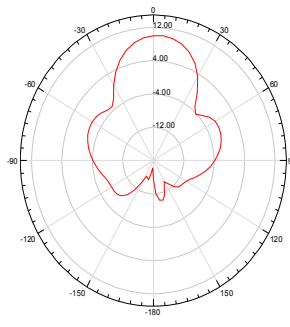
Рис. 3. Оси координат

Результаты моделирования фрактальных антенн в программном пакете Ansoft HFSS с различными генераторами фрактала квадратной, круглой и треугольной формы представлены соответственно на Рис. 2, Рис. 4, Рис. 5. Приведенные диаграммы направленности (ДН)



$\varphi=0^0$

Рис. 4 ДН  
прямоугольного  
излучателя



$\varphi=0^0$

Рис. 5 ДН  
треугольного  
излучателя

демонстрируют увеличение коэффициента усиления микрополосковой антенны до 11дБ. На Рис. 3 для наглядности приведена схема измерения для плоскости излучения антенны с  $\varphi=0^0$ . В работе предложен способ расчета диаграммы направленности фрактальной антенны на основе расчета диаграммы направленности кольцевых антенных решеток.

Излучатели фрактальной антенны находятся на двух кольцах: первое кольцо радиусом  $a_1 = 0$ , и второе кольцо с радиусом  $a_2 = \frac{d}{\sqrt{2}}$  (Рис. 6). На первом кольце – только один излучатель, на втором – 4 излучателя.

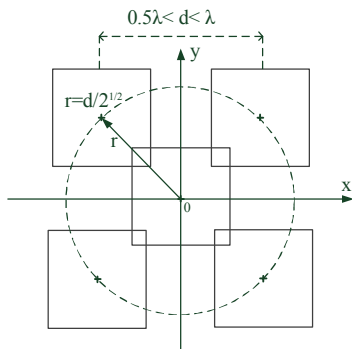


Рис. 6

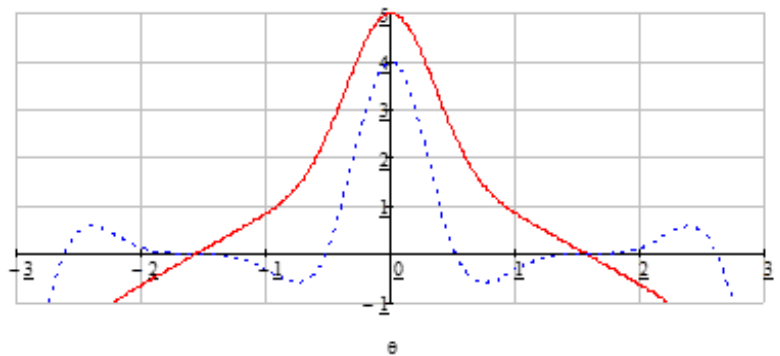


Рис. 7

Формула диаграммы направленности фрактальной антенны будет определяться как произведение множителя такой решетки на диаграмму направленности, создаваемую одним излучателем:

$$f(\theta, \varphi) = F_0(\theta, \varphi) \cdot F_p(\theta, \varphi) \tag{1}$$

При расстоянии между 4-мя внешними излучателями в диапазоне  $0.5\lambda < d < \lambda$  излучатели имеют электрическую связь через центральный излучатель.

Множитель кольцевой антенной решетки определяется следующим выражением:

$$F_p(\theta, \varphi) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp[jka_m(\sin \theta \cdot \cos(\varphi_n - \varphi) - \sin \theta_0 \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_0))] \quad (2)$$

где  $M$  – число колец,  $N$  – число элементов в одном кольце,  $a_m$  – радиус  $m$  – ого кольца,  $\varphi_n = \frac{2\pi}{N}(n - 1)$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\theta_0$ ,  $\varphi_0$  – углы, определяющие направление главного лепестка.

По предложенным формулам выполнен расчет диаграммы направленности в программном пакете MathCAD, построены соответствующие им графики (Рис. 7). Фрактальная антенна имеет в сравнении с аналогичной антенной решеткой 2x2 увеличенный коэффициент усиления. Коэффициент усиления предложенной фрактальной антенны на 25% выше коэффициента усиления 4-х элементной антенной решетки при одинаковой площади раскрыва.

Диаграмма направленности фрактальной антенны, построенная на основе разработанной модели, соответствует диаграмме направленности, полученной по результатам компьютерного моделирования (Рис. 2).

Частотные зависимости фрактальных антенн с генераторами квадратной, круглой и треугольной формы имеют схожие характеристики: первая резонансная частота фрактальных антенн на основе различных генераторов совпадает и соответствует основной моде излучения в генераторе фрактала. Частотные зависимости фрактальных антенн имеют три резонансные частоты. Анализ электромагнитного поля в антенне показал, что на первой резонансной частоте половина длины волны укладывается в каждом из пяти элементов антенны, что обеспечивает коэффициент усиления на первой резонансной частоте 11дБ.

На второй резонансной частоте половина длины волны укладывается только в периферийные элементы, тогда как центральный элемент не является излучающим на данной частоте. Результирующая диаграмма направленности имеет провал в центральной области и коэффициент усиления 6,1дБ.

Диаграмма направленности на второй резонансной частоте имеет четырехлучевой вид, что позволяет применять антенну для измерения угла сноса и путевой скорости. Ее форма приведена на Рис. 8. Требование четырехлучевой диаграммы

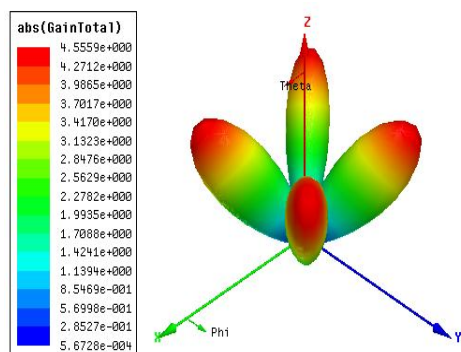


Рис. 8

направленности необходимо для непрерывного определения скорости движения, направления движения и текущих координат местоположения летательного аппарата. Разнос лучей составляет 7,5дБ. На третьей резонансной частоте половина длины волны укладывается в центральном элементе, при этом в периферийных элементах укладывается по две половины длины волны.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния геометрических параметров фрактальной антенны на её характеристики.

Актуальной задачей для фрактальных антенн является возможность управления частотными характеристиками и диаграммой направленности антенны, а также получение зависимостей, позволяющих задавать частотные характеристики и варьировать коэффициент усиления в зависимости от геометрических параметров.

В качестве геометрических параметров, обеспечивающих управление частотными характеристиками и диаграммой направленности, выбраны соотношение размера периферийных элементов по отношению к центральному элементу  $a/a_0$  (коэффициент подобия), а также расстояние между центральным и периферийными элементами  $b/b_0$  (Рис. 9).

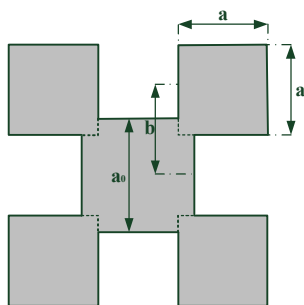


Рис. 9

Максимизация коэффициента усиления на первой резонансной частоте достигается при  $a/a_0=0,82$ . Коэффициент усиления антенны на второй и третьей резонансных частотах уменьшается по мере увеличения соотношения  $a/a_0$  с 7,5дБ до 6дБ и с 9дБ до 4дБ.

Увеличение расстояния между центральным и периферийными элементами антенны приводит к уменьшению коэффициента усиления на первой (Рис. 10) и третьей (Рис. 12) резонансных частотах и к увеличению коэффициента усиления на второй резонансной частоте (Рис. 11).

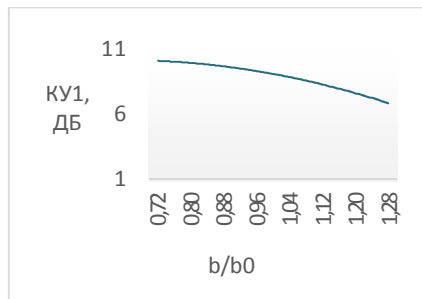


Рис. 10

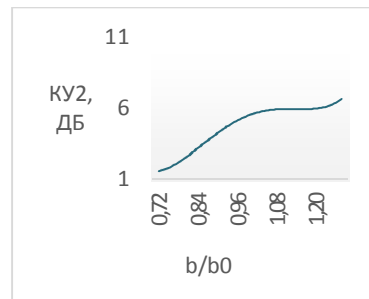


Рис. 11

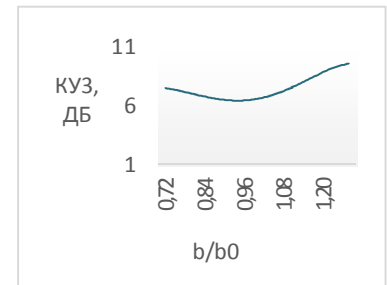


Рис. 12

Геометрически параметры антенны оказывают влияние также на частотные характеристики антенны, так как изменяют распределение напряженности электрического поля и распределение токов в периферийных и центральном элементах антенны.

С увеличением размера периферийных элементов резонансные частоты смещаются в сторону более низких частот. При удалении периферийных элементов резонансные частоты сдвигаются в область более низких частот.

Полученные результаты позволяют осуществлять смещение резонансных частот в пределах диапазона  $\pm 15\%$  с помощью изменения расстояния между периферийными и центральным элементами, а также размера периферийных элементов.

Важной особенностью разработанной антенны является возможность управления расположением резонансных частот и их соотношением за счет изменения ее геометрических характеристик. Увеличение размеров периферийных элементов, а также расстояния между центральным и периферийными элементами приводит к смещению одновременно первого, второго и третьего резонансов в область более низких частот. Соотношение смежных резонансных частот вне зависимости от размера периферийных элементов остается постоянным.

В работе предложен следующий способ постановки резонансов на требуемые частоты:

1) выбор первой резонансной частоты, которая определяется резонансной частотой центрального элемента;

2) вторая и третья резонансные частоты определяются по полученным выше аналитическим зависимостям;

3) в зависимости от соотношения  $a/a_0$  могут быть сдвинуты все три резонансные частоты одновременно.

Рассмотренные микрополосковые антенны являются фрактальными антеннами первой итерации. Периферийные элементы являются подобными центральному с заданным коэффициентом подобия, выражающимся отношением размера периферийных элементов  $a$  к размеру центрального элемента  $a_0$ . Фрактальная антенна второй итерации показана на Рис. 13.

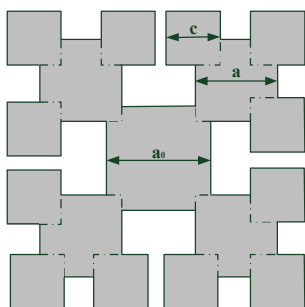


Рис. 13

Таким образом, к каждому периферийному элементу первой итерации добавляется по три периферийных элемента второй итерации. Общее количество периферийных элементов второй итерации – 12. Размер периферийных элементов второй итерации ограничен соотношением  $c/a=0,5$ .

При увеличении этого соотношения периферийные элементы второй итерации пересекаются. Высокое значение коэффициента усиления при первой итерации достигается тем, что и периферийные и центральный элементы кратны одной половине длине волны.

Одновременно с увеличением периферийных элементов второго порядка до размера  $c/a=0,75$  нарушается структура распределения электрического поля в периферийных элементах первого порядка, что приводит к уменьшению коэффициента усиления до 8дБ.

Увеличение количества итераций не увеличивает коэффициент усиления фрактальной антенны, так как в силу геометрических причин их размер на каждой итерации должен уменьшаться, что делает невозможным кратность периферийных элементов высших итераций половине длине волны.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований изготовленного экспериментального образца.

Измерения проводились на стенде на Рис. 15 с использованием векторного анализатора цепей N5230C фирмы Agilent.

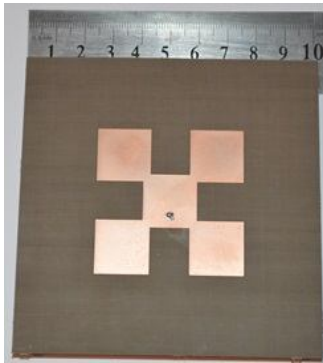


Рис. 14

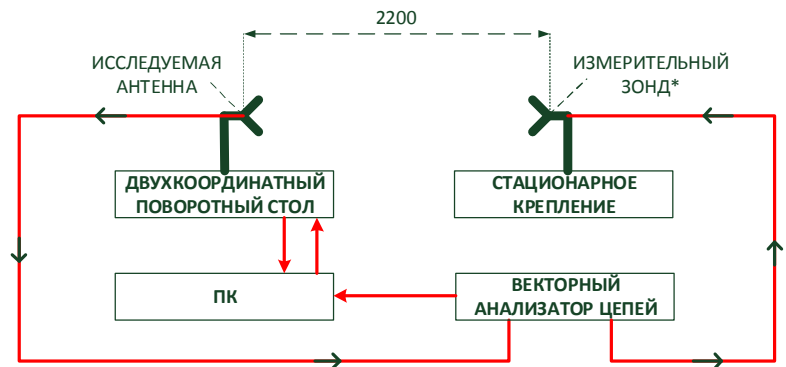


Рис. 15

В рамках исследования экспериментального образца проводились измерения:

- коэффициента стоячей волны (КСВ);
- диаграммы направленности (ДН) в главных сечениях на резонансных частотах **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

Диаграммы направленности экспериментального образца и компьютерной модели, а также частотные характеристики совпадают и подтверждают полученные теоретически результаты.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. предложен фрактальный подход для конструирования микрополосковых антенн на основе центрального (генератора фрактала) и четырех периферийных элементов (с варьируемым коэффициентом подобия), расположенных по углам центрального элемента, выполненных в едином металлическом слое, обеспечивающим электрическую связь излучателей, на диэлектрической подложке с металлическим экраном;

2. предложен способ расчета диаграммы направленности фрактальной антенны на основе расчета диаграммы направленности кольцевых антенных решеток;
3. получено двукратное увеличение коэффициента усиления предложенной микрополосковой антенны фрактального типа по сравнению с микрополосковой антенной простейшей формы и увеличение коэффициента усиления на 25% по сравнению с аналогичной 4-х элементной антенной решеткой при одинаковой площади раскрытия;
4. высокое значение коэффициента усиления достигается тем, что периферийные и центральный элементы кратны половине длине волны;
5. расчеты диаграммы направленности предложенной антенны фрактального типа на основе компьютерной модели в программном пакете численного моделирования Ansoft HFSS и на основе аналитической модели фрактальной антенны на основе кольцевых антенных решеток показали хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований изготовленных образцов антенн предложенного типа;
6. проведенное исследование характеристик излучения фрактальных антенн с различными формами генераторов фрактала простейшего типа (квадратной, круглой и треугольной) выявили схожий набор характеристик излучения антенн, что позволяет выделить отдельный класс микрополосковых антенн на основе предложенного фрактального подхода;
7. вид поляризации фрактальной антенны определяется типом резонанса, взаимным расположением элементов антенны и формой центрального и периферийных элементов, при этом для треугольного и круглого генераторов более выражена линейная поляризация;
8. проведено исследование влияния геометрических параметров антенны на её характеристики, позволяющее управлять резонансными частотами и формой диаграммы направленности, а также осуществлять проектирование фрактальных антенн с заранее прогнозируемыми результатами;



- увеличение количества итераций не приводит к увеличению коэффициента усиления фрактальной антенны, так как в силу геометрических причин их размер на каждой итерации должен уменьшаться, что делает невозможным кратность периферийных элементов высших итераций половине длине волны.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- D.A. Babichev, V.A. Tupik: «Investigation of Geometrical Parametrs Influence of Fractal Antennas Characteristics», Proceeding of the IEEE Russia. North-West Section, vol.3. p.53-55, 2012, ISSN 2221-7169;
- Д.А. Бабичев, В.А. Тупик: «Влияние протяженности границы излучения фрактальной микрополосковой антенны на её характеристики. Часть 1»//Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 8. 2010. С. 7-11, ISSN 2071-8985;
- Д.А. Бабичев, В.А. Тупик: «Влияние протяженности границы излучения фрактальной микрополосковой антенны на её характеристики. Часть 2», Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 9.2010. С. 18-20, ISSN 2071-8985;
- D. Babichev, V. Tupik, A. Seluyanova: «Calculation of Antenna Based on the Fractal Skins»// Proceeding of the 2014 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electric Engineering Conference, February 3-4, 2014, St. Petersburg, Russia, ISBN 978-1-4799-2594-0;
- Марголин В.И., Тупик В.А., Фантиков В.С., Аммон Л.Ю., Бабичев Д.А.: «Влияние воздействия слабых электромагнитных полей на процессы нанотехнологии»// Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. №7. 2012. С. 127-132. ISSN 0033-8486;
- Д.А. Бабичев, В.А. Тупик, А.В. Селуянова «Математическая модель и анализ фрактальной антенны дипольного типа»// Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 8. 2013. С. 3-6. ISSN 2071-8985;

7. Д.А. Бабичев, В.А. Тупик «Взаимосвязь геометрических и электродинамических параметров фрактальных антенн»// Нанотехника. №1 (33), 2013;

**ДРУГИЕ СТАТЬИ:**

8. Д.А. Бабичев, В.А. Тупик: «Моделирование формы фрактальной антенны на основе электромагнитного расчета характеристик прямоугольной микрополосковой антенны»// Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». №10. 2009. С. 3-7. ISSN 2071-8985;

9. Чу Чонг Шы, Д.А. Бабичев: «Моделирование процессов массопереноса при термическом вакуумном напылении тонких пленок»// 67-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, Россия. - 2014.- С. 29-33.

10. Бабичев Д.А. «Электромагнитное моделирование фрактальной антенны на основе метаматериалов»// "Международная конференция - Научная школа молодых ученых "Новые материалы для электромашиностроения и радиоэлектроники". XIV Молодежная научная конференция ИХС РАН", Санкт-Петербург, 4-6 декабря 2013 г. Тезисы докладов, Санкт-Петербург: Лема, 2013. - 74 с., ISBN 978-5-98709-698-7;

**Наличие охраняемых результатов деятельности и заявок на них:**

11. Патент на полезную модель №125396: «Фрактальная антенна», авторы Д.А. Бабичев, В.А. Тупик, заявка №2012144974, приоритет полезной модели от 22.10.2012, зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 февраля 2013г., срок действия патента истекает 22.10.2022г.;

12. Патент на полезную модель №155173: «Микрополосковая антенна», авторы Бабичев Д.А., Тупик В.А., Холодняк Д.В., заявка №2012111408, приоритет полезной модели от 30.03.2015г., зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 01.09.2015г., срок действия патента истекает 30.03.2025г.