

На правах рукописи

Бабушкина Ольга Александровна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫХ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ И ФИЛЬТРОВ СВЧ
ДИАПАЗОНА

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Головков Александр Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Вендик Ирина Борисовна
кандидат технических наук Федотов Анатолий Николаевич

Ведущая организация: ОАО Научно-технический центр «Завод ЛЕНИНЕЦ»

Защита диссертации состоится « ___ » _____ 2010 года в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 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 университета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2010 года.

Учёный секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Разработка излучающих, фильтрующих и волноводно-фидерных СВЧ устройств представляет комплекс сложных задач, решение которых требует дальнейших исследований, особенно, в свете необходимости уменьшения габаритов этих устройств, например, за счет использования фракталов.

Во многих радиотехнических устройствах используются электрически малые антенны (ЭМА), расположенные над проводящим экраном ограниченных размеров. Большинство пределов для характеристик ЭМА получено при допущениях свободного пространства или бесконечного экрана. Представляется актуальным проверить справедливость этих соотношений для одно и многовитковых рамочных антенн, в том числе фрактальных, расположенных над экраном ограниченных размеров, найти тенденции изменения характеристик излучателя в зависимости от расстояния до экрана, разработать методы быстрой оценки резонансных частот и оптимизации параметров фрактальных рамочных излучателей.

Представляется важным найти и исследовать структуры на отрезках линий передачи, которые, подавляя паразитные полосы пропускания в полосовых СВЧ фильтрах, одновременно являлись бы резонаторами полосового фильтра или имели бы вне полосы задерживания постоянное и вещественное входное сопротивление. Представляет также интерес оценить возможности подавления паразитных полос пропускания в полосовых фильтрах СВЧ, выполненных на основе фрактальных резонаторов.

Традиционные конструктивные решения для изгибов прямоугольных волноводов в фидерных трактах СВЧ не являются удачными с конструктивно-технологических точек зрения. В связи с этим становится актуальной задача поиска новых конструктивных вариантов исполнения изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях на различные углы, которые при простоте изготовления обладали бы хорошими характеристиками передачи.

Решению всех перечисленных выше актуальных для настоящего времени задач и посвящена настоящая диссертационная работа.

Цель работы и задачи исследований. Цель диссертационной работы заключается в разработке теории, методов проектирования и исследовании характеристик печатных фрактальных рамочных антенн, расположенных над проводящим экраном ограниченных размеров, разработке методов подавления паразитных полос пропускания в полосовых фильтрах СВЧ, поиску новых решений для элементов волноводных фидерных трактов СВЧ.

Для достижения этих целей необходимо было решить задачи:

- исследовать иммитансные и поляризационные характеристики фрактальных одно и многовитковых рамочных антенн, расположенных над экраном ограниченных размеров и сравнить их с предельными показателями, определенными из геометрических размеров излучателя;
- разработать быстродействующие методы анализа резонансных частот и иммитансных характеристик фрактальных рамочных антенн;
- определить предельные характеристики согласования в полосе частот фрактальных рамочных антенн, расположенных над проводящим экраном;
- разработать методы подавления паразитных полос пропускания в СВЧ полосовых фильтрах за счет использования ФНЧ и ПЗФ структур, открытых и замкнутых фрактальных резонаторов;
- разработать новые конструкции изгибов прямоугольных волноводов и инженерные методики оценки их конструктивных параметров.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался аппарат анализа цепей с сосредоточенными и распределенными постоянными, теория матриц, аппарат математического анализа и численные методы. Имитационное моделирование СВЧ устройств выполнено с использованием прикладных пакетов MathCAD, Microwave Office, Ansoft HFSS, CST Microwave Studio. Проверка теоретических положений выполнялась экспериментально.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Исследованы эффекты изменения добротности одно и многовитковых печатных рамочных излучателей, в том числе фрактальных, в зависимости от расстояния до проводящего экрана ограниченных размеров. Определены пределы применимости соотношений для определения добротности антенны по ее геометрическим размерам. Получены предельные соотношения для согласования полноволновых и укороченных рамочных антенн, расположенных над проводящим экраном.

3. Предложен эффективный метод расчета резонансных частот и иммитансных характеристик фрактальных рамочных антенн, расположенных параллельно проводящему экрану.

4. Предложена, защищенная патентом, новая структура миниатюрной многочастотной многослойной антенны.

5. Предложены новые структуры на основе Т-линий, обладающие характеристиками ФНЧ или ПЗФ с большой полосой задерживания, выполнен их анализ и показана возможность использования для подавления паразитных полос пропускания в полосовых фильтрах СВЧ.

6. Показано, что резонансные частоты открытых и замкнутых фрактальных резонаторов не кратны и это свойство можно использовать для создания узкополосных фильтров СВЧ с подавлением паразитных полос пропускания в широких интервалах частот.

7. Предложены новые конструкции изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях, получены аналитические соотношения для их расчетов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Возможность определения по размерам радиальной сферы добротности одновитковых рамочных антенн квадратной формы, а также выполненных на основе фракталов первого и второго порядков и расположенных параллельно проводящему экрану ограниченных размеров, когда расстояние до экрана превышает $h \geq \lambda/4$. При уменьшении расстояния до экрана $h \ll \lambda/4$ добротность рамочных антенн резко возрастает и определять её по геометрическим размерам антенны нельзя.

2. Независимость добротности двух и трехвитковых рамочных антенн квадратной формы, а также выполненных на основе фракталов первого и

второго порядков от расстояния до экрана. Добротность многовитковых рамочных антенн в 3-4 раза выше, чем у соответствующей одновитковой.

3. Неэквидистантность расположения резонансных частот фрактальных открытых и замкнутых резонаторов на основе Т-линий передачи.

4. Возможность согласования изгибов прямоугольного волновода в Е-плоскости с помощью металлической пластины, расположенной параллельно узкой стенке волновода, а в Н-плоскости – с помощью индуктивных штырей.

Практическая ценность новых научных результатов. В диссертационной работе показана возможность создания печатных рамочных антенн, расположенных над проводящим экраном ограниченных размеров, имеющих минимальные габариты, позволяющие инкорпорировать их в мобильные телефоны для приема сигналов цифрового телевидения.

Предложенная методика расчета резонансных частот и импедансов фрактальных резонаторов и рамочных антенн на основе схемотехнического приближения обладает высокой вычислительной эффективностью и позволяет за короткое время оптимизировать эти устройства.

Предложенные и исследованные в диссертации структуры на основе линий передачи с Т-волной с характеристиками ФНЧ и ПЗФ эффективно подавляют паразитные полосы пропускания фильтров на высоких частотах.

Предложенные в работе новые конструкции изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях на 90° и 135° отличаются простотой конструктивного исполнения и хорошими частотными характеристиками.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы получены в процессе выполнения трех хозяйственных и трех госбюджетных НИР в 2004 - 2009 г. на кафедре РЭС СПбГЭТУ (ЛЭТИ), а также при выполнении в 2006 - 2008 г. научной работы по международному контракту №МПЛ-18/МК от 20.04.06г. “Development of Antennas for Mobile Phones” (Contract agreement between LG Electronics INC. (LGE) and St-Petersburg Electrotechnical University). Материалы диссертации использованы в научных разработках кафедры, в учебном процессе, в ОАО «АРГУС», в ЗАО «Транстрика» и в ОАО НТЦ «Завод ЛЕНИНЕЦ».

Апробация работы. Основные теоретические и практические положения работы докладывались и обсуждались на 7-м и 8-м Международных симпозиумах по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС (Санкт-Петербург, 2007, 2009), 14-й, 15-й, 16-й, 17-й, 18-й и 19-й Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», (Севастополь, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009), на 2-ой международной научной конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Ростов-на-Дону, 2008г), а также научно-технических конференциях профессорского – преподавательского состава СПбГЭТУ (ЛЭТИ) в 2005-2010 г.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 статьях и докладах, из них по теме диссертации 14, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 2 статьи в других изданиях. Доклады доложены и получили одобрение на 8 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата. Основные положения защищены 1 патентом, решение о выдаче патента получено 24.02.2010.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, 1 приложения и списка литературы, включающего 109 наименований. Основная часть работы изложена на 182 страницах и содержит 199 рисунков и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемых проблем, сформулирована цель диссертационной работы и её основные задачи, определена практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе приводится обзор теории ЭМА, для которых выполняется условие $ka < 1$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны, a

– радиус условной сферы, охватывающей максимальный размер антенны-диполя. Рассматриваются пределы добротности для ЭМА в свободном пространстве и над бесконечным проводящим экраном и их связь с параметром ka . Показано, что в случае ориентации ЭМА параллельно поверхности экрана добротность антенны возрастает и зависит как от параметра ka и расстояния до экрана h , так и α – угла между направлением диполя и тангенциальной плоскостью. Из приведенных результатов делается вывод, что для расчета достижимых значений добротности следует учитывать все нюансы распределения токов в антенне и экране, что затрудняет аналитическое решение задачи при конечных размерах экрана.

Рассматриваются характеристики относительно нового класса ЭМА – фрактальных дипольных двумерных и трехмерных деревьев и фрактальных рамочных антенн.

Описаны достоинства и недостатки различных методов подавления паразитных полос в полосовых фильтрах СВЧ на основе линий с Т-волной.

Приведены существующие способы согласования изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях, рассмотрены их достоинства и недостатки.

На основании анализа приведенных в первой главе обзорных материалов определяются задачи исследований в диссертационной работе.

Во второй главе приводятся результаты электродинамического моделирования ряда одно и многовитковых квадратных и фрактальных печатных полноволновых рамочных антенн, расположенных над экраном ограниченных размеров на различной высоте h и приводится сравнение их характеристик с характеристиками одиночной рамки в свободном пространстве и над бесконечным экраном.

Сравнением значений добротностей рамочных антенн по результатам моделирования с предельными добротностями, определенными по величинам ka , h и α показано, что предельные добротности одновитковых полноволновых рамочных антенн квадратной формы, а также выполненных на основе фракталов первого и второго порядков, расположенных параллельно проводящему экрану ограниченных размеров, могут быть

определены по геометрическим размерам, когда расстояние до экрана составляет $h \geq \lambda/4$. При уменьшении расстояния до экрана $h \ll \lambda/4$ добротность одновитковых рамочных антенн возрастает тем больше, чем меньше значение h (при близких расстояниях примерно на порядок) и использовать предельные соотношения из теории ЭМА нельзя. Определены ограничения рабочих диапазонов частот рамочных антенн для приема сигналов цифрового телевидения в мобильных телефонах.

Показано, что параллельный экран ограниченных размеров ухудшает поляризационные свойства рамочного излучателя, причем форма диаграммы направленности искажается тем больше, чем меньше расстояние до экрана.

Анализ результатов моделирования показал, что добротность двух и трехвитковых рамочных антенн квадратной формы, а также выполненных на основе фракталов первого и второго порядков, практически не зависит от расстояния до экрана и оказывается в 3-4 раза выше, чем у одновитковых рамочных антенн. Исследовано влияния экрана на поляризационные характеристики многовитковых фрактальных рамочных антенн.

Результаты моделирования подтвердили, что все указанные выше закономерности для рамочных фрактальных антенн, расположенных над экраном ограниченных размеров, сохраняются и в СВЧ диапазоне.

Для фрактальных рамочных антенн в диссертации разработан метод расчета резонансных частот, входных импедансов и элементов электрической модели. Сущность метода заключается в представлении печатной фрактальной антенны над проводящей плоскостью в виде каскадного соединения одинаковых структур из модели изгиба проводника микрополосковой линии передачи на угол, определяемый типом фрактала, и симметрично подключенных соединяющих изгибы одинаковых отрезков микрополосковой линии. Это позволило определить полную матрицу А-параметров всей фрактальной антенны в виде степени матриц передачи $[a]$ для элементарной структуры и привести её к виду:

$$[A] = \frac{(a_{11} + \sqrt{a_{11}^2 - 1})^n}{2\sqrt{a_{11}^2 - 1}} \begin{bmatrix} \sqrt{a_{11}^2 - 1} & a_{12} \\ a_{21} & \sqrt{a_{11}^2 - 1} \end{bmatrix} - \frac{(a_{11} - \sqrt{a_{11}^2 - 1})^n}{2\sqrt{a_{11}^2 - 1}} \begin{bmatrix} -\sqrt{a_{11}^2 - 1} & a_{12} \\ a_{21} & -\sqrt{a_{11}^2 - 1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{11} , a_{12} , и a_{22} – элементы матрицы $[a]$ для элементарной структуры фрактальной рамочной антенны, n – количество элементарных структур.

Входной импеданс рамки определяется соотношением:

$$\dot{Z}_{ex} = -\frac{(A_{11} - 1)^2}{A_{21}} + A_{12},$$

где A_{11} , A_{12} , A_{21} – элементы матрицы эквивалентного фрактальной рамке замкнутого четырехполюсника, которые определяются выражением (1).

Полученные соотношения позволили разработать в среде MathCAD алгоритм для расчета и оптимизации частот резонансов и входного импеданса фрактальной рамки над плоскостью без электродинамического моделирования. На основе этого алгоритма были выполнены расчеты \dot{Z}_{ex} для ряда фрактальных рамок. Например, для рамочной антенны на основе фрактала Минковского первого порядка с габаритами 34×34 мм², расположенной над проводящей плоскостью и выполненной на пленке из лавсана толщиной 100 мкм, имеющей ширину проводника $W = 2$ мм, высоту над экраном $h = 1$ мм были получены резонансные частоты: 0,933 ГГц, 2,8 ГГц, 4,663 ГГц, 6,517 ГГц. При электродинамическом моделировании данной антенны получены резонансные частоты для рамки равные: 0,92 ГГц, 2,75 ГГц, 4,54 ГГц, 6,334 ГГц, то есть резонансные частоты хорошо совпадают.

На основе полученных в работе L - C - R электрических моделей рамочных антенн, расположенных над проводящим экраном, в диссертации были определены предельные характеристики согласования антенны в полосе частот. Показано, что для полноволновых и укороченных рамочных антенн предельное значения равномерной в рабочей полосе частот характеристики коэффициента отражения на входе согласующей цепи определяется одинаковым соотношением:

$$|S|_{np\epsilon\delta} \geq e^{-2\pi \frac{\beta}{(1+\beta^2)} Q_p \cdot \delta},$$

где $Q_p = \frac{R_p}{\omega_p \cdot L_p}$ – добротность рамки на частоте резонанса ω_p , $\beta = \frac{\omega_p}{\omega_0}$,

$\delta = \frac{\omega_в - \omega_н}{\omega_0}$ – относительный рабочий диапазон рамочной антенны, ω_0 –

центральная частота рабочего диапазона, L_p – индуктивность L - C - R электрической модели рамки, R_p – вещественная составляющая импеданса.

Эти соотношения позволяют связать с номиналами элементов модели рамочной антенны минимально возможный уровень модуля коэффициента отражения $|S(\omega)|$ на входе пассивной недиссипативной согласующей цепи при заданном рабочем диапазоне частот $\Delta\omega$ и ω_0 .

В данной разделе также описан и промоделирован защищенный патентом оригинальный вариант миниатюрной многодиапазонной антенны, который основан на новом принципе заполнения многослойного пространства проводником и может использоваться как антенный элемент в

устройствах мобильной связи, а также в других случаях, когда требуется антенна минимальных габаритов. Структура антенны показана на рис. 1.

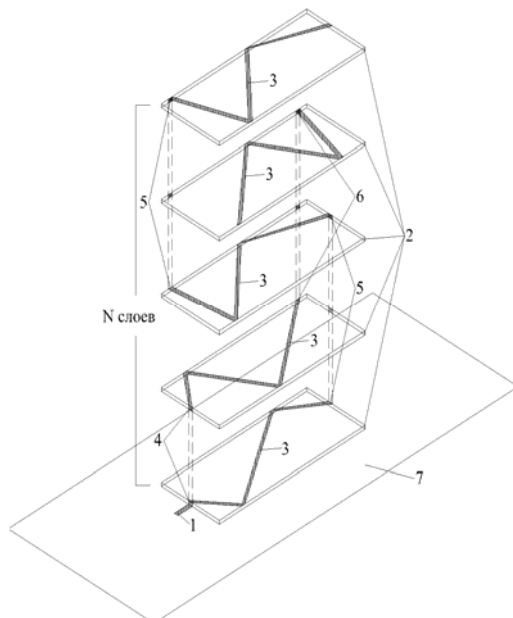


Рис. 1. Структура миниатюрной антенны.

В третьей главе исследуются структуры полосовых фильтров, в которых подавление паразитных полос пропускания осуществляется за счет частотно-избирательных элементов фильтра, имеющих характеристики по типу ФНЧ, либо ПЗФ с широкими полосами задерживания, а также фильтров на основе фрактальных резонаторов. Одна из предложенных

структур, показанная на рис. 2, имеет характеристику ФНЧ с широкой

полосой задерживания и может служить резонатором в полосовых фильтрах, при этом одновременно осуществляя подавление паразитных полос пропускания.

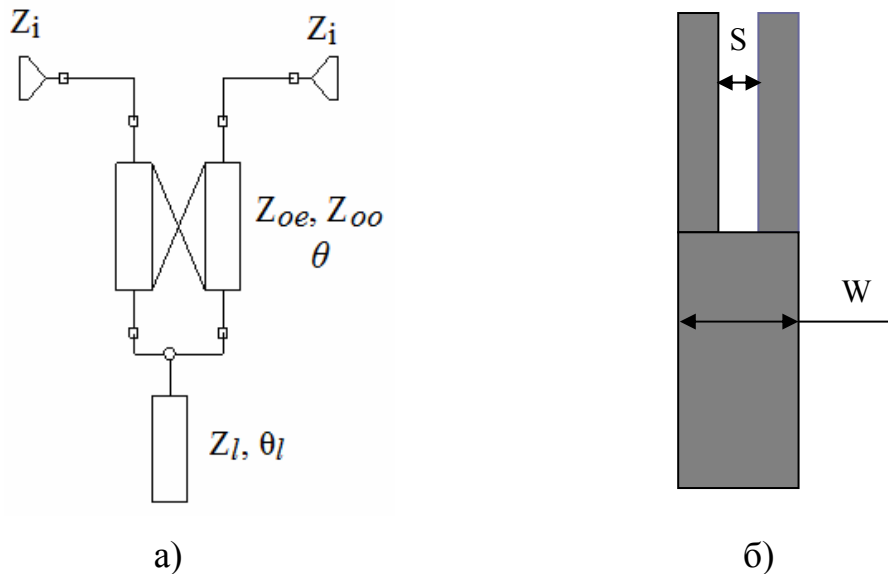


Рис. 2. Схема (а) и топология (б) ФНЧ структуры.

Из полученного в работе выражения для коэффициента передачи данной структуры было найдено, что частоты нулей коэффициента передачи цепи $|S_{21}|$ определяются условием:

$$(Z_{oe} - Z_{oo}) \cdot \operatorname{tg} \theta = \frac{2 \cdot Z_l}{\operatorname{tg} \theta_l},$$

где θ – электрические длины линий, Z параметры понятны из рис. 2.

Выполненный анализ показал, что цепь будет иметь в полосе задерживания три нуля передачи. Задача поиска оптимальных параметров такой структуры в диссертации была решена для двух случаев: параметры цепи выбирались из условия, чтобы нули коэффициента передачи цепи $|S_{21}|$ совпадали с паразитными полосами частот полосового фильтра, на частотах второй, третьей, четвертой кратности, либо выбирались из условия максимальной ширины полосы задерживания цепи.

Рассмотренная ФНЧ структура может послужить основой для построения ПЗФ структур с периодическими полосами задерживания, включаемых каскадно с основной схемой фильтра для подавления паразитных полос пропускания на высоких частотах. Схема полосно-запирающей структуры и пример её характеристики показаны на рис. 3.

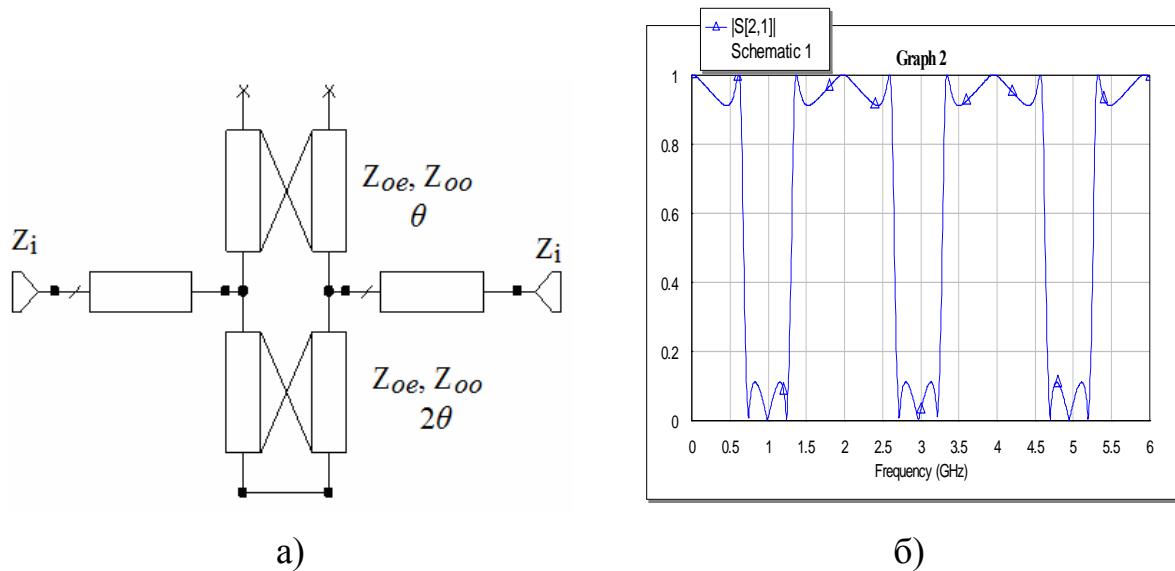


Рис. 3. Схема ПЗФ структуры (а) и пример характеристики $|S_{21}|$ (б).

В работе анализируется коэффициент передачи ПЗФ структуры рис.3а и определяются положения двух групп нулей, частоты которых определяются уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{\operatorname{ctg}\theta}{1 - \operatorname{tg}^2\theta} = 0 \\ Z_{oe} - 2(2Z_{oe} - 3Z_{oo})\operatorname{tg}^2\theta + (3Z_{oe} - 2Z_{oo})\operatorname{tg}^4\theta = 0 \end{cases}$$

Показано, что нули передачи первой группы соответствуют частотам, на которых электрическая длина разомкнутых отрезков линий передачи равна:

$$\theta = \theta_0 \frac{f}{f_0} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \quad n = 0, 1, \dots, \infty$$

где f_0 – резонансная частота, на которой электрическая длина разомкнутых отрезков линий передачи равна $\theta_0 = \pi/2$.

Нули передачи второй группы будут располагаться симметрично относительно нулей передачи первой группы и появляются только при достаточно сильной связи линий: $\frac{Z_{oe}}{Z_{oo}} \geq 2,8$ (см. рис. 3б).

Предложена новая ПЗФ структура, содержащая балластный резистор, благодаря чему в промежутках между нулями передачи входное сопротивление цепи постоянно, вещественно и близко по величине к 50 Ом. Выполнен анализ этой структуры, получены соотношения для оптимальных значений параметров цепи.

Разработан аналитический метод и алгоритм расчета резонансных частот фрактальных $\lambda/2$ открытых и λ замкнутых резонаторов. Показано, что резонансные частоты у фрактальных резонаторов не кратны, что при выполнении фильтров на их основе позволяет подавить паразитные полосы пропускания. Предложены кольцевые резонаторы квазифрактальной структуры с сильно неэквидистантным расположением резонансных частот.

Четвёртая глава диссертации посвящена вопросам разработки новых конструкций изгибов прямоугольного волновода в Е- и Н-плоскостях на углы 90° и 135° . Сущность предлагаемых в диссертации конструкций волноводных изгибов поясняется на рис. 4.

Для определения оптимальных размеров согласующих пластин и штырей использовалось многократное моделирование волноводных изгибов в пакетах Ansoft HFSS и CST Microwave Studio. Моделирование проводилось для волноводов диапазонов S-К, имеющих сечения соответствующие отечественным стандартам, а также волноводов английского стандарта.

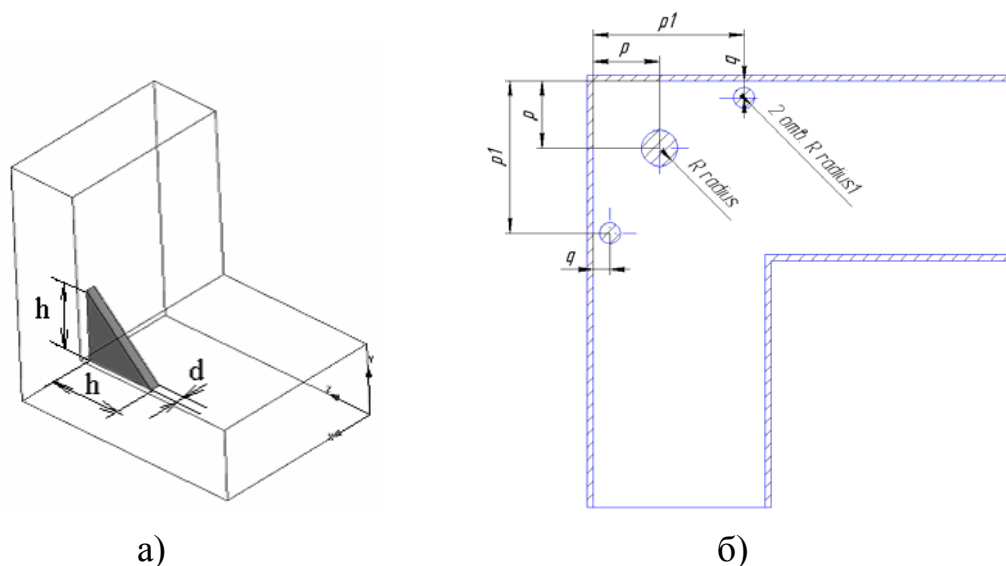


Рис. 4. Изгибы прямоугольного волновода в Е-плоскости (а) и Н-плоскости (б) под 90° .

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что для волноводных изгибов можно рекомендовать симметричное расположение согласующих элементов, а для их геометрических размеров были получены простые инженерные соотношения.

Также в этой главе излагаются результаты разработки конструкций двух типов коаксиально-волноводных переходов (КВП) для волновода сечением $72 \times 34 \text{ мм}^2$ (диапазон частот 2,59-3,94 ГГц).

Пятая глава содержит результаты разработки и экспериментальных исследований двух малогабаритных фрактальных антенн (печатной рамочной фрактальной антенны и антенны на основе фрактального дерева) для приема на мобильный телефон сигналов TDMB (174-240 МГц) диапазона, разработанных по международному контракту и успешно испытанных на фирме LGE на реальных сигналах. Приведены также результаты разработки и экспериментальных исследований укороченной рамочной антенны диапазона 100-500 МГц над экраном ограниченных размеров, разработанной по заказу промышленности.

Приведены результаты разработки и экспериментальных исследований полосовых микрополосковых СВЧ фильтров, в которых паразитные полосы пропускания подавлены за счет использования предложенной в диссертации структуры ФНЧ с широкой полосой задерживания.

На основе полученных в главе 4 результатов были разработаны и проверены экспериментально изгибы прямоугольных волноводов на 90° сечения $72 \times 34 \text{ мм}^2$ и $23 \times 10 \text{ мм}^2$ в Е- и Н-плоскостях.

Приведены результаты экспериментальных исследований двух коаксиально-волноводных переходов на диапазон частот 2,6-3,95 ГГц. Выполнено сравнение их характеристик с характеристиками промышленного измерительного КВП и показано, что разработанные в диссертации имеют лучшие характеристики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Определены закономерности изменения предельных добротностей одновитковых и многовитковых рамочных антенн квадратной форм, а также выполненных на основе фракталов первого и второго порядков, от высоты расположения над параллельным проводящим экраном ограниченных

размеров. Получены предельные соотношения для согласования полноволновых и укороченных фрактальных рамочных антенн.

2. Исследованы уровни ортогональных и кроссполяризованных составляющих у одно и многовитковых рамочных антенн квадратной формы, а также, выполненных на основе фракталов различных порядков и расположенных над экраном ограниченных размеров.

3. Разработан метод расчета резонансных частот и иммитансных характеристик фрактальных рамочных антенн, расположенных параллельно проводящему экрану, обеспечивающий достаточную для практики точность.

4. Предложена, защищенная патентом, новая структура многослойной многочастотной миниатюрной антенны.

5. Предложены и выполнен анализ структур на основе связанных Т-линий, которые могут использоваться как резонатор СВЧ фильтра, и одновременно обладающих характеристиками ФНЧ или ПЗФ с большой полосой задерживания для подавления паразитных полос пропускания.

6. Выполнен анализ резонансных частот открытых $\lambda/2$ и замкнутых λ фрактальных резонаторов и показано, что эти частоты расположены неэквидистантно, что может быть использовано для подавления паразитных полос пропускания в СВЧ фильтрах. Предложены квазифрактальные структуры замкнутых резонаторов, у которых неэквидистантный разнос резонансных частот существенно выше, чем у стандартных фрактальных.

7. Предложены новые конструкции изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях, отличающиеся простотой конструктивного исполнения и хорошими частотными характеристиками, получены простые аналитические соотношения для основных конструктивных параметров.

8. По результатам теоретических исследований выполнена разработка и экспериментальные исследования миниатюрных фрактальных антенн, полосовых фильтров с подавлением паразитных полос пропускания и изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях, внедренных на отечественных и зарубежных (LGE) предприятиях.

Опубликованные научные работы по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бабушкина О.А., Головков А.А. СВЧ полосовые фильтры с подавлением паразитных полос пропускания // Вопросы Радиоэлектроники. Сер. "Радиолокационная техника". 2008. №4. С. 51-59.
2. Бабушкина О.А., Головков А.А. Новый тип конструкции изгиба прямоугольного волновода // Вопросы Радиоэлектроники. Сер. "Радиолокационная техника". 2008. №4. С. 34-42.
3. Бабушкина О.А., Головков А.А., Ручьев В.И. Упрощённый метод проектирование и оценки иммитансных характеристик фрактальных рамочных антенн // Проектирование и технологии электронных средств. 2008. № 3. С. 62-66.

и в других изданиях:

4. Бабушкина О.А., Головков А.А., Мамруков А.В. Характеристики согласования рамочной антенны, расположенной на конечном проводящем экране // Известия Высших учебных заведений России. Сер. "Радиоэлектроника". 2007. №3. С. 12-18.
5. Бабушкина О.А. Новые конструкции полосно-запирающих фильтров для СВЧ радиотрактов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сер. "Радиоэлектроника и телекоммуникации". 2009. №9. С. 3-12.
6. Решение о выдаче патента на полезную модель РФ № 2010100231/22(000296) / Бабушкина О.А., Головков А.А., Молодцов Д.И. Малоразмерная многодиапазонная антенна; 24.02.2010.
7. Фрактальные антенны для приема сигнала TDMB диапазона / Бабушкина О.А. // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникации «РТ-2006»: Труды Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Севастополь, 17-21 апреля 2006, С. 66.
8. Влияние экрана ограниченных размеров на характеристики рамочной антенны / Бабушкина О.А., Белодед В.И., Головков А.А., Мамруков А.В.,

Пивоваров И.Ю // СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии: Труды 16-ой международной крымской конференции, Севастополь, Украина, 11-15 сентября 2006г. С. 447-448.

9. Фрактальные антенны для приема телевизионного сигнала метрового диапазона / Бабушкина О.А. //ЭМС: Труды 7 международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург, 26-29 июня 2007г. С. 209-211.

10. Микрополосковые полосовые фильтры с подавлением паразитных полос пропускания / Бабушкина О.А., Головков А.А., Пивоваров И.Ю.//СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии: Труды 17-ой международной крымской конференции, Севастополь, Украина, 10-14 сентября 2007г. С. 504-505.

11. Новый тип конструкции изгиба прямоугольного волновода/Бабушкина О.А., Николаев П.В., Ручьев В.И. // Современные проблемы радиоэлектроники: Труды 2-ой международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 11 апреля 2008г. С. 222-224.

12. Новые конструкции элементов мощных волноводных трактов/ Бабушкина О.А., Головков А.А., Пивоваров И.Ю. // СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии: Труды 18-ой международной крымской конференции, Севастополь, Украина, 8-12 сентября 2008г. С. 459-460.

13. Улучшенные конструкции изгибов прямоугольных волноводов в Е- и Н-плоскостях на 90 и 135 градусов / Бабушкина О.А., Головков А.А., Николаев П.В. // ЭМС: Труды 8 международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург, 16-19 июня 2009г. С. 278-282.

14. Новые конструкции полосно-запирающих фильтров для СВЧ радиотрактов / Бабушкина О.А., Головков А.А., Пивоваров И.Ю. // СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии: Труды 19-ой международной крымской конференции, Севастополь, Украина, 14-18 сентября 2009г. С. 501-502.