

На правах рукописи

Земляков Кирилл Николаевич

Исследование и разработка фильтров СВЧ на многомодовых резонаторах

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

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

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор, Вендик Ирина Борисовна

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Малышев Виктор Николаевич, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), профессор кафедры «Радиоэлектронных средств»

Кандидат физико-математических наук, Колмаков Игорь Анатольевич, ООО «Специальный технологический центр», старший научный сотрудник
Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное предприятие «РАДАР ММС»

Защита состоится 25 декабря 2013 года в ____ 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).

Автореферат разослан __ ноября 2013 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.03

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в развитии систем телекоммуникации, радиолокации, радиоастрономии, систем связи, средств диагностики материалов в СВЧ диапазоне обусловлен, в основном, совершенствованием всех компонентов радиоаппаратуры, и, в том числе, частотно-избирательных устройств. Это заставляет разработчиков аппаратуры, с одной стороны, широко использовать новейшие достижения науки в области радиотехники, СВЧ электроники, новых СВЧ материалов, а, с другой стороны, искать нетрадиционные подходы к конструированию устройств и оптимизации их параметров.

Многомодовые резонаторы появились благодаря требованиям к более эффективному использованию площади (объема), которую занимает устройство, а также необходимости создания многофункциональных устройств, работающих одновременно в нескольких частотных диапазонах. Конструктивные особенности таких резонаторов позволяют управлять положением собственных частот двух или более типов колебаний. В результате каждый многомодовый резонатор имеет сразу несколько рабочих резонансов, которые могут использоваться для формирования полос пропускания/запираания. Для этого могут использоваться как моды, обеспечивающие близкие по частоте резонансные отклики (для повышения порядка фильтра без увеличения количества резонаторов), так и сильно разнесенные друг от друга по частоте резонансные колебания (для формирования, например, двух независимых полос пропускания). В первом случае это может привести к снижению потерь в фильтре и уменьшению его габаритов, во втором – к формированию дополнительной полосы пропускания для работы в двух или нескольких частотных диапазонах.

Исследования, направленные на изучение многомодовых СВЧ резонаторов и фильтров на их основе, представляются перспективными. В данной работе исследуются различные пути создания многомодовых резонаторов, подходы к синтезу таких структур, анализируются характеристики резонаторов и фильтров.

Актуальность работы определяется: 1) разработкой новых подходов к проектированию и анализу многомодовых резонаторов и фильтров на их основе; 2) исследованием актуальных направлений развития СВЧ-фильтров, в частности, фильтров на основе комбинации отрезков с положительной и отрицательной дисперсией, фильтров на основе фрактальных кривых и криогенных фильтров; 3) технологичностью разработок, что позволяет применять современные технологии, обеспечивающие массовый выпуск устройств.

Цель диссертационной работы – исследование и разработка СВЧ-фильтров на многомодовых резонаторах, обладающих улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями, а также разработка модифицированной процедуры синтеза таких устройств.

Поставленная цель была достигнута за счет решения следующих задач:

1) Разработка методики анализа многомодовых резонаторов на основе комбинации искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией, исследование условий резонанса;

2) Применение этой методики при исследовании зависимости резонансных откликов резонаторов такого типа от их структурного состава (различной комбинации элементарных ячеек и усеченных элементарных ячеек);

3) Исследование и разработка фильтров мм диапазона для использования в приемном модуле радиотелескопа РАТАН-600, в том числе, охлаждаемых;

4) Исследование квазифрактальных резонаторов на основе кривых Гильберта, анализ условий резонанса и возможности управления резонансными частотами;

5) Исследование возможности проектирования ФНЧ и ППФ на основе квазифрактальных резонаторов.

Основные методы исследования;

а) Теоретические: методы теории электрических цепей, синфазно-противофазный метод, численные методы электродинамического моделирования;

б) Экспериментальные: измерения частотной зависимости модуля коэффициентов отражения и передачи.

Научные положения, выносимые на защиту

1) Количество резонансных откликов резонаторов на комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией определяется его структурой: в случае каскадирования ячеек с положительной частотной дисперсией можно возбудить лишь резонансы $n = +1, +2, \dots$, для ячеек с отрицательной дисперсией $n = -1, -2, \dots$, причем количество резонансов непосредственно связано с количеством элементарных Т- или П-ячеек, использованных в структуре резонатора; при использовании в структуре ячеек обоих типов, возбуждаются все типы резонансов: положительные ($n > 0$), отрицательные ($n < 0$) и резонанс нулевого порядка ($n = 0$).

2) Метод анализа резонаторов на комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией основан на использовании условия нулевой входной проводимости на резонансных частотах. Условием резонанса является равенство эквивалентной электрической длины резонатора $n \cdot \pi$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). При этом максимальная эквивалентная электрическая длина одной ячейки не превосходит $\pi/2$.

3) В миллиметровом диапазоне диэлектрическая подложка с планарным резонатором, помещенная в запердельный волновод, вместе с запердельным объемом формирует двухмодовый резонатор за счет возбуждения корпусных мод. Для уменьшения влияния ближайшей паразитной моды достаточно повысить её частоту, уменьшив сечение волновода.

4) Введение неоднородностей во фрактальные кривые, используемые для проектирования частотно-избирательных СВЧ-устройств, приводит к формированию двух резонансных откликов в резонаторе, с использованием которого возможно не только построение двухполосных фильтров, но и однополосных с малым расщеплением резонансных частот за счет возможности независимого управления каждой из центральных частот полос пропускания. ФНЧ на базе квазифрактальных кривых характеризуются высокой крутизной склона передаточной характеристики.

Научная новизна работы

1) Предложено и обосновано применение методики синтеза ППФ на основе комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией на основе анализа условий резонанса и входной проводимости резонатора. Проведено исследование различных структурных сочетаний элементарных ячеек. Предложены усеченные структуры резонаторов, которые вводят дополнительные степени свободы при синтезе резонаторов и фильтров на их основе, а также сокращают вносимые потери по сравнению с классическими элементарными ячейками.

2) Разработан квазиэллиптический фильтр мм диапазона частот с уменьшенными потерями и высокой крутизной, соответствующей более высокому порядку фильтра по сравнению с фильтром на основе полиномиального прототипа.

3) Предложена оригинальная конструкция квазифрактального резонатора на основе кривой Гильберта второго порядка, использование которого возможно как в составе ППФ, так и в составе ФНЧ в зависимости от выбранного типа возбуждения. Предложен метод синтеза ФНЧ на таких резонаторах.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов.

Полученные теоретические результаты не противоречат ранее полученным и описанным в литературе результатам. Результаты электродинамического моделирования и экспериментального исследования тестовых образцов подтверждают достоверность результатов, полученных теоретически.

Практическая значимость результатов работы

1) Разработанная методика анализа резонаторов на комбинации ячеек с положительной и отрицательной дисперсией может применяться для синтеза резонаторов и фильтров на их основе в соответствии с требуемым количеством резонансов и их резонансными частотами.

2) Предложенная оригинальная конструкция квазифрактальных ППФ и ФНЧ на основе фрактальных кривых Гильберта и методики синтеза позволяют проектировать миниатюрные двухполосные фильтры с произвольными неэквидистантными центральными частотами полос пропускания, а также разрабатывать компактные ФНЧ с малыми габаритами и высокой крутизной склона АЧХ.

3) Применение совокупности инженерных приемов разработки и проектирования СВЧ-фильтров мм диапазона позволило разработать фильтр с крайне малыми вносимыми потерями в диапазоне 35-37 ГГц с управляемой частотой паразитного резонанса для приемного модуля радиотелескопа РАТАН-600.

4) Реализация указанных типов фильтров с применением гибридных технологий массового производства, в том числе, многослойной керамической технологии, позволяет изготавливать миниатюрные устройства для массового производства.

Реализация и внедрение результатов исследования.

Полученные в рамках работы результаты могут быть использованы в современной радиоэлектронной промышленности.

Апробация

Результаты работы были представлены и обсуждены специалистами в области СВЧ электроники на конференциях различного уровня.

Международные конференции: The Physics And Technology Of Wave Processes International Conference (15-18 сентября 2009, Санкт-Петербург, Россия), COMCAS 2009 (Ноябрь 2009, Тель-Авив, Израиль), Metamaterials '2009 (02-05 сентября 2009, Лондон, Великобритания), Metamaterials '2010 (13-16 сентября 2010, Карлсруэ, Германия), MRRS-2011: Radar and Remote Sensing Symposium (25-27 августа 2011, Киев, Украина), 10th IEEE International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS) (5-8 октября 2011, Ниш, Сербия).

Всероссийские конференции: Всероссийская конференция и научная школа молодых ученых «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ» (ноябрь 2010г., Санкт-Петербург, Россия), Всероссийская Астрономическая Конференции ВАК-2010 (13–18 сентября 2010 г., Нижний Архыз).

Прочие конференции и семинары: Научно-технический семинар «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» в рамках 63^{ой}, 64^{ой} научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (2010, 2011гг., Санкт-Петербург, Россия).

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 21 статьях и докладах на конференциях разного уровня, среди которых 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 10 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами и заключения. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, включает 84 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Многомодовые резонаторы и фильтры на их основе» посвящена обзору литературы по теме диссертации.

Рассматриваются резонаторы и фильтры на основе комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией, которые реализуются на элементарных ячейках в виде П- и/или Т- эквивалентных схем на LC- элементах. Для реализации таких структур могут использоваться как планарные топологии, так и многослойные. В полосе частот такое устройство характеризуется присутствием счетного числа резонансов. Условия резонанса в общем виде имеют вид:

$$\beta_n = \frac{n\pi}{l}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

где β_n - постоянная распространения, n – номер резонанса и l – физическая длина искусственной линии. При $n=0$ эффективная электрическая длина линии равна 0 и возникает резонанс нулевого порядка. Комбинация отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией может быть эффективно использована для разработки многополосных фильтров с заданными центральными частотами полос пропускания.

Во втором параграфе главы 1 приведен анализ проблем, возникающих в радиоастрономии, которые делают необходимым применение частотно-селективных устройств. Сформулированы жесткие требования к уровню потерь в полосе пропускания и уровню подавления сигнала за пределами этой полосы. Для решения этой проблемы может применяться охлаждаемый приемный модуль, рабочая температура которого составляет 60-65К со сверхпроводниковыми компонентами в его составе, что позволит снизить потери в фильтре и снизить шумовую температуру устройства. Выполнен анализ существующих на данный момент и опубликованных в литературе решений.

В третьем параграфе главы 1 рассмотрена специфика фрактальных и квазифрактальных резонаторов и фильтров, разработанных с использованием фрактальных кривых Коха, Серпинского, Гильберта. Анализируются различные направления разработки фрактальных фильтров

В заключении главы 1 сформулированы основные выводы и выбраны направления для исследования и разработки фильтров на многомодовых резонаторах для различных применений.

Глава 2 «Многомодовые резонаторы и фильтры на основе комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной

дисперсией» посвящена разработке методики проектирования и анализа структур резонаторов и фильтров на их основе с использованием комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией.

В параграфе 1 главы 2 рассмотрены условия резонанса симметричных структур резонаторов на основе комбинации искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией, а также введены модифицированные элементарные ячейки, которые могут эффективно применяться при проектировании фильтров на основе искусственных длинных линий.

Планарные резонаторы на отрезках линий передачи обладают бесконечным количеством резонансных откликов высших порядков по отношению к фундаментальной моде. В большинстве случаев, при проектировании фильтров резонансы высших порядков являются паразитными. Их подавление может быть достигнуто за счет реализации резонаторов в виде комбинации отрезков искусственных длинных линий передачи с положительной дисперсией (ЛПД) и с отрицательной дисперсией (ЛОД), обладающих разными дисперсионными законами. Комбинация ЛОД и ЛПД в составе резонатора делает возможной разработку резонатора с некратами резонансными частотами. В этих линиях традиционно используются Т- или П-ячейки (рисунок 1). Предложена обобщенная эквивалентная схема элементарной ячейки, а также рассмотрена комбинация отрезков искусственной длинной линии с положительной (R) и отрицательной (L) дисперсией в различных сочетаниях: R-L-R и L-R-L (рисунок 2). Такие ячейки обладают резонансными откликами, соответствующими резонансам с номером n , причем $n=0$ и $n=+1, +2, +\dots$ для R-L-R ячейки, либо $n=-1, -2, -\dots$ для L-R-L ячейки. Условие резонанса соответствует равенству эффективной электрической длины резонатора целому числу полупериодов n , включая ноль и $\pm n$.

В случае симметричного резонатора (рисунок 2) резонанс нулевого порядка на частоте $f = f_0$ соответствует нулевому значению эффективной электрической длины резонатора и определяется следующими условиями:

$$\cos^{-1} \left[\cos 2\theta_R \cos 2\theta_L + 0.5(Z_{RL}^{-1} - Z_{RL}) \sin 2\theta_R \sin 2\theta_L \right] = 0, \quad (2)$$

$$\sin^{-1} \left[\frac{2 \sin \theta_R \cos \theta_L}{(Z_{RL} - Z_{RL}^{-1}) + (Z_{RL} + Z_{RL}^{-1}) \cos \theta_R} \right] - \theta_L = 0. \quad (3)$$

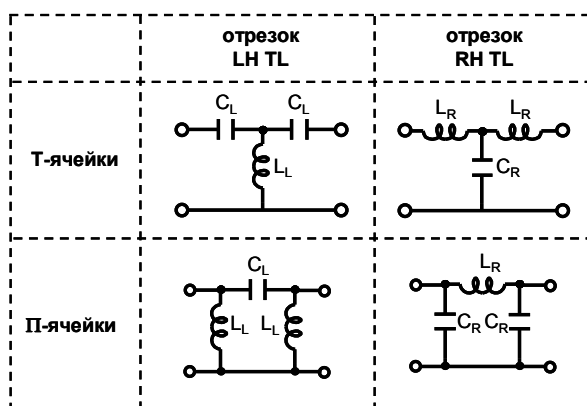


Рисунок 1. Элементарные Т- и П-ячейки.

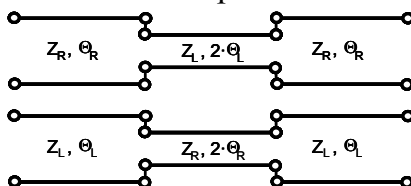


Рисунок 2. Резонаторы симметричной структуры на основе отрезков линий с отрицательной (ЛОД) и положительной (ЛПД) дисперсией: структура R-L-R и L-R-L.

Для резонансов высших порядков с частотой $f_{\pm n}$

$$\cos^{-1} \left[\cos \left(2\theta_R \cdot \frac{f_{+n}}{f_0} \right) \cos \left(2\theta_L \cdot \frac{f_0}{f_{+n}} \right) + 0.5(Z_{RL}^{-1} - Z_{RL}) \sin \left(2\theta_R \cdot \frac{f_{+n}}{f_0} \right) \sin \left(2\theta_L \cdot \frac{f_0}{f_{+n}} \right) 2\theta_L \right] = n \cdot \pi, \quad (4)$$

$$\cos^{-1} \left[\cos \left(2\theta_R \cdot \frac{f_{-n}}{f_0} \right) \cos \left(2\theta_L \cdot \frac{f_0}{f_{-n}} \right) + 0.5(Z_{RL}^{-1} - Z_{RL}) \sin \left(2\theta_R \cdot \frac{f_{-n}}{f_0} \right) \sin \left(2\theta_L \cdot \frac{f_0}{f_{-n}} \right) 2\theta_L \right] = -n \cdot \pi, \quad (5)$$

где θ_R и θ_L — электрические длины отрезков ЛПД и ЛОД на частоте $f = f_0$, $Z_{RL} = Z_R/Z_L$ - отношение волновых сопротивлений ЛПД и ЛОД; (4) верно для $f_{+n} > f_0$ и (5) — для $f_{-n} < f_0$.

Решив систему уравнений (2), (3), (4), либо (2), (3), (5), можно найти θ_R , θ_L и Z_{RL} для любой выбранной комбинации $n = 0$ и $\pm n$. По известным значениям θ_R , θ_L и Z_{RL} , могут быть найдены номиналы сосредоточенных L-C элементов Т-, либо П-ячеек эквивалентной схемы.

Полные R-L-R или L-R-L структуры резонаторов следующего вида: крайние отрезки длинных линий реализованы в виде элементарных Т-ячеек, а в качестве центрально элемента использована П-ячейка, - могут быть заменены усеченными структурами, которые обладают двумя резонансными откликами с подавлением $n=-1$ резонанса для случая R-L-R схемы и $n=+1$ - для L-R-L схемы. Наиболее интересна с точки зрения реализации усеченная R-L-R схема (рисунок 3), содержащая 3 емкостных элемента, которые могут быть заменены переменными конденсаторами (варикапами) для получения многомодового перестраиваемого резонатора с широкими возможностями перестройки резонансных откликов по частоте.

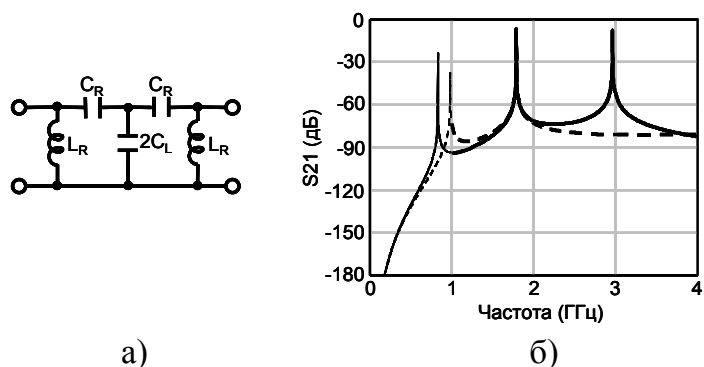


Рисунок 3. R-L-R структура усеченного резонатора на комбинации отрезков искусственных длинных линий; коэффициент передачи резонатора: сплошная линия соответствует полной структуре, штриховая – структуре усеченного резонатора.

Предложенная методика была использована для синтеза двухполосного резонатора на две заданные центральные частоты $f_0 = 1.8$ ГГц и $f_{-1} = 0.75$ ГГц. Конденсаторы C_R и $2C_L$ могут использоваться для перестройки резонансной частоты такого резонатора. Многослойная структура резонатора, выполненная по технологии LTCC, представлена на рисунке 4а. Структура обладает малыми размерами, что делает возможным её применение в мобильных устройствах телекоммуникационных систем.

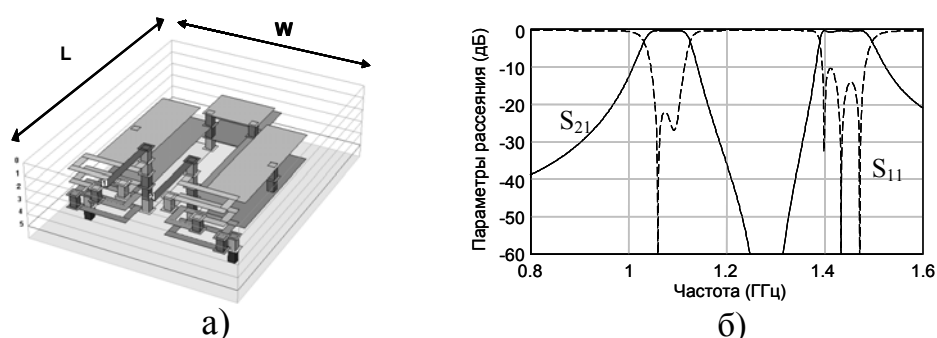


Рисунок 4. (а) Реализация резонатора по технологии LTCC: 6 слоев Dupont Green Tape 951, $d = 95$ мкм с $\epsilon_r = 7.8$, размеры: $L = 5.7$ мм, $W = 4.5$ мм, (б) Параметры рассеяния двухполосного перестраиваемого фильтра на резонаторах рисунка 4а.

В параграфе 2 главы 2 подробно рассмотрены частотные свойства резонаторов на отрезках искусственных длинных линий с применением анализа частотной зависимости входной проводимости структуры резонатора при заданных граничных условиях. Условие резонанса отрезка линии с разомкнутыми концами соответствует нулевому значению входной проводимости.

В случае каскадирования ячеек с положительной дисперсией можно возбудить лишь резонансы $n = +1, +2, \dots$, а резонансы $n = -1, -2, \dots$ - для ячеек с отрицательной дисперсией. Простейшим случаем является наличие двух ячеек искусственных длинных линий с положительной или отрицательной дисперсией конфигурации Т-

П. В таком резонаторе отсутствует резонанс нулевого порядка. Поскольку одна ячейка может обладать максимальной эквивалентной электрической длиной 90 градусов, в случае двух ячеек номиналы элементов Т- и П-ячеек равны, и резонансные частоты равны

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_R L_R}} \quad f_2 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\sqrt{C_R L_R}} \quad (6)$$

для ячеек искусственной длинной линии с положительной дисперсией и

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_L L_L}} \quad f_2 = \frac{\sqrt{3}}{6\pi\sqrt{C_L L_L}} \quad (7)$$

для ячеек искусственной длинной линии с отрицательной дисперсией. Сводная таблица соответствия количества резонансов количеству ячеек в структуре резонатора приведена ниже (Таблица 1).

Таблица 1

Соответствие количества ячеек n количеству резонансных откликов для однородного состава резонатора

Состав резонатора	Количество резонансов
только Т-ячейки	$n-1$
только П-ячейки	n
Т-П или П-Т	2
Т-П-Т	3
П-Т-П	4

Предложенный метод анализа применим и к резонатором на комбинации отрезков искусственных длинных линий с различным законом дисперсии. Для комбинации ячеек с различным законом дисперсии из-за наличия резонанса $n=0$, число резонансных откликов отличается от случая однородного по составу резонатора (Таблица 2).

Таблица 2

Соответствие количества ячеек n количеству резонансных откликов для резонатора на ячейках с различным законом дисперсии.

Состав резонатора	Количество резонансов
только Т-ячейки	$n-1$
только П-ячейки	$n+1$
Т-П-... или П-Т-...	n

Например, для случая двух П-ячеек резонансные частоты трех резонансов, найденные через условие нулевой входной проводимости резонатора имеют вид:

$$f_1 = \frac{2 - \sqrt{3}}{2\pi\sqrt{LC}}, f_2 = \frac{2 + \sqrt{3}}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ и } f_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Используя предложенные в главе 2 структуры на отрезках искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией, можно синтезировать резонансные цепи с выбранным числом откликов и неэквидистантным спектром собственных резонансных частот при полном отсутствии паразитных резонансов.

Глава 3 «Многомодовые микрополосковые резонаторы и фильтры миллиметрового диапазона для использования в составе радиотелескопа РАТАН-600» посвящена описанию проектирования и разработки полосового квазиэллиптического фильтра миллиметрового диапазона радиометрического модуля для радиотелескопа РАТАН-600. В рамках модернизации оборудования РАТАН-600 для непрерывного мониторинга атмосферного поглощения предлагалось на одном из облучателей установить два атмосферных радиометра в одном термостатируемом боксе на длины волн 1,35 см и 8,3 мм с рупорами с полушириной диаграммы направленности 15-20 градусов и направить их оси под углом 20-30 град к зениту, что позволит измерять поглощение вблизи зенита и пересчитывать его на любой нужный угол. Полоса атмосферного радиометра миллиметрового диапазона 36 ± 1 ГГц должна быть сформирована с помощью высокочастотных полосно-пропускающих фильтров.

ППФ в составе приемного модуля был выполнен в планарном варианте с использованием отрезков микрополосковых линий. При этом конечной целью была разработка фильтра на высокотемпературном сверхпроводнике (ВТСП). Для «тёплой» версии фильтра в качестве материала подложки был выбран сапфир, пригодный для получения на нем эпитаксиальных пленок сверхпроводника состава YBCO.

При моделировании фильтра внутри запердельного волновода с сечением 3×3 мм² на частотах от 38 ГГц и выше появлялись паразитные резонансные полосы, то есть резонатор оказался многомодовым. При анализе было выявлено, что это корпусные моды, резонансные частоты которых определяются габаритными размерами волновода. Для того чтобы подавить возбуждение паразитных мод в рабочей полосе частот, размеры волновода при дальнейшем моделировании и в производстве были уменьшены до 2 мм в ширину и 1,5 мм в высоту.

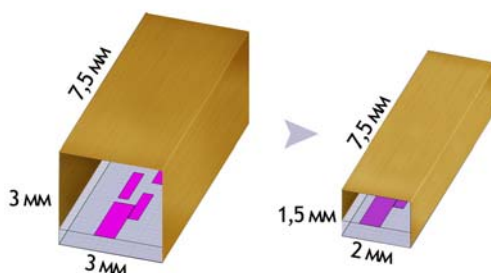


Рисунок 5. Фильтр внутри запердельного объема 3×3 мм и $2 \times 1,5$ мм.

Для реализации фильтра на 35 ГГц была выбрана следующая топология (рисунок 6а). Схема связей в структуре данного фильтра представлена на рисунке 6б.

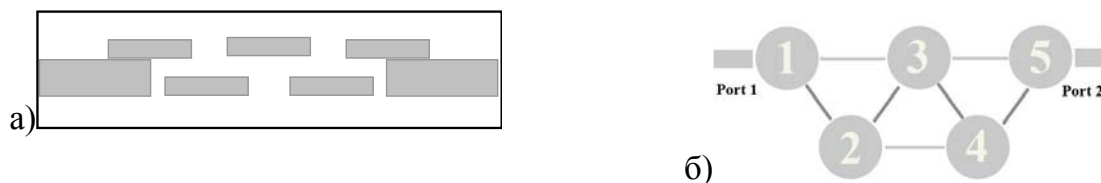


Рисунок 6. Фильтр 5-го порядка на полуволновых связанных резонаторах: (а) топология, (б) схема связей между резонаторами

Такая конструкция позволяет использовать 5 резонаторов для получения крутизны склонов характеристики за счет введения дополнительных нулей передачи, обусловленных связями между несоседними резонаторами. Уменьшение порядка фильтра снижает вносимые потери.

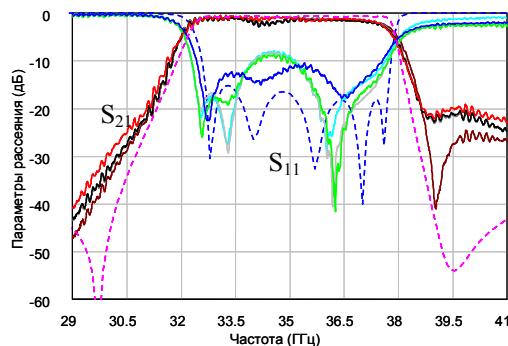


Рисунок 7. Сравнение результатов измерения (сплошная линия) и моделирования (пунктирная) параметров рассеяния фильтров 5-го порядка.

Было проведено экспериментальное исследование разработанных фильтров в составе действующего приемного модуля радиотелескопа РАТАН-600. ППФ был установлен в приемном модуле, для которого измерена шумовая температура. Шумовая температура приемного модуля с ППФ фильтром на сапфире уменьшилась на 5%-10% (на 15-25 К) за счет улучшения формы АЧХ и уменьшения шумового вклада детекторной части модуля в сравнении с ранее используемым ППФ на подложке RT/Duroid 5880, $\epsilon = 2,20$, $\tan\delta = 0,0009$, толщина 0,127 мм с потерями 3-4 дБ.

Выполнялось моделирование ВТСП версии фильтра. При этом использовались измеренные параметры поверхностного сопротивления пленки YBCO, при $T=60$ К расчетные потери не хуже 0,15 дБ. Фильтр обладает внеполосным подавлением не хуже 39 дБ (рисунок 9).

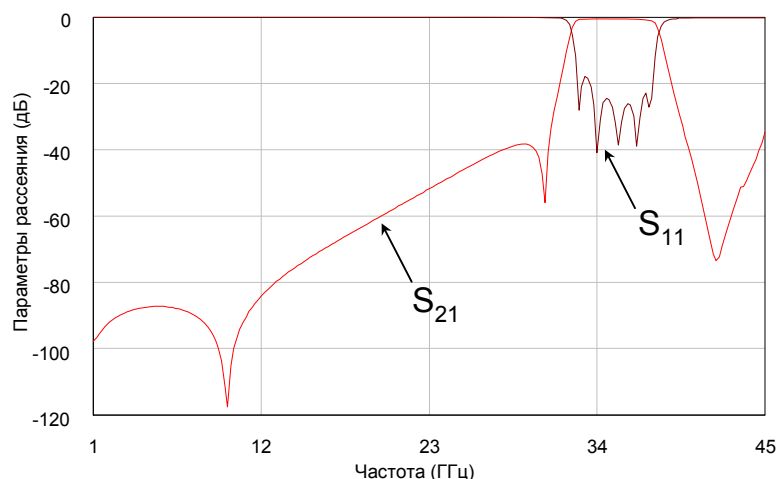
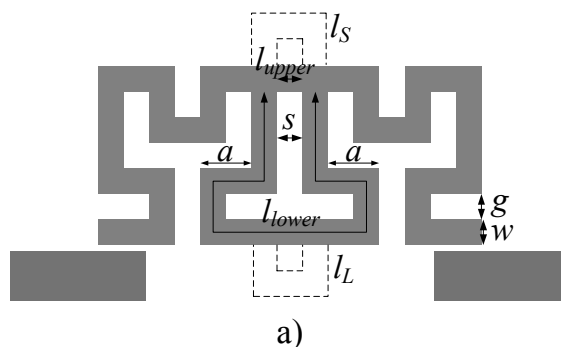


Рисунок 9. Характеристика ВТСП-фильтра 5-го порядка при $T=60$ К в широком диапазоне частот 1-45 ГГц.

В главе 4 «Многомодовые квазифрактальные микрополосковые резонаторы и фильтры» предложена и исследована оригинальная структура многомодового резонатора, полученного путём введения неоднородности во фрактальную кривую Гильберта второго порядка, а также представлены частотно-селективные устройства с применением такого резонатора.

В параграфе 1 главы 4 рассматривается многомодовый квазифрактальный микрополосковый резонатор, образованный нарушением регулярной структуры фракталов Гильберта, и полосовые фильтры на его основе. Фрактальные кривые, в первую очередь, применяются благодаря своим свойствам плотной упаковки.

В главе предложен резонатор, состоящий из двух кривых Гильберта второго порядка, соединённых последовательно. Двухмодовый Псевдофрактальный Резонатор Гильберта (ДПРГ) (рисунок 10а). В такой структуре существует два различных пути распространения электромагнитной волны, что приводит к двухмодовому отклику. Резонатор был разработан и изготовлен на подложке Rogers RT/Duroid 5880, толщиной 1,575 мм с $\epsilon_r=2,2$ и $\tan\delta=0,0009$.



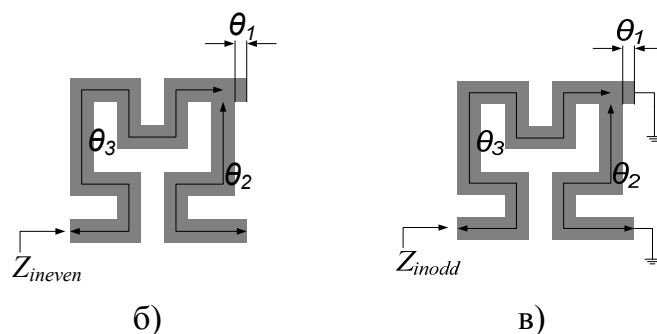


Рисунок 10.(а) Конфигурация псевдофрактального двухмодового резонатора Гильберта. Эквивалентная схема для четной (б) и нечетной (в) моды.

Поскольку предложенный резонатор является симметричной структурой, для его анализа может быть использован метод синфазно-противофазного возбуждения. В приближении отсутствия взаимной связи между сегментами резонатора можно записать выражение для входных сопротивлений для четной и нечетной мод и далее, исходя из условия резонанса $1/Z_{in}=0$, находим уравнения для определения электрических длин структуры:

$$\tan \theta_1 + \tan \theta_2 - \tan \theta_3 \tan \theta_1 \tan \theta_2 = 0 \quad (9)$$

$$\tan \theta_1 + \tan \theta_2 + \tan \theta_3 = 0 \quad (10)$$

Существует возможность достичь практически независимого управления частотным положением резонансных откликов путём отдельного изменения длины верхнего (l_{upper}) и нижнего (l_{lower}) отрезков, соединяющих две фрактальные кривые (рисунок 10а).

Дополнительным преимуществом предложенного резонатора является наличие нуля передачи, который расположен в верхней части частотного диапазона резонатора, выше второй резонансной частоты.

Два двухполосных фильтра с использованием ДПРГ были разработаны для беспроводных сетей связи в диапазоне 2,45 и 3,5 ГГц. Геометрия первого фильтра представлена на рисунке 11а, а его параметры рассеяния – на рисунке 11б. Положение полос пропускания определялось выбором длин l_{upper} и l_{lower} , а точная подстройка фильтра – изменением параметра a . В конечном варианте a не равно сумме $w+g$, выбрано оптимальное значение, $a = 1,5$ мм. Фильтр отличаются малые вносимые потери, малые потери на отражение в полосе пропускания и достаточно высокая частотная избирательность для фильтра низкого порядка за счет трёх нулей передачи.

Результаты хорошо согласуются с результатами моделирования и представлены на рисунке 11б. Измеренные центральные частоты 2,44 ГГц и 3,49 ГГц, и соответствующие вносимые потери 1 дБ и 1,6 дБ.

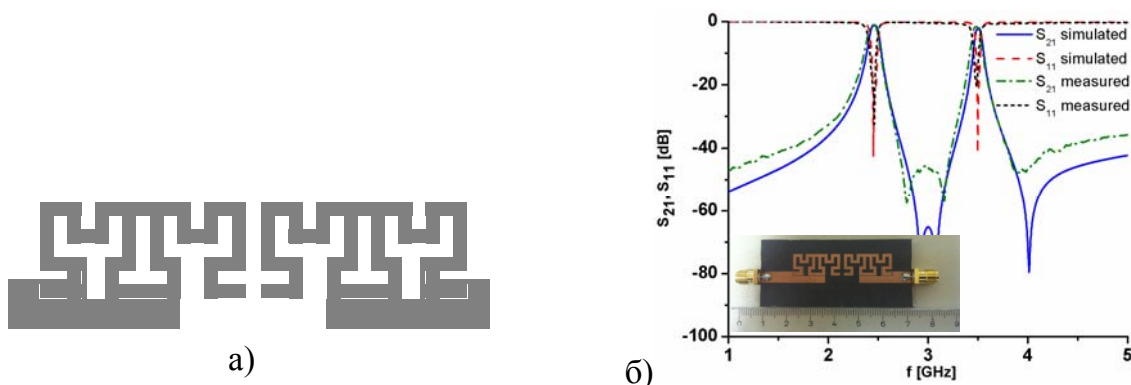


Рисунок 11. (а) Топология первого фильтра. (б) Результаты моделирования и измерений первого фильтра. Фотография фильтра представлена на вставке.

В целях повышения частотной избирательности фильтра топология фильтра была изменена для введения дополнительного нуля передачи в нижней части первой полосы пропускания. Фильтр образован двумя ДПРГ.

По результатам моделирования и измерения фильтра центральная частота первой полосы 2,43 ГГц, второй – 3,47 ГГц, в то время как соответствующие вносимые потери 0,38 дБ и 2,53 дБ, соответственно.

Для демонстрации широких возможностей перестройки предложенной структуры, был спроектирован и изготовлен двухмодовый резонатор с малым расщеплением резонансных мод. Вторая резонансная частота ДПРГ понижена до частоты, близкой к первой. Результатом является однополосный фильтр.

Измеренная центральная частота фильтра 2,37 ГГц, в то время как по результатам моделирования она составляла 2,4 ГГц, измеренные вносимые потери составили 0,78 дБ в сравнении с 0,37 дБ по результатам моделирования, измеренная ширина полосы пропускания по уровню 3 дБ равна 13,56 %, по результатам моделирования – 16,52 %. Итоговые размеры фильтра составили 20,6 x 16,9 мм², то есть приблизительно $0,215\lambda_g \times 0,18\lambda_g$ в длинах волн.

Дальнейшие исследования квазифрактальных структур на базе кривой Гильберта показали, что, кроме многомодовых резонаторов, существуют и другие применения подобных квазифрактальных структур, в частности, для разработки ФНЧ с высокой крутизной склона характеристики. В качестве элементарной ячейки ФНЧ использовались N последовательно соединенных фрактальных кривых Гильберта второго порядка: «Двойная Кривая Гильберта» (ДКГ). Фильтр выполнен на подложке Taconic CER-10 толщиной 1,27 мм с $\epsilon_r = 9,8$ и $\text{tg } \delta = 0,0025$. Ширина МПЛ (w) и ширина зазора (g) выбраны равными 700 мкм. ДКГ занимает площадь: $\lambda_g/12 \times \lambda_g/6$.

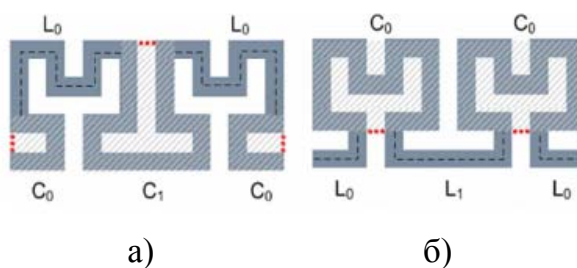


Рисунок 12. Конфигурации ФНЧ на основе ДКГ: (а) CLC и (б) LCL. Точечные линии обозначают позиции, в которых возможно замыкание отрезков ДКГ.

Благодаря специфической форме ДКГ, некоторые из её отрезков могут быть замкнуты, позиции для таких КЗ вставок представлены на рисунке 12. В случае, когда КЗ помещены в участки, обозначенные точечной линией на рисунок 12а, ДКГ соответствует типу фильтра «CLC ФНЧ» (рисунок 13а). Схеме рисунка 14б соответствует «LCL ФНЧ» (рисунок 13б).



Рисунок 13. (а) CLC ФНЧ на основе ДКГ. Положение среднего короткозамкнутого участка может варьироваться для точной настройки. (б) Топология LCL ФНЧ на основе ДКГ.

Получение ФНЧ более высоких порядков возможно путём простого каскадирования дополнительных секций.

Были изготовлены и исследованы ФНЧ фильтры на основе обеих структур (CLC и LCL). Геометрические размеры обоих фильтров: $4,9 \times 10,5 \text{ мм}^2$ в случае CLC ФНЧ и $4,9 \times 10,9 \text{ мм}^2$ в случае LCL ФНЧ, что в длинах волн меньше $\lambda_g/6$ и $\lambda_g/3$. Сравнение результатов моделирования и измерений обоих фильтров представлено на рисунках 15а и 15б, соответственно. На вставках представлены фотографии изготовленных фильтров.

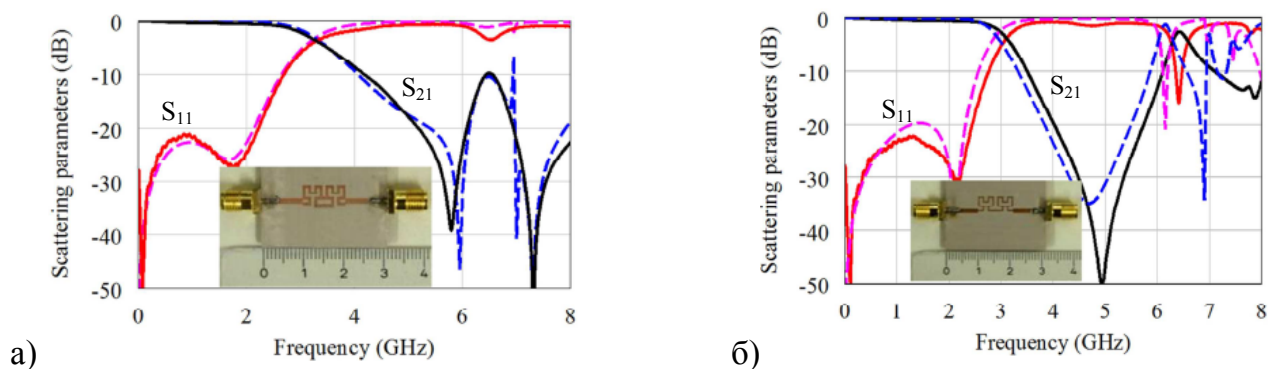


Рисунок 17. Коэффициенты передачи и отражения для ФНЧ на основе ДКГ, результаты измерений (сплошные линии) в сравнении с результатами электродинамического моделирования (штриховые линии): (а) CLC, (б) LCL.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

- [1] Земляков, К.Н. Перестраиваемые многополосные СВЧ-резонаторы и фильтры на комбинации отрезков искусственных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсией [Текст] / К.Н. Земляков, И.Б. Вендик // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. - № 8. - С. 11-17.
- [2] Вендик, И.Б. Особенности технологии пленок высокотемпературных сверхпроводников для СВЧ-фильтров [Текст] / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, И. В. Колмакова, К.Н. Земляков, М.Ф. Ситникова, П.А.Туральчук, Д.В.Мастеров, С.А.Павлов, А.Е.Парафин // Письма в Журнал технической физики. – 2011. - Том 37, выпуск 9. - С. 64-69.
- [3] Zemlyakov, K. Planar low-pass filters based on hilbert fractal (Планарные фильтры нижних частот на основе фрактальной кривой Гильберта) [Text] / K. Zemlyakov, V. Crnojevic-Bengin // Microwave and Optical Technology Letters – 2012. - Volume 54, Issue 11, November 2012 - P. 2577–2581.
- [4] Crnojevic-Bengin, V. Dual-band bandpass filters based on dual-mode hilbert fractal resonator (Двухполосные полосно-пропускающие фильтры на основе двухмодового фрактального резонатора) [Text] / V. Crnojevic-Bengin, K. Zemlyakov, N. Jankovic, I. Vendik // Microwave and Optical Technology Letters – 2013. - Volume 55, Issue 7, July 2013 - P. 1440–1443.
- [5] Machac, J. A Dual Band Leaky Wave Antenna on a CRLH Substrate Integrated Waveguide (Двухполосная антенна вытекающей волны на сбалансированной композитной искусственной длинной линии в волноводе, интегрированном в подложку) [Text] / J. Machac, M. Polivka, K. Zemlyakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation – 2013. - Volume 61, Issue 7, - P. 3876 –3879.

Другие статьи и материалы конференций (наиболее существенные):

- [1] Земляков, К.Н. Полосно-пропускающий ВТСП фильтр для охлаждаемого радиометра 8 мм диапазона [Текст] / К.Н. Земляков, И.Б. Вендик, В.Б. Хайкин // Всероссийская Астрономическая Конференции ВАК-2010, Нижний Архыз, Россия. – 2010. - С. 37.
- [2] Zemlyakov, K. Tuneable Microwave Resonators and Filters on Combination of Right/Left Handed Transmission Line Sections for Multiband Applications (Перестраиваемые СВЧ-резонаторы и фильтры на отрезках искусственных линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией для применения в многополосных устройствах) [Text] / K. Zemlyakov, I. Vendik // Proc. of Metamaterials '2010, Karlsruhe, Germany. - 2010. - P. 423-425.
- [3] Zemlyakov, K. High Q bandpass filters on sapphire substrate for atmosphere remote sensing (Высокодобротные ППФ на подложках из синтетического сапфира для дистанционного зондирования атмосферы) [Text] / K. Zemlyakov, P. Turalchuk, I. Vendik, V. Khaikin, V. Radzikhovsky // Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), Kiev, Ukraine. – 2011. - P. 65 - 68.
- [4] Zemlyakov, K.N. Electronically Tunable Fractal Microstrip Resonators and Filters (Электрически перестраиваемые микрополосковые фрактальные резонаторы и фильтры) [Text] / Kirill N. Zemlyakov, Vesna Crnojević-Bengin // 10th IEEE International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), Nis, Serbia. - 2011. - P. 525-528.