

На правах рукописи



Кершис Сергей Александрович

ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ И
ДИПЛЕКСЕРОВ СВЧ И ПОИСК ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМНО-
КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

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

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Головков Александр Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, Парнес Михаил Давыдович, генеральный директор ООО "Резонанс"

кандидат технических наук, Капитанова Полина Вячеславовна, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университета информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник кафедры: фотоники и оптоинформатики

Ведущая организация: ОАО НИИ «ВЕКТОР»

Защита диссертации состоится «25» июня 2014 года в 14 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 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. Ульянова (Ленина) и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан «23» апреля 2014 года.

Учёный секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В подавляющем большинстве современные радиосистемы являются многодиапазонными. Например, телекоммуникационные системы: WLAN работает на центральных частотах 2.4ГГц/5ГГц, сотовая связь — 850МГц/ 900МГц/950МГц/1800МГц, глобальные спутниковые системы позиционирования ГЛОНАСС, GPS, Galileo поддерживают два диапазона L1 и L2. Аппаратура должна обеспечивать уверенную работу одновременно со всеми поддерживаемыми диапазонами, что накладывает дополнительные требования к радиочастотному тракту приема-передатчика. Помимо всего прочего, массогабаритные показатели устройства должны быть минимально-возможными. Современные мобильные телефоны имеют размер не больше человеческой ладони и массу, не превышающую 300 граммов. В связи с этим, количество функциональных блоков, расположенных на заданной площади печатной платы, становится все больше, а их размеры меньше. Чтобы достичь желаемых размеров устройства необходимо обеспечить компактность многодиапазонных элементов антенно-фидерного тракта со всеми его цепями согласования и фильтрами.

Разработка многополосных фильтрующих СВЧ устройств и частотных мультиплексоров для систем телекоммуникаций и навигации представляет комплекс сложных задач, решение которых требует проведения дальнейших исследований, особенно в свете поиска новых перспективных схмотехнических и конструктивных решений, позволяющих уменьшить габариты этих устройств, упростить их проектирование, изготовление и настройку. Использование в телекоммуникационных и навигационных системах широкополосных сигналов требует разработки фильтрующих устройств не только обеспечивающих заданное подавление внеполосного излучения, но и вносящих минимальные фазовые искажения, что крайне актуально при использовании сложных видов амплитудно-фазовой модуляции с уплотнением спектра, типа OFDM. В литературе опубликовано большое число работ, посвященных методикам синтеза многополосных фильтров и частотных мультиплексоров СВЧ по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ), но практически отсутствуют работы, в которых исследуются фазочастотные характеристики (ФЧХ) многополосных фильтров и мультиплексоров, влияние полос пропускания друг на друга при их взаимно близком расположении. Исследование ФЧХ таких цепей представляет сложную задачу, решение которой назрело к настоящему времени.

Для практики представляется важным найти и исследовать структуры многочастотных резонаторов на отрезках линий передачи, которые обладали бы свойством развязанности резонансных частот, позволяя реализовывать многополосные фильтры и диплексеры СВЧ с

раздельной настройкой полос пропускания, предложить перспективные для различных физических реализаций структуры многополосных фильтров и диплексеров.

Традиционные схемно-конструктивные решения фильтров высоких частот (ФВЧ) не удобны для реализации частотных диплексеров СВЧ. Представляется необходимым найти и исследовать простые в реализации структуры на отрезках линий передачи, с полосовой АЧХ, имеющие нули передачи в полосах задерживания, которые могли бы использоваться в качестве ФВЧ в диплексерах на паре ФНЧ-ФВЧ и обладали бы малым затуханием в полосе пропускания.

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 и исследовании характеристик ФЧХ и группового времени задерживания (ГВЗ) многополосных фильтров и диплексеров СВЧ, исследовании перспективных схемно-конструктивных решений для многочастотных резонаторов с развязкой резонансных частот, на основе которых могли бы быть реализованы многополосные фильтры и диплексеры, поиску новых решений для структур, которые могли бы использоваться в качестве ФВЧ в диплексерах на паре ФНЧ-ФВЧ.

Для достижения этих целей необходимо было решить задачи:

- исследовать ФЧХ идеальных многополосных фильтров с бесконечным числом реактивных элементов и фильтров с конечным числом элементов;
- определить предельные параметры по взаимному расположению полос пропускания многополосных фильтров с конечным числом элементов, при которых начинают проявляться искажения ФЧХ и выработать рекомендации по выбору порядков фильтра;
- исследовать поведение ФЧХ частотных диплексеров на паре фильтров ФВЧ-ФНЧ в зависимости от ширины переходной зоны и уровня затухания в полосах задерживания и выработать рекомендации по выбору порядка фильтров;
- разработать и теоретически исследовать основные принципы построения многополосных фильтров СВЧ, позволяющих выполнять раздельную настройку амплитудно-частотных характеристик в каждой полосе пропускания;
- предложить новые структуры двухполосных фильтров и диплексеров СВЧ, допускающие реализацию в различных технологиях и позволяющие осуществлять раздельную настройку АЧХ в полосах пропускания;
- предложить и теоретически исследовать новые структуры, имеющие характеристики ФВЧ с большими полосами пропускания и задерживания, удобные для использования в диплексерах на паре фильтров ФВЧ-ФНЧ;

— выполнить разработки и экспериментальные исследования ряда одно и двухполосных фильтров и диплексеров для приемных устройств систем спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS, а также телекоммуникационных систем.

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. Проверка теоретических положений выполнялась экспериментально.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Исследованы частотные свойства ФЧХ нижнечастотного и высокочастотного каналов диплексера, реализованного на паре полиномиальных фильтров ФНЧ-ФВЧ, показано наличие экстремума фазовой характеристики диплексера в переходной зоне и определены его параметры;

2. Показано, что увеличение порядка фильтров в каналах диплексера приводит к сужению линейной части ФЧХ в каналах, увеличению неравномерности ФЧХ в переходной зоне;

3. Исследованы частотные свойства ФЧХ и ГВЗ в полосах пропускания многополосных фильтров с любым числом полос пропускания при Кауэровской и Баттервортовской аппроксимации АЧХ;

4. Для двухполосного фильтра с Кауэровской и Баттервортовской аппроксимацией АЧХ с различным числом реактивных элементов выполнен анализ характеристик ФЧХ и ГВЗ на всей оси частот при различном расположении полос пропускания друг относительно друга и найдены критические параметры, при которых становится заметным искажение характеристик;

5. Предложен принцип построения многочастотных микрополосковых резонаторов с развязкой резонансных частот для синтеза многополосных фильтров с независимой настройкой АЧХ в каждой из полос пропускания. Выполнен теоретический анализ предложенных резонаторов, определено условие развязки резонансных частот, моделированием найдены оптимальные соотношения для конструктивных параметров многочастотного резонатора и максимальное число резонансных частот;

6. На основании выполненных теоретических исследований предложены конструкция двухполосного фильтра на основе двухмодовых резонаторов, защищенная патентом, и конструкция диплексера на паре полосовых фильтров, на которую подана заявка на патент, отличающиеся независимой настройкой АЧХ в каждой из полос пропускания и минимальными габаритами;

7. Предложена микрополосковая структура с полосовой АЧХ, имеющая нули в полосах задерживания, которая может использоваться в качестве ФВЧ в диплексерах на паре ФНЧ-ФВЧ. Выполнен анализ предложенной структуры, определены ее оптимальные параметры.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Диплексеры на паре фильтров ФВЧ-ФНЧ имеют в переходной зоне в каждом из каналов экстремум ФЧХ, величина которого возрастает с увеличением порядка фильтров и затухания в полосе задерживания.

2. В многополосных фильтрах при разносе центральных частот на величину менее суммы двух соседних полос пропускания начинает увеличиваться неравномерность характеристик ФЧХ и ГВЗ, возрастающая с увеличением порядка фильтра.

3. В многочастотных резонаторах, выполненных на пересекающихся в центральной точке проводниках полуволновых резонаторах, количество пересекающихся проводников не должно превышать четырех для получения резонатора с высокой степенью развязки резонансных частот.

4. Использование ФНЧ и ФВЧ структур на основе фазовой цепи СВЧ первого порядка позволяет создавать СВЧ диплексеры с контролируемыми нулями передачи в полосах задерживания фильтров и малыми потерями в полосах пропускания.

Практическая ценность новых научных результатов. В диссертационной работе показана возможность создания многополосных фильтров и диплексеров СВЧ с минимальными искажениями характеристик ФЧХ и ГВЗ, имеющих минимальные габариты и выполнимых по различным технологиям.

Предложенная методика оценки искажений ФЧХ при сближении полос пропускания друг с другом позволяет разработчикам грамотно подойти к выбору порядков фильтров в многополосных фильтрах и диплексерах в зависимости от расположения полос пропускания и требуемого подавления между полосами.

Разработанные в диссертационной работе диплексеры на паре фильтров ФВЧ-ФНЧ с широкими канальными полосами пропускания и диплексер на паре полосно-пропускающих фильтров, в основе которых лежат полуволновые резонаторы, найдут широкое применение в радиоприемных устройствах аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS для разделения сигналов диапазонов L1 и L2 и для разделения сигналов в системах мобильной связи.

Предложенные в диссертации структуры двухполосных фильтров и диплексеров, одна из которых защищена патентом, а на другую подана заявка на патент, с независимой настройкой полос пропускания могут быть выполнены на многослойной диэлектрической подложке и на основе LTCC технологий и найдут широкое применение в телекоммуникационном оборудовании и аппаратуре потребителей спутниковых навигационных систем.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы получены в процессе выполнения трех госбюджетных НИР в 2009- 2013 г. на кафедре РЭС СПбГЭТУ (ЛЭТИ), а также при выполнении в 2013-2014г. научной работы в рамках государственного контракта № У-2013-1/7 на тему: «Разработка многочастотных резонаторов с некротными частотами и фильтров на их основе» от 01.04.2013 в рамках программы УМНИК. Материалы диссертации использованы в научных разработках кафедры, в учебном процессе, в ЗАО «Транстрика» и в ОАО НТЦ «Завод ЛЕНИНЕЦ».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты работы докладывались и обсуждались на 20-й, 21-й и 22-й Международных конференциях «Microwave & Telecommunication Technology», (Sevastopol, Crimea, Ukraine 2010, 2011, 2012г.), на 1 и 2-ой всероссийской научной конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (г. Санкт-Петербург, 2012, 2013г.), а также научно-технических конференциях профессорского – преподавательского состава СПбГЭТУ (ЛЭТИ) в 2010-2014 г.

Публикации. Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 10 печатных научных работах, в числе которых 3 статьи, входящие в Перечень ВАК, один патент на полезную модель и 6 трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, 2 приложений и списка литературы, включающего 67 наименований. Основная часть работы изложена на 141 странице и содержит 103 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приводится обзор материалов по методам построения многополосных фильтров (МФ). Рассматриваются варианты построения МФ на основе параллельного соединения полосно-пропускающих фильтров (ППФ) с решением проблем контроля неравномерности АЧХ в полосах пропускания и уровня подавления сигнала между ними. Обсуждаются достоинства и недостатки реализации МФ на основе каскадного соединения ППФ и полосно-запирающего (ПЗФ) фильтров, а также комбинации параллельного соединения и ППФ с ПЗФ. Показана перспективность использования в МФ многочастотных резонаторов, например кольцевых, двухчастотных. Излагаются материалы по классическому методу синтеза МФ по рабочим параметрам от нижнечастотного фильтра-прототипа с использованием многополосового реактансного преобразования частоты, показано удобство использования этого

подхода к решению задачи оценки поведения ФЧХ в многополосных фильтрах. В материалах работы указывается, что все рассмотренные структуры МФ обладают общими недостатками: взаимосвязью АЧХ в полосах пропускания, большими размерами и сложными системами цепей согласования. Указывается также, что практически отсутствуют работы посвященные исследования характеристик ФЧХ и ГВЗ для МФ, относительно небольшое число работ посвящено поиску структур МФ, которые могли бы обеспечить возможность отдельных настроек АЧХ фильтра в каждой из его полос пропускания.

Рассматриваются основные соотношения для канальных характеристик передачи у частотно-разделительных устройств фильтрового типа, в том числе диплексеров на принципе параллельного соединения ФНЧ-ФВЧ.

Рассмотрена взаимосвязь между АЧХ и ФЧХ для минимально-фазовых цепей с помощью преобразования Гильберта, записанного в различных формах, обсуждаются примеры расчетов ФЧХ внутри полос пропускания ФНЧ и ППФ.

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

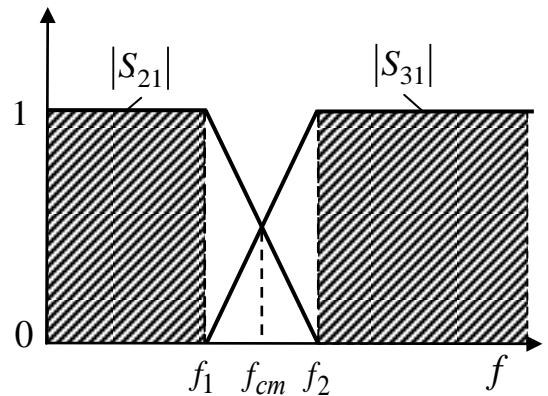
Во второй главе приводятся результаты исследования фазовых характеристик каналов диплексера на паре фильтров ФНЧ-ФВЧ при кусочно-линейной аппроксимации АЧХ, показанной на рисунке 1.

Показано, что при использовании в каналах диплексера полиномиальных фильтров фазовая характеристика нижнечастотного канала описывается системой уравнений:

$$\varphi_{21}(\omega) = \begin{cases} \frac{A_0}{\pi \cdot \ln(\omega_2/\omega_1)} \cdot (F(\omega/\omega_2) - F(\omega/\omega_1)), & \text{если } \omega \in [0, \omega_1) \\ -\frac{A_0}{\pi \cdot \ln(\omega_2/\omega_1)} \cdot \left(\frac{\pi^2}{2} - (F(\omega_1/\omega) + F(\omega/\omega_2)) \right), & \text{если } \omega \in [\omega_1, \omega_2) \\ \frac{A_0}{\pi \cdot \ln(\omega_2/\omega_1)} \cdot (F(\omega_1/\omega) - F(\omega_2/\omega)), & \text{если } \omega \in [\omega_2, \infty) \end{cases} \quad (1)$$

где A_0 - разность между уровнями затухания АЧХ в полосе задерживания и в полосе пропускания, выраженная в неперах, $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$ - круговые частоты, а функция $F(x)$ - первообразная:

$$F(x) = \int \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) \cdot \frac{dx}{x} = 2 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)^2}. \quad (2)$$



Аналогичная система уравнений получена для ФЧХ высе- Рисунок 1 гла диплек- сера. Показано, что ФЧХ в обоих каналах имеет экстремум на частоте стыковки $\omega_{cm} = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2} \Rightarrow f_{cm} = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$, причем максимальное по модулю значение фазового сдвига на этой частоте, а значит и неравномерность ФЧХ, зависят от уровня затухания в полосе задерживания и от ширины полосы стыковки и составляет:

$$|\varphi_{\max}(S_{21})| = |\varphi_{\max}(S_{31})| = \frac{A_0}{\pi \cdot \ln(\omega_2/\omega_1)} \cdot \left(\frac{\pi^2}{2} - 2 \cdot F \left(\sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} \right) \right). \quad (3)$$

Эти результаты позволили выработать рекомендации разработчикам по выбору порядка фильтров в каналах диплекера в зависимости от требуемого уровня фазовых искажений.

Найдены аналитические выражения для ФЧХ в полосах пропускания предельных МФ, АЧХ которых соответствует рисунку 2 и которые получены из Кауэровского фильтра-прототипа многочастотным реактансным преобразованием частоты. Для МФ, имеющего n полос пропускания, с аппроксимацией АЧХ полиномом Баттерворта степени N выражение для ФЧХ в полосах пропускания фильтра получено в виде:

$$\varphi(\omega) = -\frac{N}{\pi} \cdot F \left(\frac{\prod_{i=1}^n [\omega^2 - \omega_{0i}^2]}{\prod_{i=1}^{n-1} [\omega^2 - \omega_{pi}^2] \cdot \omega \cdot \beta \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i} \right), \quad (4)$$

где ω_{0i} , ω_{pi} - нули и полюсы многочастотного реактансного преобразования частоты, определяемые из решения однородных уравнений:

$$\prod_{i=1}^n (\omega^2 - \Delta\omega_i \cdot \omega - \omega_{ri}) = 0, \quad (5)$$

полученных путем группировки членов с четными и нечетными степенями ω . При четных степенях ω под ω_{ri} в (5) понимаются центральные частоты полос пропускания МФ с ширинами $\Delta\omega_i$, на которые необходимо синтезировать фильтр (см. рисунок 2). На частотах, соответствующим полюсам реактансного преобразования частоты (уравнение с нечетными степенями ω), АЧХ МФ стремится к нулю, а ФЧХ меняет знак на противоположный.

Для двухполосного фильтра с бесконечным числом элементов и равными ширинами полос пропускания $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \Delta\omega$ получено выражение для ФЧХ во всей полосе частот в зависимости ширины

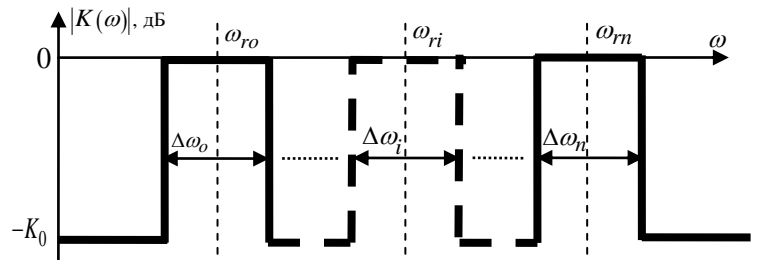


Рисунок 2

полосы пропускания $\Delta\omega$ и взаимного расположения центральных частот полос ω_{01} , ω_{02} друг относительно друга, определяемого коэффициентом k :

$$\varphi(\omega) = -\frac{K_0}{20 \cdot \pi \cdot \lg(e)} \cdot \ln \left(\frac{2\Delta\omega \cdot (\omega^2 - \omega_{p1}^2) \cdot \omega + (\omega^2 - \omega_{01}^2)(\omega^2 - \omega_{02}^2)}{2\Delta\omega \cdot (\omega^2 - \omega_{p1}^2) \cdot \omega - (\omega^2 - \omega_{01}^2)(\omega^2 - \omega_{02}^2)} \right), \quad (6)$$

где K_0 [дБ] - максимальное затухание АЧХ в полосах задерживания МФ, $\omega_{02} = \omega_{01} + k \cdot \Delta\omega$, а $\omega_{p1} = \sqrt{\omega_{01} \cdot \omega_{02}}$.

Расчет ФЧХ по приведенной формуле позволил определить критичное сближение полос в двухполосном фильтре, когда начинаются искажения частотных характеристик ФЧХ и ГВЗ. При этом характеристики ФЧХ и ГВЗ внутри каждой из полос пропускания оказываются ассиметричными и сдвинутыми к частоте ω_{p1} . Характеристики ФЧХ и ГВЗ для значения $k = 2$ показаны на рисунке 3.

При дальнейшем сближении полос пропускания двухполосного фильтра искажения частотных характеристик ФЧХ и ГВЗ еще более усиливаются, сохраняя при этом геометрическую симметрию относительно частоты f_{p1} .

Эти результаты позволяют оценить неравномерность ГВЗ в полосах пропускания двухполосного фильтра и необходимость компенсации полученных неравномерностей при использовании широкополосных сигналов цифровыми методами при постобработке.

Получено аналитическое выражение для ФЧХ двухполосного фильтра с конечным числом реактивных элементов N при аппроксимации АЧХ полиномами Баттерворта:

$$\varphi(\omega) = -\frac{N}{\pi} \cdot F \left(\frac{(\omega^2 - \omega_{01}^2)(\omega^2 - \omega_{02}^2)}{2 \cdot \Delta\omega \cdot (\omega^2 - \omega_{p1}^2) \cdot \omega} \right). \quad (7)$$

Выполнен анализ полученного выражения и получено подтверждение, что и при конечном числе элементов в фильтре-прототипе критическим является сближение центральных частот полос пропускания на величину равную сумме обеих полос.

В третьей главе предлагается принцип построения многочастотных микрополосковых резонаторов с развязкой резонансных частот для синтеза многополосных фильтров с незави-

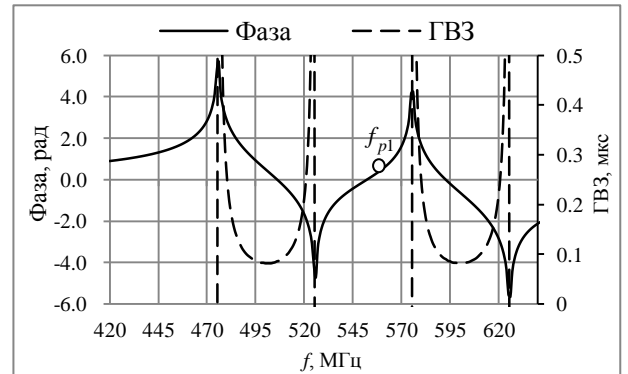


Рисунок 3

симой настройкой АЧХ в каждой из полос пропускания. В основу этого принципа положено свойство развязки резонансных частот полуволновых резонаторов, пересекающихся в центральной точке. Получена матрица передачи такого резонатора, на основании которой доказывается развязка резонансных частот у простейшего крестообразного резонатора, топология которого приведена на рисунке 4.

Математическим моделированием подтверждена независимость одной из резонансных частот при симметричном изменении длины второго резонатора. Это подтверждается рисунком 5, где приведены результаты моделирования двухчастотного резонатора, когда физическая длина первого резонатора остается постоянной, а длина второго резонатора изменяется с увеличением номера итерации расчета.

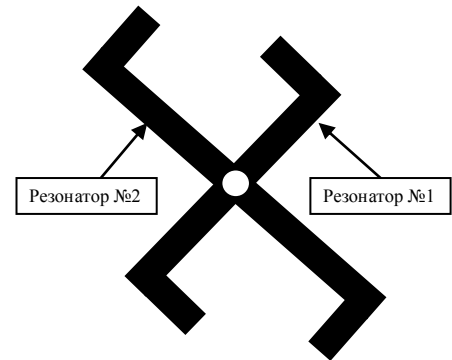


Рисунок 4

В диссертации показано, что максимальное число пересекающихся полуволновых резонаторов целесообразно ограничить четырьмя, определены оптимальные соотношения для конструктивных параметров такого многочастотного резонатора.

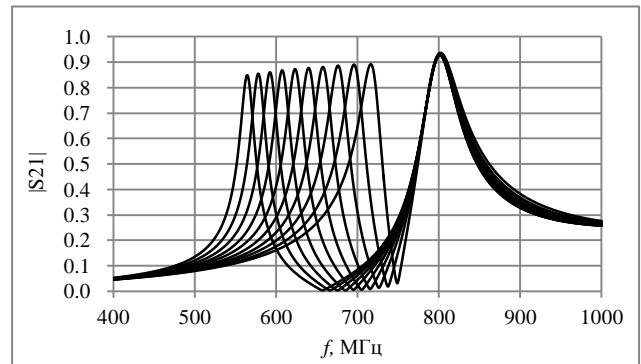


Рисунок 5

На основании выполненных исследований многочастотных резонаторов в дис-

сертации предложена конструкция двухполосного фильтра, выполненного на двухчастотных резонаторах, защищенная патентом на полезную модель. Резонаторы фильтра выполнены в виде V-образных проводников, расположенных на различных сторонах среднего слоя трехслойной подложки и соединенных металлизированными отверстиями связи, проходящими через средний слой подложки. На рисунке 6 черным цветом обозначены проводники на верхней стороне среднего слоя подложки, а белым - на нижней стороне, отверстия заштрихованы. Результат электромагнитного моделирования двухполосного фильтра показан на рисунке 7.

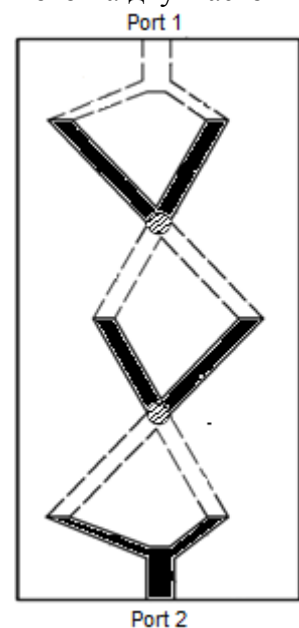


Рисунок 6

Другим примером использования рассматриваемого принципа построения многочастотных резонаторов с развязкой центральных частот и полос пропускания является предложенная в третьей главе диссертации конструкция диплексера, на которую подана заявка на патент. Структурно дип-

лексер состоит из двух соединенных с источником сигнала ППФ, реализованных в виде цепочки полуволновых резонаторов, связанных друг с другом емкостной связью через средний слой трехслойной диэлектрической подложки, настроенных на разные центральные частоты и подключенные каждый к своему выходу. Нечетные и четные по номеру полуволновые резонаторы обоих ППФ расположены сверху и снизу среднего слоя подложки, причем разомкнутые концы проводников соседних резонаторов каждого фильтра расположены на различных сторонах среднего слоя подложки

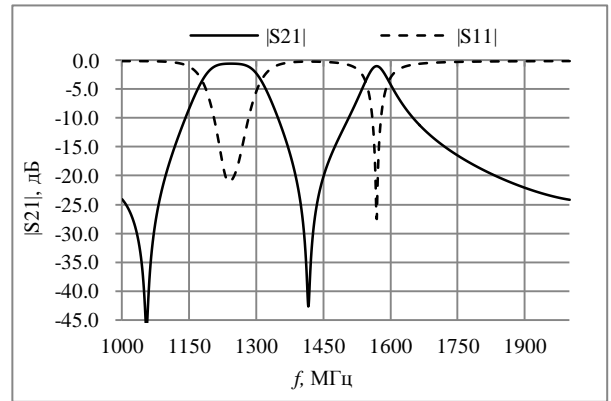


Рисунок 7

друг над другом. Полуволновые резонаторы первого и второго ППФ с одинаковыми номерами пересекаются в средних точках и образуют двухчастотный крестообразный резонатор (рисунок 8). Для подавления паразитных полос пропускания точки пересечения полуволновых микрополосковых резонаторов первого и второго ППФ соединены с нижним и верхним экранирующими металлическими слоями с помощью металлизированных отверстий связи через слои диэлектрической подложки. Поскольку оба ППФ, образующих диплексер, расположены в одном объеме, то заявленная конструкция отличается малыми габаритами. Результат электромагнитного моделирования показан на рисунке 9.



Обе конструкции как двухполосного фильтра, так и диплексера могут быть реализованы с любым числом резонаторов, позволяют реализацию не только на симметричной полосковой линии, но и на несимметричной микрополосковой линии с одним нижним экраном либо с помощью LTCC технологий.

В третьей главе предлагается структура полосового фильтра на основе фазовой цепи первого порядка, у которой имеются дополнительные нули передачи в полосах задерживания, положением которых можно управлять. Показано, что это позволяет с помощью ФНЧ структуры, также выполненной на основе фазовой цепи первого порядка, сформировать структуру диплексера на паре ФНЧ-ФВЧ с широкими рабочими полосами.

Рисунок 8

Предложенная структура ФВЧ показана на рисунке 10. В результате анализа цепи получено уравнение, определяющее положение нулей передачи в полосах задерживания:

$$r \cdot \operatorname{tg} \theta + Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2 = 0, \quad (8)$$

где $r = (Z_{oe} - Z_{oo})/2$, остальные параметры понятны из рисунка 10.

Для частного случая $\theta = 2\theta_2$ получены корни уравнения (8), определяющие частоты нулей передачи:

$$\theta_{21} = 2\pi k, \theta_{22} = \arctg\left(\sqrt{\frac{2 \cdot r + Z_2}{Z_2}}\right) + \pi k, \theta_{23} = -\arctg\left(\sqrt{\frac{2 \cdot r + Z_2}{Z_2}}\right) + \pi k, \quad (9)$$

где k - целые числа.

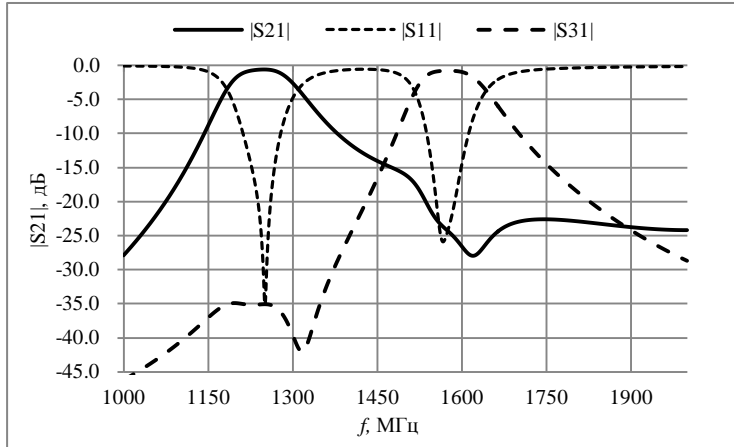


Рисунок 9

АЧХ наиболее близко совпадающую с АЧХ ФВЧ. Такой фильтр может найти применение в широкополосных системах связи. Он обладает максимально плоской характеристикой внутри полосы пропускания, что прогнозирует линейную фазочастотную характеристику и постоянную скорость ее изменения по частоте. На основе этих результатов предложена структура широкополосного диплексера, показанная на рисунке 11.

Четвертая глава содержит результаты разработки и экспериментальных исследований трех вариантов малогабаритных микрополосковых диплексеров на паре ФНЧ-ФВЧ и паре полосовых фильтров, полосы пропускания и задерживания которых были выбраны так, чтобы обеспечить частотное разделение сигналов диапазонов L1 и L2 в приемниках навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Диплексер на паре ФНЧ-ФВЧ может быть использован и для разделения сигналов мобильной связи GSM диапазонов 900МГц и 1800МГц. Диплексер обеспечивает малые потери в по-

При $\theta_2 \rightarrow \pi + 2\pi k$ получаем значение центральной частоты полосы пропускания.

В диссертации решена и обратная задача - формирование цепи с минимальным числом нулей передачи в полосе задерживания и максимальной шириной полосы пропускания, когда фильтр имеет

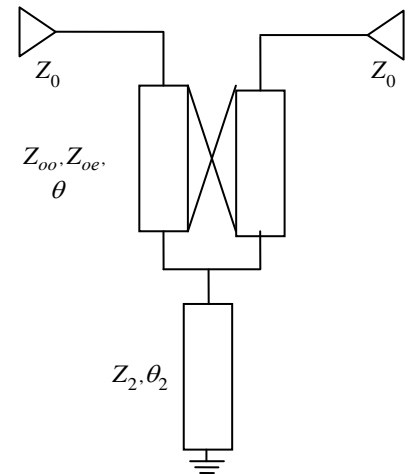


Рисунок 10

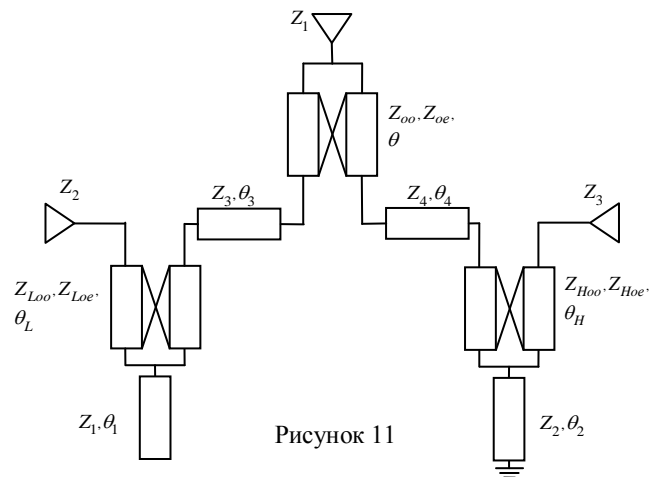


Рисунок 11

лосах пропускания и высокую развязку в полосах задерживания при минимальных габаритах и реализации для монтажа по SMD технологиям. Топология диплексера представлена на рисунке 12, а его расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (точки) частотные характеристики — на рисунке 13.

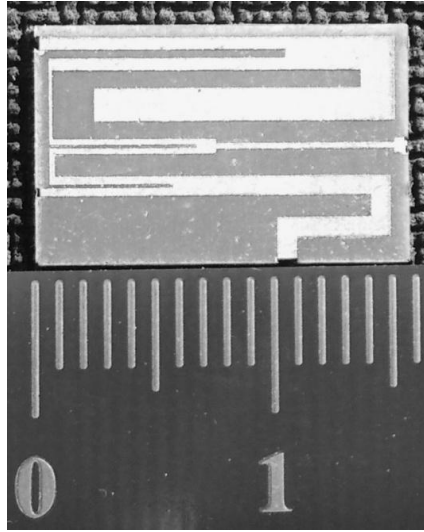


Рисунок 12

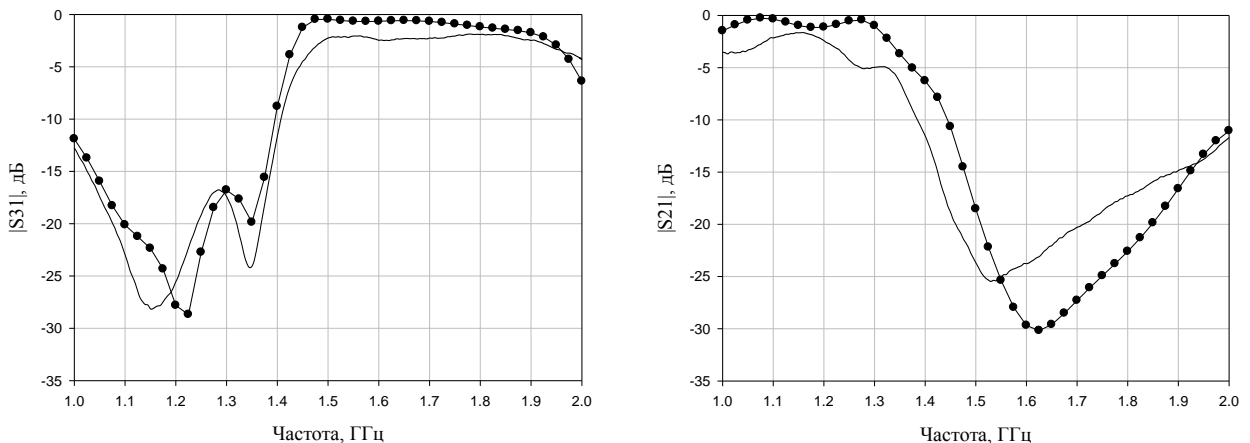


Рисунок 13

Диплексер был выполнен на керамической подложке с $\varepsilon = 80$ и $\tan \delta = 0.003$. Размеры его составляют $10.3 \times 15.8 \times 0.5$ мм³.

Диплексер на паре ППФ с $\lambda/2$ -резонаторами на диапазоны L1 и L2, выполненный на той же керамической подложке, имеет размеры $17.5 \times 7.4 \times 0.5$ мм³, уровень потерь в полосах пропускания не более 2дБ и затухание в полосах задерживания не менее 30дБ.

Результаты раздела 3.1 позволили разработать двухполосный фильтр с отдельной настройкой полос пропускания. Топология фильтра и его частотные характеристики приведены на рисунках 14 и 15. Расчетные и измеренные характеристики хорошо коррелируются друг с другом. К достоинствам такого фильтра можно отнести три ярко выраженных и контроли-

руемых нуля передачи, два из которых расположены по краям характеристики, а один в центре. Двухполосный фильтр также выполнен на керамической подложке с $\varepsilon = 80$ и $\tan \delta = 0.003$, размеры фильтра составляют $17 \times 11 \times 0.5$ мм³ и могут быть уменьшены до $12 \times 11 \times 0.5$ мм³.

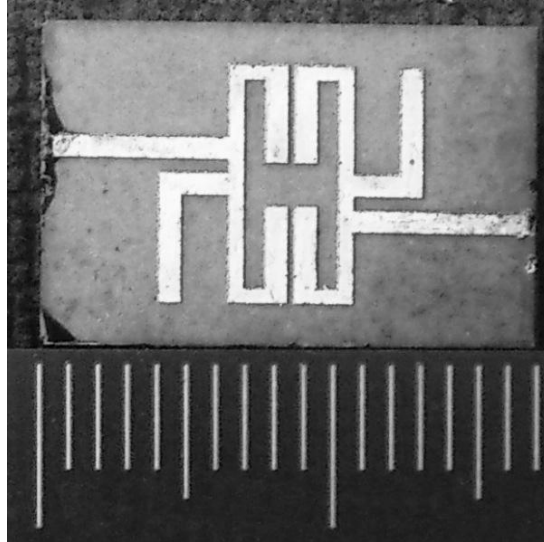


Рисунок 14

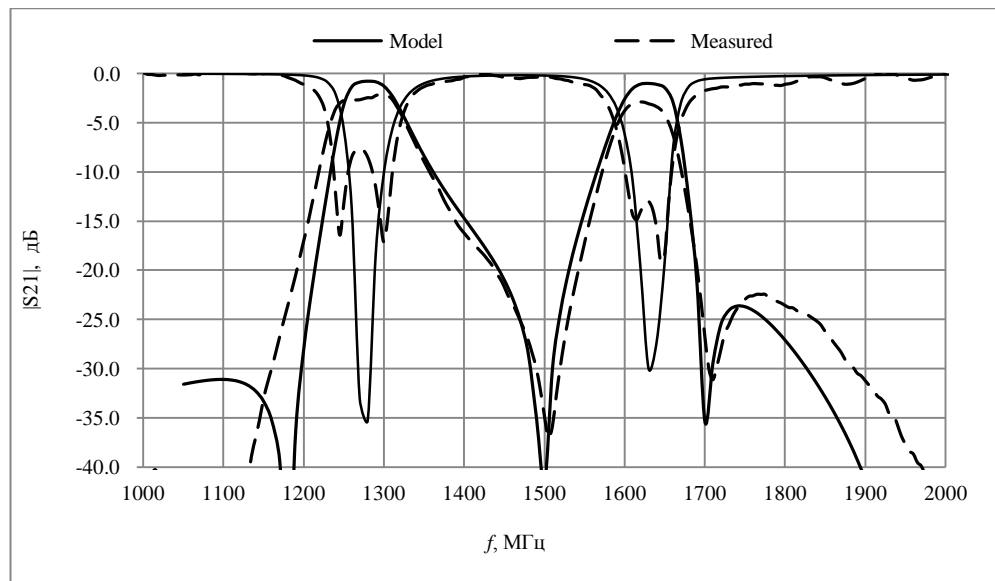


Рисунок 15

Кроме описанных выше диплексеров и двухполосного фильтра, самостоятельное значение имеет и разработанный в процессе работы над диссертацией ряд керамических микрополосковых ППФ на диапазоны спутниковых навигационных систем $L1=1575$ МГц и $L2=1240$ МГц. Эти фильтры имеют малые габариты, высокую вибрационную и радиационную стойкость. Некоторые из них, например ППФ на полуволновых резонаторах, выпускаются серийно и используются в различных по назначению приемниках навигационных систем, что отмечено в акте внедрения.

Основные результаты диссертационной работы

1. Исследованы частотные свойства характеристик ФЧХ и ГВЗ каналов диплексера, реализованного на паре полиномиальных фильтров ФНЧ-ФВЧ. Показано наличие экстремумов фазовой характеристики в каналах в переходной зоне, определены их частота и максимальное значение фазового сдвига. Исследованы различия характеристик ФЧХ и ГВЗ для отдельного фильтра и фильтра в составе диплексера, установлена связь между параметрами фильтров в составе диплексера и неравномерностью ФЧХ в каналах.

2. В общем виде решена задача определения ФЧХ и ГВЗ в полосах пропускания многополосных фильтров с любым числом полос пропускания при Кауэровской и Баттервортовской аппроксимации АЧХ. Для предельного двухполосного фильтра с бесконечным числом реактивных элементов и для двухполосного фильтра с аппроксимацией АЧХ полиномами Баттерворта выполнен анализ искажений характеристик ФЧХ и ГВЗ на всей оси частот при различном расположении полос пропускания друг относительно друга.

3. Предложен принцип построения многочастотных микрополосковых резонаторов с развязкой резонансных частот для синтеза многополосных фильтров с независимой настройкой АЧХ в каждой из полос пропускания. Выполнен теоретический анализ предложенных резонаторов, определено условие развязки резонансных частот, найдены оптимальные соотношения для конструктивных параметров многочастотного резонатора

4. На основании выполненных теоретических исследований предложена, защищенная патентом, конструкция двухполосового фильтра на основе многочастотных резонаторов с развязкой центральных частот полос пропускания и предложена конструкция диплексера на паре полосовых фильтров, отличающаяся минимальными габаритами, на которую подана заявка на патент.

5. Предложена и исследована микрополосковая структура с полосовой АЧХ, имеющая нули в полосах задерживания, которая может использоваться в качестве ФВЧ в диплексерах на паре ФНЧ-ФВЧ, определены ее оптимальные параметры. Показана возможность реализации диплексера с широкими полосами пропускания и задерживания в совокупности с известной структурой ФНЧ на основе фазовой цепи первого порядка.

6. На основе теоретических исследований в главах 2 и 3 диссертации была оптимизирована и реализована конструкция диплексера на паре фильтров ФНЧ-ФВЧ, выполненная на керамике с высокой электрической плотностью. Результаты экспериментальных исследований диплексера хорошо совпали с результатами моделирования. Диплексер используется для разделения сигналов в приемниках спутниковых навигационных систем и может использоваться для разделения сигналов в системах мобильной связи.

7. По результатам теоретических исследований главы 3 выполнена оптимизация, разработка и экспериментальные исследования двух типов диплексеров на полосно-пропускающих фильтрах для разделения сигналов в спутниковых навигационных системах. Экспериментальные и расчетные характеристики диплексеров совпадали с достаточной для практики точностью.

8. Выполнена разработка линейки полосно-пропускающих фильтров для спутниковых навигационных систем на керамических подложках с высокой диэлектрической проницаемостью, отличающихся малыми габаритами и ориентированных на монтаж с помощью SMD технологий.

9. На основе теоретических исследований, выполненных в главах 2 и 3 диссертации, была предложена конструкция и выполнена разработка двухполосного фильтра с развязкой полос пропускания и возможностью их отдельной настройки для приемников спутниковых навигационных систем на керамической подложке с высокой диэлектрической проницаемостью. Результаты экспериментальных исследований двухполосного фильтра хорошо совпали с результатами моделирования и подтвердили теоретические разработки.

Все устройства, которые были разработаны в процессе работы над диссертацией, являются результатами выполнения трех госбюджетных НИР в 2009-2013 г. на кафедре РЭС СПбГЭТУ (ЛЭТИ) с участием автора диссертации. В рамках первого года программы "УМ-НИК", выполняемой автором, реализован двухполосный фильтр с независимой настройкой полос пропускания. Диплексер на полуволновых фильтрах и двухполосный фильтр выпускаются серийно в ЗАО «Транстрика» (г. Санкт-Петербург).

Опубликованные научные работы по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Бабушкина, О.А., Кершис, С.А. СВЧ фильтры высоких частот с широкой полосой задерживания/ О.А. Бабушкина, С.А. Кершис//Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". — 2011. — № 2. — стр. 8-13.
2. Кершис, С.А. Многочастотные резонаторы и фильтры на их основе/ С.А. Кершис // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ".—2012.— №9.— стр. 3-7.
3. Головков, А.А., Кершис, С.А. Частотные характеристики фазы и группового времени задержки многополосовых фильтров/А.А.Головков, С.А.Кершис// Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника.— 2013.— №5.— стр.14-17
4. Патент РФ на полезную модель № 131902/Головков А.А, Кершис С.А. СВЧ двухполосный микрополосковый фильтр; опубликован 27.08.2013, бюл.№ 24.

и в других изданиях

5. Babushkina, O., Golovkov, A., Kuzmenko, V. Kerhis, S. Miniature Filters, Diplexers and Antennas of L-Band used in receivers of Satellite Radionavigation system/ O. Babushkina, A. Golovkov, V. Kuzmenko, S. Kerhis// Electrical and Electronic Engineering.—2012.— Vol. 2.— no. 6.— pp. 409-414.
6. Кершис, С.А. СВЧ фильтр с двумя полосами пропуска на основе двухмодовых Х-образных микрополосковых резонаторов / С.А. Кершис// Сборник докладов 66-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ.—Санкт-Петербург—1-8 февраля 2013.— стр. 10-16.
7. Кершис, С.А., Гомонова, А.И. Микрополосковые резонаторы с некротными частотами и полосовые фильтры на их основе/ С.А. Кершис, А.И. Гомонова//Всероссийская конференция Микроэлектроника СВЧ. Сборник трудов конференции Том 2.—Санкт-Петербург.— 4-7 июня 2012—стр. 175-180.
8. Бабушкина, О.А., Головков, А.А., Пивоваров, И.Ю., Кершис, С.А. Миниатюрные диплексоры и фильтры для аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем Глонасс и GPS/ О.А. Бабушкина, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров., С.А.Кершис// СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии: Труды 21-ой международной крымской конференции.— Севастополь, Украина.— 12-16 сентября 2012г. —Том 2: стр. 610-613.
- 9.Бабушкина, О.А., Головков, А.А., Пивоваров, И.Ю., Кершис, С.А. Миниатюрные фильтры и диплексоры L-диапазона для радионавигационных систем Глонасс-GPS/ О.А. Бабушкина, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров., С.А.Кершис// СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии: Труды 22-ой международной крымской конференции.— Севастополь, Украина.— 10-14 сентября 2012г. —Том 2: стр. 557-558.
10. Бабушкина, О.А., Кершис С.А. СВЧ диплексор на основе фильтров высоких и нижних частот/ О.А. Бабушкина, С.А. Кершис // Сборник трудов научно-технической конференции микроэлектроники.—Военно-Морской Институт Радиоэлектроники им А. С. Попова.— стр. 13-18.