


На правах рукописи



Афонин Алексей Олегович

**ПОЛОСКОВЫЕ ДИПЛЕКСЕРЫ ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ГЛОНАСС/GPS И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ
СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ С ВХОДНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ
ФИЛЬТРОВ КАНАЛОВ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в Институте физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Лексиков Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Разинкин Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра теоретических основ радиотехники, профессор
Дроботун Николай Борисович, кандидат технических наук; Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», департамент информационно-измерительных систем, группа разработки СВЧ узлов и монолитных интегральных схем, руководитель

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится «22» января 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.21, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 13а, ауд. 1-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «27» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности. Частотно-селективные устройства (ЧСУ) сверхвысоких частот (СВЧ) являются важнейшими элементами современных радиотехнических систем. Они широко используются в системах связи, в том числе спутниковой, в радиолокационных станциях, а также в различной измерительной и специальной аппаратуре. Среди большого разнообразия ЧСУ наиболее востребованными являются полосно-пропускающие фильтры, фильтры нижних частот, фильтры верхних частот, фильтры с двумя полосами пропускания и другие. Современные радиосистемы, например, спутниковые радионавигационные системы (СРНС) ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) и GPS (Global Positioning System), часто являются многодиапазонными, поэтому кроме вышеперечисленных устройств, также востребованы и многоканальные частотно-разделительные устройства – мультиплексеры, служащие для разделения спектра сигнала по каналам с соответствующими им частотами. В частности, к таким устройствам относятся диплексеры, т. е. двухканальные мультиплексеры, разделяющие спектр сигнала на два независимых канала.

С развитием радиотехники и радиоэлектроники к частотно-селективным устройствам предъявляются все более жесткие требования, а именно: к их миниатюрности, избирательности, надежности, технологичности в производстве и, конечно, стоимости. Наиболее высоким уровнем всех перечисленных качеств в совокупности обладают диплексеры, построенные на полосковых и микрополосковых резонаторах [1, 2], получившие, в связи с этим, широкое распространение в СВЧ-технике [3].

Чаще всего диплексеры конструируют как два полосно-пропускающих фильтра, имеющих один общий вход (порт). Из-за взаимодействия между двумя фильтрами каналов, составляющих диплексер, их характеристики искажаются, т. е. получаются отличными от характеристик двух отдельных фильтров. Для того чтобы свести эти искажения к минимуму, каждый канал диплексера необходимо правильно согласовать с общим входным портом с помощью соответствующей конфигурации согласующей цепи (СЦ). К настоящему времени известно несколько основных подходов к согласованию общего порта с фильтрами каналов в полосковых и микрополосковых диплексерах. Однако эти подходы не позволяют создавать диплексеры, которые полностью удовлетворяют требованиям современных радиосистем. Часто цепи согласования занимают до половины площади всего устройства [4, 5], что неприемлемо при разработке миниатюрных диплексеров. Некоторые способы согласования слишком сложны в настройке, что делает невозможной разработку диплексеров для серийного производства.

Вместе с тем нерешенной остается важная задача создания миниатюрных диплексеров, характеризующихся высокими электрическими

характеристиками. Наиболее эффективным подходом к миниатюризации полосковых устройств является использование подложек с высокой относительной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r > 11$). Чаще всего в литературе описываются диплексеры, которые выполнены на подложках с диэлектрической проницаемостью, находящейся в пределах $\epsilon_r = 2 \dots 11$. В связи с этим они имеют размеры, которые не удовлетворяют современным требованиям по миниатюрности. Поэтому актуальной задачей является разработка простых способов согласования каналов, позволяющих проектировать миниатюрные диплексеры на подложках с высокой ϵ_r , которые удовлетворяют требованиям современных радиосистем.

Целью диссертационной работы является поиск новых способов согласования общего порта с фильтрами каналов в полосковых и микрополосковых диплексерах, выявление закономерностей поведения коэффициентов связи согласующих цепей с входными резонаторами фильтров каналов, а также разработка полосковых и микрополосковых диплексеров по заданным частотным характеристикам. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Анализ существующих подходов к согласованию каналов с общим портом в полосковых и микрополосковых диплексерах.

2. Разработка новых способов согласования каналов с общим портом в полосковых и микрополосковых диплексерах.

3. Разработка одномерных моделей и программ расчета коэффициентов связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов в диплексерах на основе квазистатического приближения.

4. Исследование влияния параметров согласующей цепи на величину взаимодействия с входными резонаторами каналов диплексеров для использования этих результатов при разработке диплексеров.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Впервые рассчитаны и исследованы частотно-зависимые коэффициенты связи согласующей цепи в виде нерезонансного отрезка микрополосковой линии с входными резонаторами каналов в микрополосковом диплексере. Исследования показали, что величина взаимодействия между согласующей цепью и входными резонаторами каналов достаточно велика для создания миниатюрных диплексеров на подложках с высокой относительной диэлектрической проницаемостью. Также показано, что использование модифицированного энергетического подхода для расчета коэффициентов связи двух проводников различных конфигураций, резонансные частоты которых не совпадают, оправдано.

2. Разработана новая конфигурация согласующей цепи в виде нерегулярного Π -образного короткозамкнутого полоскового проводника для согласования каналов с общим портом в микрополосковом диплексере на основе четвертьволновых резонаторов. Согласующая цепь электромагнитно связана с входными резонаторами каналов. Такая конфигурация согласующей цепи свела к минимуму взаимное влияние каналов друг на друга и позволила

уменьшить размеры устройства. Рассчитаны и исследованы частотно-зависимые коэффициенты связи Π -образной согласующей цепи с входными резонаторами каналов.

3. Предложена конфигурация согласующей цепи в виде короткозамкнутого отрезка полосковой линии для согласования каналов с общим портом в полосковом диплексере на подвешенной подложке на основе двухпроводниковых резонаторов. Согласующая цепь электромагнитно связана с входными резонаторами каналов. Конфигурация отличается от известной тем, что один конец полоскового проводника замкнут на землю, что обеспечило требуемый уровень связи с фильтрами каналов. Исследовано влияние ширины согласующего проводника на величину связи с входными резонаторами каналов.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы.

Полученные результаты диссертационной работы вносят вклад в теоретические основы методов согласования общего порта с фильтрами каналов полосковых и микрополосковых диплексеров.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

1. Разработана конструкция микрополоскового диплексера с полуволновыми резонаторами в фильтрах каналов для работы в СРНС ГЛОНАСС/GPS. Согласование в диплексере выполнено с помощью исследованной конфигурации согласующей цепи в виде нерезонансного отрезка микрополосковой линии. Диплексер имеет малые вносимые потери в полосах пропускания каналов – 0,84 дБ в низкочастотном канале и 0,95 дБ в высокочастотном (фильтры каналов четырехзвенные). Простая конфигурация согласующей цепи позволила сделать диплексер простым в регулировке.

2. Разработана конструкция миниатюрного микрополоскового диплексера с четвертьволновыми резонаторами в фильтрах каналов для работы в СРНС ГЛОНАСС/GPS. Согласование в диплексере выполнено с помощью нерегулярного Π -образного короткозамкнутого полоскового проводника. Использование компактной согласующей цепи и четвертьволновых резонаторов в фильтрах каналов позволило уменьшить размеры диплексера более чем в два раза (по сравнению с ранее используемой конструкцией).

3. Разработана конструкция миниатюрного полоскового диплексера на подвешенной подложке с двухпроводниковыми резонаторами в фильтрах каналов для работы в СРНС ГЛОНАСС/GPS. Согласование в диплексере выполнено с помощью нерезонансного короткозамкнутого отрезка полосковой линии. Такая конструкция диплексера позволила обеспечить высокий уровень развязки между каналами, который составил не менее 75 дБ.

4. Полученные результаты позволили реализовать ряд устройств для применения в радиотехнических системах, которые внедрены в серийное производство.

Методы диссертационного исследования. В работе использованы методы электродинамики СВЧ, в частности, квазистатический метод расчета электрических параметров микрополосковых линий, методы вычислительной

математики, реализованные в виде алгоритмов и программ для ЭВМ, а также методы экспериментальных исследований СВЧ-устройств.

Положения, выносимые на защиту:

1. На подложках с высокой относительной диэлектрической проницаемостью с применением согласующей цепи в виде нерезонансного отрезка микрополосковой линии можно разрабатывать миниатюрные диплексеры с широкими (до 15%) относительными полосами пропускания каналов.

2. Разработанный новый способ согласования каналов, основанный на использовании нерегулярного П-образного короткозамкнутого полоскового проводника, позволяет создавать миниатюрные микрополосковые диплексеры на основе четвертьволновых резонаторов в фильтрах каналов, с использованием подложек с высокой относительной диэлектрической проницаемостью и широкими (до 17%) полосами пропускания каналов. Такая конфигурация согласующей цепи позволяет осуществлять практически независимую настройку каналов.

3. Предложенная согласующая цепь в виде нерезонансного короткозамкнутого отрезка полосковой линии в полосковом диплексере на подвешенной подложке и двухпроводниковых резонаторах позволяет разрабатывать миниатюрные диплексеры с широкими (до 21%) относительными полосами пропускания каналов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением корректных методов математического анализа, современных программ электродинамического моделирования полосковых и микрополосковых структур, хорошим согласием результатов численных и физических экспериментов, а также использованием современной измерительной аппаратуры (R&S ZVL и ZVA 50).

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на конференциях: X Всероссийская научно-практическая конференция творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2014 г.), XII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2014 г.), XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2015 г.), XXV Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», (Севастополь, 2015 г.), XIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2016 г.), VII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2017 г.), V Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2018 г.), Конкурс-конференция ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов (Красноярск, 2019 г.), XXII Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2020 г.).

Результаты диссертационного исследования использованы предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск). Акт о внедрении приведен в приложении Е.

Публикации по теме работы. Всего по теме работы опубликовано 12 работ, из них: в журналах из перечня ВАК – 2, индексируемые базами *WoS*, *Scopus* – 1; получено патентов РФ – 1 шт.

Личный вклад автора. Все представленные в работе результаты получены автором лично или при непосредственном его участии: автор рассчитал и исследовал частотно-зависимые коэффициенты связи СЦ в виде нерезонансного отрезка микрополосковой линии (МПЛ) с входными резонаторами каналов; автор разработал и исследовал способ согласования каналов в микрополосковом диплексере на основе четвертьволновых резонаторов, в частности, были исследованы частотно-зависимые коэффициенты связи СЦ с входными резонаторами каналов; автор разработал и исследовал способ согласования каналов в полосковом диплексере на подвешенной подложке и двухпроводниковых резонаторах; автор лично изготавливал экспериментальные макеты устройств и проводил измерения их характеристик.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 6 приложений. Общий объем работы – 135 страниц, включая 60 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 133 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертационной работы.

Первая глава работы представляет собой обзор существующих конструкций полосковых и микрополосковых диплексеров, а также обзор существующих подходов к согласованию каналов с общим портом в диплексерах, построенных на полосно-пропускающих фильтрах. Задачей главы является классификация различных подходов к согласованию каналов с общим портом. Приводятся достоинства и недостатки каждого из способов согласования, описаны возможные пути преодоления этих недостатков.

Вторая глава содержит описание миниатюрного микрополоскового диплексера на полуволновых резонаторах, согласование в котором выполнено с помощью нерезонансного отрезка МПЛ. Для миниатюризации диплексера была применена подложка из высокочастотной керамики ТБНС ($\epsilon_r=80$). Для того чтобы достичь малых вносимых потерь в полосах пропускания каналов, фильтры каналов решено было сделать на полуволновых регулярных резонаторах. На рисунке 1 приведена конструкция диплексера с двухзвенными

фильтрами в каналах (а) и его АЧХ (б). Черным цветом выделен проводник СЦ. Общий порт диплексера (P1) подключен к одному из концов согласующего проводника, второй конец которого разомкнут. Два других порта подключены кондуктивно к внешним резонаторам каналов: порт P2 подключен к фильтру НЧ-канала (слева), порт P3 – к фильтру ВЧ-канала (справа). Диплексер моделировался с помощью программы *CST Microwave Studio*.

Таким образом, применив согласующую цепь на основе нерезонансного отрезка МПЛ, удалось осуществить согласование каналов с входным портом диплексера. Преимущества такой конфигурации СЦ: согласующий проводник имеет компактные размеры; проводник СЦ не является резонатором, т. е. его собственные резонансные частоты находятся далеко за пределами полос пропускания каналов. Кроме этого, благодаря тому, что согласующий проводник сильно нагружен входным портом, добротность этих мод мала (резонансы в проводнике практически не возбуждаются). Иными словами, эти резонансы не влияют на характеристики диплексера.

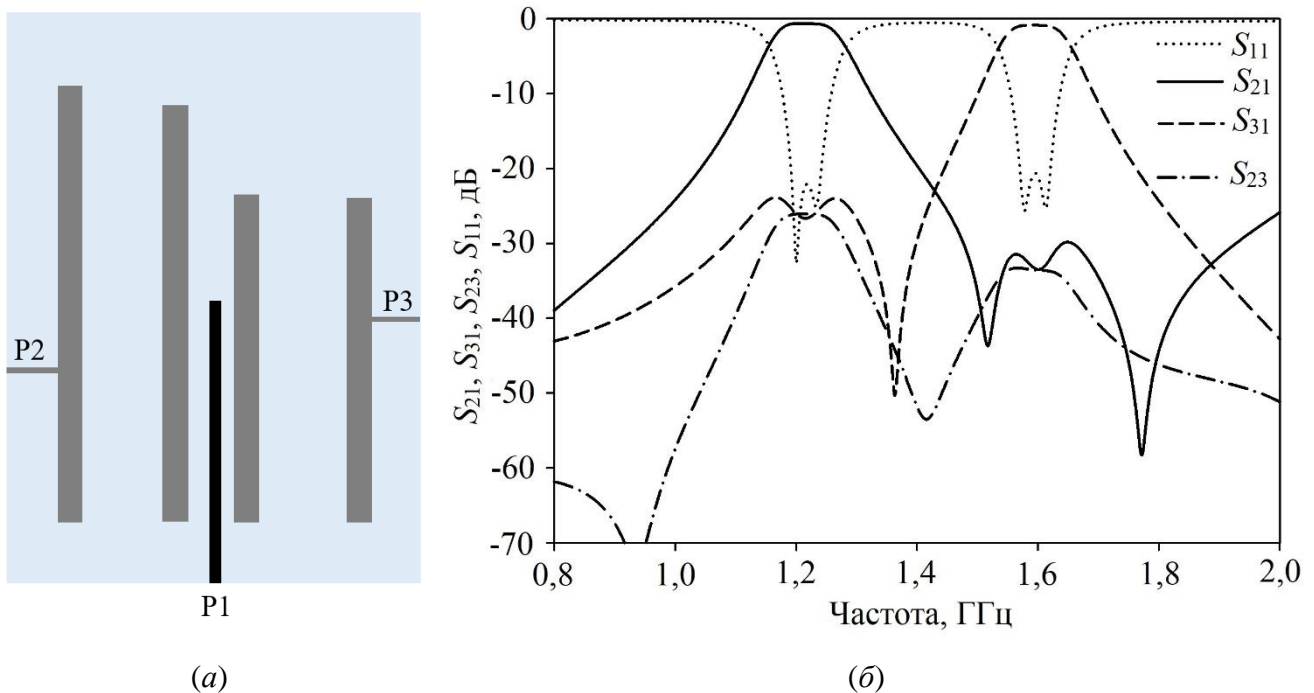


Рисунок 1 – Топология микрополоскового диплексера с нерезонансным отрезком МПЛ в качестве согласующей цепи (а) и его АЧХ (б)

Во втором параграфе главы рассчитаны и исследованы частотно-зависимые коэффициенты связи СЦ с входными резонаторами каналов диплексера отдельно для субструктуры «входной резонатор НЧ-канала – СЦ» (рисунок 2, а) и субструктуры «СЦ – входной резонатор ВЧ-канала» (рисунок 2, б). Коэффициенты связи рассчитывались с помощью модифицированного энергетического подхода [4, 5]. Подход основан на частотной зависимости соотношений энергий электрических и магнитных полей, запасаемых проводниками. В нем при вычислении магнитных

(индуктивных) и электрических (емкостных) энергий, запасаемых проводниками отдельно ($E_{1L}, E_{1C}, E_{2L}, E_{2C}$) и совместно (E_{12L}, E_{12C}), используются комплексные высокочастотные токи $I_{1,2}(x)$ и напряжения $U_{1,2}(x)$, распределение которых по длине полосковых проводников можно найти в квазистатическом приближении для любой заданной частоты.

Частотно-зависимые коэффициенты индуктивной и емкостной связи входного резонатора (низкочастотного или высокочастотного канала) и общего проводника рассчитываются по формулам [6, 7]:

$$k_L(f) = \frac{2E_{12L}}{E_{1L} + E_{2L} + E_{1C} + E_{2C}} \cdot \frac{1}{K}; \quad k_C(f) = \frac{-2E_{12C}}{E_{1L} + E_{2L} + E_{1C} + E_{2C}} \cdot \frac{1}{K}. \quad (1)$$

Здесь K – модуль коэффициента передачи по напряжению со входа микрополосковой структуры на ее выход.

А общий коэффициент связи высчитывается по формуле [6, 7]:

$$k(f) = \frac{k_L(f) + k_C(f)}{1 + k_L(f)k_C(f)}. \quad (2)$$

Так как, что погонные параметры связанных микрополосковых линий являются константами, зависимости коэффициентов индуктивной, емкостной и полной связи от частоты обусловлены исключительно частотными зависимостями распределений амплитуд токов и напряжений по длине проводников. Именно от этих распределений зависят запасаемые энергии в проводниках. Для расчёта распределения токов и напряжений в проводниках использовался метод квазистатического приближения.

На рисунках 3, а и 3, б приведены рассчитанные вышеописанным способом частотные зависимости коэффициентов емкостной k_C , индуктивной k_L и полной k связи согласующей цепи с входными резонаторами низкочастотного и высокочастотного каналов соответственно. Видно, что на центральной частоте низкочастотного канала (1218 МГц) и вблизи нее связь определяется индуктивным и емкостным (противоположным по знаку) взаимодействием. На центральной частоте высокочастотного канала (1596 МГц) связь в основном определяется индуктивным

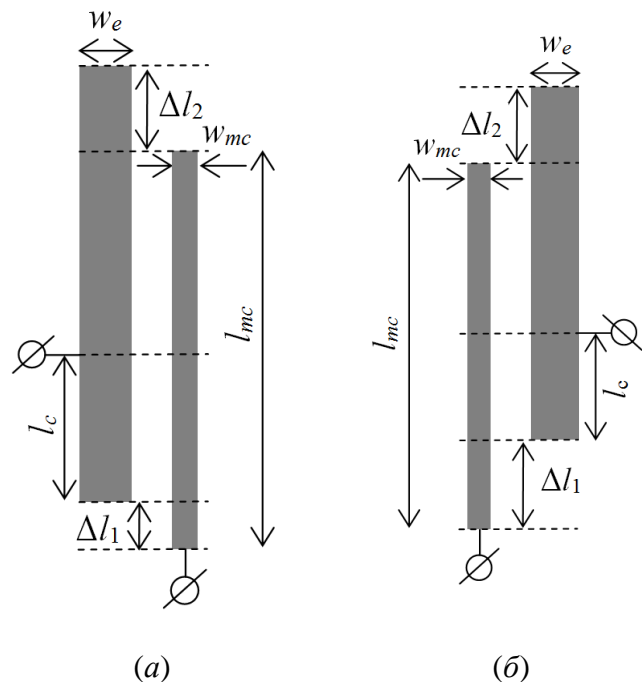


Рисунок 2 – Топологии субструктур «входной резонатор НЧ-канала – СЦ» (а) и «СЦ – входной резонатор ВЧ-канала» (б)

взаимодействием, т. к. емкостное взаимодействие мало. Кроме того, сама величина полного коэффициента связи довольно велика, что подтверждает перспективность такой конфигурации согласующего проводника.

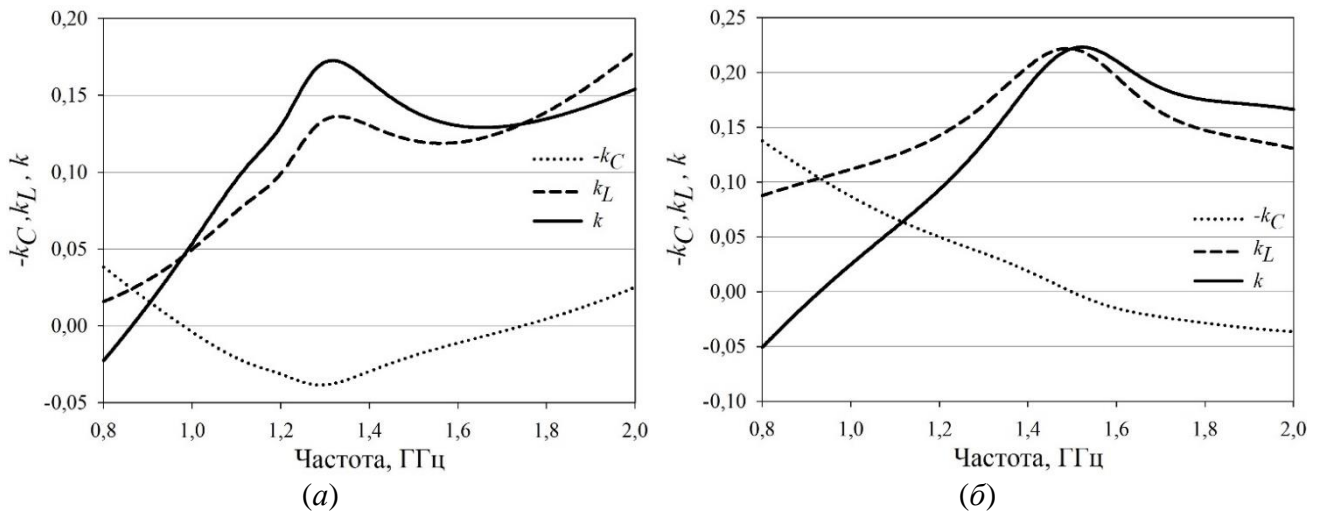


Рисунок 3 – Частотные зависимости коэффициентов связи для низкочастотного (а) и высокочастотного (б) каналов

На рисунке 4 изображены зависимости коэффициента связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов от длины l_{mc} (а) и ширины w_{mc} (б) согласующего проводника для низкочастотного (здесь и далее сплошная линия) и высокочастотного (здесь и далее пунктирная линия) каналов. Поведение коэффициента связи от длины l_{mc} для разных каналов отличается. Так, для ВЧ-канала кривая $k(l_{mc})$ имеет максимум в районе $l_{mc}=12\dots13$ мм, в то время как связь для НЧ-канала растет с увеличением длины СЦ. Используя эти зависимости можно подобрать длину согласующей цепи, которая будет оптимальной для обоих каналов.

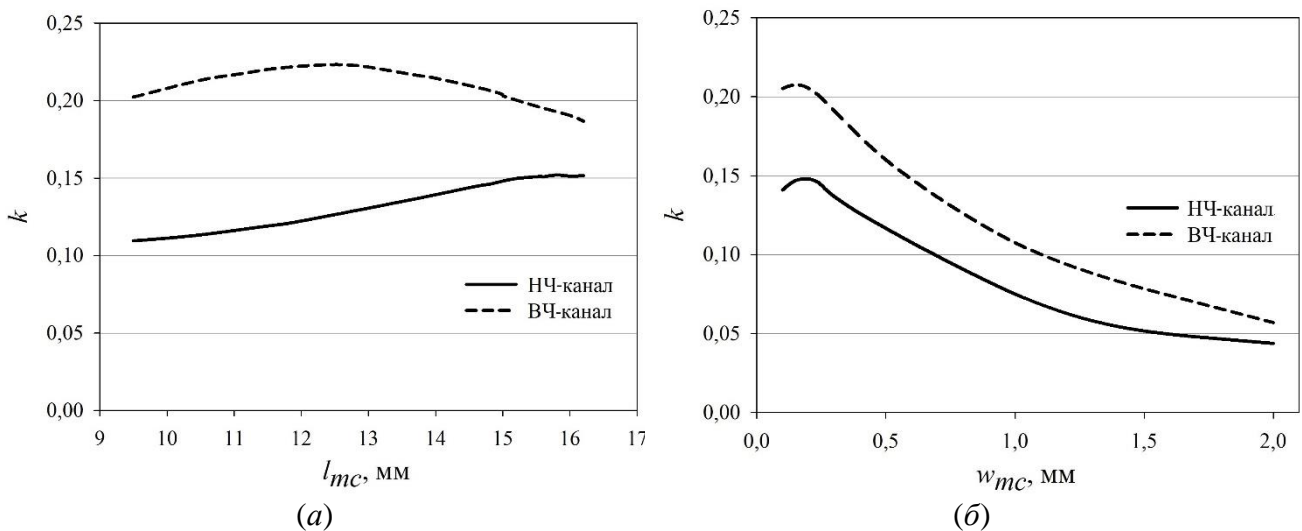


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента связи от длины (а) и ширины (б) согласующего проводника

Поведение зависимостей k от ширины СЦ для обоих каналов схоже: увеличение w_{mc} приводит к уменьшению величины связи. Характер кривых $k(w_{mc})$ объясняется тем, что при росте ширины проводника СЦ уменьшается плотность тока, который в нем протекает, что и уменьшает величину взаимодействия с входными резонаторами каналов.

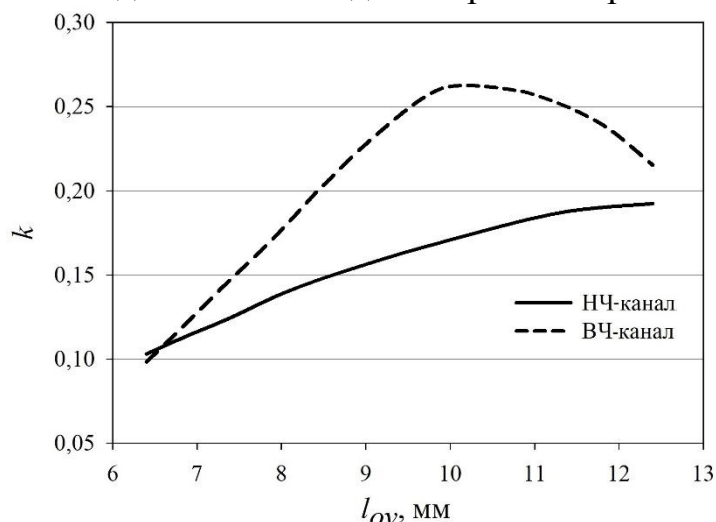


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента связи от длины области перекрытия согласующего проводника и входного резонатора канала

На рисунке 5 изображены зависимости коэффициента связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов от длины области перекрытия между проводником СЦ и входным резонатором канала. Видно, что коэффициент связи для НЧ-канала растет при увеличении l_{ov} . Между тем в ВЧ-канале максимум k наблюдается при $l_{ov}=10$ мм. Таким образом, подбирая величины перекрытия для каждого из каналов по отдельности, можно обеспечить необходимую величину связи.

Это исследование показывает, что можно подстроить коэффициенты связи соответствующим смещением фильтров каналов диплексера вдоль проводника СЦ.

Зная поведение зависимостей коэффициента связи от параметров согласующей цепи можно осуществлять тонкую настройку величины связи с входными резонаторами каналов, что является ключевым моментом в настройке диплексера в целом.

Также в главе показано, что использование модифицированного энергетического подхода для расчета коэффициентов связи двух проводников различных конфигураций, резонансные частоты которых не совпадают, оправдано. Ниже на рисунках 6 и 7 приведено сравнение зависимостей величины связи от длины согласующего проводника l_c и от длины области перекрытия l_{ov} , полученных с помощью различных методик. Сплошной линией показаны зависимости, полученные с помощью модифицированного энергетического подхода, пунктирной линией – полученные с помощью методики, основанной на определении относительной ширины полосы пропускания фильтра канала, соответствующей варьируемому параметру СЦ при оптимальном согласовании. Поведение зависимостей, в целом, одинаковое: в НЧ-канале коэффициент связи k и относительная ширина полосы пропускания $\Delta f/f_0$ имеют максимумы при значении $l_c=15,8$ мм и увеличиваются с увеличением перекрытия; в ВЧ-канале k и $\Delta f/f_0$ имеют максимумы при значении $l_c=12,4...12,5$ мм и при значении $l_{ov}=10,1...10,2$ мм.

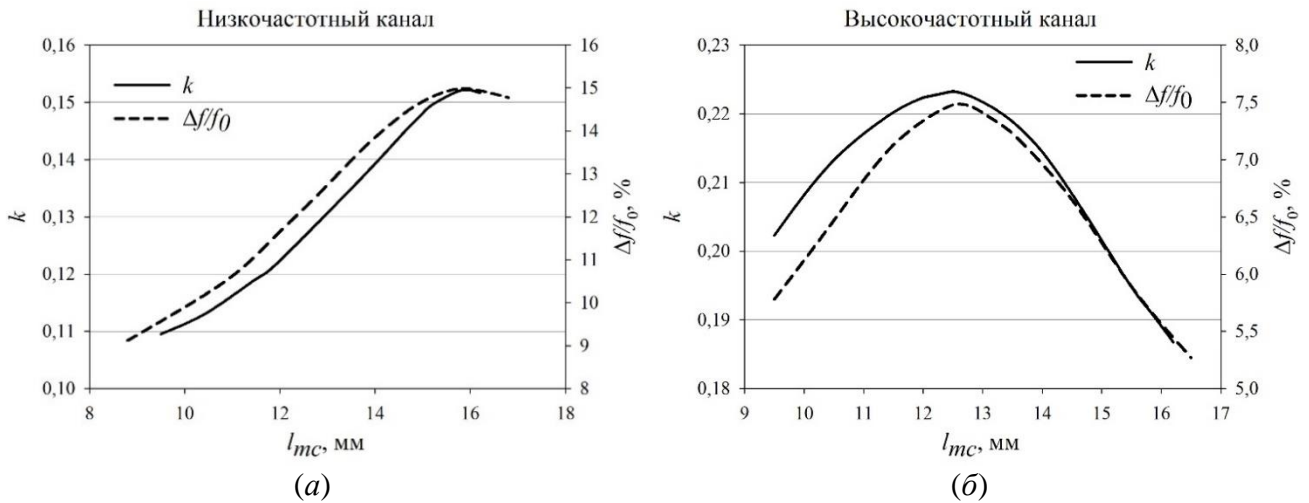


Рисунок 6 – Сравнение зависимостей величины связи от длины согласующего проводника l_c для НЧ- (а) и ВЧ- (б) каналов

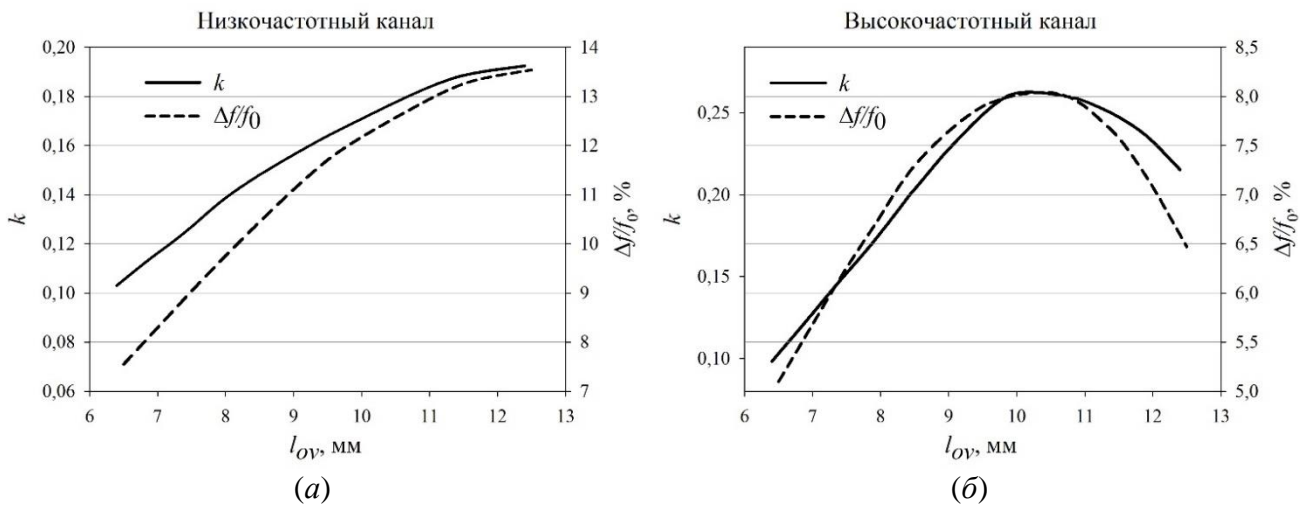


Рисунок 7 – Сравнение зависимостей величины связи от области перекрытия l_{ov} для НЧ- (а) и ВЧ- (б) каналов

В третьем параграфе приведено исследование максимальной относительной ширины полосы пропускания каналов диплексера. Исследование показало, что использование в качестве согласующей цепи нерезонансного отрезка МПЛ позволяет разрабатывать микрополосковые диплексеры на подложках с высокой ϵ_r и полуволновыми резонаторами в каналах с широкими (до 15%) относительными полосами пропускания.

В конце главы приведена топология диплексера, разработанного для применения в СРНС ГЛОНАСС/GPS. Согласование общего порта с фильтрами каналов реализовано с помощью исследованной согласующей цепи. Диплексер имеет небольшие вносимые потери в полосы пропускания каналов.

Третья глава содержит описание миниатюрного микрополоскового диплексера на четвертьволновых резонаторах, согласование в котором выполнено с помощью нерегулярного Π -образного короткозамкнутого проводника. Для миниатюризации диплексера была применена подложка из высокочастотной керамики ТБНС ($\epsilon_r=80$). На рисунке 8 приведена конструкция

диплексера с двухзвенными фильтрами в каналах (а) и его АЧХ (б). Общий порт диплексера (P1) подключен к одному из концов согласующего проводника, второй конец которого короткозамкнут. Два других порта подключены кондуктивно к внешним резонаторам каналов: порт P2 подключен к фильтру НЧ-канала (слева), порт P3 – к фильтру ВЧ-канала (справа). Диплексер моделировался с помощью программы *CST Microwave Studio*.

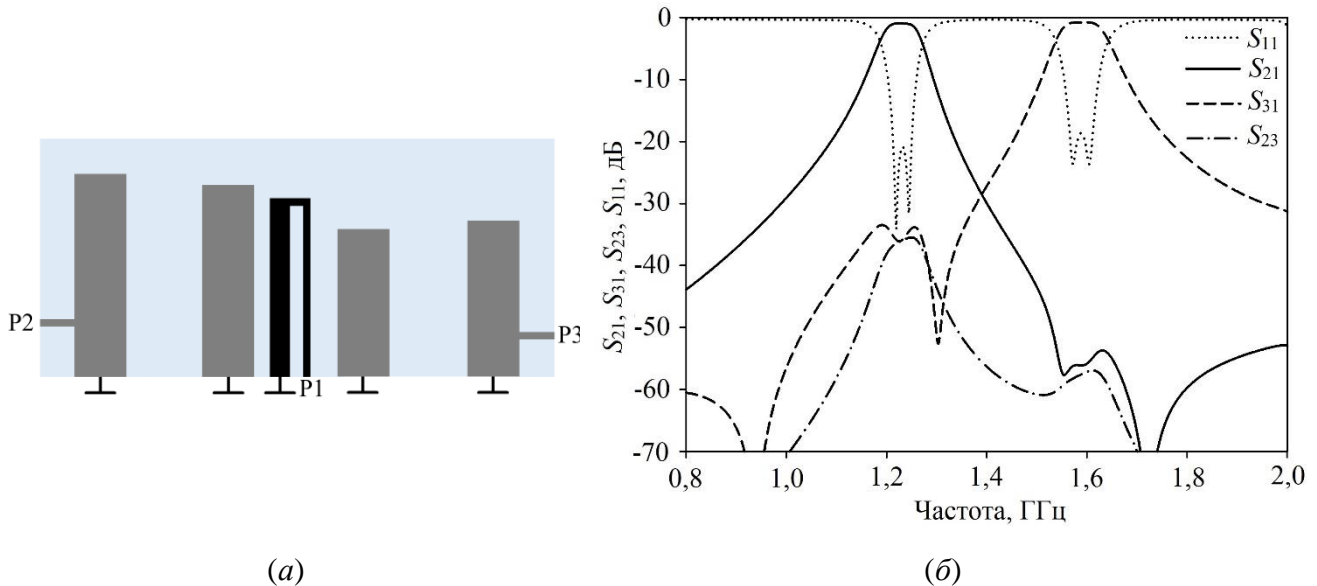


Рисунок 8 – Топология микрополоскового диплексера с нерегулярным П-образным короткозамкнутым проводником СЦ (а) и его АЧХ (б)

Таким образом, применив согласующую цепь в виде нерегулярного П-образного короткозамкнутого проводника удалось осуществить согласование каналов с входным портом микрополоскового диплексера, фильтры каналов которого выполнены на четвертьволновых резонаторах. Преимущества такой конфигурации СЦ: согласующий проводник достаточно компактен; проводник СЦ не является резонатором, т.е. его собственные резонансные частоты находятся далеко за пределами полос пропускания каналов. Кроме этого, благодаря тому, что согласующий проводник он сильно нагружен входным портом, добротность этих мод мала (резонансы в проводнике практически не возбуждаются). Иными словами, эти резонансы не влияют на характеристики диплексера.

Во втором параграфе главы рассчитаны и исследованы частотно-зависимые коэффициенты связи СЦ с входными резонаторами каналов диплексера отдельно для субструктуры «входной резонатор НЧ-канала – СЦ» (рисунок 9, а) и субструктуры «СЦ – входной резонатор ВЧ-канала» (рисунок 9, б). Для расчета коэффициентов связи был применен модифицированный энергетический подход, описанный ранее.

На рисунке 10 приведены рассчитанные частотные зависимости коэффициентов емкостной k_C , индуктивной k_L и полной k связи согласующей цепи с входными резонаторами низкочастотного (а) и высокочастотного (б) каналов соответственно. Видно, что на частотах каналов (1228 МГц и 1591 МГц) и вблизи них связь в целом определяется индуктивным взаимодействием, т. к. емкостное (противоположное по знаку) мало. Кроме того, сама величина полного коэффициента связи довольно велика, что подтверждает перспективность такой конфигурации согласующего проводника.

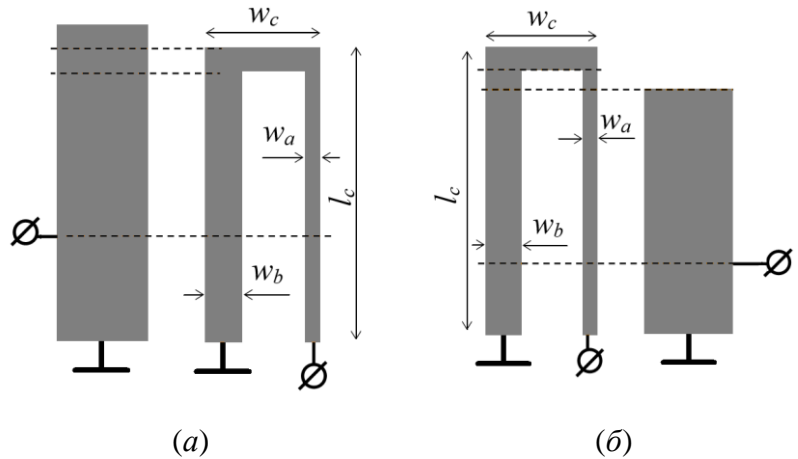


Рисунок 9 – Топологии субструктур «входной резонатор НЧ-канала – СЦ» (а) и «СЦ – входной резонатор ВЧ-канала» (б)

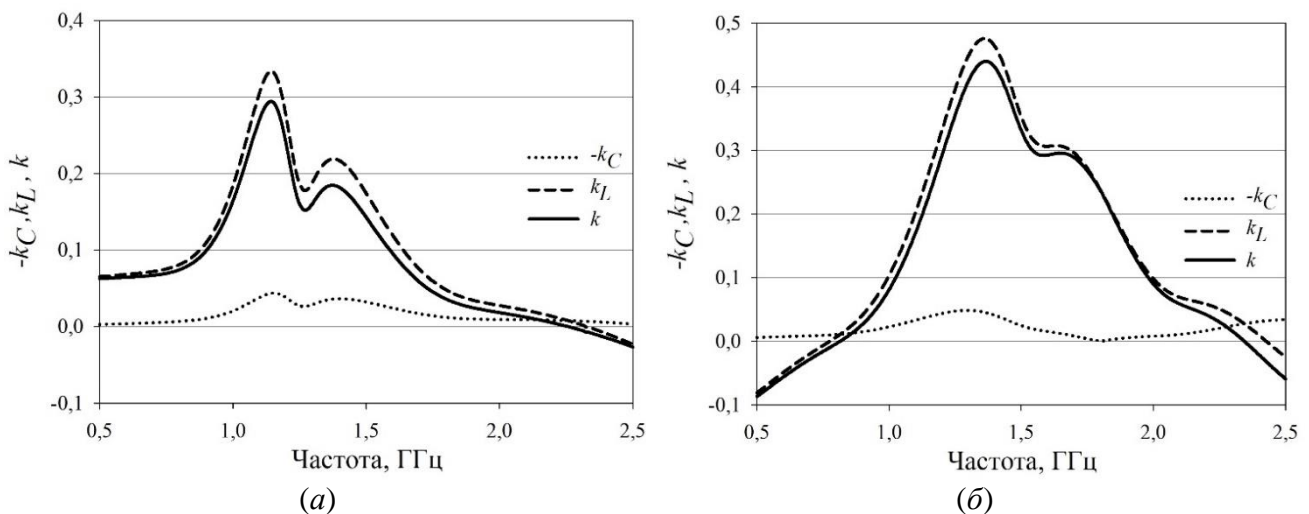


Рисунок 10 – Частотные зависимости коэффициентов связи для низкочастотного (а) и высокочастотного (б) каналов

На рисунке 11 изображены зависимости коэффициента связи согласующей цепи с входными резонаторами от высоты l_c (а) и ширины w_c (б) П-образного проводника для низкочастотного и высокочастотного каналов. Характер зависимостей от одного и того же параметра сильно отличается в разных каналах. Например, для низкочастотного канала максимум взаимодействия между согласующим проводником и резонатором наблюдается при определенном значении l_c (около 5,5 мм), тогда как для высокочастотного канала взаимодействие растет с увеличением «высоты» согласующего проводника. При этом оптимальной «высотой» согласующего проводника

является точка, где кривые пересекаются, и она примерно совпадает с тем значением l_c , которое имеет Π -образный проводник настроенного диплексера.

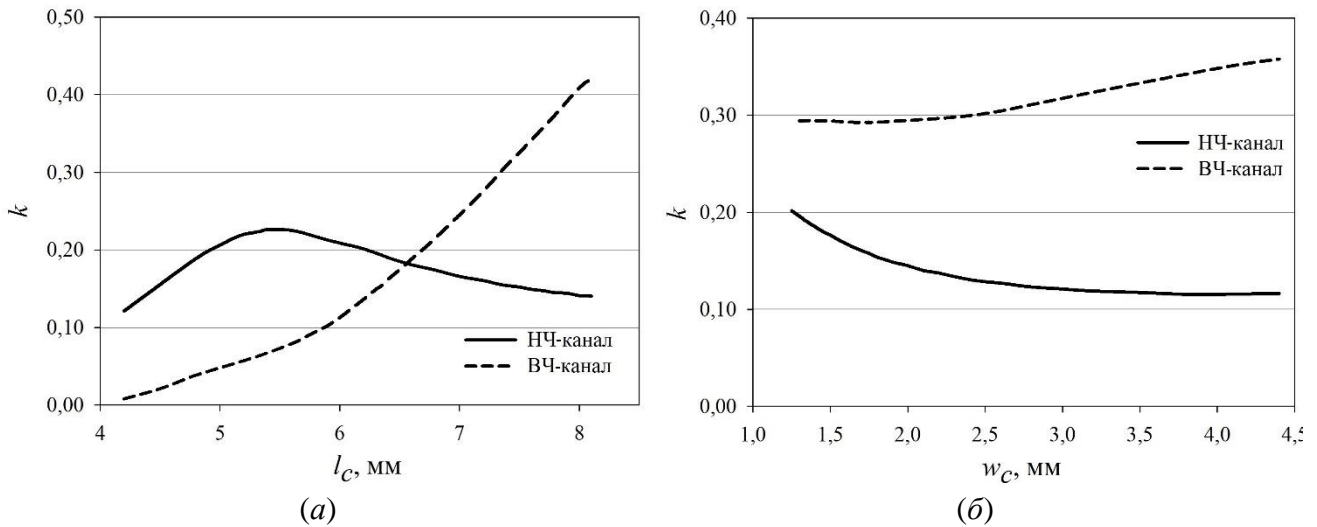


Рисунок 11 – Зависимости коэффициента связи от высоты l_c (а) и ширины w_c (б) Π -образного проводника

На рисунке 12 изображены зависимости коэффициента связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов от ширины высокоомного (а) и низкоомного (б) участков Π -образной согласующей цепи. Характер зависимостей и для низкочастотного, и для высокочастотного каналов схож. Это обстоятельство носит положительный характер, т. к. изменением какого-либо из этих параметров можно подстраивать величину связи сразу в обоих каналах. Как можно увидеть из зависимостей, увеличить k можно путем уменьшения ширины высокоомного участка и увеличения ширины низкоомного участка.

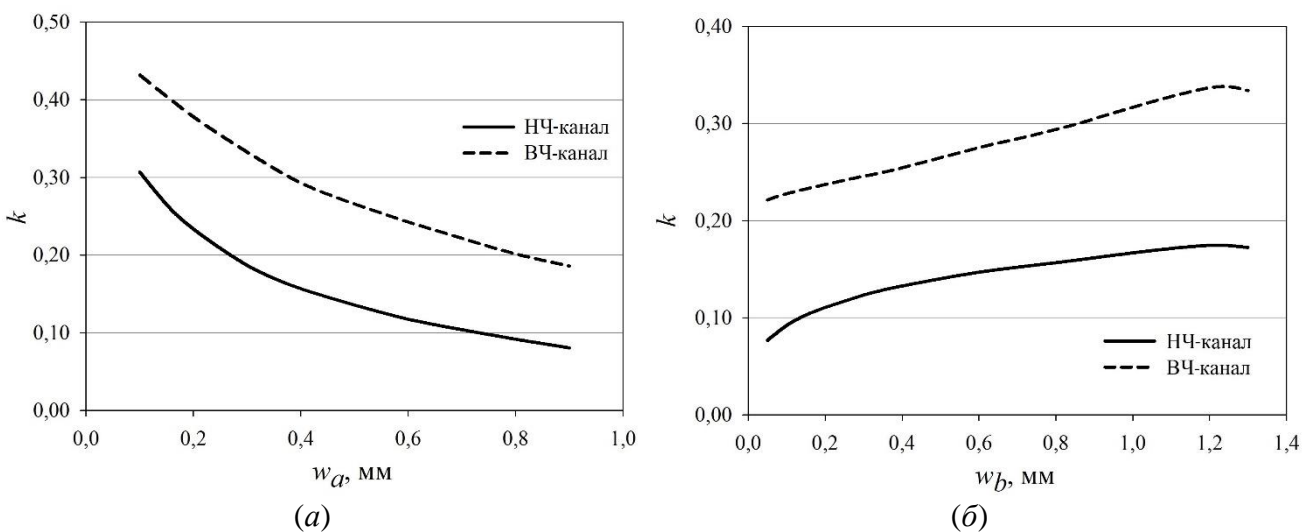


Рисунок 12 – Зависимости коэффициента связи от ширины высокоомного (а) и низкоомного (б) участков Π -образного проводника

Зная характер зависимостей коэффициента связи от параметров Π -образной согласующей цепи можно осуществлять тонкую настройку величины связи с входными резонаторами каналов, что является ключевым моментом в настройке диплексера в целом.

В третьем параграфе исследована максимальная относительная ширина полосы пропускания каналов диплексера. Исследование показало, что использование в качестве согласующей цепи нерегулярного Π -образного полоскового короткозамкнутого проводника позволяет разрабатывать миниатюрные микрополосковые диплексеры на подложках с высокой ϵ_r и четвертьволновыми резонаторами в каналах с широкими (до 17%) относительными полосами пропускания.

В конце главы приведена топология компактного диплексера, разработанного для применения в СРНС ГЛОНАСС/GPS. Согласование общего порта с фильтрами каналов реализовано с помощью разработанной согласующей цепи в виде нерегулярного Π -образного полоскового короткозамкнутого проводника.

Четвертая глава содержит описание полоскового диплексера на подвешенной подложке и двухпроводниковых резонаторах, согласование в котором выполнено с помощью нерезонансного короткозамкнутого отрезка ПЛ. Двухпроводниковый резонатор состоит из диэлектрической подложки, подвешенной в средней плоскости металлического корпуса, на которой сформировано два полосковых проводника: первый полосковый проводник расположен на верхней поверхности подложки, а второй – на нижней. У обоих проводников один из концов разомкнут, а второй короткозамкнут. При этом проводники короткозамкнуты на противоположных стенках корпуса. На сегодняшний день резонаторы, выполненные по многопроводниковой технологии, являются более миниатюрными и высокодобротными, по сравнению с микрополосковыми резонаторами [8].

Для миниатюризации диплексера была применена подложка из высокочастотной керамики ТБНС ($\epsilon_r=80$). На рисунке 13 приведена конструкция диплексера с двухзвенными фильтрами в каналах (а) и его АЧХ (б). Черным цветом выделен проводник СЦ. Общий порт диплексера (P1) подключен к одному из концов согласующего проводника, второй конец которого замкнут на корпус. Два других порта (P2 и P3) подключены к проводникам, аналогичным по структуре согласующему проводнику. Преимущества такой конфигурации СЦ: согласующий проводник компактен; проводник СЦ не является резонатором, т. е. его собственные резонансные частоты находятся далеко за пределами полос пропускания каналов. Кроме этого, благодаря тому, что согласующий проводник он сильно нагружен входным портом, добротность этих мод мала (резонансы в проводнике практически не возбуждаются). Иными словами, эти резонансы не влияют на характеристики диплексера.

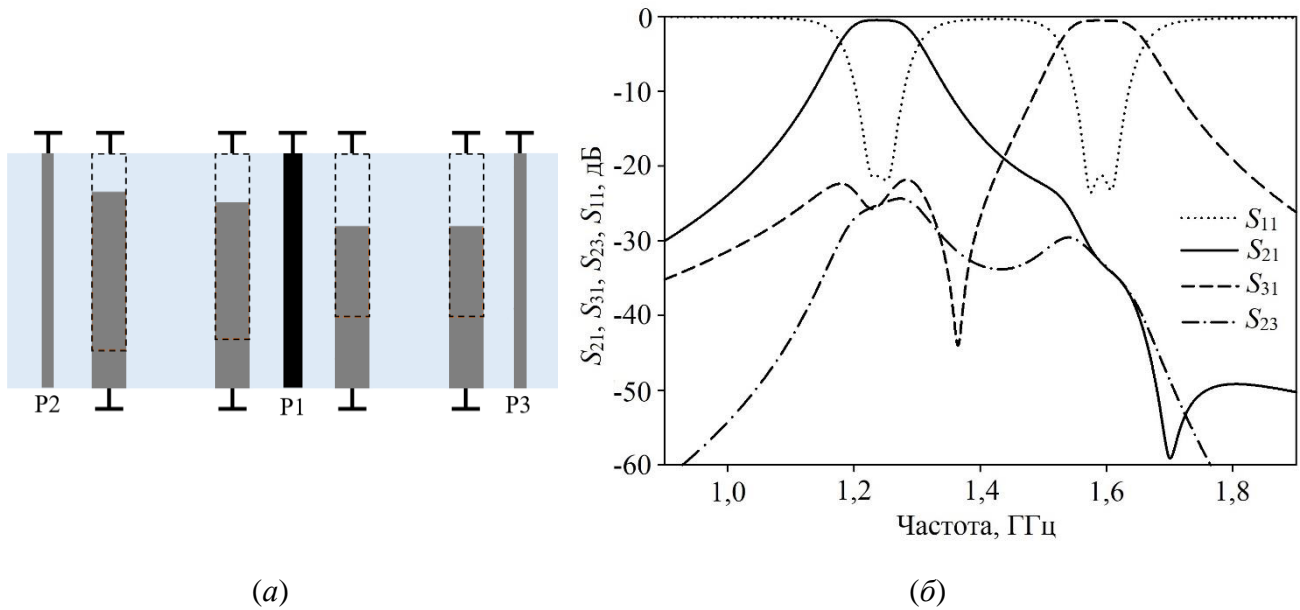


Рисунок 13 – Топология модели ПДПП на основе двухпроводниковых резонаторов (а) и его АЧХ (б). Штриховыми линиями показаны проводники резонаторов, расположенные с противоположной стороны подложки

Во втором параграфе главы приведено исследование влияния параметров СЦ на поведение коэффициента связи для низкочастотного и высокочастотного каналов по отдельности. Приведенная в предыдущих главах методика расчета частотно-зависимых коэффициентов связи разработана для описания взаимодействия двух отрезков микрополосковых линий. Однако создание расчетной модели и вывод выражений для коэффициентов связи на основе квазистатического расчета для двухпроводниковых структур на подвешенной подложке представляет собой задачу несравненно более сложную, чем для микрополосковых. Поэтому для оценки степени взаимодействия СЦ с каналами диплексера была использована методика, основанная на определении относительной ширины полосы пропускания фильтра канала, которая соответствует варьруемому параметру СЦ при оптимальном согласовании.

Получены зависимости $\Delta f/f_0$ от ширины согласующего проводника w_{mc} , приведенные на рисунке 14 для низкочастотного (а) и высокочастотного (б) каналов. Зависимости представлены для различных значений зазора s_p между проводником СЦ и входным резонатором канала. Характер поведения в том и другом канале одинаков. Видно, что зависимости имеют максимумы, соответствующие ширине $w_{mc}=0,3\dots 0,4$ мм. Зазор s_p на положение максимума практически не влияет. При уменьшении ширины согласующего проводника менее $w_{mc}=0,3$ мм наблюдается уменьшение относительной ширины полосы пропускания, что говорит о том, что величина связи уменьшается. Этот факт объясняется тем, что с уменьшением ширины увеличивается его импеданс, приводящий к ослаблению тока и, как следствие, к ослаблению величины связи. При увеличении ширины СЦ w_{mc} более 0,3 мм связь монотонно спадает, что, по-видимому, связано уменьшением плотности тока в проводнике.

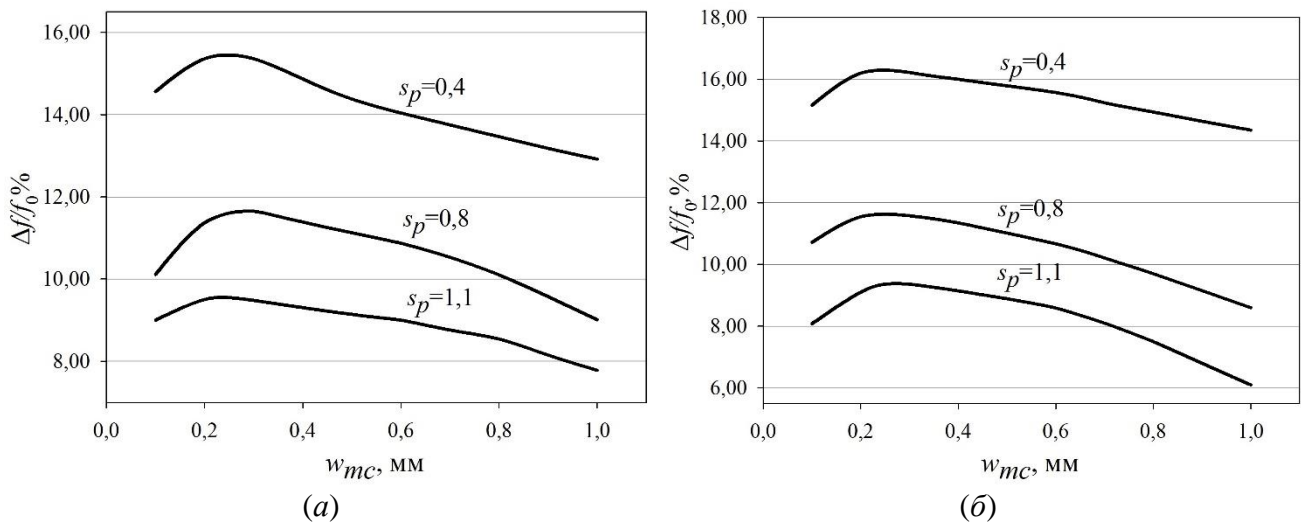


Рисунок 14 – Зависимости относительной ширины полосы пропускания канала от ширины согласующего проводника при различных зазорах s_p для НЧ- (а) и ВЧ- (б) каналов

Оказалось, что зависимость коэффициента связи согласующего проводника с фильтрами каналов немонотонна и имеет максимум при его ширине порядка 0,3 мм. Зная характер зависимости величины связи от ширины согласующего проводника, можно осуществлять тонкую настройку связи с входными резонаторами каналов, что является ключевым моментом в настройке диплексера в целом.

В третьем параграфе исследована максимальная относительная ширина полосы пропускания каналов диплексера. Исследование показало, что использование в качестве согласующей цепи нерезонансного короткозамкнутого отрезка ПЛ позволяет разрабатывать ПДПП с каналами на основе двухпроводниковых резонаторов с широкими (до 21%) относительными полосами пропускания каналов.

В конце главы приведена топология компактного диплексера, разработанного для применения в СРНС ГЛОНАСС/GPS. Согласование общего порта с фильтрами каналов реализовано с помощью разработанной согласующей цепи в виде короткозамкнутого нерезонансного отрезка ПЛ.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

В **приложениях А–Г** приведено описание диплексеров, разработанных для применения в радиотехнических системах и внедренных в серийное производство. В **приложениях Д и Е** приведен патент на изобретение и акт о внедрении устройств в серийное производство.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показана возможность применения нерезонансного отрезка микрополосковой линии для согласования общего порта с фильтрами каналов микрополоскового диплексера для реализации миниатюрных устройств на подложке с высокой ϵ_r .

На основе одномерных моделей субструктур каналов диплексера разработаны программы расчета частотно-зависимых коэффициентов связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов. С их помощью исследовано влияние параметров согласующей цепи на поведение коэффициентов связи. Показано, что использование модифицированного энергетического подхода для расчета коэффициентов связи двух проводников различных конфигураций, резонансные частоты которых не совпадают, оправдано.

Также показано, что использование в качестве согласующей цепи нерезонансного отрезка микрополосковой линии позволяет разрабатывать микрополосковые диплексеры на полуволновых резонаторах, с использованием подложек с высокой ϵ_r и широкими (до 15%) относительными полосами пропускания каналов.

2. Разработана новая конфигурация согласующей цепи в виде нерегулярного Π -образного короткозамкнутого полоскового проводника для согласования общего порта с каналами микрополоскового диплексера на основе четвертьволновых резонаторов. Использование подложки с высокой ϵ_r , компактной согласующей цепи и четвертьволновых резонаторов в фильтрах каналов позволило уменьшить размеры диплексера более чем в два раза (по сравнению с ранее используемой конструкцией). К тому же такая конфигурация согласующей цепи позволяет минимизировать взаимное влияние каналов, что облегчает разработку диплексеров такой конструкции.

На основе одномерных моделей субструктур каналов диплексера разработаны программы расчета частотно-зависимых коэффициентов связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов. С их помощью исследовано влияние параметров согласующей цепи на поведение коэффициентов связи. Показано, что использование в качестве согласующей цепи нерегулярного Π -образного короткозамкнутого полоскового проводника позволяет разрабатывать миниатюрные микрополосковые диплексеры на четвертьволновых резонаторах, с использованием подложек с высокой ϵ_r и широкими (до 17%) относительными полосами пропускания каналов.

3. Предложена конфигурация согласующей цепи в виде короткозамкнутого отрезка полосковой линии для согласования каналов с общим портом в полосковом диплексере на подвешенной подложке на основе двухпроводниковых резонаторов. Согласующая цепь электромагнитно связана с входными резонаторами каналов диплексера. Использование подложки с

высокой ϵ_r и компактные размеры согласующего проводника позволили разработать миниатюрный диплексер.

Исследовано влияние ширины проводника согласующей цепи на величину взаимодействия с фильтрами каналов. Показано, что использование такой согласующей цепи для согласования общего порта с каналами позволяет разрабатывать полосковые диплексеры на подвешенной подложке и двухпроводниковых резонаторах с широкими (до 21%) относительными полосами пропускания каналов.

4. Разработанные и исследованные способы согласования каналов в полосковых и микрополосковых диплексерах позволили реализовать ряд устройств для применения в радиотехнических системах, которые внедрены в серийное производство на предприятии АО «НПП «Радиосвязь», что подтверждается актом о внедрении.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в журналах из перечня ВАК, индексируемые базами WoS, Scopus:

A1. Лексиков, А. А. Миниатюрный полосковый диплексер на подвешенной подложке для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS / А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков, И. В. Говорун, **А. О. Афонин**, А. В. Угрюмов, А. В. Гребенников // Известия высших учебных заведений физика. – 2015. – Т. 58, №10/3. – С. 150–152.

A2. Лексиков, А. А. Микрополосковый диплексер для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS» / А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков, И. В. Говорун, **А. О. Афонин**, А. В. Угрюмов, А. В. Гребенников // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 325–327.

A3. Leksikov, A. A. Microstrip Diplexer with Π -shaped Matching Circuit / A. A. Leksikov, A. M. Serzhantov, I. V. Govorun, **A. O. Afonin**, A. V. Ugryumov, An. A Leksikov // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2020. – Vol. 88. – P. 59–65.

Патенты РФ:

A4. Микрополосковый диплексер: пат. 2691999 Российская Федерация: МПК⁷ H01P 1/203 / Беляев Б. А., **Афонин А. О.**, Лексиков Ан. А., Сержантов А. М., Лексиков А. А., Говорун И. В.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2018107089; заявл. 26.02.2018; опубл. 19.06.2019, Бюл. №17.

Другие публикации:

А5. Лексиков, Ан. А. Микрополосковый диплексер для радионавигационной системы ГЛОНАСС/GPS / Ан. А. Лексиков, А. А. Лексиков, **А. О. Афонин**, А. В. Угрюмов // Сборник тезисов V Всероссийской научно-технической конференции «Системы Связи и Радионавигации» (ВНТК-2018), Красноярск. – 2018. – С. 151–154.

А6. Афонин, А. О. Исследование связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов в микрополосковом диплексере / **А. О. Афонин**, Ан. А. Лексиков, А. А. Лексиков, И. В. Говорун, А. М. Сержантов, А. В. Угрюмов // XXII Всероссийская научно-техническая конференция «Современные Проблемы Радиоэлектроники»: сборник научных трудов, Красноярск. – 2020. – С. 90–99.

А7. Leksikov, A. A. The Compact Microstrip Diplexer for Radionavigation Systems GPS/GLONASS / A. A. Leksikov, An. A. Leksikov, I. V. Govorun, **A. O. Afonin**, A. V. Ugryumov, A. V. Grebennikov // 25th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015), Sevastopol. – 2015. – P. 543–544.

А8. Афонин, А. О. Исследование частотно-зависимых коэффициентов связи согласующей цепи с входными резонаторами каналов в микрополосковом диплексере / **А. О. Афонин**, А. В. Угрюмов, А. А. Лексиков, И. В. Говорун, А. М. Сержантов, Ан. А. Лексиков // Сборник трудов VII Международной научно-технической конференции «Актуальные Проблемы Радиофизики» (АПР-2017), Томск. – 2017. – С. 16–20.

А9. Афонин, А. О. Исследование частотно-зависимых коэффициентов связи П-образной согласующей цепи с входными резонаторами каналов в микрополосковом диплексере / **А. О. Афонин**, А. А. Лексиков // Сборник тезисов конкурс-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов. Секция «Физика», Красноярск. – 2019. – С. 5.

А10. Афонин, А. О. Разработка микрополоскового диплексера для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS / **А. О. Афонин**, И. В. Говорун, А. А. Лексиков // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники»: сборник научных трудов, Красноярск. – 2015. – С. 306–308.

А11. Leksikov, A. A. The Compact Suspended-Substrate Diplexer For GPS/GLONASS Radionavigation Systems / A. A. Leksikov, An. A. Leksikov, I. V. Govorun, **A. O. Afonin**, A. V. Ugryumov, A. V. Grebennikov / 25th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015), Sevastopol. – 2015. – P. 541–542.

А12. Лексиков, А. А. Полосковый диплексер на подвешенной подложке для работы на стыке VHF/UHF диапазонов / А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков, И. В. Говорун, **А. О. Афонин**, А. В. Угрюмов // Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2016), Новосибирск. – 2016. – Т. 6. – С. 30–33.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pozar, D. M. *Microwave Engineering* / D. M. Pozar // John Wiley, 2000. – 756 p.
2. Cameron, R. J. *Microwave Filters for Communication Systems* / R. J. Cameron // John Wiley, 2007. – 912 p.
3. Hong, J. S. G. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications* / J. S. G. Hong, M. J. Lancaster // A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 2001. – 457 p.
4. Беляев, Б. А. Особенности коэффициентов связи регулярных микрополосковых резонаторов / Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, Н. В. Лалетин, А. М. Сержантов // *Радиотехника и электроника*. – 2003. – Т. 48, № 1. – С. 39–46.
5. Беляев, Б. А. Исследование коэффициентов связи шпильковых резонаторов / Б. А. Беляев, А. М. Сержантов // *Радиотехника и электроника*. – 2004. – Т. 49, № 1. – С. 24–31.
6. Беляев, Б. А. Коэффициент связи нерегулярных микрополосковых резонаторов / Б. А. Беляев, М. М. Титов, В. В. Тюрнев // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2000. – Т. 43, № 8. – С. 722–727.
7. Tyurnev, V. V. Coupling Coefficients of Resonators in Microwave Filter Theory / V. V. Tyurnev // *Progress In Electromagnetics Research B*. – 2010. – Vol. 21. – P. 47–67.
8. Belyaev, B. A. Suspended Substrate Stripline Filter / B. A. Belyaev, A. A. Leksikov, V. V. Tyurnev, A. V. Kazakov // 15th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo'2005), Sevastopol. – 2005. – P. 506–507.

Автор выражает благодарность А. А. Лексикову за руководство диссертационной работой. Также автор благодарит И. В. Говоруна за содействие, поддержку и помощь в работе. Автор благодарит сотрудников лабораторий Электродинамики и СВЧ-электроники и Научного приборостроения за ценные советы и помощь в работе.