

*На правах рукописи*



**Чинь То Тхань**

**МОДЕЛИ И КОНСТРУКЦИИ НЕОТРАЖАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ СВЧ  
НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ И  
СОСРЕДОТОЧЕННЫХ RLC-ЭЛЕМЕНТОВ**

**2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Томск - 2024**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный  
руководитель:**

**Малютин Николай Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры конструирования узлов и деталей  
радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР

**Официальные  
оппоненты:**

**Дунаевский Григорий Ефимович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиоэлектроники,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»;

**Летавин Денис Александрович**  
кандидат технических наук, доцент  
департамента радиоэлектроники и связи,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина»

**Ведущая организация:** Ордена Трудового Красного Знамени  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский технический  
университет связи и информатики»

Защита состоится 17 сентября 2024 года в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/fxyz8b43>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Мандель Аркадий Евсеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Фильтры СВЧ являются широко применяемыми устройствами практически во всех радиотехнических системах связи, радиолокации, а также в измерительной технике. Фундаментальные принципы работы и теория фильтров, их оптимизация и проектирование хорошо известны еще с середины прошлого века. Тем не менее сегодня эта область в радиоэлектронике является активно исследуемой и актуальной в связи с постоянным ростом требований к аппаратуре по таким важным показателям, как электромагнитная совместимость, частотная селекция формируемых и принимаемых сигналов.

Особый интерес представляют фильтры неотражающего или поглощающего типа. Часть частотного спектра сигнала, поступающего на вход таких фильтров в полосе непропускания, не отражается обратно к источнику сигнала, а поглощается самими фильтрами в противовес традиционным фильтрам, отражающим внеполосные колебания. Это позволяет обеспечить хорошее согласование с другими устройствами системы, что является важной характеристикой при проектировании широкополосной аппаратуры, имеющей несколько каналов, настроенных на разные частоты. Идеи и решения проблемы построения неотражающих фильтров (НФ) при сохранении свойства частотной селекции рассмотрены во многих работах. Далеко не сразу разработка неотражающих фильтров привлекла высокий уровень интереса, так как традиционные СВЧ-фильтры на волноводах, коаксиальных резонаторах явно превосходили по избирательности неотражающие фильтры. Создание широкого ряда дискретных элементов поверхностного монтажа, развитие полосковых технологий, разработка интегральных схем СВЧ в настоящее время открыли новые возможности построения неотражающих фильтров. Одновременно с этим выросли потребности в полосковых НФ. Поэтому разработка неотражающих фильтров актуальна.

**Степень разработанности темы.** Многие публикации последних лет посвящены неотражающим фильтрам. Известными зарубежными исследователями в этой области являются Morgan M.A., Boyd T.A., Psychogiou D., Gómez-García R., Muñoz-Erreras J., Wu X., Li Y., Liu X., Yang L., Lee J., Jin X.H., Huang X.D., Ren Q., Cheng C.H., Zhang S., Liu H., Wang Z., Fang S. Следует отметить существенный вклад в данной области исследований и разработок Тиличенко М.П., Баранова А.В., Козикова А.Л., Осипенкова В.М., Веснина С.Г. и др. Разработка полосковых неотражающих фильтров основывается на предшествовавшем опыте создания направленных фильтров, представленных работами Фельдштейна А.Л., Агуреева А.В., Губарева Д.Е., Кочубея А.С., Зикия А.Н. Созданию неотражающих фильтров на основе полосковых линий передачи и связанных линий в немалой степени способствовали работы Газизова Т.Р. и его школы, внесших большой вклад в исследования импульсных характеристик полосковых модальных фильтров,

Малютина Н.Д., Сычева А.Н. Семенова Э.В. по развитию теории и практики устройств на связанных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением. Однако, несмотря на созданные благоприятные условия по теме создания неотражающих частотно-селективных устройств, степень ее разработанности остается явно недостаточной, особенно в отечественной научно-технической литературе и базе патентов.

**Цель работы** – исследование, разработка моделей и конструкций неотражающих полосковых фильтров на связанных полосковых линиях (СПЛ) и сосредоточенных  $RLC$ -элементах с максимально возможным коэффициентом передачи в полосе пропускания и минимально достижимым коэффициентом отражения в полосе заграждения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выполнить аналитический обзор источников по теме создания неотражающих фильтров и конструкций связанных полосковых линий, используемых для построения неотражающих полосковых фильтров (НПФ).

2. Провести математическое моделирование неотражающих фильтров СВЧ, эквивалентная схема которых содержит распределенные цепи связанных линий и цепи, образованные сосредоточенными  $RLC$ -элементами.

3. Решить обратную задачу отыскания частотной зависимости импеданса  $RLC$ -цепей, входящих в состав НПФ при известных параметрах СПЛ, на этой основе разработать алгоритм синтеза схемы неотражающих фильтров.

4. Исследовать влияние неуравновешенности электромагнитной связи СПЛ 3D-конструкции с гетерогенным диэлектрическим заполнением на характеристики НПФ и разработать метод определения диэлектрических проницаемостей подложек по заданному отношению фазовых скоростей синфазной и противофазной волн в связанных линиях.

5. Разработать способ измерения коэффициента распространения и фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях, используемых для проектирования НПФ.

6. На основе результатов исследований разработать неотражающие полосно-пропускающие фильтры (НППФ) с одной полосой пропускания, НППФ с двумя полосами пропускания нечетных гармоник, малогабаритный НППФ.

7. Разработать методику проектирования неотражающих фильтров на основе связанных полосковых линий и сосредоточенных  $RLC$ -элементов.

#### **Научная новизна**

1. Предложена обобщенная эквивалентная схема неотражающих фильтров на основе применения принципа декомпозиции, которая позволяет проводить анализ частотных характеристик НПФ по известным параметрам конструкции СПЛ и значениям номиналов сосредоточенных элементов.

2. Построены аналитические модели неотражающих фильтров как результат решения обратной задачи отыскания частотной зависимости импеданса  $RLC$ -цепей, входящих в состав НПФ при известных параметрах

СПЛ, позволяющие решать задачу синтеза схемы и параметров элементов  $RLC$ -цепи и фильтров.

3. Определена зависимость частотных свойств базового варианта неотражающего полосно-пропускающего фильтра от первичных и модальных параметров связанных линий, а также от согласованности характеристического импеданса  $RLC$ -цепи и среднего геометрического характеристических сопротивлений синфазного и противофазного возбуждения СПЛ.

4. Разработан и запатентован способ определения отношения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных полосковых линиях.

5. Решена задача определения диэлектрических проницаемостей подложек СПЛ по заданному отношению фазовых скоростей синфазной и противофазной волн.

6. Предложен и реализован способ уменьшения габаритов неотражающих фильтров путем изменения топологии проводников СПЛ в форме меандра.

#### **Теоретическая значимость**

1. Полученные аналитические соотношения для анализа неотражающих фильтров и решение обратной задачи отыскания частотной зависимости импеданса  $RLC$ -цепей, необходимых для получения задаваемых параметров НПФ, представляют теоретически значимый результат для решения задач моделирования частотно-селективных неотражающих цепей распределенно-сосредоточенного типа.

2. Обобщенная эквивалентная схема неотражающих частотно-селективных устройств инвариантна к методам ее анализа, что позволяет использовать подходы, основанные на анализе квази-Т-волн в связанных полосковых линиях и методы расчета сосредоточенных цепей, и на этой основе разрабатывать программы моделирования в среде математического моделирования Mathcad, а также применять схему для электродинамического анализа устройств САПР CST Studio Suite 2017, AWR.

#### **Практическая значимость**

1. Предложены и разработаны макеты полосковых неотражающих полосно-пропускающих фильтров, обладающих новизной. Разработаны программы анализа неотражающих фильтров и программа для расчета частотных характеристик  $RLC$ -цепей по задаваемым параметрам фильтра как четырехполюсника.

2. Предложен способ определения отношения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных полосковых линиях, что позволяет решать практическую задачу выбора конструкции связанных полосковых линий.

3. Разработан алгоритм и программа синтеза связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением, которые позволяют решить задачу выбора подложек по критерию относительных

диэлектрических проницаемостей для проектирования конструкции связанных полосковых линий, базового элемента НПФ.

4. Получены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик полосковых неотражающих фильтров, которые составляют базу данных реальных параметров НПФ.

#### **Методы исследования**

При выполнении работы проводилось математическое моделирование, экспериментальные исследования, численный расчет, экстракция параметров по данным измерений с использованием моделей неотражающих фильтров и их элементов. В ходе исследований разработан новый способ определения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях. Моделирование разрабатываемых новых устройств проводилось в среде математического моделирования MathCad и с помощью САПР CST Studio Suite 2017, AWR. Экспериментальные исследования осуществлялись на векторных анализаторах цепей производства АО «НПФ «Микран» и ООО «Планар» с подтвержденными метрологическими характеристиками.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Решение обратной задачи определения частотной зависимости импеданса RLC-цепей в явном виде в результате декомпозиции обобщенной эквивалентной схемы неотражающих полосковых полосно-пропускающих фильтров на блок с распределенными параметрами, образуемый связанными линиями, и блоки с сосредоточенными параметрами в виде RLC-цепей при известных параметрах блока с распределенными параметрами позволяет ускорить синтез фильтров по заданным частотным характеристикам.

2. Исследование зависимости частотных свойств базового варианта неотражающего полосно-пропускающего фильтра от первичных и модальных параметров связанных линий доказало, что коэффициент передачи НППФ на центральной частоте полосы пропускания максимален при одинаковых емкостных и индуктивных коэффициентах связи и равных фазовых скоростях синфазных и противофазных волн вследствие синфазного сложения волн равной амплитуды на выходе фильтра.

3. Рассогласование характеристического импеданса  $Z_0$  RLC-цепи и среднего геометрического характеристических сопротивлений синфазного и противофазного возбуждения СПЛ приводит к изменению ширины полосы пропускания неотражающих фильтров, что позволяет управлять этим параметром, расширяя полосу от 12% до 54% при изменении  $Z_0$  от 200 Ом до 45 Ом.

4. Исполнение топологии горизонтально и вертикально расположенных полосок связанных полосковых линий в виде меандра уменьшает габариты неотражающих фильтров до двух раз при сохранении частотных параметров неотражающих фильтров при условии одинаковой длины связанных полосок, ориентированных ортогонально друг к другу, вследствие уменьшения перекрестных связей между разделенными воздушным промежутком смежных параллельных полосок и отсутствия

связи между полосками, соединяющих концы смежных параллельных полосок.

**Достоверность результатов** основывается на корректном применении теории линий передачи, теории связанных линий, согласованности результатов моделирования и эксперимента, использовании современных методик измерения сертифицированными приборами.

#### **Апробация результатов**

Результаты диссертации прошли экспертную оценку в составе отчетов при выполнении госзаданий по проектам FEWM-2020-0039 от 01.03.2020, FEWM-2023-0014 от 16.01.2023 Министерства науки и высшего образования РФ. Разработанные конструкции и модели использованы при проведении исследований в НИР по хозяйственному договору 14/22 с АО «НПФ «Микран» от 01.06.2022. Разработанный макет неотражающего полосно-пропускающего фильтра и вычислительные эксперименты по использованию программных средств для расчета частотных характеристик неотражающего фильтра внедрены в ООО «Микроэлектронные Системы». Материалы диссертации использовались в лабораторных и практических работах по дисциплине «Основы проектирования микроволновых устройств» для студентов и магистрантов кафедры конструирования узлов и деталей ТУСУРа. Результаты докладывались на Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), Севастополь, 2021, 2022, 2023; Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2021, 2022; Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная Сессия ТУСУР», Томск, 2021, 2022, 2023; IEEE Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Эрлагол (Алтай), 2022; IEEE Int. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Томск, 2022; IEEE Ural-Siberian conf. on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT), Екатеринбург, 2023; IEEE International Scientific and Technical Conference "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering" (APEIE), Новосибирск, 2023.

**Публикации.** По результатам исследований опубликованы 23 работы (3 без соавторов): 8 статей в журналах из перечня ВАК, 4 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus, 2 патента на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 5 докладов в трудах международных конференций, 1 монография.

**Структура и объем диссертации.** Содержание диссертации изложено на 156 страницах текста, включает 93 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 134 наименования. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений.

#### **Личный вклад автора**

Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или при его

участии. Личный вклад состоит в проведении всех этапов исследований и непосредственном участии в получении исходных данных. Их обработка и интерпретация выполнены совместно с соавторами публикаций и научным руководителем. Непосредственный вклад автора состоит в разработке прототипов устройств, проведении экспериментальных исследований, разработке программ для моделирования и подготовке публикаций.

Постановка задач для экспериментальных исследований, анализ и обобщение экспериментальных данных выполнены совместно с научным руководителем, д-ром техн. наук, профессором Н.Д. Малютиным.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведены общие сведения по теме исследования и обоснована ее актуальность.

**В первом разделе** содержатся краткие сведения из истории создания неотражающих фильтров. Рассматриваются направленные фильтры, послужившие прототипом неотражающих фильтров, НФ на сосредоточенных элементах, неотражающие фильтры с нагруженными отрезками линий передачи, неотражающие фильтры на связанных линиях. Все эти типы устройств отличаются от обычных фильтров тем, что они остаются согласованными как в рабочей полосе пропускания (или непропускания), так и вне ее. Кроме этого, приведен краткий обзор 3D-конструкций связанных линий, являющихся базовым компонентом НПФ.

**Во втором разделе** рассматриваются вопросы моделирования неотражающих полосковых фильтров на основе распределенных и сосредоточенных цепей.

На рисунке 1 представлены две конструкции НПФ в виде трехмерной модели. Ее особенностью является применение связанных полосковых линий, выполненных на горизонтальной (1) и вертикальной (2) подложках с разными относительными диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_{r1}$  и  $\epsilon_{r2}$ .

Связанные линии представляют соединение горизонтально и вертикально расположенных полосок 3 и 4. Они образуют направленный ответвитель (НО) в общем случае с неуравновешенной электромагнитной связью. Одни диагональные порты связанных линий используются как вход и выход устройства, а другие (см. рисунок 1) нагружены на частотно-зависимые нагрузки в виде  $RLC$ -цепей 5-1 и 5-2, заземляемых через контактные площадки 7. Подложка 1 снабжена заземляемым основанием 6. Вход и выход производятся через соединительные отрезки линий 8.

На рисунке 2 представлена наиболее полная обобщенная эквивалентная схема неотражающего полоскового фильтра. Эта схема соответствует конструкции, показанной на рисунке 1,б, и может рассматриваться как базовая при моделировании.



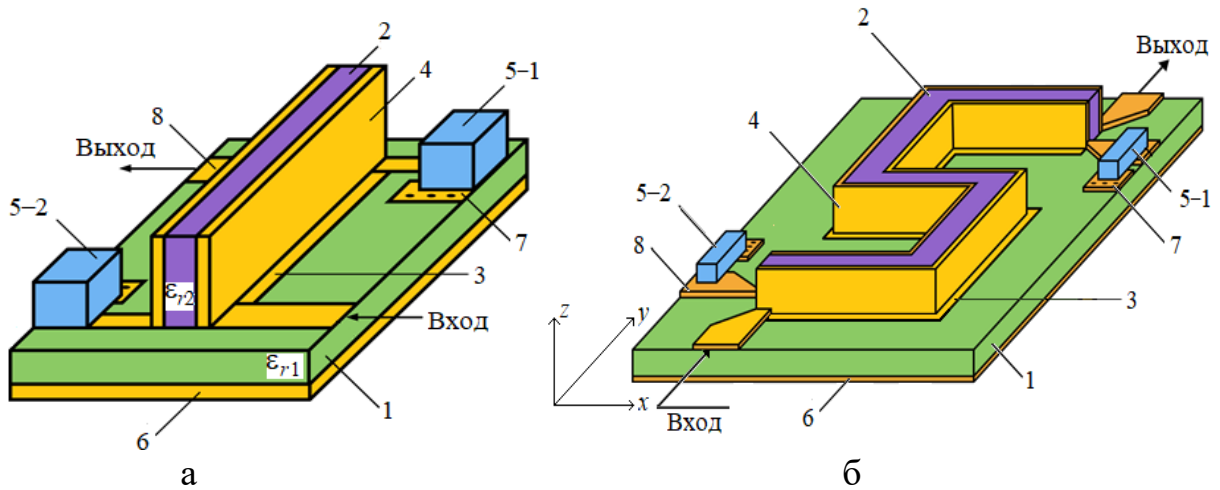


Рисунок 1 – Трехмерная модель НПФ (а) и модель малогабаритного НПФ (б) на СПЛ 3D-конструкции: 1 – горизонтально расположенная подложка с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r1}$ ; 2 – вертикально расположенная подложка с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r2}$ ; 3 – горизонтальная полоска связанных линий; 4 – вертикальная полоска связанных линий; 5-1, 5-2 –  $RLC$ -цепь, составленная из сосредоточенных элементов; 6 – заземляемое основание; 7 – контактная площадка заземления; 8 – соединительная линия

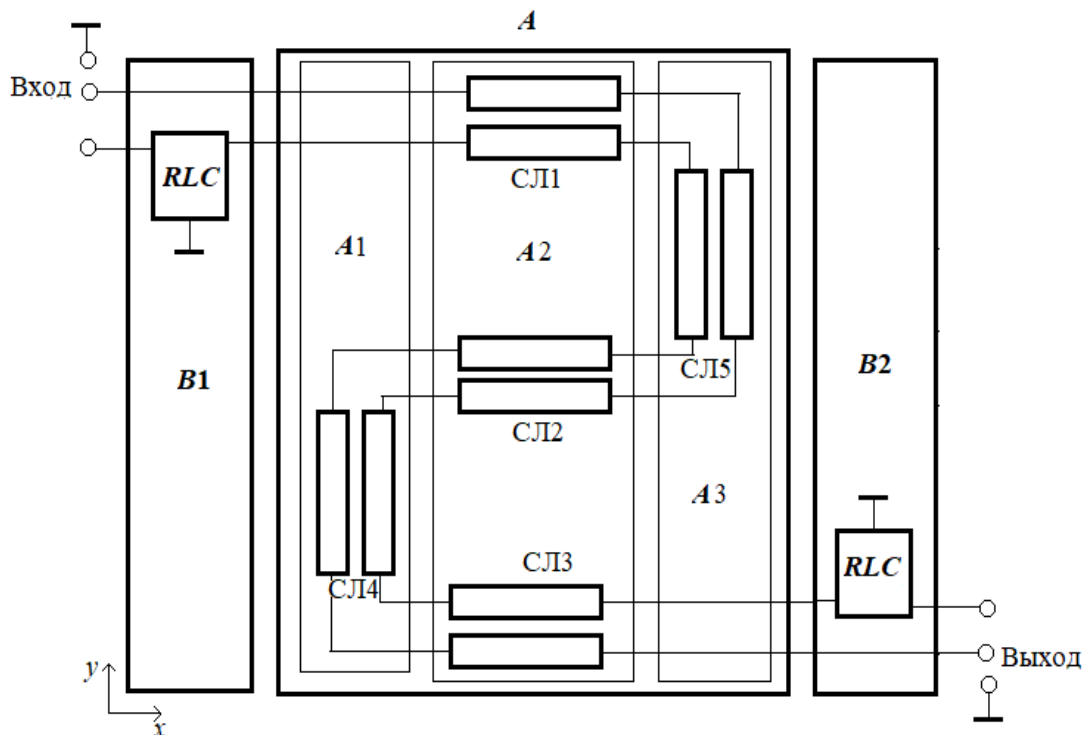


Рисунок 2 – Обобщённая эквивалентная схема неотражающего полоскового фильтра:  $A$  – блок распределенной структуры из трех пар связанных линий СЛ1, СЛ2, СЛ3, ориентированных по оси  $x$ , и двух пар связанных линий СЛ4, СЛ5, ориентированных по оси  $y$ ;  $B1$ ,  $B2$  – блоки сосредоточенных  $RLC$ -цепей;

$A1$  – восьмиполосник, составленный из СЛ4;  $A2$  – восьмиполосник, составленный из СЛ1, СЛ2, СЛ3;  $A3$  – восьмиполосник, включающий СЛ5

Схема (см. рисунок 2) получена путем декомпозиции конструкции (см. рисунок 1,б) на составные части, каждая из которых представляется как многополюсник. Секции связанных полосковых линий, образующих меандр, выделены в блок  $A$ , названный блоком распределенных элементов. Блоки  $B1$  и  $B2$  состоят из  $RLC$ -цепей и соединительных линий. Схема имеет вход и выход, т.е. по существу является четырехполюсником, производным от многополюсника, построенного по схеме рисунка 2. Поэтому необходима декомпозиция блока  $A$  и блоков  $B1$  и  $B2$  на составляющие, что и показано на рисунке 2. Как уже отмечалось, звенья меандра, ориентированные по оси  $x$ , электромагнитно связаны, поэтому они показаны как многополюсник  $A2$ , образованный отрезком многосвязной полосковой линии. Звенья СПЛ, ориентированные по оси  $y$  (см. рисунок 2), представляются восьмиполюсниками  $A1$  и  $A3$ . Эквивалентная схема рисунка 2 упрощается, если пренебречь связью между полосками, ориентированными по оси  $x$ . Поэтому в ходе моделирования неотражающих полосковых фильтров в качестве расчетной схемы рассматривалась схема, показанная на рисунке 3.

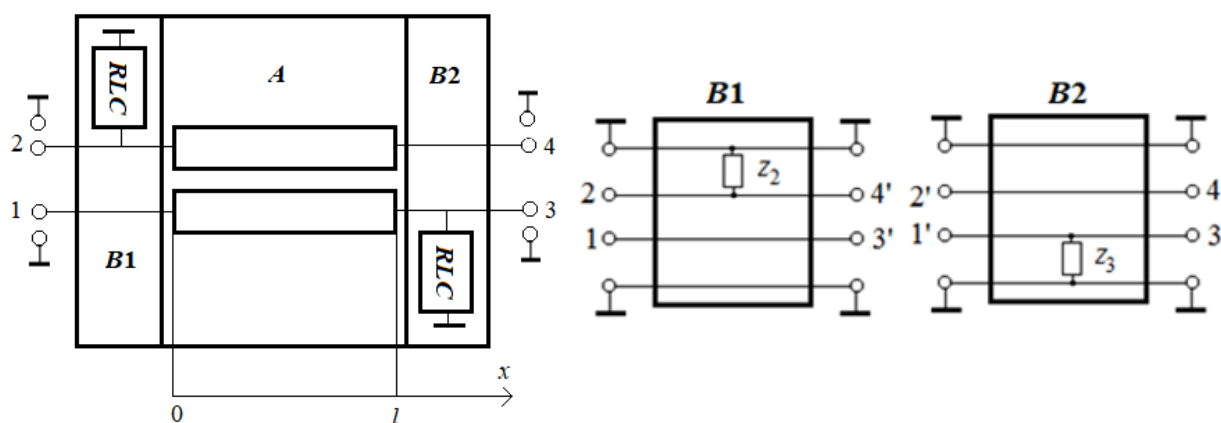


Рисунок 3 – Симметризация обобщенной схемы

Результирующую матрицу передачи  $\mathbf{a}_\Sigma$  структурной схемы (см. рисунок 3) можно записать в виде произведения трех матриц:  $\mathbf{a}_\Sigma = \mathbf{a}_{B1} \times \mathbf{a} \times \mathbf{a}_{B2}$ , где  $\mathbf{a}_{B1}$ ,  $\mathbf{a}_{B2}$  – матрицы передачи блоков  $B1$  и  $B2$  (Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., 1971);  $\mathbf{a}$  – матрица передачи связанных полосковых линий с неоднородным диэлектриком (Воробьев П.А., Малютин Н.Д., Федоров В.Н., 1982; Tripathi V.K., 1975)). В рассматриваемом нами варианте построения неотражающих фильтров блоки  $B1$ ,  $B2$  включают  $RLC$ -цепи, их структуру можно упростить с помощью уравнений Кирхгофа при переходе к эквивалентной схеме.

Нагрузки  $z_2$  и  $z_3$  являются «внутренними», т.е. восьмиполюсник (см. рисунок 3) нагружен только на  $z_1$  и  $z_4$ . Поэтому можно перейти от схемы восьмиполюсника к схеме производного четырехполюсника (Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., 1971), описываемого матрицей  $\mathbf{ap}$ . Элементы матрицы  $\mathbf{ap}$  находятся следующим образом:

$$\begin{aligned}
ap_{11} &= [a_{12} \cdot \varphi - \beta \cdot (a_{22} + a_{24} \cdot g_2)] \cdot \Delta^{-1}, \\
ap_{12} &= [a_{14} \cdot \varphi - \beta \cdot (a_{42} + a_{22} \cdot g_2)] \cdot \Delta^{-1}, \\
ap_{21} &= [a_{32} \cdot \varphi - \eta \cdot (a_{42} + a_{22} \cdot g_2)] \cdot \Delta^{-1}, \\
ap_{22} &= [a_{21} \cdot \varphi - \eta \cdot (a_{22} + a_{24} \cdot g_2)] \cdot \Delta^{-1},
\end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}
\varphi &= a_{32} + g_3 \cdot (a_{12} + a_{14} \cdot g_2) + a_{21} \cdot g_2; \quad \beta = a_{11} + a_{12} \cdot g_3; \quad \eta = a_{31} + a_{11} \cdot g_3; \\
\Delta &= a_{32} + g_3 \cdot (a_{12} + a_{14} \cdot g_2) + a_{21} \cdot g_2; \quad g_2 = (z_2)^{-1}; \quad g_3 = (z_3)^{-1}.
\end{aligned}$$

Формулы (1) предоставляют возможность перейти от классической матрицы передачи **ap** к матрице коэффициентов рассеяния **S**, которая чаще всего используется при проектировании и измерениях (Малютин Н.Д. и др., 2012).

Показанное решение задачи анализа позволяет проводить расчет частотных характеристик устройств при выбранных параметрах входящих в схему элементов. Неравенство частотно-зависимых эквивалентных адмиттансов нагрузок  $g_2 = (z_2)^{-1}$  и  $g_3 = (z_3)^{-1}$  в блоках **B1**, **B2** приводит к неравенству коэффициентов возвратных потерь (коэффициентов отражения)  $S_{11} \neq S_{22}$  матрицы **S**, что не всегда допустимо и, кроме того, затрудняет проектирование фильтров неотражающего типа. Поэтому рассмотрен частный случай, когда  $g_2 = g_3 = g$ .

Решена обратная задача с формулировкой: найти функцию зависимости адмиттанса *RLC*-цепи  $g(f)$ , при которой можно гарантировать достижение заданных значений коэффициента передачи  $|S_{21}(f)|$  и коэффициента отражения  $|S_{11}(f)|$  на центральной частоте  $f_0$  единственной полосы пропускания, а также в полосах непропускания.

Коэффициенты  $a_{i,j}$  ( $i, j = 1, \dots, 4$ ) матрицы **a** блока **A** распределенной цепи рассматриваемых связанных линий считаются известными, так как конструкция связанных линий обычно выбирается из уже известных. Следовательно, в выражении (1) неизвестным является адмиттанс  $g(f)$  *RLC*-цепи. Матрица передачи **ap** определяется через матрицу рассеяния **S**. В свою очередь матрица **S** может быть задана на основе требуемых частотных характеристик фильтра и обозначена как **Sd**. Обратное преобразование от **Sd** к классической матрице передачи дает нам **ad**. Матрицы **Sd** и **ad** могут быть экспериментально определены. Тогда формулировка обратной задачи сводится к определению параметров *RLC*-цепи из известных экспериментальных данных:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \cdot g^2 + m_2 \cdot g + m_3 &= 0; \\ m_4 \cdot g^2 + m_5 \cdot g + m_6 &= 0; \\ m_7 \cdot g^2 + m_8 \cdot g + m_9 &= 0; \\ m_{10} \cdot g^2 + m_{11} \cdot g + m_{12} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} m_1 &= ad_{11} \cdot q_1 - p_1; \quad m_2 = ad_{11} \cdot q_2 - p_2; \quad m_3 = ad_{11} \cdot q_3 - p_3; \quad m_4 = ad_{12} \cdot q_1 - p_4; \\ m_5 &= ad_{12} \cdot q_2 - p_5; \quad m_6 = ad_{12} \cdot q_3 - p_6; \quad m_7 = ad_{21} \cdot q_1 - p_7; \quad m_8 = ad_{21} \cdot q_2 - p_8; \\ m_9 &= ad_{21} \cdot q_3 - p_9; \quad m_{10} = ad_{22} \cdot q_1 - p_{10}; \quad m_{11} = ad_{22} \cdot q_2 - p_{11}; \\ m_{12} &= ad_{22} \cdot q_3 - p_{12}. \end{aligned}$$

Решение системы квадратных уравнений (2), по сути, представляет собой решение обратной задачи нахождения частотной зависимости адмиттанса  $g(f)$   $RLC$ -цепи на основе известных коэффициентов матрицы **ad**, которая определяется через матрицу рассеяния **Sd**. При этом, конечно, необходимо иметь определенную матрицу **a**, что может быть легко выполнено при известных размерах полосковой структуры и свойствах диэлектрика.

Система квадратных уравнений (2) переопределена, т.к. мы фактически рассматриваем устройство с симметричной и взаимной матрицей рассеяния **Sd**. Запишем систему из двух уравнений для определения  $g^2$  и  $g$ , поскольку  $g$  – комплексная переменная:

$$\left. \begin{aligned} \sigma 1 \cdot g^2 + \tau 1 \cdot g &= \mu 1; \\ \sigma 2 \cdot g^2 + \tau 2 \cdot g &= \mu 2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\sigma 1 = m_1 + m_4$ ;  $\sigma 2 = m_7 + m_{10}$ ;  $\tau 1 = m_2 + m_5$ ;  $\tau 2 = m_8 + m_{11}$ ;  $\mu 1 = -m_3 - m_6$ ;  $\mu 2 = -m_9 - m_{12}$  – частотно-зависимые коэффициенты, определяемые через  $m_k$  из формулы (3). Далее получаем выражение для нахождения  $g^2$  и  $g$ :

$$\begin{bmatrix} g^2 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma 1 & \tau 1 \\ \sigma 2 & \tau 2 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mu 1 \\ \mu 2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Численные эксперименты, проведенные с использованием полученных моделей, показали, что неотражающие фильтры работают в оптимальном режиме по критерию максимума коэффициента ослабления и минимума коэффициента отражения сигнала в диапазоне частот непропускания при равенстве отношения фазовых скоростей синфазных ( $v_c$ ) и противофазных ( $v_\pi$ ) волн. Поэтому в диссертации решена задача отыскания относительных диэлектрических проницаемостей подложек 3D-конструкции связанных полосковых линий, обеспечивающих получение требуемого отношения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн  $v_c/v_\pi$ .

В данном разделе предложен и реализован относительно простой способ измерения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью, основанный на экспериментальном определении резонансных частот секции связанных полосковых линий. Приведенный пример реализации способа показывает целесообразность такого пути получения недостающих данных для успешного проектирования устройств. Это справедливо, с одной стороны, по причине резкого сокращения времени для получения необходимой информации при наличии разработанных методик и измерительной аппаратуры; с другой стороны, получение экспериментальных данных, так или иначе, представляет более надежный способ проверки достижения заданных условий технического задания. Установлено частотное ограничение способа до 6 ГГц.

В разделе рассматривается изменение частотных характеристик НПФ при вариации модальных параметров СПЛ и  $RLC$ -цепи. В качестве таких параметров взяты коэффициент электромагнитной связи  $K = (Z_{0c} - Z_{0\pi}) / (Z_{0c} + Z_{0\pi})$ , коэффициент неуравновешенности электромагнитной связи, определяемый через отношение фазовых скоростей синфазного и противофазного возбуждения  $v_c/v_\pi$ , характеристическое сопротивление  $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$   $RLC$ -цепи.

В ходе анализа модели НПФ были установлены основные зависимости между параметрами его элементов и частотными характеристиками:

1. Исследование влияния коэффициента электромагнитной связи СПЛ на частотные характеристики фильтров показывает, что оптимальной связью с точки зрения согласования НПФ по входу и выходу является связь с  $K \approx 0,7$ .

2. Показано, что различие в скоростях распространения синфазных ( $v_c$ ) и противофазных ( $v_\pi$ ) волн отрицательно влияет на характеристики НПФ. Оптимальное функционирование фильтра достигается при отношении фазовых скоростей  $v_c/v_\pi = 1,0$ , обеспечивая возвратные потери не хуже минус 20 дБ в диапазоне частот до 8 ГГц.

3. Полоса пропускания фильтра существенно зависит от характеристического сопротивления  $RLC$ -цепи. Другими словами, чем выше значение характеристического сопротивления  $RLC$ -цепи, тем более узкой становится полоса пропускания и ниже уровень возвратных потерь. Однако следует отметить, что наличие компонентов с желаемыми номинальными значениями не всегда гарантировано. Например, для емкости обычно используют значения больше 1 пФ, а для индуктивности предпочтительны значения больше 0,8 нГн. В работе была использована емкость  $C_0 = 1$  пФ и индуктивность  $L_0 = 22$  нГн, что приводит к характеристическому сопротивлению  $RLC$ -цепи  $Z_0 = 150$  Ом. При этом фильтр обеспечивает возвратные потери не хуже, чем минус 10 дБ.

В третьем разделе представлены результаты исследования неотражающих фильтров на связанных полосковых линиях. Рассматриваются частотные характеристики однокаскадных и двухкаскадных НПФ, НПФ нечетных гармоник, малогабаритный НПФ, перестраиваемый НПФ. Экспериментально подтверждена возможность разработки различных видов НПФ.

Было проведено моделирование на САПР CST Studio Suite и с применением разработанной программы на MathCad (рисунок 4).

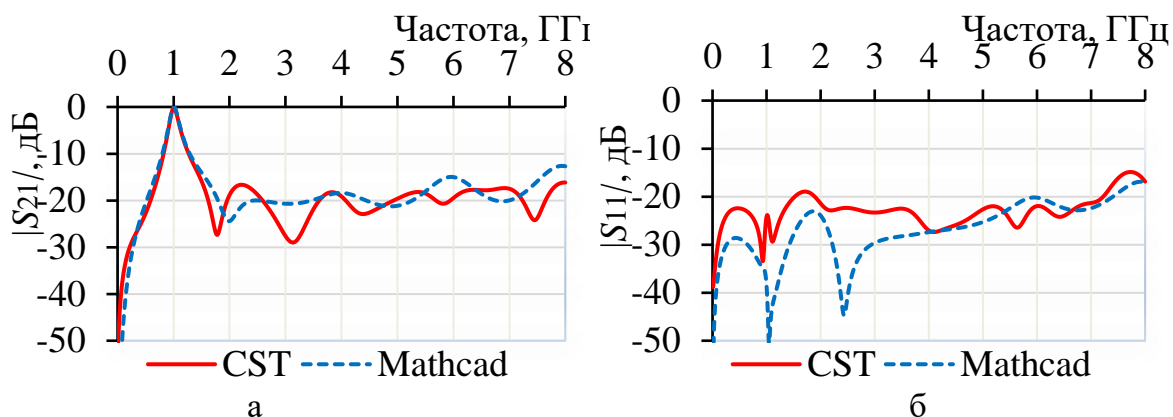


Рисунок 4 – Частотные зависимости коэффициента передачи  $|S_{21}(f)|$  (а) и коэффициент отражения  $|S_{11}(f)|$  (б), рассчитанные разными программами

Результаты расчетов в различных программах в полосе прозрачности близки и качественно совпадают в полосе непрозрачности. Можно подтвердить, что работа НПФ соответствует описанным ранее закономерностям.

Был спроектирован НПФ на центральную частоту  $f_0 = 0,949$  ГГц. В состав  $RLC$ -цепи вошли индуктивность  $L = 22$  нГн, емкость  $C = 1,1$  пФ, сопротивление  $R = 48$  Ом. Длина отрезка связанных линий  $l_{СПЛ} = 0,048$  м. На рисунке 5 представлены изготовленный макет НПФ и его частотные характеристики.

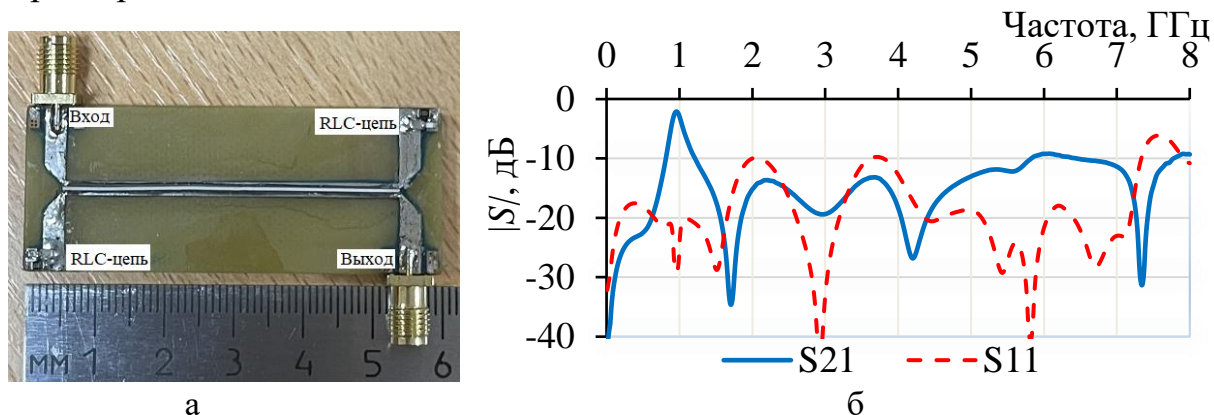


Рисунок 5 – Изготовленный макет однокаскадного НПФ (а) и его экспериментальные частотные характеристики (б)

Экспериментально подтверждаются параметры НПФ: ослабление минус 2,1 дБ на центральной частоте 949,2 МГц; полоса пропускания 174,1 МГц; коэффициент отражения не более минус 10 дБ во всем частотном диапазоне до 7,5 ГГц. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность построения полосно-пропускающего фильтра неотражающего типа с характеристиками, близкими к расчетным.

На рисунке 6 показан изготовленный макет двухкаскадного НПФ и частотные зависимости его S-параметров.

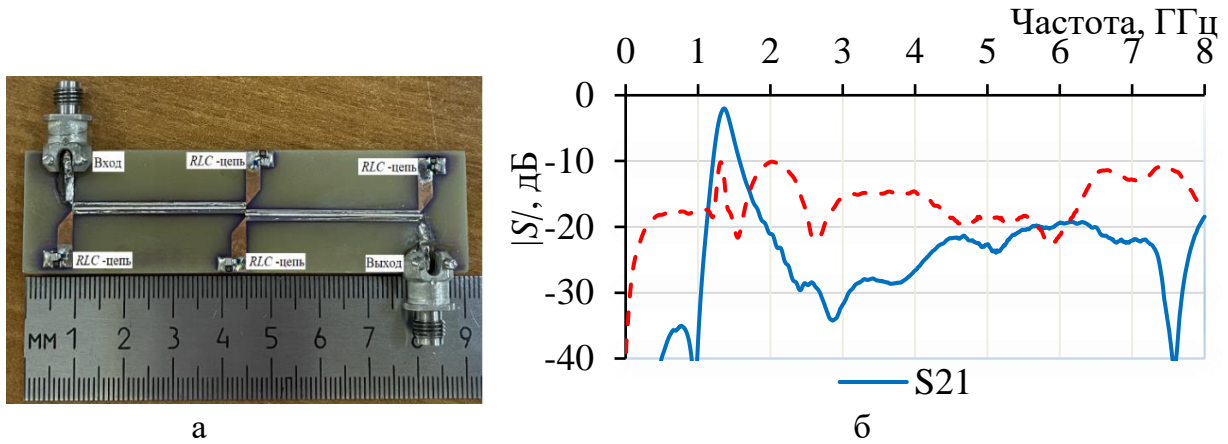


Рисунок 6 – Изготовленный макет двухкаскадного НПФ (а) и его экспериментальные частотные характеристики (б)

Видно, что в диапазоне до частоты 8 ГГц  $|S_{21}(f)|$  не хуже минус 20 дБ, а возвратные потери  $|S_{11}(f)|$  не превышают минус 10 дБ. Таким образом, представлен способ улучшения избирательности полосно-пропускающего фильтра путем его каскадирования.

Был сделан вывод, что можно использовать отрезок СПЛ как основу полосно-пропускающего фильтра нечетных гармоник при включении в порты 2 и 3 частотно-зависимых нагрузок. При этом необходимо получить нули или максимумы модуля импеданса  $z_2$  и  $z_3$  на частотах, близких к 1, 3, 5 и 7 ГГц.

В работе поставлена задача: получить две полосы пропускания на частотах  $f_1$  и  $f_2 = 3f_1$ , RLC-цепь должна иметь два резонанса соответственно на этих частотах. Для экспериментальных исследований разработан и изготовлен макет НПФ нечетных гармоник (рисунок 7). На рисунке 7,б приведены его частотные характеристики. Получена первая полоса пропускания с центральной частотой  $f_1 = 0,96$  ГГц, вторая – с частотой  $f_2 = 2,9$  ГГц. В диапазоне частот до 4,8 ГГц отмечается коэффициент отражения не хуже минус 10 дБ. Коэффициент передачи  $|S_{21}| = -2$  дБ на частоте  $f_1$  и  $|S_{21}| = -7,2$  дБ на частоте  $f_2$ . Неравенство коэффициентов на частотах  $f_1$  и  $f_2$  вызвано трудностями настройки НПФ на третью гармонику путем подбора RLC-элементов из ряда выпускаемых SMD-чипов. Переход к интегральному исполнению RLC-цепи позволил упростить эту задачу. Таким

образом, эксперимент подтвердил возможность построения НПФ нечетных гармоник с характеристиками, близкими к расчетным.

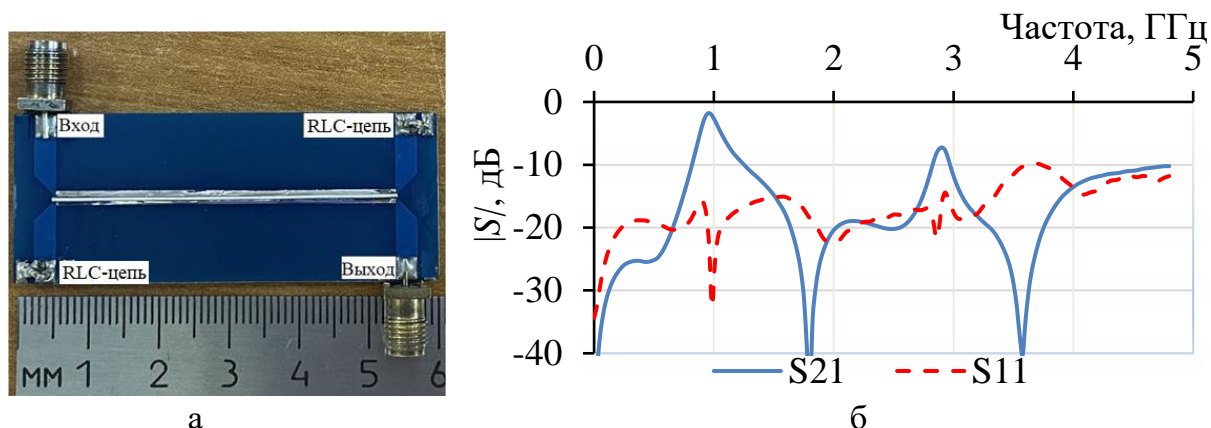


Рисунок 7 – Изготовленный макет НПФ нечетных гармоник (а) и его экспериментальные частотные характеристики (б)

В разделе 3 также представлены результаты моделирования перестраиваемого неотражающего полоскового полосо-пропускающего фильтра. На рисунке 8 показана эквивалентная схема, а на рисунке 9 частотные зависимости коэффициентов передачи  $|S_{21}|$  и отражения  $|S_{11}|$  перестраиваемого НПФ.

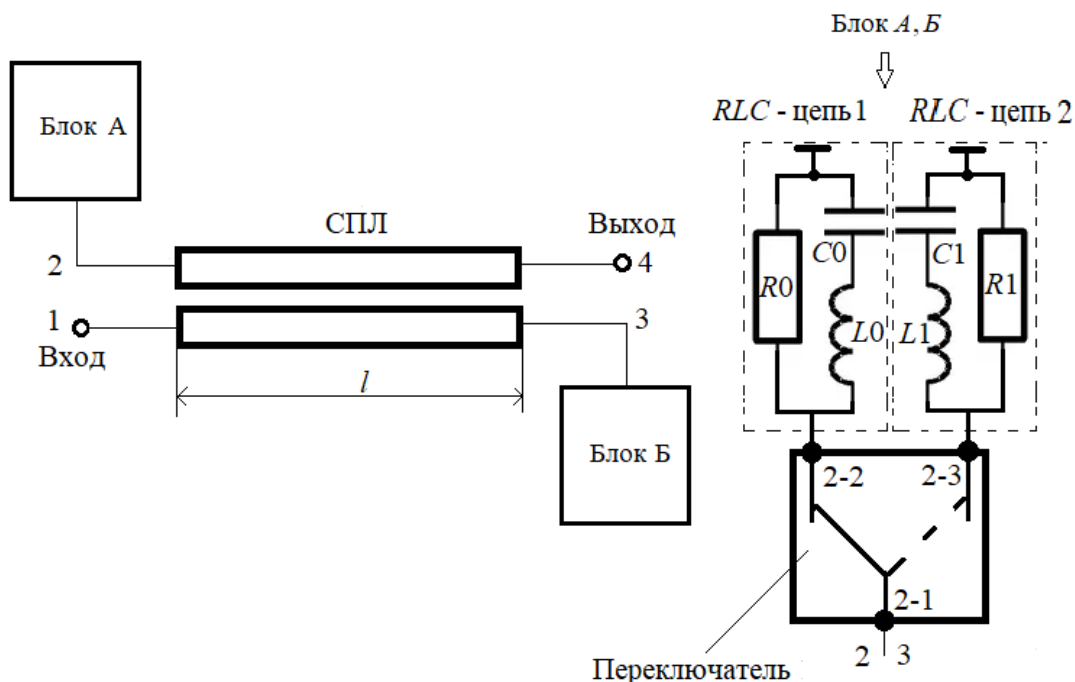


Рисунок 8 – Эквивалентная схема перестраиваемого НПФ

Изменение частоты происходит переключением  $RLC$ -цепей, настроенных на разные частоты. Видно, что НПФ работает на частоте либо 1 ГГц, либо 3 ГГц. Таким образом, фильтр обеспечивает получение следующих технических результатов: перестроение единственной полосы пропускания с частоты на частоту и обратно, уменьшение отражения от входа и выхода фильтра на внеполосных частотах при сохранении функции частотной селекции при перестройке частоты пропускания.



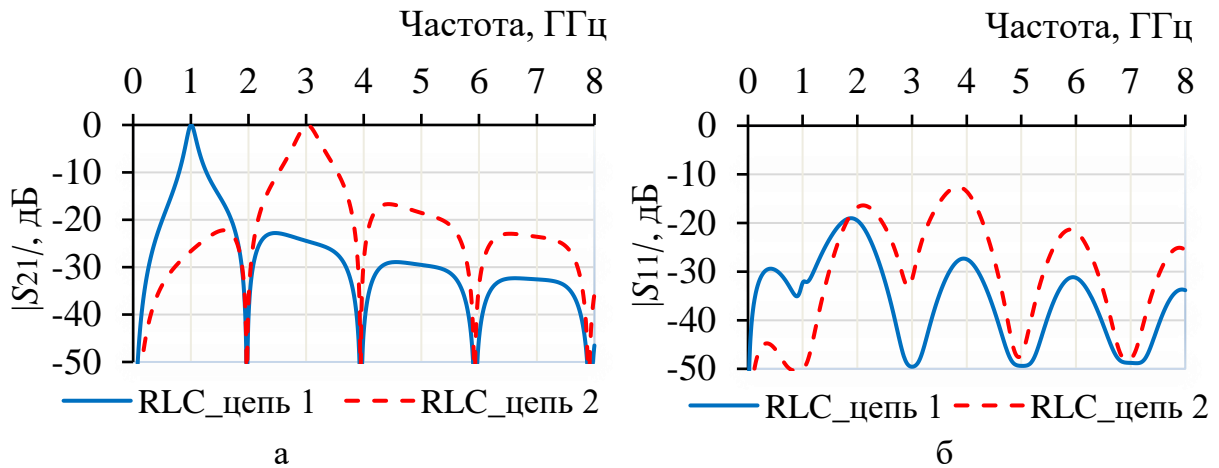


Рисунок 9 – Частотные характеристики перестраиваемого НПФ коэффициента передачи  $|S_{21}(f)|$  (а) и коэффициент отражения  $|S_{11}(f)|$  (б)

Одной из основных проблем, с которой сталкиваются разработчики и пользователи фильтров на основе линий передачи и связанных линий, являются ограничения, связанные с их физическими размерами.

Предложено уменьшить габариты НПФ изменением топологии проводников СПЛ и выполнить их в форме меандра, несмотря на то что 3D-конструкция связанных линий несколько усложняет поставленную задачу. Горизонтальные полосы расположены на подложке из материала FR4 толщиной  $h_1 = 1,5$  мм и с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r1} = 4,5$ . Вертикальные полосы выполнены на вертикально устанавливаемой подложке из материала RO-3003 толщиной  $h_2 = 0,635$  мм с  $\epsilon_{r2} = 3,0$ . Горизонтальные проводники 1 и 2 СПЛ имеют следующие параметры:  $w_1 = 0,6$  мм,  $w_2 = 2,8$  мм,  $l = 9$  мм,  $h_2 = 0,6$  мм,  $t = 35$  мкм.

Размер макета неотражающего полоскового фильтра составил  $31 \times 22$  мм, что соответствует уменьшению габаритов в два раза по сравнению с фильтром, представленным ранее. На рисунке 10 представлен изготовленный макет неотражающего полоскового фильтра и его частотные характеристики.

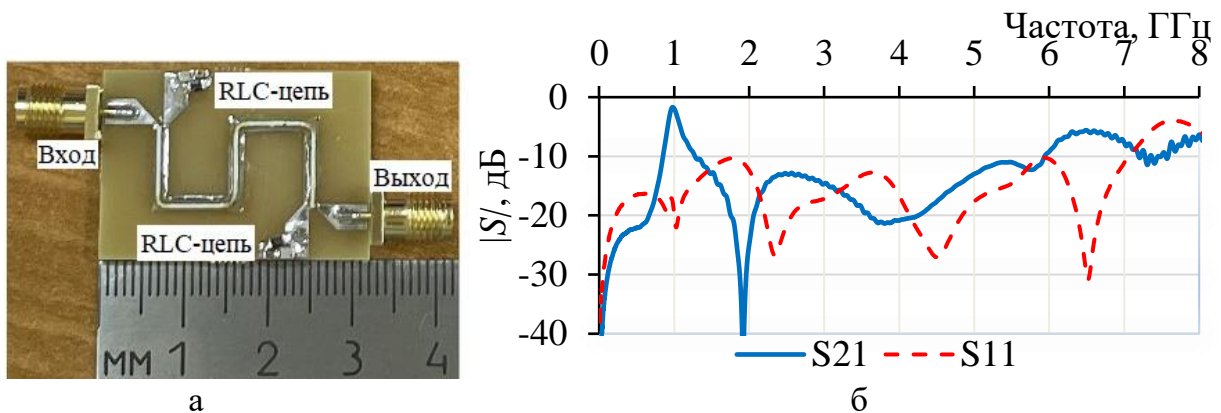


Рисунок 10 – Изготовленный макет малогабаритного НПФ (а) и его экспериментальные частотные характеристики (б)

Видно, что фильтр функционирует на центральной частоте 0,94 ГГц с полосой пропускания 0,154 ГГц. При этом коэффициент отражения не превышает минус 10 дБ во всем диапазоне частот до 6 ГГц. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность создания неотражающего полоскового фильтра с компактными размерами и характеристиками, близкими к расчетным.

**В четвертом разделе** описан алгоритм проектирования неотражающих полосковых фильтров.

Задача проектирования НПФ сводится к нескольким подзадачам, решаемым по следующему укрупненному алгоритму:

1. Проектирование связанных линий передачи, удовлетворяющих исходным требованиям к фильтрам. Это делается на основе моделей и экспериментальных данных. Алгоритм состоит в выполнении следующих действий.

1.1. Выбор конструкции СПЛ исходя из возможности реализовать 3 дБ связь между линиями, что означает обеспечение коэффициента связи  $K = 0,707$ .

1.2. Проверка условия равенства фазовых скоростей синфазного  $v_c$  и противофазного  $v_\pi$  типов колебаний. Для выполнения проверки используется расчет первичных параметров методом сеток, а также экспериментальный способ. Если не выполняется данное условие, решается итерационная задача вычисления относительных диэлектрических проницаемостей подложек.

1.3. Расчет длины связанных линий из условия использования первой или последующих полос пропускания направленного ответвителя, образуемого связанными линиями.

2. Проектирование  $RLC$ -цепей основывается на приводимой ниже последовательности действий.

2.1. В соответствии с требованием одной или двух полос пропускания устанавливаются резонансные частоты, выбирается вариант получения нуля или максимума модуля импеданса цепи.

2.2. Определение состава и номиналов сосредоточенных элементов реализации схемы  $RLC$ -цепи.

3. Проектирование НПФ по задаваемым частотным характеристикам с использованием приведенных в разделе 2 соотношений.

3.1. Формирование эквивалентной схемы НПФ по ранее полученным материалам.

3.2. Расчет частотных характеристик по выбранной или вновь сформированной эквивалентной схеме с применением оригинальных программ, а также САПР.

3.3. Внесение коррекции в конструкцию и эквивалентную схему с применением оригинальных программ экстракции частотной зависимости импеданса элементов, включенных в диагональные порты отрезка связанных

линий, синтеза конструкций связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением.

#### 3.4. Экспериментальная проверка результатов проектирования.

На основе данного алгоритма был разработан комплекс программ, состоящий из логически связанных программ с передачей данных результатов расчета.

### Заключение

Основные результаты работы, полученные с помощью проверенных методов, апробированные и опубликованные, заключаются в следующем:

1. Построена модель неотражающих фильтров на основе применения принципа декомпозиции эквивалентной схемы на многополюсники, являющиеся цепями с распределенными параметрами, и многополюсники, описываемые как  $RLC$ -цепи с сосредоточенными параметрами.

2. Решена обратная задача отыскания частотной зависимости импеданса  $RLC$ -цепи, обеспечивающей заданные частотные параметры фильтра. Построена аналитическая модель на этой основе с возможностью быстрых вычислений при проектировании фильтров.

3. Решена задача отыскания относительных диэлектрических проницаемостей подложек 3D-конструкции связанных полосковых линий, обеспечивающих получение требуемого отношения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн.

4. Разработан способ измерения частотной зависимости коэффициентов распространения и фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях.

5. Получены численные результаты моделирования НПФ на основе разработанной модели и с помощью САПР CST Studio Suite.

6. Экспериментально доказана возможность создания неотражающих полосковых фильтров с одной или двумя полосами пропускания, периодически не повторяющихся в полосе частот до 8:1 при уровне отражения минус 10 дБ.

7. Показана возможность улучшения избирательных свойств неотражающих полосковых фильтров путем каскадирования, что подтверждает их перспективность для применения в различных схемах, где одновременно требуются высокая избирательность передачи сигнала и небольшое отражение на внеполосных частотах.

8. Предложены перестраиваемые неотражающие полосковые фильтры, сохраняющие основные преимущества существующих фильтров.

9. Предложен и реализован способ управления полосой пропускания неотражающего фильтра с помощью вариации характеристического импеданса  $RLC$ -цепи.

10. На основе аналитических моделей и экспериментальных исследований разработан алгоритм и программа проектирования неотражающих полосковых фильтров.

Таким образом, в диссертационной работе решена научно-техническая задача, имеющая важное значение для развития отечественной компонентной базы СВЧ, – разработки полосковых неотражающих фильтров СВЧ. В работе изложены новые научно обоснованные технические решения по созданию неотражающих полосно-пропускающих фильтров для применения в радиоэлектронной аппаратуре связи, радиолокации.

### Рекомендации

Предложенная обобщенная эквивалентная схема неотражающих полосковых фильтров может служить основой для разработки новых модификаций фильтров и других частотно-селективных устройств, так как заложенные в ней функциональные свойства не ограничены предложенными конструкциями НПФ. Эта схема является емким примером развития, во-первых, применения принципа декомпозиции для анализа распределенно-сосредоточенных цепей и устройств на их основе, во-вторых, демонстрирует решение обратной задачи, которое является одним из наиболее быстрых инструментов в проектировании фильтров на основе синтеза  $RLC$ -цепи. Расширение решения круга обратных задач перспективно для дальнейших исследований. Рекомендация в направлении приложения усилий в разработке программ для моделирования и проектирования неотражающих фильтров в совокупности с созданием новых конструкций обеспечит доступность этих знаний для инженерных применений.

### Перспективы дальнейшей разработки темы

Решение обратной задачи отыскания частотной зависимости импеданса  $RLC$ -цепей, входящих в состав эквивалентной схемы, для общего случая неравенства и большего количества элементов  $RLC$ -цепей. На этой основе разработка программы, позволяющей проектировать более сложные функциональные узлы. Переход к интегральной технологии откроет новые возможности миниатюризации НПФ. Разработка опытных образцов неотражающих фильтров для применения в широкополосных измерительных приборах, аппаратуре связи и радиолокации. Перспективно проведение поисковых исследований для разработки технологии применения неотражающих устройств частотной селекции для снижения радиолокационной заметности и повышения помехоустойчивости многоканальной аппаратуры связи.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

#### Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Малютин, Н. Д. Неотражающие фильтры СВЧ (обзор) / Н. Д. Малютин, Т. Т. Чинь, Г. А. Малютин // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.4>.
2. Чинь, Т. Т. Неотражающий полосковый полосно-пропускающий фильтр нечетных гармоник / Т. Т. Чинь // Ural Radio Engineering Journal. – 2023. – Т. 7, № 3. – С. 250–265. – DOI 10.15826/urej.2023.7.3.002.

3. Синтез связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением / А. Г. Лоцилов, **Т. Т. Чинь**, Н. Д. Малютин, Г. А. Малютин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 7–16. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-25-1-7-16.

4. Расчетно-экспериментальный метод измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью / А. Г. Лоцилов, **Т. Т. Чинь**, Н. Д. Малютин, Г. А. Малютин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 19–27. – DOI 10.21293/1818-0442-2022-25-4-19-27.

5. Лоцилов, А. Г. Применение метода автономных блоков к математическому моделированию СВЧ-устройств, содержащих цепи распределено – сосредоточенного типа / А. Г. Лоцилов, Н. Д. Малютин, **Т. Т. Чинь** // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 61–67.

6. Малютин, Г. А. Алгоритм и программы анализа и синтеза устройств на основе распределенно-сосредоточенных цепей / Г. А. Малютин, **Т. Т. Чинь** // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 28–35.

7. Корректирующие звенья полосно-пропускающих фильтров на связанных линиях / Р. М. Шарабудинов, **Т. Т. Чинь**, Н. Д. Малютин, Т. А. Чепко, Г. А. Малютин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – № 3. – С. 175–181. – DOI 10.31114/2078-7707-2021-3-175-181.

8. Лоцилов, А. Г. Проблемы экстракции параметров полосковых линий / А. Г. Лоцилов, Г. А. Малютин, **Т. Т. Чинь** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 198–205. – DOI 10.31114/2078-7707-2022-4-198-205.

#### **Патенты на изобретение**

9. Патент № 2819096 Российская Федерация. Полосковый неотражающий полосно-пропускающий перестраиваемый фильтр : № 2023123738 : заявл. 14.09.2023 : опубл. 14.05.2024 / Лоцилов А. Г., **Чинь Т. Т.**, Малютин Г. А.

10. Патент № 2796206 Российская Федерация. Способ измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью : № 2022130074 : заявл. 21.11.2022 : опубл. 17.05.2023 / Малютин Н. Д., **Чинь Т. Т.**, Лоцилов А. Г., Малютин Г. А.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663377 Российская Федерация. Программа расчёта частотных характеристик полосно-пропускающих фильтров поглощающего типа :

№ 2021662557 : заявл. 12.08.2021 / Малютин Н. Д., Лошилов А. Г., **Чинь Т. Т.** – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2021.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610723 Российская Федерация. Программа для синтеза конструкций связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением: № 2022685674 : заявл. 22.12.2022 / Малютин Г. А., **Чинь Т. Т.**, Малютин Н. Д., Лошилов А. Г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2023.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666066 Российская Федерация. Программа экстракции частотной зависимости импеданса элементов, включённых в диагональные порты отрезка связанных линий : № 2023665203 : заявл. 21.07.2023 / Малютин Г. А., **Чинь Т. Т.**, Чепко Т. А., Санников Е. В. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.07.2023.

#### **Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science**

14. Expanding the horizon of additive printing technologies application in the technique of coupled strip lines with heterogeneous dielectric filling / A. G. Loschilov, **T. T. Thanh** [et al.] // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – P. 256–261. – DOI 10.1109/EDM55285.2022.9855103.

15. **Thanh, T. T.** Features of frequency response transformations of RLC circuits into opposite response when using them as a load of coupled strip lines with unequal waves phase velocities / **T. T. Thanh**, G. A. Malyutin, A. G. Loschilov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2022. – P. 1–4. – DOI 10.1109/SIBCON56144.2022.10002954.

16. **Thanh, T. T.** Reflectionless Stripline Filters / **T. T. Thanh**, A. G. Loschilov // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – IEEE, 2023. – P. 135–138. – DOI 10.1109/USBREIT58508.2023.10158882.

17. **Thanh, T. T.** Miniaturization of Microwave Devices by Using Three-Dimensional Strip Line Design / **T. T. Thanh**, G. A. Malyutin, D. V. Bilevich // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – P. 700–703. – DOI 10.1109/APEIE59731.2023.10347730.

#### **Доклады в трудах международных конференций**

18. Малютин, Н. Д. Решение обратных задач при синтезе связанных полосковых линий с неуравновешенной электромагнитной связью / Н. Д. Малютин, **Т. Т. Чинь**, А. Н. Малютина // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 196–197.

19. **Чинь, Т. Т.** К определению матричных параметров связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / **Т. Т. Чинь** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2021. – № 1-1. – С. 175–179.

20. **Чинь, Т. Т.** Метод измерения коэффициента распространения в связанных полосковых линиях с гетерогенным диэлектрическим заполнением / **Т. Т. Чинь** // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1-1. – С. 134–137.

21. Чепко, Т. А. Решение задачи синтеза частотной характеристики RLC-цепи фильтра неотражающего типа на основе связанных полосковых линий / Т. А. Чепко, **Т. Т. Чинь**, Г. А. Малютин // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – № 1-1. – С. 207–210.

22. Полосно-пропускающий фильтр СВЧ неотражающего типа на основе распределено-сосредоточенной цепи / А. Г. Лоцилов, **Т. Т. Чинь**, Т. А. Чепко, Г. А. Малютин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. (КрыМиКо). – 2023. – С. 89–90.

#### **Монография**

23. Распределенно-сосредоточенные цепи и полосковые СВЧ-устройства на их основе: моногр. / А. Г. Лоцилов, **Т. Т. Чинь** [и др.] ; под ред. проф. Н. Д. Малютина. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 151 с.