

На правах рукописи



Иванцов Илья Александрович

**Помехозащитные полосковые фильтры
в печатном и интегральном исполнениях
с магнитодиэлектрическим заполнением**

Специальность 2.2.13 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

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

Научный руководитель – **Жечев Евгений**,
кандидат технических наук,
доцент кафедры сверхвысокочастотной
и квантовой радиотехники ТУСУР

Официальные оппоненты – **Горбачев Анатолий Петрович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоприемных
и радиопередающих устройств
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Муравьев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор отделения автоматизации
и робототехники ФГАОУ ВО
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет»

Защита состоится 25 декабря 2026 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/wm4bnahl>

Автореферат разослан ____ ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор технических наук, доцент



Суровцев Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Кондуктивные сверхширокополосные (СШП) и узкополосные (УП) помехи большой амплитуды могут нарушить работу аппаратуры и повредить ее. Применяемые для защиты ограничители напряжения при коротких импульсах дополняют фильтрами. Примечательны модальные фильтры (МФ), раскладывающие исходный импульс на импульсы меньшей амплитуды за счет разности задержек мод. При неизменном поперечном сечении разность времени прихода мод увеличивается с длиной линии, поэтому длина МФ может достигать сотен миллиметров. Уменьшить длину МФ и дополнительно ослабить помеху позволяет применение магнитодиэлектрика с поглощающими свойствами, увеличивающего задержки и затухание мод. Это позволяет объединить модальное разложение импульса с рассеянием части его энергии. Такой подход применим к печатным и интегральным полосковым фильтрам, в которых поглотитель может быть размещен непосредственно на кристалле. Для расчета таких фильтров необходимы частотные зависимости комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей поглотителя. Их определяют по измеренным S -параметрам линии передачи с исследуемым образцом материала. Для этого может использоваться коаксиальная ТЕМ-камера. Однако исследуемый образец в ней находится между коническими переходами, влияние которых входит в измеренные S -параметры. Это влияние необходимо исключать с помощью деэмбеддинга. Рассмотренная процедура разработана для полосковой ячейки, для исследуемой коаксиальной ТЕМ-камеры требуется учесть ее переходные участки. Поэтому необходимо совершенствование определения комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей образца в такой камере с учетом конических переходов.

Степень разработанности темы. Воздействие мощных электромагнитных помех на аппаратуру исследовали W. A. Radasky, M. G. Bäckström и другие, а модальную фильтрацию СШП-помех развивает школа Т. Р. Газизова и А. М. Заболоцкого. Класс неотражающих фильтров с внутренними резисторами предложили M. A. Morgan и T. A. Boyd, а развили D. Psychogiou и X. Wu с соавторами. Неотражающие фильтры на связанных полосковых линиях и теорию этих линий с неоднородным заполнением, подбором которого управляют скоростями мод, развивает школа Н. Д. Малютина. Модальное разложение с поглотителем в печатных фильтрах исследовал Е. Жечев. Однако применение поглотителя в интегральных модальных фильтрах и влияние магнитодиэлектрика на погонные задержки, поля и затухание мод изучены мало. Метод NRW определения комплексных проницаемостей развили J. Baker-Jarvis с соавторами, а нейросетевой способ предложили T. Mosavirik с соавторами. Деэмбеддинг переходных участков измерительной ячейки улучшили G. W. Hanson с соавторами, а ТЕМ-камеры для измерения эффективности экранирования применяли P. F. Wilson, M. T. Ma и М. Е. Комнатнов. Для рассматриваемой коаксиальной ТЕМ-камеры (СТЕМ-камеры) с нерегулярным поперечным сечением требуется учесть влияние переходных участков при определении обеих комплексных относительных проницаемостей образца.

Цель работы – разработать полосковые фильтры с магнитодиэлектрическим заполнением в печатном и интегральном исполнениях для подавления кондуктивных импульсных СШП-помех. Для её достижения поставлены следующие **задачи**: усовершенствовать определение комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в СТЕМ-камере с нерегулярным поперечным сечением; исследовать влияние магнитодиэлектрических материалов на параметры мод связанных полосковых линий и разработать на этой основе печатные фильтры и фильтры для поверхностного монтажа; разработать и исследовать интегральные фильтры на подложках Al_2O_3 и GaAs, в том числе с нанесенным поглотителем, и сравнить характеристики разработанных фильтров с аналогами; разработать библиотеку моделей и топологических ячеек пассивных элементов для технологии на подложке Al_2O_3 , а также интегральные фильтры на Al_2O_3 и GaAs, исследовать их характеристики при наличии и отсутствии магнитодиэлектрического покрытия.

Научная новизна

1. Для коаксиальной ТЕМ-камеры с нерегулярным поперечным сечением предложены два алгоритма определения комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов, один из которых сочетает исключение влияния одинаковых согласованных переходов при центральном размещении исследуемого материала с методом Николсона-Росса-Вейра (NRW), а другой использует обученный по результатам электродинамического моделирования многослойный перцептрон с учетом частоты, комплексных S -параметров камеры, толщины и продольного смещения слоя исследуемого материала.

2. Предложен способ удаленной трассировки проводников в структурах модальных фильтров, отличающийся тем, что над его проводниками располагается связывающий их проводник так, что он имеет обеспечивающую модальное разложение электромагнитную связь с этими проводниками.

3. Предложен способ получения характеристики фильтра нижних частот поглощающего типа для четырехпроводной зеркально-симметричной полосковой линии в корпусе с магнитодиэлектрическим заполнением, отличающийся избирательным подавлением основных мод.

4. Разработаны фильтры нижних частот в интегральном исполнении, отличающиеся сочетанием модальной фильтрации с каскадным соединением секций различной длины либо с применением магнитодиэлектрического покрытия.

Теоретическая значимость

1. Представление СТЕМ-камеры каскадным соединением четырехполюсников двух переходов и участка с исследуемым материалом позволяет при центральном размещении исследуемого слоя и одинаковых согласованных переходах определять параметры участка с материалом по характеристикам пустой и заполненной камер для восстановления проницаемостей.

2. Получены расчетные зависимости минимальной разности погонных задержек основных мод и характеристического сопротивления четырехпроводной полосковой структуры от толщин подложки и магнитодиэлектрического слоя, ширины проводников и зазоров между ними, позволяющие выбирать парамет-

ры поперечного сечения с учетом временного разнесения импульсов разложения и согласования с сигнальным трактом.

Практическая значимость

1. Для технологии на подложке Al_2O_3 разработана библиотека пассивных элементов, включающая топологические ячейки, схемотехнические и электродинамические модели, по которым созданы и исследованы три варианта интегральных фильтров нижних частот.

2. Создан фильтр нижних частот с магнитодиэлектрическим заполнением в корпусе, обеспечивающий сверхширокую полосу подавления.

3. Разработаны одиночные и каскадно-соединенные модальные фильтры на подложках GaAs размером $3,4 \times 1,5 \text{ мм}^2$.

4. Усовершенствованы методики определения комплексных относительных проницаемостей материалов в СТЕМ-камере.

Положения, выносимые на защиту

1. В каскадной модели коаксиальной ТЕМ-камеры с центральным расположением слоя исследуемого материала и одинаковыми согласованными переходными участками определение комплексных относительных проницаемостей материала сводится к применению метода NRW к однородному участку коаксиальной линии после исключения влияния переходов по S -параметрам пустой и заполненной камер и модели воздушного участка с длиной исследуемого слоя.

2. Добавление связывающего проводника над магнитодиэлектрическим слоем двухпроводного микрополоскового модального фильтра способно увеличить максимальную разность погонных задержек мод с 0,3 до 9,6 нс/м при неизменном расстоянии между двумя сигнальными проводниками.

3. В расчетной модели четырехпроводного зеркально-симметричного фильтра длиной 100 мм с учетом потерь в материалах заполнение пространства между подложкой и опорными проводниками магнитодиэлектрическими слоями толщиной по 3 мм способно уменьшить пиковое напряжение отклика на трапецеидальный импульс длительностью 300 пс при э.д.с. источника 2 В в 3,3 раза по сравнению с вариантом без заполнения.

4. Каскадное соединение трех модальных фильтров в интегральном исполнении на подложке GaAs толщиной 100 мкм способно обеспечить вносимые потери не более 3 дБ в диапазоне от постоянного тока до 350 МГц и не менее 20 дБ в диапазоне от 2 до 20 ГГц, а также возвратные потери не менее 15 дБ в диапазоне от постоянного тока до 9 ГГц.

Методология и методы исследования. Работа основана на теории многопроводных линий передачи. Характеристики фильтров рассчитаны посредством квазистатического и полноволнового моделирования. Параметры материалов определены по измеренным S -параметрам СТЕМ-камеры после деэмбеддинга ее переходных участков, а многослойный перцептрон обучен и проверен на результатах полноволнового моделирования. Временные отклики фильтров измерены стробоскопическим осциллографом с генератором сверхкоротких импульсов и рассчитаны по S -параметрам, измеренным векторным анализатором цепей. Отклики оценены с помощью N -норм, а сходимость результатов – с помощью метода FSV.

Достоверность результатов. Достоверность результатов обеспечена применением апробированных методов квазистатического и электродинамического моделирования, измерением прототипов на векторном анализаторе цепей после калибровки и на зондовой станции, а также согласованностью расчетных и измеренных частотных характеристик по оценке методом FSV.

Использование результатов исследований. Результаты работы использованы в учебном процессе ТУСУР, при разработке и совершенствовании технологии проектирования пассивных СВЧ-устройств в ООО «МСТ», а также при выполнении ряда НИР и НИОКР.

Личный вклад. Автору принадлежат разработка конструкций фильтров и их конфигураций, моделирование, проведение экспериментов и разработка библиотеки пассивных элементов для технологии на подложке Al_2O_3 . Постановка задач и обсуждение результатов выполнены совместно с научным руководителем, часть результатов получена совместно с соавторами публикаций.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на международных конференциях SIBIRCON (Екатеринбург, 2022), EDM (Новосибирск, 2023 и 2026), APEIE (Новосибирск, 2023) и ЭССУ (Томск, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы (1 без соавторов): 1 статья в журнале, индексируемом Scopus (Q1), 3 статьи в журналах, индексируемых в WoS и Scopus, 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 5 докладов в трудах международных конференций, индексируемых в WoS и Scopus, 2 доклада в трудах конференций, индексируемых РИНЦ, 3 патента РФ на изобретения, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 2 свидетельства о регистрации топологии интегральной микросхемы и 2 свидетельства о регистрации базы данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка сокращений, списка использованных источников и 6 приложений. Список использованных источников содержит 192 наименования. Объем диссертации с приложениями составляет 170 с., в том числе 99 рисунков и 49 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор пассивных полосковых фильтров и методов измерения параметров магнитодиэлектрических материалов

В подразделах 1.1–1.5 рассмотрены кондуктивные СШП-помехи, пассивные полосковые фильтры отражающего и поглощающего типов, модальная фильтрация и применение магнитодиэлектриков в печатных и интегральных устройствах. Показано, что сочетание разложения импульса на составляющие меньшей амплитуды с поглощением энергии позволяет расширять полосу подавления и уменьшать габариты фильтров. В подразделе 1.6 сопоставлены методы определения комплексных относительных проницаемостей по отражённой и прошедшей волнам, деэмбеддинг и нейросетевые методы. Выявлено, что для СТЕМ-камеры необходимо учитывать переходные участки, а для интегральных фильтров – исследовать влияние нанесённого поглотителя. В подразделе 1.7 сформулированы цель и задачи работы.

2. Определение комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в СТЕМ-камере

В подразделе 2.1 разработан метод определения комплексных относительных диэлектрической $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ и магнитной $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ проницаемостей образца в коаксиальной ТЕМ-камере с нерегулярным поперечным сечением на основе многослойного перцептрона. Конические переходы учитываются непосредственно при полноволновом моделировании камеры, результаты которого служат обучающими данными. При формировании базы варьировались частота, проницаемости, толщина и продольное смещение образца. До фильтрации база содержала 9 009 000 записей. Исключены результаты, нарушающие принятые условия пассивности и взаимности, а также записи с резкими нефизическими изменениями частотных зависимостей.

Вход сети содержит девять признаков: частоту, действительные и мнимые части S_{11} , S_{21} и S_{22} , толщину и смещение образца. Пять скрытых слоёв включают по 128 нейронов с функцией активации ReLU, четыре выхода соответствуют ε_r' , ε_r'' , μ_r' и μ_r'' . Данные разделены на обучающую, тестовую и валидационную выборки в отношении 8:1:1; функция потерь дополнена штрафом за выход оценок за принятые границы. На тестовой выборке расчётных данных максимальное относительное отклонение восстановленных параметров не превысило 3,24% в диапазоне от 0,1 до 3 ГГц.

В подразделе 2.2 предложена процедура исключения влияния переходных участков, переносящая плоскости отсчёта к поверхностям образца. Камера представлена каскадом двух одинаковых переходов и центрального участка длиной L , заполненного воздухом либо исследуемым материалом (рисунок 2.1). По S -параметрам пустой и заполненной камер определяют матрицы передачи $A_{\text{пуст}}$ и $A_{\text{зап}}$. Матрицу воздушного участка $A_{\text{возд}}$ рассчитывают аналитически. При центральном размещении образца и одинаковых согласованных переходах их матрицу $A_{\text{бок}}$ находят из соотношения $A_{\text{пуст}} = A_{\text{бок}} A_{\text{возд}} A_{\text{бок}}$. Искомая матрица образца равна $A_{\text{обр}} = A_{\text{бок}}^{-1} A_{\text{зап}} A_{\text{бок}}^{-1}$.

После преобразования $A_{\text{обр}}$ в S -параметры проницаемости извлекают методом Николсона – Росса – Вейра (NRW), неитерационным методом NNIM

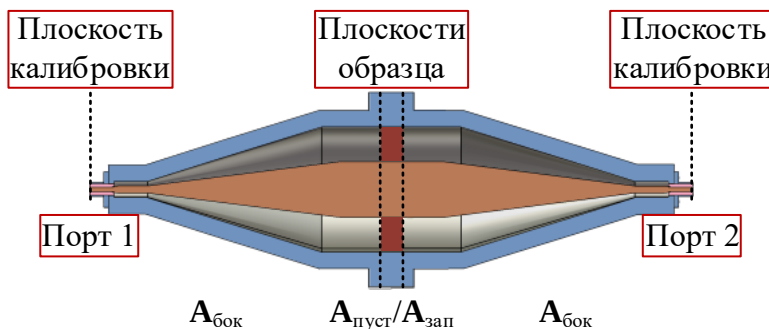


Рисунок 2.1 – Каскадная модель СТЕМ-камеры с воздушным участком или образцом длиной L

либо по адаптированной модели коаксиальной линии передачи (CTLM). Метод NRW восстанавливает обе комплексные проницаемости, NNIM применяется к немагнитным материалам, а CTLM позволяет вычислять ε_r' , ε_r'' и μ_r' по погонным $RLCG$ -параметрам.

В подразделе 2.3 методы проверены по расчётным S -параметрам камеры с образцами PTFE, FR4 и магнетодиэлектрика MS при толщине 1 мм. По данным моделирования среднеквадратичная ошибка (RMSE) ε_r' у перцептрона составила 0,0575; 0,158 и 0,00991, соответственно, а RMSE μ_r' не превысила

0,0321. Для PTFE наименьшую ошибку ϵ_r' дал деэмбеддинг с NRW – 0,0304. Перцептрон также проверен при смещении образца на 1 мм.

В подразделе 2.4 выполнена экспериментальная проверка алгоритмов с деэмбеддингом в диапазоне от 50 до 400 МГц (рисунок 2.2). Измерения выполнены ВАЦ Planar S50180 после двухпортовой SOLT-калибровки. Исследованы PTFE толщиной 1 и 2,15 мм и стеклотекстолит толщиной 3,5 мм. Для PTFE толщиной 2,15 мм алгоритм DE+NRW дал RMSE ϵ_r' и μ_r' 0,157 и 0,103, а для стеклотекстолита – 0,232 и 0,0468. У более тонкого образца PTFE ошибка ϵ_r' возросла до 0,314, что может быть связано с набегом фазы.

Тангенс угла потерь материалов определяется хуже действительной части проницаемости, где ошибка сопоставима с самими значениями тангенса либо превышает их. Перцептрон проверен только на результатах моделирования; применение к измерениям требует дообучения по образцам с известными параметрами. При изменении камеры необходимы новая база данных и обучение.

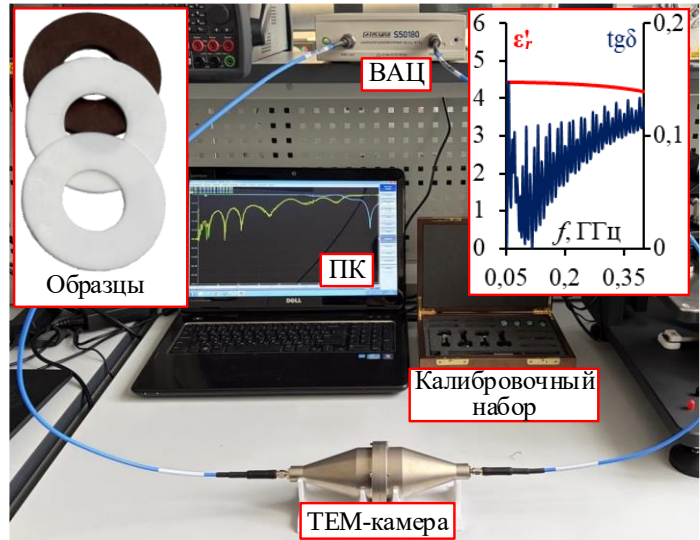


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка для анализа ϵ_r' и μ_r' образцов материалов

Таким образом в каскадной модели коаксиальной ТЕМ-камеры с центральным расположением слоя исследуемого материала и одинаковыми согласованными переходными участками определение комплексных относительных проницаемостей материала сводится к применению метода NRW к однородному участку коаксиальной линии после исключения влияния переходов по S-параметрам пустой и заполненной камер и модели воздушного участка с длиной исследуемого слоя.

3. Разработка фильтров поглощающего типа

для поверхностного монтажа и в печатном исполнении

В подразделах 3.1 и 3.2 изложены методы расчёта и измерения фильтров и исследован поглотитель ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л. Погонные задержки и распределения полей мод определены квазистатическим и полноволновым моделированием, эффективность подавления – по N -нормам откликов. Временные отклики прототипов рассчитаны по измеренным S -параметрам.

В подразделе 3.3 в пункте 3.3.1 исследован полосно-пропускающий фильтр с витками меандровой линии и поглотителем. **В пункте 3.3.2** предложен способ сохранения модального разложения при разнесении сигнальных проводников. В обычной связанной линии увеличение расстояния между ними ослабляет электромагнитную связь, сближает задержки мод и препятствует временному разделению импульсов. Для устранения этого ограничения над двумя сигнальными проводниками размещён связывающий проводник, отде-

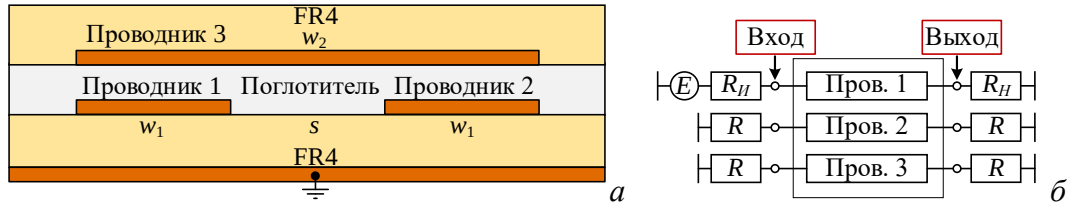


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение (а) и схема включения (б) МФ1 со связывающим проводником над магнитоэлектрическим слоем

Таблица 3.1 – Погонные задержки мод МФ1 (квазистатический расчёт)

Вариант МФ1	τ , нс/м	$\Delta\tau_{\text{макс}}$, нс/м
Без поглотителя и связывающего проводника	5,7403; 5,8103	0,07
С поглотителем, без связывающего проводника	10,697; 10,987	0,30
С поглотителем и связывающим проводником	9,5043; 16,136; 19,137	9,63

лённый от них магнитоэлектрическим слоем (рисунок 3.1). Он связан с обоими проводниками, формирует дополнительную основную моду и изменяет распределение поля в неоднородном заполнении.

В исследованном МФ1 расстояние между сигнальными проводниками составляет 10 мм, их ширина – 0,5 мм, ширина связывающего проводника – 11 мм. Толщина подложки FR4 равна 1,5 мм, магнитоэлектрического слоя – 1 мм. Геометрия сигнальных проводников при сравнении вариантов сохраняется. Раздельно рассмотрены линия без поглотителя и связывающего проводника, линия только с поглотителем и линия с поглотителем и связывающим проводником (таблица 3.1). Такое сравнение позволяет выделить вклад связывающего проводника при неизменном магнитоэлектрическом заполнении.

Заполнение поглотителем увеличивает задержки двух мод, но оставляет их близкими: максимальная разность составляет около 0,3 нс/м. После добавления связывающего проводника возникают три моды, а разность крайних задержек достигает 9,63 нс/м, то есть около 9,6 нс/м. Следовательно, результат получен при неизменном расстоянии между

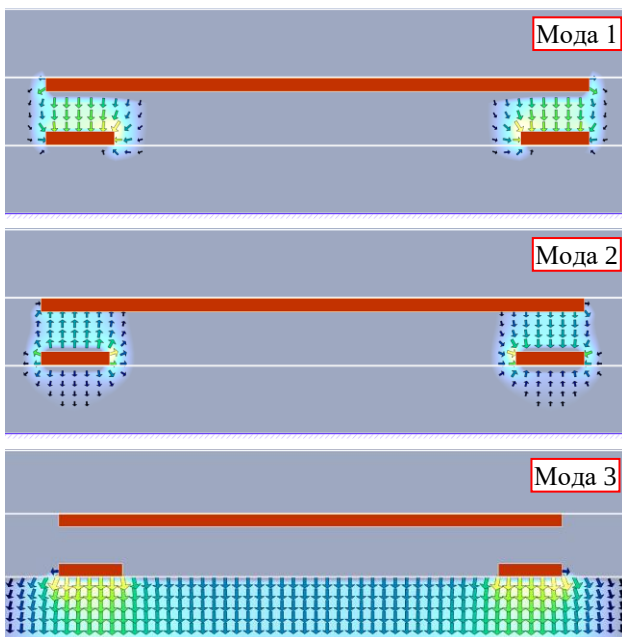


Рисунок 3.2 – Распределение поля E для трех мод в МФ1 (лог. масштаб)

сигнальными проводниками, а рост разности задержек обусловлен изменением модового состава и распределения полей, а не сближением проводников. Именно сравнение двух вариантов с поглотителем соответствует второму положению, выносимому на защиту.

Физическая причина различия задержек установлена по распределению электромагнитного поля (рисунок 3.2). У наиболее быстрой моды поле сосредоточено преимущественно в FR4, и её погонная задержка равна 9,5043 нс/м. Поля двух других мод сосредоточены в поглотителе; их задержки равны 16,136 и 19,137 нс/м. Неоди-

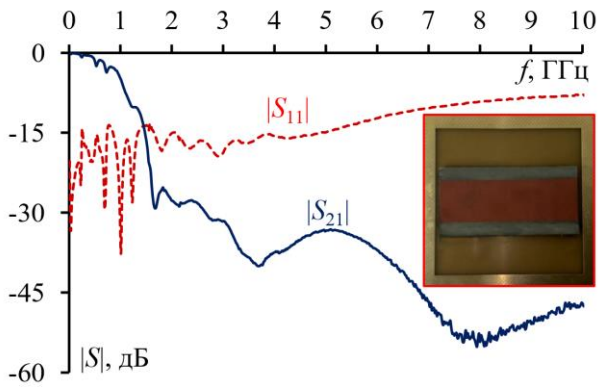


Рисунок 3.3 – Измеренные характеристики МФ1 с магнитодиэлектриком

наковое заполнение областей поля позволяет получить существенно различные скорости распространения. При достаточной длине линии это создаёт условия для разложения короткой помехи на разнесённые во времени составляющие меньшей амплитуды.

Способ также исследован в многопроводных МФ2 и МФ3 с двумя связывающими проводниками. Для МФ1 измеренная частота среза после модификации снизилась с 5,3

до 0,9 ГГц (рисунок 3.3), а пиковое напряжение отклика на гауссов импульс, рассчитанного по измеренным S -параметрам, уменьшилось с 0,722 до 0,062 В. Эти результаты дополняют модальный анализ; одновременно выявлен рост излучаемых эмиссий в диапазоне от 0,46 до 1,5 ГГц.

В пунктах 3.3.3 и 3.3.4 исследована возможность усилить подавление помех за счёт избирательного воздействия магнитодиэлектрика на моды четырёхпроводного зеркально-симметричного модального фильтра (З-С МФ). Сигнальные проводники расположены симметрично на обеих сторонах подложки FR4, а между подложкой и верхним и нижним опорными проводниками размещены два магнитодиэлектрических слоя (рисунок 3.4). Длина сигнальных трасс равна 100 мм, толщина подложки – 0,8 мм, каждого слоя поглотителя – 3 мм, ширина проводников – 0,4 мм, зазор между ними – 0,3 мм. В расчёте приняты $\epsilon_r=4,5$ и $\text{tg}\delta=0,018$ для подложки и $\epsilon_r=20,1$, $\mu_r=4$ и $\text{tg}\delta=0,1$ для поглотителя.

Четыре основные моды имеют погонные задержки 10,59; 13,46; 19,59 и 25,96 нс/м. Поле первой сосредоточено преимущественно в FR4, второй и третьей – в подложке и поглотителе, четвёртой – преимущественно в поглотителе (рисунок 3.5). Поэтому магнитодиэлектрическое заполнение одновре-



Рисунок 3.4 – Поперечное сечение (а) и схема включения (б) четырёхпроводного З-С МФ с магнитодиэлектрическими слоями

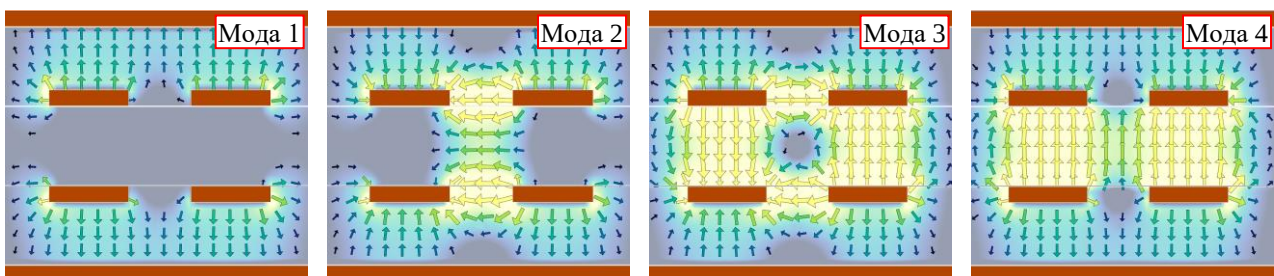


Рисунок 3.5 – Распределение поля E для четырех мод в З-С МФ (лог. масштаб)

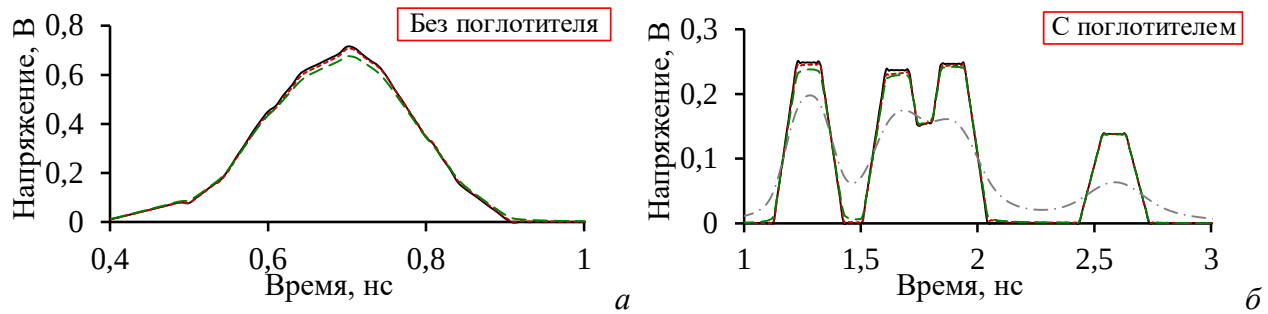


Рисунок 3.6 – Рассчитанные отклики без поглотителя (а) и с ним (б): без потерь (—), с потерями в проводниках (---), в проводниках и FR4 (—), во всех материалах (---)

Таблица 3.2 – Нормированное пиковое напряжение отклика

Учтённые потери	Без поглотителя	С поглотителем
Потери не учитываются	0,71	0,25
Все потери в материалах структуры	0,66	0,20

менно увеличивает разность задержек и избирательно ослабляет составляющие отклика. Сильнее всего потери в поглотителе действуют на самую медленную моду, поле которой сосредоточено преимущественно в магнитоэлектрике. Полученная разность крайних погонных задержек 15,37 нс/м обеспечивает разность задержек около 1,54 нс при длине 100 мм.

Для проверки механизма отдельно оценены модальное разложение и потери в проводниках, подложке и поглотителе. На вход подан трапецеидальный импульс длительностью 300 пс при э.д.с. источника 2 В. Без поглотителя на выходе наблюдается один основной импульс, а с ним – четыре составляющие, соответствующие основным модам (рисунок 3.6). Пиковые напряжения нормированы на пиковое напряжение входного воздействия; результаты сравнения приведены в таблице 3.2.

Без учёта потерь магнитоэлектрическое заполнение уменьшает нормированный пик с 0,71 до 0,25 за счёт разнесения модовых составляющих. С учётом потерь в материалах соответствующие значения равны 0,66 и 0,20. Их отношение $0,66/0,20=3,3$ определяет уменьшение пикового напряжения именно относительно фильтра без заполнения. Ослабление относительно входного воздействия составляет около 1,5 раза без поглотителя и 5 раз с ним. Эти два способа сравнения различаются: третье положение, выносимое на защиту, характеризует преимущество заполненной структуры перед незаполненной при одинаковом возбуждении и учёте потерь.

Таким образом, снижение пика обеспечивается сочетанием временного разложения и избирательного затухания мод. Потери в поглотителе сильнее всего уменьшают последний импульс, соответствующий самой медленной моде. Геометрические зависимости показали, что разность погонных задержек задаётся главным образом толщинами подложки и магнитоэлектрических слоёв, а характеристическое сопротивление – шириной проводников и зазорами. Это позволяет выбирать поперечное сечение с учётом разнесения импульсов и согласования с трактом.

Для изготовленного прототипа в латунном корпусе (рисунок 3.7) измеренная частота среза после заполнения поглотителем снизилась с 1,19

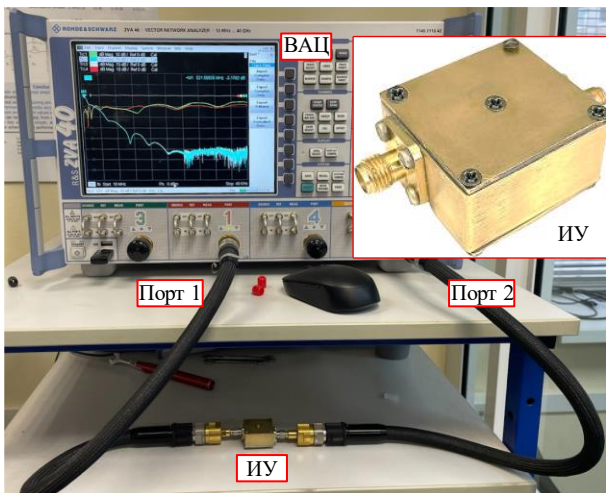


Рисунок 3.7 – Установка для измерения S-параметров прототипа 3-С МФ

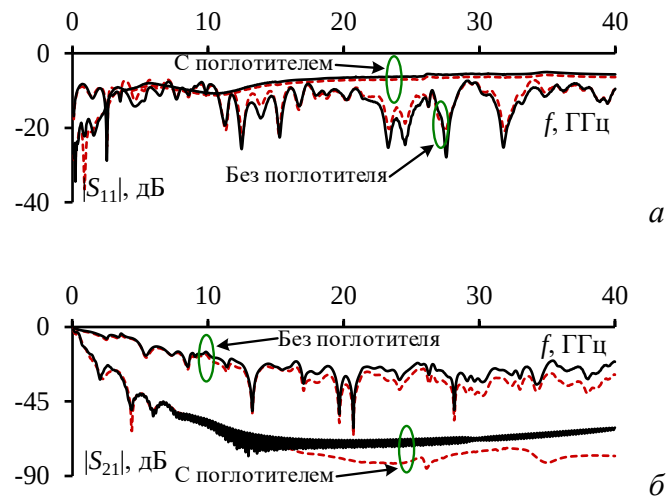


Рисунок 3.8 – Вычисленные (---) и измеренные (—) $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) прототипа

до 0,58 ГГц. В полосе пропускания вносимые потери не превышают 2,44 дБ, возвратные составляют не менее 13,5 дБ; в полосе заграждения до 40 ГГц вносимые потери не менее 40 дБ и побочные полосы отсутствуют (рисунок 3.8). Эти измерения подтверждают перспективность конструкции; количественное ослабление в 3,3 раза относится к рассмотренной выше расчётной модели.

Другие решения **подраздела 3.3** дополняют исследование связывающих проводников и избирательного поглощения мод. Последовательное включение двух витков меандровой линии с поглотителем в ППФ на шпильчных резонаторах увеличило минимальное измеренное ослабление от 3 до 20 ГГц с 6 до 19,6 дБ. Добавление T-резонаторов к МФ повысило подавление помех ценой снижения частоты среза и увеличения длины проводников. В **подразделе 3.4** предложены элементы поверхностного монтажа со связывающим проводником и поглотителем; для изготовленных плат получены открытые глазковые диаграммы при 500 Мбит/с. В **подразделе 3.5** выполнено сравнение с аналогами по частотным характеристикам и N-нормам, выявившее зависимость преимуществ от конструкции и вида воздействия.

Таким образом, добавление связывающего проводника над магнитодиэлектрическим слоем двухпроводного микрополоскового модального фильтра увеличивает максимальную разность погонных задержек мод с 0,3 до 9,6 нс/м при неизменном расстоянии между сигнальными проводниками. В расчётной модели четырёхпроводного зеркально-симметричного фильтра длиной 100 мм магнитодиэлектрические слои толщиной по 3 мм между подложкой и опорными проводниками уменьшают пиковое напряжение отклика на трапецеидальный импульс длительностью 300 пс при э.д.с. источника 2 В в 3,3 раза относительно варианта без заполнения с учётом потерь в материалах. Эти результаты обосновывают второе и третье положения, выносимые на защиту.

4. Фильтры поглощающего типа в интегральном исполнении

В **подразделе 4.1** воздействием СШП-импульсов на пассивный удвоитель частоты с диодами Шоттки на GaAs экспериментально показана необходимость защиты пассивных нелинейных интегральных устройств. В **подразделе 4.2** раз-

работаны библиотека пассивных элементов и три ФНЧ поглощающего типа на подложке Al_2O_3 с измеренными частотами среза 4,285; 1,877 и 2,3 ГГц.

Для реализации модальной фильтрации в интегральном исполнении по технологии GaAs pHEMT 0,5 мкм изготовлена партия из 25 фильтров LPF1 размером $3,4 \times 1,5 \text{ мм}^2$. Связанные линии свёрнуты в меандр, пассивная линия нагружена тонкоплёночными резисторами по 50 Ом (рисунок 4.1). Средняя измеренная частота среза по партии равна 480,8 МГц при стандартном отклонении 4,4 МГц. Возвратные потери исследованного образца до 12 ГГц составляют не менее 14,75 дБ, групповое время задержки в полосе пропускания изменяется от 328 до 415 пс. Эти результаты характеризуют исходную секцию для последующего каскадирования.

Отклики на выходе LPF1 на воздействие СКИ измерены на зондовой станции при помощи стробоскопического осциллографа в режимах малого (аттенюаторы до фильтра) и большого сигналов (аттенюаторы после фильтра). Для обоих режимов показано ослабление помехи.

У одиночного LPF1 выявлена побочная полоса пропускания с $|S_{21}|$ около –8 дБ на частоте 4,2 ГГц, ограничивающая широкополосное подавление. Измерения импульсного отклика подтвердили ослабление пикового напряжения, но в режиме большого сигнала зафиксировано выгорание резисторов. Поэтому дальнейшее расширение полосы подавления исследовано расчётом каскада секций. Для подавления побочной полосы предложено каскадное соединение трёх модальных фильтров LPF1, LPF2 и LPF3 на подложке GaAs толщиной 100 мкм. Их поперечное сечение сохраняется, а длины сигнальных трасс составляют 60,66; 34,66 и 22,75 мм соответственно. Изменение длины смещает частоты минимумов и побочных полос передачи. Секции выбраны так, чтобы полосы подавления одних перекрывали побочные полосы пропускания других. Благодаря этому каскад сохраняет низкочастотную полосу пропускания и устраняет побочную полосу одиночного фильтра без применения поглощающего покрытия.

S-параметры каждой секции рассчитаны методом FDTD, после чего по ним вычислены эквивалентные S-параметры каскада LPF4. Его расчётная топология занимает $6,8 \times 1,5 \text{ мм}^2$, то есть вдвое большую площадь, чем LPF1 (рису-

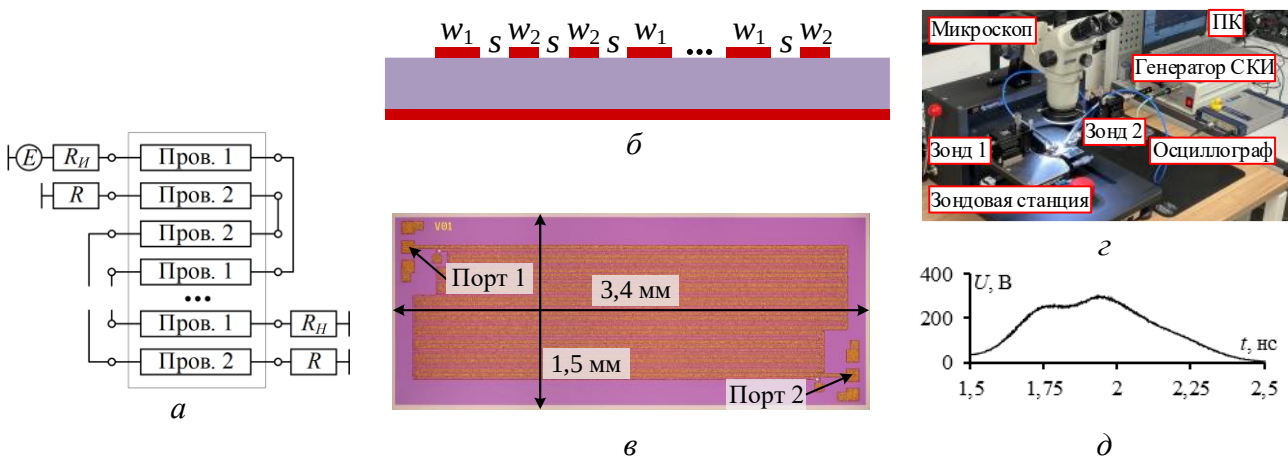


Рисунок 4.1 – Схема включения (а), поперечное сечение (б) и фотография кристалла (в), измерительная установка (г) и формы напряжения (д) модального фильтра LPF1

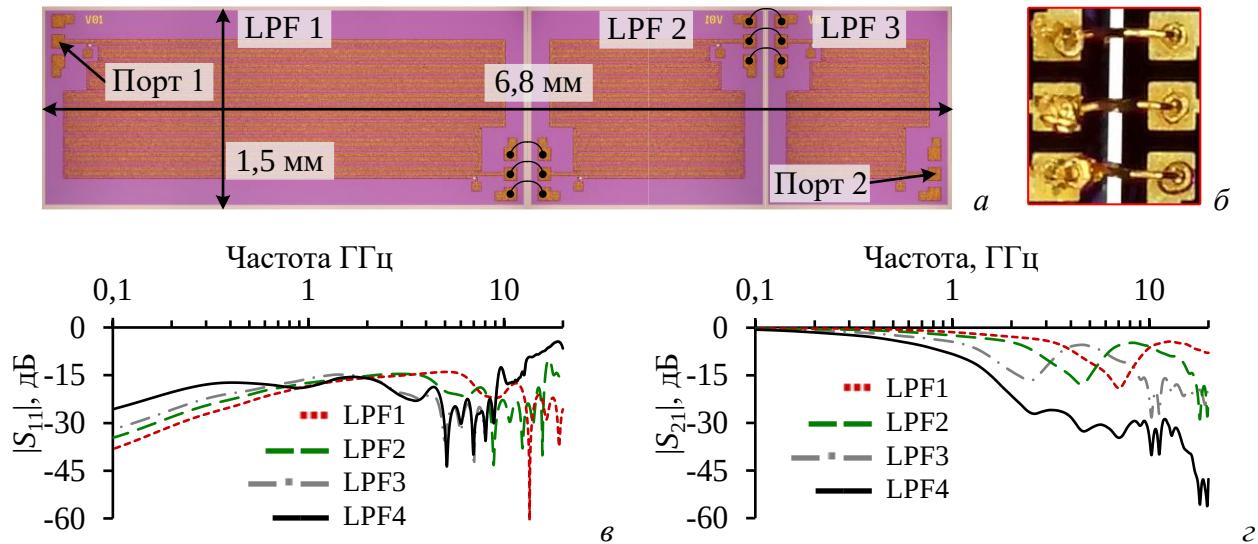


Рисунок 4.2 – Топология каскада LPF4 (а), разварка (б) и рассчитанные $|S_{11}|$ (в) и $|S_{21}|$ (г)

нок 4.2). Сопоставление характеристик отдельных секций и каскада показывает взаимное перекрытие побочных полос пропускания полосами подавления.

По расчёту каскад обеспечивает вносимые потери не более 3 дБ от постоянного тока до 350 МГц и не менее 20 дБ от 2 до 20 ГГц. Возвратные потери составляют не менее 15 дБ от постоянного тока до 9 ГГц. Следовательно, широкополосное подавление сочетается с согласованием входа и передач низкочастотного полезного сигнала. Эти предельные значения в заданных диапазонах характеризуют результат, сформулированный в четвёртом положении, выносимом на защиту.

Средние потери, приведённые в таблице 4.1, дополняют оценку по предельным значениям. Для каждой структуры полоса пропускания принята от постоянного тока до её частоты среза f_c , полоса заграждения – от $1,5f_c$ до 20 ГГц. При переходе от LPF1 к каскаду средние вносимые потери в полосе заграждения возрастают с 15,78 до 33,74 дБ, тогда как в полосе пропускания – с 1,54 до 1,67 дБ. Средние возвратные потери в полосе пропускания составляют 21,1 дБ против 23,62 дБ у LPF1. Расчётная частота среза каскада равна 365 МГц. Результат показывает возможность расширения полосы подавления при небольшом увеличении потерь полезного сигнала и удвоении площади топологии; каскад экспериментально не проверен.

В подразделе 4.3 рассмотрен другой способ изменения характеристик интегральных фильтров – нанесение поглотителя на разваренные кристаллы. Покрытие снизило частоту среза ФНЧ2 на Al_2O_3 с 1,77 до 0,48 ГГц и LPF1 на GaAs до 279 МГц, увеличив подавление в полосе заграждения. При интерпретации измерений учитывается влияние монтажа кристаллов. В подразделе 4.4 показано, что разработанные филь-

Таблица 4.1 – Частоты среза и средние потери (FDTD)

Ст-ра	f_c , ГГц	IL_{cp} (DC- f_c), дБ	IL_{cp} ($1,5f_c$ - max), дБ	RL_{cp} ($1,5f_c$ - max), дБ
LPF1	0,606	1,54	15,78	15,99
LPF2	1,19	1,54	11,39	20,84
LPF3	1,95	1,55	8,14	21,78
LPF4	0,365	1,67	33,74	16,00

тры имеют меньший разброс группового времени задержки и более высокие возвратные потери в полосе заграждения, чем сопоставленные аналоги, но уступают боль-

шинству из них по вносимым потерям в полосе пропускания. Эти результаты дополняют исследование каскадного соединения.

Таким образом, каскадное соединение трёх модальных фильтров в интегральном исполнении на подложке GaAs толщиной 100 мкм способно обеспечить вносимые потери не более 3 дБ в диапазоне от постоянного тока до 350 МГц и не менее 20 дБ в диапазоне от 2 до 20 ГГц, а также возвратные потери не менее 15 дБ в диапазоне от постоянного тока до 9 ГГц. Эти характеристики получены расчётом каскада секций различной длины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена задача извлечения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов материалов в коаксиальной ТЕМ-камере, разработаны и исследованы топологии фильтров поглощающего типа в печатном и интегральном исполнениях с магнитодиэлектрическими материалами.

Результаты исследования

1. Создана база данных S -параметров в коаксиальной ТЕМ-камере образцов материалов по результатам полноволнового моделирования, включающая более 9 миллионов записей, и выполнена её фильтрация для удаления численных артефактов.

2. Разработана и обучена модель многослойного перцептрона, восстанавливающая комплексные относительные диэлектрическую и магнитную проницаемости по S -параметрам с максимальным относительным отклонением 3,24% на тестовых данных моделирования.

3. Предложена процедура исключения влияния переходов для переноса плоскостей отсчета к поверхностям исследуемого слоя материала в коаксиальной ТЕМ-камере с нерегулярным поперечным сечением, что позволяет корректно применять классические алгоритмы NRW и NNIM.

4. Адаптированная модель коаксиальной линии передачи используется в процедуре исключения влияния переходов для переноса плоскостей калибровки к плоскостям образца в коаксиальной ТЕМ-камере. Эта же модель позволяет вычислить ϵ' , ϵ'' и μ' из $RLCG$ -параметров, полученных из матрицы рассеяния образца уже после переноса плоскостей калибровки к плоскостям образца.

5. По результатам измерений в коаксиальной ТЕМ-камере образцов PTFE и стеклотекстолита аналитически вычислены частотные зависимости их относительных проницаемостей.

6. Показано, что процедура исключения влияния переходов вместе с применением метода NRW или адаптированной модели коаксиальной линии передачи применима к данным в коаксиальной ТЕМ-камере, однако их погрешность существенно выше, чем при моделировании, что может быть связано с влиянием неучтенных в модели факторов (неидеальный контакт образца с камерой, сдвиг образца вдоль камеры).

7. Экспериментально исследовано воздействие СШП-помех в течение 10 с на характеристики пассивного удвоителя частоты. Показано снижение коэффициента преобразования, рост нежелательных гармоник и ухудшение со-

гласования. В рассмотренной серии воздействий с ростом амплитуды напряжения возрастало отклонение выходной мощности от исходной.

8. Исследован широкополосный СШП-поглотитель. Установлено его влияние на перекрестные помехи и целостность сигналов в связанных линиях передачи: изменение амплитуды и длительности импульсов, рост фазового отклонения и изменение отношения сигнал-шум на глазковых диаграммах при заданных параметрах битовой последовательности.

9. Разработаны и исследованы помехозащитные фильтры в печатном и интегральном исполнении, а также фильтры поверхностного монтажа: ППФ на шпилечных резонаторах с модальным разложением и поглотителем; ФНЧ на основе модальной фильтрации со связывающими проводниками; ФНЧ с T -резонаторами; SMD-фильтры; интегральные фильтры на подложках Al_2O_3 и GaAs. Для исследованных вариантов оценены подавление побочных полос, ослабление помех, согласование и передача полезного сигнала. Достигнутые эффекты и ограничения зависят от конструкции и условий сравнения.

10. Разработана библиотека элементов для технологии на Al_2O_3 , выполнены электродинамическое моделирование и зондовые измерения исследованных элементов и фильтров. Проведён анализ N -норм, FSV, глазковых диаграмм и статистическая обработка результатов.

Таким образом, разработаны и исследованы помехозащитные полосковые фильтры в печатном и интегральном исполнениях. Для определения параметров материалов исследованы методы обработки S -параметров СТЕМ-камеры. Метод на основе многослойного перцептрона проверен на расчетных данных. Полученные результаты предназначены для использования при проектировании устройств с модальной фильтрацией, в первую очередь при поиске путей уменьшения их габаритов. Исследованные фильтры предназначены для ослабления СШП и УП помех. Предложен ряд конструкций и решений для проектирования таких фильтров, и разработана библиотека для их проектирования в интегральном исполнении.

Рекомендации

1. Разработанную процедуру исключения влияния переходов и алгоритмы извлечения (NRW, NNIM, адаптированная модель коаксиальной линии передачи) рекомендуется использовать при обработке экспериментальных данных.

2. Полученные для фильтров результаты целесообразно использовать при проектировании помехозащитных фильтров в печатном, SMD и интегральном исполнениях.

3. Рекомендуется сочетать модальную фильтрацию с электромагнитными поглотителями для подавления побочных полос пропускания и расширения полосы заграждения.

4. Используемые методы анализа (N -нормы, FSV, глазковые диаграммы) рекомендуются для комплексной оценки эффективности устройств. Библиотека элементов Al_2O_3 предназначена для использования при проектировании интегральных фильтров.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Для определения электрофизических параметров материалов перспективна разработка калибровочного стенда, в котором роль эталонов выполняют материалы с независимо определенными параметрами и известной неопределенностью (сапфир, кварц). Это полезно для проверки и адаптации нейросетевого метода к данным ВАЦ.

2. Разработка алгоритмов компенсации воздушных зазоров по измерениям нескольких образцов разной толщины для создания программного обеспечения для инженерного расчета относительных проницаемостей в реальном времени, что полезно для дальнейшего уменьшения габаритов устройств с модальной фильтрацией.

3. Оптимизация геометрических параметров фильтров поглощающего типа с помощью генетических алгоритмов для расширения частотного диапазона, создания каскадных и перестраиваемых устройств, а также переноса конструкций на другие технологические процессы, в том числе на основе GaN, с целью совершенствования защиты от электромагнитных помех.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК (3)

1. **Иванцов И.А.** Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 124–133.

2. Жечев Е.С., **Иванцов И.А.**, Козинец А.С. Анализ и систематизация способов трассировки печатных проводников на основе симметричных структур с модальной фильтрацией // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 24–36.

3. Экспериментальное подтверждение перспективности применения структур со ступенчатым импедансом для подавления сверхширокополосных помех / П.В. Микола, **И.А. Иванцов**, Р.С. Суворцев, Е.С. Жечев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2026. – Т. 31, № 3. – С. 49–60.

Статья в журнале из перечня ВАК по смежной специальности (1)

4. Полосно-пропускающий фильтр на основе микрополосковых резонансных структур, покрытых магнитодиэлектрическим поглотителем / Ю.В. Калашников, **И.А. Иванцов**, Е.С. Жечев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 2. – С. 1–18.

Публикации в журналах, индексируемых

в международных базах данных Web of Science и/или Scopus (4)

5. Zhechev Y.S., Kokolov A.A., **Ivantsov I.A.** Impact of Ultra-Wideband Electromagnetic Interference on the Performance of a Passive Frequency Doubler // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 195145–195151.

6. Protection against UWB pulses in hybrid quasi-reflectionless structures based on coupled lines and t-Resonators / **I.A. Ivantsov**, S.V. Vlasov, Y. S. Zhechev [et al.] // Russian Physics Journal. – 2026. – P. 1–11.

7. Zhechev Y.S., **Ivantsov I.A.**, Zabolotsky A. M. Multicriteria optimization of a four-layer reflection-symmetric modal filter parameters for ESD protection // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862. – No. 1. – Art. 012023.

8. Using Reflections in a Meander Line Turn of Two Segments for Suppressing UWB Excitations / R.S.Surovtsev, P.V. Mikola, S. Karri, **Ivantsov I.A.** // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2024. – Vol. 13. – No. 1. – P. 51–60.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus (5)

9. Extraction of Complex Permittivity and Permeability in a Coaxial TEM-Cell Using a Multilayer Perceptron / **I.A. Ivantsov**, N.V. Pavlov, Y.V. Kalashnikov [et al.] // 2026 IEEE 27th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2026. – P. 1–5.

10. **Ivantsov I.A.**, Kalashnikov Y.V., Zhechev Y.S. The Influence of Electromagnetic Absorber on Crosstalk and Signal Integrity of Coupled Transmission Lines // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2023. – P. 710–713.

11. **Ivantsov I.A.**, Mikola P.V., Surovtsev R.S. Reflections in a Meander Line Turn of Two Segments as a Resource for Suppressing UWB Excitations // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2023. – P. 410–413.

12. **Ivantsov I.A.**, Zhechev Y.S. Four-Layer Reflection-Symmetric Structure with Electromagnetic Absorber // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2022. – P. 140–143.

13. **Ivantsov I.A.**, Kalashnikov Y.V., Zhechev Y.S. Resonators in Modal Filter as a Resource for Improving its Characteristics // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2023. – P. 550–554.

Доклады в трудах отечественных конференций (2)

14. **Иванцов И.А.**, Жечев Е.С. Многокритериальная оптимизация параметров четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра для защиты от электростатического разряда // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск : ТУСУР, 2020. – № 1-1. – С. 282–285.

15. **Иванцов И.А.**, Черникова Е.Б., Белоусов А.О. Оптимизация параметров 8-проводного зеркально-симметричного модального фильтра квадратной конфигурации // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск : ТУСУР, 2020. – № 1-1. – С. 262–265.

Патенты на изобретение (3)

16. Патент на изобретение № 2801688 С1 Российская Федерация. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием / Т.Р. Газизов, **И.А. Иванцов**. – Заявка № 2022131709; заявл. 06.12.2022; опубл. 14.08.2023.

17. Патент на изобретение № 2801830 С1 Российская Федерация. Способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным модальным резервированием / Т.Р. Газизов, **И.А. Иванцов**. – Заявка № 2022132011; заявл. 08.12.2022; опубл. 16.08.2023.

18. Патент на изобретение № 2813609 С1 Российская Федерация. Усовершенствованная микрополосковая линия задержки из двух отрезков, защищающая от сверхкоротких импульсов / П. Микола, Р.С. Суровцев, **И.А. Иванцов**. – Заявка № 2023107076; заявл. 24.03.2023; опубл. 13.02.2024.

Программы для ЭВМ (2)

19. Анализ многослойных зеркально-симметричных структур: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616144 / Е. Жечев, А.С. Козинец, **И.А. Иванцов** [и др.]. – Заявка № 2022615113; поступила 29.03.2022; зарег. 05.04.2022.

20. Программный код для аналитического вычисления характеристик симметричной связанной микрополосковой линии передачи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025696921 / М.С. Мурманский, **И.А. Иванцов**, Е. Жечев [и др.]. – Заявка № 2025696281; поступила 11.12.2025; зарег. 22.12.2025.

Свидетельства о регистрации топологий интегральных микросхем (2)

21. Микросхема фильтра MF001: свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2024630108 / Е. Жечев, **И.А. Иванцов**. – Заявка № 2024630105; поступила 24.06.2024; зарег. 27.06.2024.

22. Микросхема квази-неотражающего ФНЧ: свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2025630297 / **И.А. Иванцов**, Е. Жечев, Н. Д. Малютин [и др.]. – Заявка № 2025630286; поступила 11.09.2025; зарег. 16.09.2025.

Свидетельства о регистрации баз данных (2)

23. Средства проектирования СВЧ ЭКБ на основе GaN: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025624891 / А.А. Коколов, А.В. Помазанов, **И.А. Иванцов** [и др.]. – Заявка № 2025623253; поступила 26.08.2025; зарег. 05.11.2025.

24. База данных типовых структур с однократным модальным резервированием: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620068 / А.А. Квасников, Т.Р. Газизов, А.В. Медведев, А.О. Белоусов, Х.А. Ф. Алхадж, **И.А. Иванцов**, Е.Б. Черникова, М.А. Самойличенко, И. Сагиева. – Заявка № 2023624611; поступила 06.12.2023; зарег. 09.01.2024; опубл. 10.01.2024.