

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ЛЕТАВИН Денис Александрович

**МЕТОДИКА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ШЛЕЙФНЫХ МОСТОВ УВЧ
ДИАПАЗОНА С УМЕНЬШЕННЫМИ ГАБАРИТНЫМИ РАЗМЕРАМИ**

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
ШАБУНИН Сергей Николаевич

Официальные оппоненты:

ДАРОВСКИХ Станислав Никифорович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии»;

МАЛЮТИН Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск, главный научный сотрудник НИИ систем электросвязи;

ЩЕТИНИН Никита Николаевич, кандидат технических наук, ФКОУ ВО «Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний», г. Воронеж, старший преподаватель кафедры основ радиотехники и электроники

Защита состоится «01» октября 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.10.27 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2454>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кирилл Александрович Игнатков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Микрополосковый направленный ответвитель – базовый элемент фазовращателей, сумматоров, смесителей, диаграммообразующих схем антенных решеток и других радиотехнических средств. Направленный ответвитель, распределяющий подводимую к нему мощность поровну между двумя его выходами с разностью фаз 90° , называется шлейфным квадратурным мостом (ШКМ). Кроме ШКМ задачу деления входной мощности решают синфазные делители мощности (мосты Уилкинсона), синфазно-противофазные мосты (СПМ), ответвители на связанных линиях, ответвители Ланге, планарные Т-образные делители, направленные ответвители с трансформаторами, резистивные тройники и др. В микрополосковом исполнении ШКМ и синфазно-противофазные мосты занимают наибольшую площадь на подложке среди перечисленных устройств при прочих равных условиях. Поскольку подходы в миниатюризации СПМ и ШКМ схожи, а последние в технике используются чаще, то именно им и были посвящены исследования в диссертационной работе.

Значительный вклад в разработку и исследование направленных ответвителей внесли Зелях Э.В., Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Гвоздев В.И., Нефедов Е.И., Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А., Печурин В.А., Петров А.С., Мунина И.В., Вендик И.Б., Капитанова П.В., Холодняк Д.В., Щетинин Н.Н., Останков А.В., Кац Б.М., Мещанов В.П., Карамзина В.В., Альтман Дж.Л., Малорацкий Л.Г., и другие.

Классическая конструкция ШКМ (при волновых сопротивлениях подводящих линий $\rho_0 = 50$ Ом) включает в себя две пары четвертьволновых отрезков линии передачи L_1 , L_2 , образующих прямоугольник, одна из которых имеет сопротивление $\rho_1 = 50$ Ом, а другая – $\rho_2 = 35$ Ом. Схемно-конструктивная реализация микрополоскового ШКМ, показанная на рисунке 1, далее по тексту будет называться традиционной конструкцией.

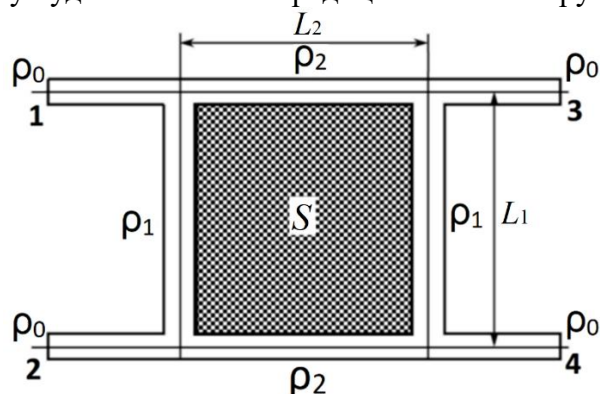


Рисунок 1 –Топология стандартного двухшлейфного моста

Размеры ШКМ связаны с длиной линий передачи, на основе которых они изготовлены. Поэтому в УВЧ диапазоне, в котором работают такие системы как GSM, Wi-Fi, 3G, 4G, GPS, ГЛОНАСС и другие, мосты обладают значительными размерами, при том, что большая площадь внутри моста, заключенная между четвертьволновыми отрезками, остается неиспользуемой. Поэтому УВЧ диапазон был выбран для конструирования малогабаритных ШКМ.

В литературе представлены разнообразные методы уменьшения габаритных размеров шлейфных квадратурных мостов. Применение этих методов, как правило, сопровождается ухудшением частотных характеристик ШКМ: сужением полосы рабочих частот; отклонением коэффициентов передачи и разности фаз выходных сигналов от номинальных значений; увеличением вносимых потерь; уменьшением уровня развязки и увеличением коэффициентов отражения от входов. Также большинство авторов опубликованных работ мало внимания уделяют описанию методики синтеза топологии компактных мостов, а останавливаются лишь

на обобщенных широко известных расчетных выражениях, не раскрывая перечень выполненных этапов проектирования.

Сказанное выше свидетельствует об **актуальности исследования**, направленного на разработку методики проектирования компактных мостов и устройств на её основе.

Объектом исследования диссертации являются квадратурные мосты.

Предметом исследования – модели квадратурных мостов, методы их анализа и расчета, методики и алгоритмы их проектирования.

Цель и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является разработка и исследование методики и алгоритмов расчета шлейфных мостов УВЧ диапазона с уменьшенными относительно традиционных конструкций габаритными размерами.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих схемно-топологических методик уменьшения габаритных размеров шлейфных мостов для подтверждения актуальности работы.
2. Исследовать возможности использования Т- и П-образных звеньев эквивалентных фильтров, применяемых в качестве базовых сегментов шлейфных мостов, выполняемых на сосредоточенных и/или распределённых элементах, для анализа и синтеза ШКМ.
3. Разработать и исследовать новые схемно-конструктивные варианты построения ШКМ, являющиеся компромиссным решением между уменьшением их размеров и ухудшением частотных характеристик, мостов с разными значениями волновых сопротивлений подводящих линий, ШКМ с возможностью переключения режимов направленности с сонаправленного на противонаправленный, и наоборот.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана методика структурного синтеза шлейфных мостов с уменьшенными габаритными размерами относительно традиционных конструкций, основанная на применении Т-образных звеньев эквивалентных фильтров. Она отличается от существующих методик построения компактных мостов наличием компромиссного решения между уменьшением габаритных размеров устройства и ухудшением его частотных характеристик при условии замены лишь двух идентичных отрезков МПЛ на Т-образные звенья.
2. Впервые исследованы допустимые пределы миниатюризации ШКМ. Показано, что Т-образные звенья с индуктивными элементами в виде высокоомных отрезков и емкостными элементами в виде низкоомных отрезков позволяют уменьшить площадь микрополосковых устройств на ~80–90% с уменьшением полосы развязки и согласования не более, чем на ~30–40%. Показано, что наибольшую степень миниатюризации удастся достичь при использовании тонких подложек с небольшой диэлектрической проницаемостью.
3. Разработано новое схемно-конструктивное решение по реализации шлейфного квадратурного моста с коммутируемым типом направленности, которое отличается от известных тем, что вместо исключительно фильтров нижних частот в состав моста добавлен фильтр верхних частот.
4. Разработаны компактные мосты, отличающиеся от существующих аналогов тем, что для изменения волновых сопротивлений подводящих линий устройства вместо традиционных четвертьволновых отрезков используются Т-образные звенья фильтров с разными сопротивлениями входов/выходов.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в том, что заявляемая работа способствует обобщению имеющихся наработок автора в области миниатюризации ШКМ на основе применения Т-образных фильтров СВЧ.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что на основе предложенной методики разработаны оригинальные устройства, обладающие приемлемыми частотными свойствами и расширенными функциональными возможностями относительно традиционной конструкции.

Методология и методы диссертационного исследования

При исследовании миниатюрных микрополосковых мостов на основе Т- и П-образных звеньев применялись теория электрических цепей и теория матриц, которые позволили получить аналитические выражения для определения эквивалентных индуктивностей и емкостей звеньев.

Корректность представленного теоретического подхода подтверждена результатами численного моделирования в системах автоматизированного проектирования ANSYS HFSS и Cadence AWR Design Environment, а также данными натурных экспериментов, полученных с помощью векторного анализатора цепей ZVA24 компании Rohde&Schwarz.

Положения, выносимые на защиту

1. Замена четвертьволновых отрезков МПЛ двухшлейфных мостов на эквивалентные Т-образные звенья фильтров с аналогичными характеристиками обеспечивает реализацию устройства с уменьшенными габаритными размерами по сравнению с традиционными конструкциями.

2. Частотные характеристики ШКМ ухудшаются с повышением степени миниатюризации его конструкции. При этом минимальное ухудшение достигается путем замены лишь двух идентичных четвертьволновых отрезков МПЛ моста на Т-образные звенья фильтров с эквивалентными характеристиками.

3. Для реализации ШКМ с коммутируемым типом направленности в одном диапазоне частот необходимо заменить два идентичных четвертьволновых отрезка МПЛ устройства таким образом, чтобы вместо одного отрезка был установлен фильтр нижних частот, а вместо второго отрезка – фильтры нижних и верхних частот, переключение между которыми осуществляется по принципу работы фазовращателей коммутируемой линии с помощью $p-i-n$ -диодов. При этом переключение фильтра нижних частот на фильтр верхних частот позволяет изменить тип направленности моста с сонаправленного на противонаправленный.

4. Применение Т-образных звеньев с разными сопротивлениями входа/выхода вместо четвертьволновых отрезков МПЛ моста позволяет реализовать устройства с разными волновыми сопротивлениями подводящих линий. При этом каждая подводящая линия ШКМ может обладать своим волновым сопротивлением.

Достоверность защищаемых положений и результатов диссертационной работы основывается на применении общеизвестных методов аналитического и численного анализа, проверенных систем схемотехнического и электродинамического моделирования и современного измерительного оборудования. Полученные результаты апробированы на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

Апробация

Основные результаты научной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 25-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии", КрыМиКо'2015 (сентябрь 2015, Севастополь); 2015 Loughborough Antennas and Propagation Conference, LAPC 2015 (ноябрь 2015, Лафборо, Великобритания); 2015 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems, COMCAS (ноябрь 2015, Тель-Авив, Израиль); 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2016 (март 2016, Давос, Швейцария); 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy, ACES 2017 (март 2017, Флоренция, Италия); 2016 Loughborough Antennas and Propagation Conference, LAPC 2016 (ноябрь 2016, Лафборо, Великобритания); 2016 24th Telecommunication Forum, TELFOR (ноябрь 2016, Белград, Сербия); Conference Proceedings – 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016 (сентябрь 2016, Саратов, Россия); 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017 (март 2017, Париж, Франция); 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems, COMCAS (ноябрь 2017, Тель-Авив, Израиль); 2017 24th Telecommunication Forum, TELFOR (ноябрь 2017, Белград, Сербия); 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE

(октябрь 2018, Новосибирск, Россия); 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2018 (март 2018, Лондон, Великобритания).

Реализация и внедрение результатов исследования

Результаты диссертации получены при выполнении научно-исследовательских работ, выполненных в УрФУ при участии автора за период 2016–2020 гг. Описанные в работе конструкции мостов могут быть использованы при разработке ВЧ трактов телекоммуникационных и радиолокационных систем.

Полученные результаты используются в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» при преподавании дисциплин «Микроволновые устройства и антенные системы» и «Проектирование высокочастотных средств» для магистрантов по направлению подготовки 11.04.01 – Радиотехника, что подтверждается актом внедрения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные в диссертации научные результаты соответствуют пунктам 2 и 9 из перечня областей исследований для специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии согласно её паспорту:

пункту 2 – Исследование характеристик антенн и СВЧ устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.;

пункту 9 – Разработка методов проектирования и оптимизации антенных систем и СВЧ устройств широкого применения.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 36 научных работ. Основные теоретические и практические результаты научной работы опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 2 статьи в международных журналах, индексируемых в базах научного цитирования WoS и Scopus. Получено 13 патентов РФ на полезную модель.

Личный вклад автора состоит в разработке методики проектирования компактных мостов с помощью фильтров верхних и/или нижних частот, реализованных на комбинации сосредоточенных и/или распределенных элементов в виде Т-образных звеньев; в проведении электродинамического моделирования исследуемых устройств в системах автоматизированного проектирования; разработке и экспериментальном исследовании образцов компактных мостов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 127 страницах машинописного текста. Работа содержит 97 рисунков и 11 таблиц. Список использованных источников насчитывает 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ известных методик проектирования компактных устройств и конструкций ШКМ на их основе. Компактные мосты получены, в основном, заменой двух пар четвертьволновых отрезков фильтрами нижних частот, реализованными на комбинации сосредоточенных и/или распределенных элементов в виде Т- и/или П-образных звеньев. Значения волновых сопротивлений цепей с распределёнными параметрами, необходимых для реализации планарных компактных мостов, выбираются исходя из возможности реализовать их на практике.

Отрезок МПЛ с высоким волновым сопротивлением имеет малую ширину линии и в цепи эквивалентен индуктивности, а отрезки МПЛ с низким волновым сопротивлением соответствуют емкости и могут быть выполнены в виде различных структур. Емкости на печатной плате занимают бóльшую часть подложки и ограничивают возможности миниатюризации мостов. При этом малая ширина индуктивных отрезков МПЛ, а также малые значения зазоров между соседними элементами устройства повышают требования к точности их изготовления и ограничивают уровень допустимой мощности, подаваемой на вход компактного ШКМ, по сравнению с его классической реализацией. Также по результатам обзора конструкций мостов видно, что компактные устройства обладают более узкой полосой рабочих частот, по сравнению с традиционными конструкциями.

Большинство авторов опубликованных работ приводят лишь конкретные примеры реализации устройств и мало внимания уделяют описанию методик расчета параметров компактных ШКМ, что заметно усложняет работу инженеров, занимающихся разработкой подобных устройств. Также все рассмотренные миниатюрные ШКМ обладают только одним типом направленности и могут быть подключены без согласующих устройств к цепям лишь с одинаковыми значениями волновых сопротивлений.

Было введено понятие степени миниатюризации. Под степенью миниатюризации понимается уменьшение площади мостов по сравнению с традиционной конструкцией без учета подводящих линий. При этом не учитывается влияние других близко расположенных устройств. Высокой степенью миниатюризации будем считать уменьшение габаритов традиционной конструкции моста $>70\%$.

Вторая глава посвящена описанию структурного синтеза компактных шлейфных мостов, выполненных на Т-образных звеньях.

Применение современных систем автоматизированного проектирования радиотехнических средств (например, AWR Design Environment) со встроенными средствами параметрического оптимизационного синтеза для получения миниатюрных конструкций ШКМ может создать у начинающего исследователя иллюзию отсутствия необходимости предварительного аналитического исследования свойств проектируемых объектов. Проведение оптимизационного синтеза подразумевает длительный итеративный поиск возможных реализаций компактного моста по заданному алгоритму, что требует наличия значительного объема вычислительных и временных ресурсов. Для их сокращения можно использовать заранее выверенную методику проектирования таких устройств.

Для уменьшения габаритных размеров ШКМ можно использовать замену отрезков МПЛ на Т- и П-образные звенья эквивалентных фильтров (рисунок 2), обладающие такими же характеристиками, но имеющие при реализации меньшие размеры. На рисунке 2 присутствуют обозначения: ρ – волновое сопротивление МПЛ, θ – электрическая длина отрезка МПЛ, L – индуктивность, C – емкость эквивалентных фильтров.

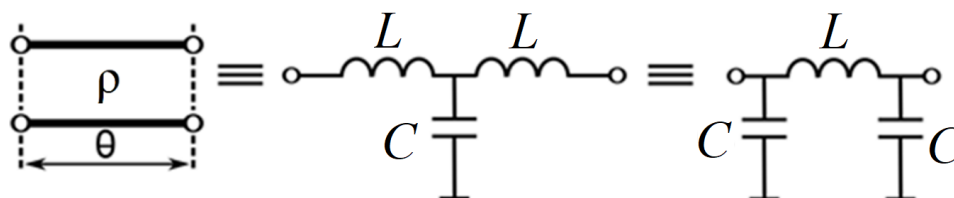
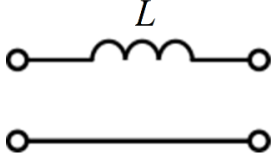
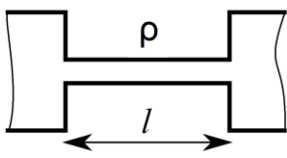
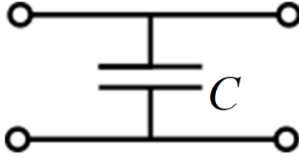
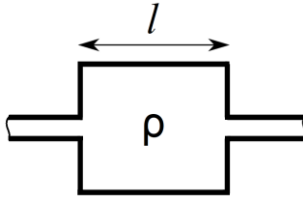


Рисунок 2 – Замещение отрезка длинной линии Т- или П-образными звеньями

За счет приравнивания между собой элементов матриц передачи $[A]$ отрезка МПЛ и П- и Т-образных звеньев схемы замещения получаем формулы для расчета номиналов индуктивности и емкости звеньев:

$$L_{\text{П}} = \frac{\rho}{\omega_0} \sin \theta, \quad C_{\text{П}} = \frac{1}{\omega_0 \rho} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

Таблица 1 Представление сосредоточенных LC-элементов в виде элементов с распределенными параметрами

Цепь на сосредоточенных элементах	Элементы на распределенных параметрах	Формула перехода ($l < \lambda_L/8$)
		$L = \frac{\rho l}{f \lambda_L}$
		$C = \frac{l}{\rho f \lambda_L}$

Формулы перехода позволяют по известным номиналам LC-элементов рассчитать габариты реализующих их отрезков (w – ширина отрезков, l – длина отрезков). Значения волновых сопротивлений выбираются из соображений конструктивной реализуемости МПЛ.

Описанный подход можно рассматривать лишь в качестве инструмента для получения начального приближения топологии компактного моста (поскольку не удастся учесть все факторы, влияющие на конечные характеристики устройства). Для получения готовой конструкции устройства следует использовать оптимизацию. На рисунке 5 представлена конечная топология компактного ШКМ, полученная после оптимизации разрабатываемого устройства (критериями оптимизации выступают: центральная частота, полоса частот, разность фаз выходных сигналов, баланс коэффициентов передачи). Поскольку цель – уменьшение размеров, рекомендуется изогнуть высокоомные отрезки с сохранением их прежней длины. Также для дополнительного уменьшения размеров можно изменять формы емкостных отрезков линий так, чтобы занять максимум внутреннего пространства топологии моста. При этом площадь низкоомных участков должна сохраниться неизменной.

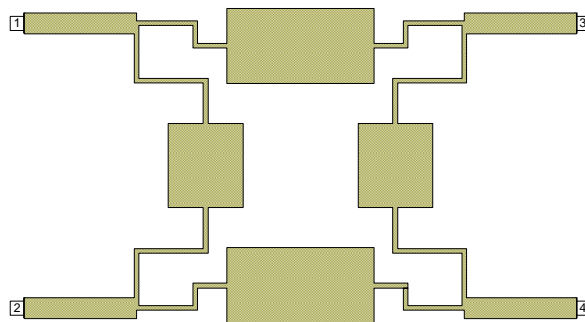


Рисунок 5 – Топология компактного ШКМ

Площадь ШКМ, реализованного на четвертьволновых отрезках МПЛ с центральной частотой 0,9 ГГц на подложке FR4, имеет площадь 2520 мм². За счет использования T-образных звеньев удалось уменьшить площадь устройства до величины 30,2 мм × 27,8 мм = 839,6 мм². Степень миниатюризации моста составляет 66,7%. Частотные характеристики, полученные в AWR Design Environment, показаны на рисунке 6. Полоса частот ШКМ, оцениваемая по уровню развязки 20 дБ, равна 79,6 МГц (8,84%, по сравнению с полосой частот традиционной конструкции – 10,5%). При этом на центральной частоте 0,9 ГГц, разность фаз выходных сигналов устройства составляет 90,2°, а дисбаланс между коэффициентами передачи не превышает 0,05 дБ.

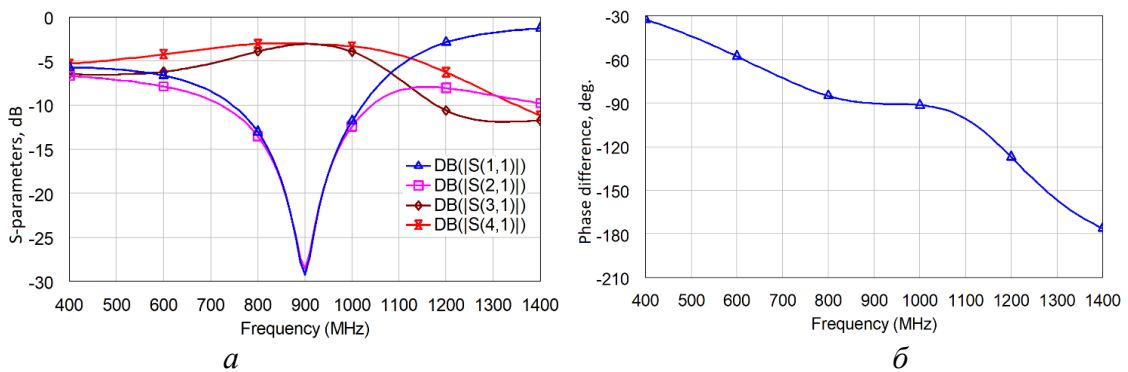


Рисунок 6 –*S*-параметры (а) и разность фаз выходных сигналов (б) моста в зависимости от частоты, полученные в программе AWR Design Environment

Таким образом, предложена методика миниатюризации микрополосковых ШКМ с использованием Т-образных звеньев. Методика заключается в замене участков МПЛ на звенья, дающие одинаковые фазовые сдвиги сигналов на центральной частоте и в ее окрестностях, но имеющие меньшую длину. Описанную методику можно использовать для миниатюризации не только ШКМ, но и для любых устройств, включающих в себя участки МПЛ, обеспечивающих нужный для функционирования устройства фазовый сдвиг. Суммируя вышесказанное, можно выделить следующие шаги в предложенной методике проектирования компактного моста при условии, что заданы центральная частота ω_0 , параметры подложки и волновые сопротивления ρ четвертьволновых отрезков ($\theta=90^\circ$) ШКМ:

1. При помощи формул (1)–(2) по известным значениям параметров ρ , ω_0 , θ вычислить номиналы *LC*-элементов для требуемых Т- или П-образных звеньев, используемых вместо четвертьволновых отрезков;
2. Выполнить переход от расчётных сосредоточенных *LC*-элементов к элементам с распределенными параметрами, используя приведенные формулы в таблице 1 для планарных *LC*-элементов;
3. С использованием средств электродинамического моделирования выполнить коррекцию габаритов элементов компактного моста для минимизации влияния паразитных связей и неоднородностей в нем, сказывающихся на конечных характеристиках устройства.

В третьей главе представлены результаты исследований по определению допустимых пределов уменьшения размеров микрополосковых ШКМ. Разработана и исследована конструкция компактного моста, полученная путем замены только одной пары четвертьволновых отрезков с идентичными значениями волновых сопротивлений на Т-образные звенья.

Предложены и исследованы оригинальные конструкции ШКМ: мост, сочетающий в себе два типа направленности (сонаправленный и противонаправленный); мост с разными значениями волновых сопротивлений подводящих линий передачи. В отдельных случаях (например, в диаграммообразующих схемах) может потребоваться возможность переключения типа направленности ШКМ в одной полосе частот. Для этого в составе моста используются фильтры верхних и нижних частот (реализованные на Т-образных звеньях) вместо исключительно фильтров нижних частот.

В случае применения ФНЧ с разными сопротивлениями входа и выхода при разработке ШКМ удастся получать мосты с разными волновыми сопротивлениями подводящих линий, что позволяет улучшить условия согласования устройства с последующим трактом.

Для определения теоретического предела миниатюризации двухшлейфного моста на примере его конструкции, настроенной на центральную частоту 1 ГГц, в программе Cadence AWR Design Environment были спроектированы устройства с постепенным повышением степени миниатюризации (уровень допустимой мощности при этом не учитывался). В качестве подложки всех конструкций использован диэлектрик FR4 ($\epsilon = 4,4$, $\text{tg}\delta = 0,02$) толщиной $h = 1$ мм.

На рисунке 7 показаны лишь три последних топологии компактных ШКМ с различной степенью миниатюризации: ~70% (№1), ~75% (№2) и ~80% (№3). Первоначально была получена топология компактного моста №1 (рисунок 7а). Затем за счет уменьшения длины высокоомных отрезков МПЛ моста №1 (уменьшена их индуктивность) и компенсации такого изменения увеличением емкости низкоомных отрезков, реализуемое за счет увеличения их размеров, удалось получить топологию моста №2 (рисунок 7б). Топология моста №3 получается аналогичным образом (рисунок 7в).

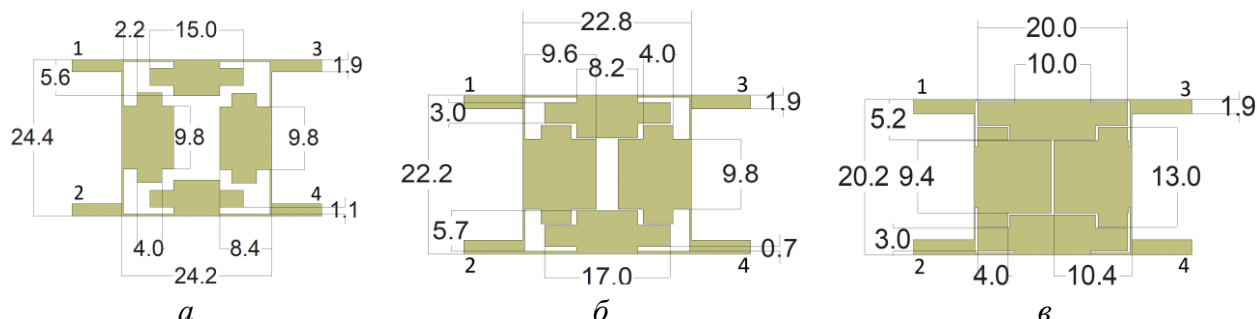


Рисунок 7 – Топологии компактных ШКМ с разной степенью миниатюризации, полученные в AWR Design Environment: 71% (а), 75% (б) и 79% (в)

В конструкции компактного моста №3, показанного на рисунке 7в, емкостные элементы Т-образных звеньев занимают всё свободное пространство внутри устройства, и дальнейшее повышение степени миниатюризации возможно, например, за счет уменьшения габаритов применяемых конденсаторов или использования многослойной подложки.

Фотографии изготовленных устройств показаны на рисунке 8. Частотные зависимости S-параметров и разности фаз разработанных устройств, измеренные при помощи векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA24, показаны на рисунках 9–11.

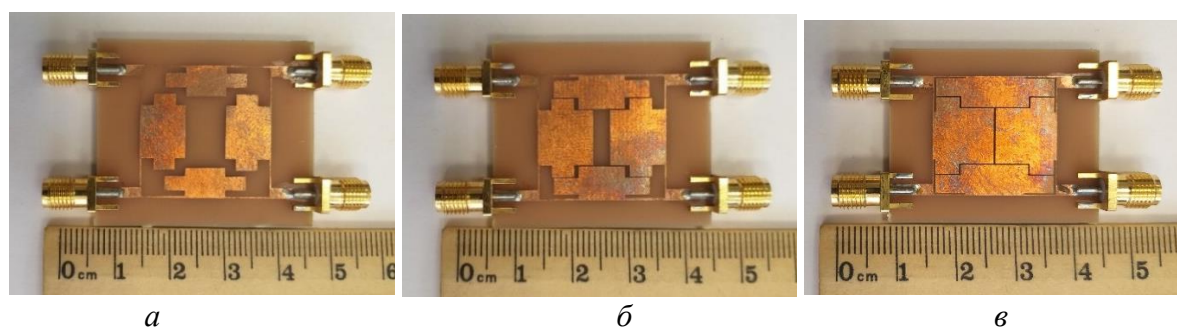


Рисунок 8 – Фотографии компактных ШКМ, площади которых по отношению к стандартной конструкции уменьшены на: 71% (а), 75% (б) и 79% (в)

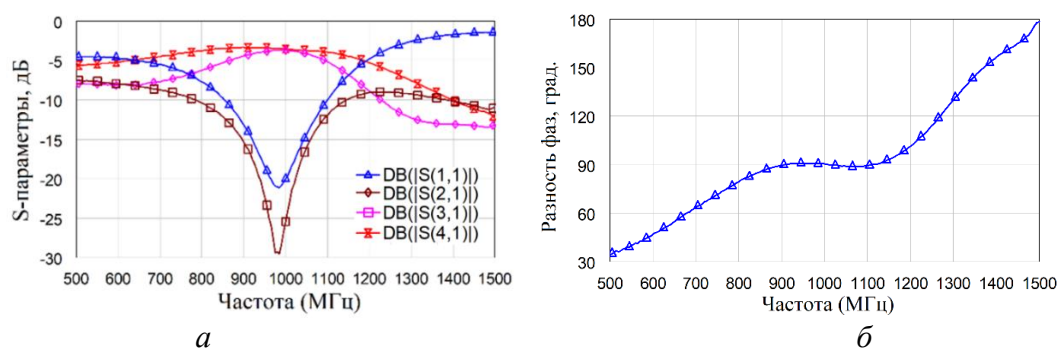


Рисунок 9 – Результаты натурного эксперимента для моста №1: график S- параметров (а), разность фаз выходных сигналов (б)

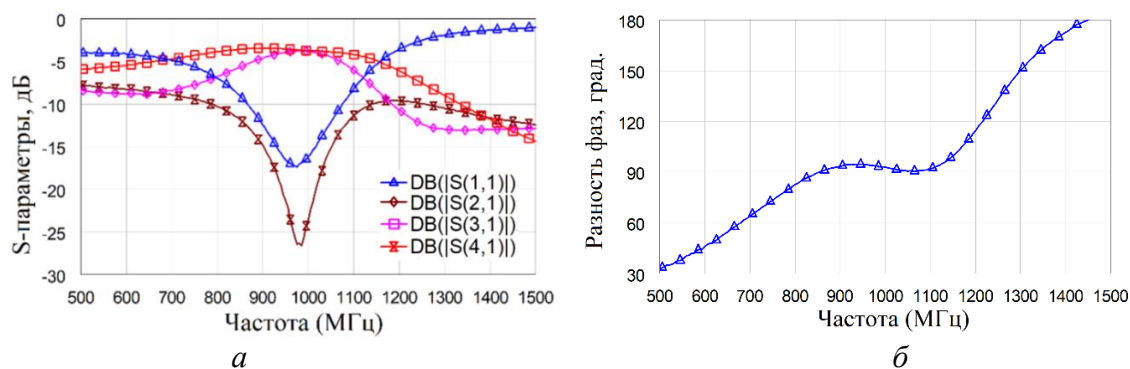


Рисунок 10 – Результаты натурального эксперимента для моста №2: график S - параметров (а), разность фаз выходных сигналов (б)

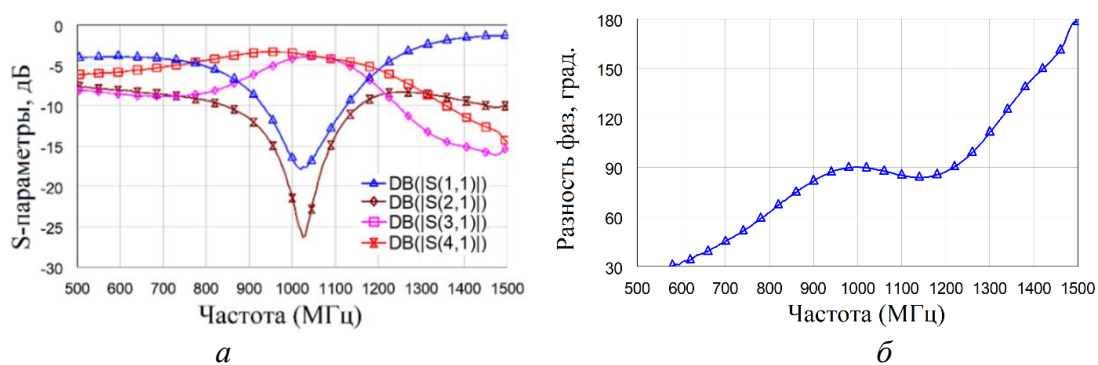


Рисунок 11 – Результаты натурального эксперимента для моста №3: график S - параметров (а), разность фаз выходных сигналов (б)

В результате замены четвертьволновых отрезков их аналогами в виде Т-образных звеньев удается уменьшать габаритные размеры мостов. Однако, чем выше степень миниатюризации, тем уже полоса частот. Площадь, занимаемая ШКМ на печатной плате, была уменьшена на 71% (№1), 75% (№2) и 79% (№3) при соответствующем уменьшении полосы рабочих частот на 24% (№1), 34% (№2) и 41% (№3) относительно полосы частот традиционного ШКМ.

ШКМ №3 имеет предельно допустимое уменьшение габаритных размеров при расположении элементов в одном проводящем слое. Однако при изменении параметров подложки или рабочей частоты устройства, этот показатель может изменяться. Поэтому были спроектированы компактные ШКМ, реализованные на разных диэлектрических подложках: ФАФ4Д ($\epsilon = 2,5$, $h = 1$ мм и $\text{tg}\delta=0,001$), Arlon 28N ($\epsilon = 3,38$, $h = 1$ мм и $\text{tg}\delta=0,001$), FR4 ($\epsilon = 4,4$, $h = 1$ мм и $\text{tg}\delta=0,02$), ФЛАН 5 ($\epsilon = 5,2$, $h = 1$ мм и $\text{tg}\delta=0,0015$), Arlon AD600 ($\epsilon = 6,15$, $h = 1$ мм и $\text{tg}\delta=0,003$). Площадь, занимаемая ШКМ на печатной плате, была уменьшена на 81,8% (ФАФ4Д), 81,1% (Arlon 28N), 79,5% (FR4), 77,6% (ФЛАН 5) и 76% (Arlon AD600). На примере конструкции компактного моста, реализованного на подложке ФАФ4Д (обладающего наибольшей степенью миниатюризации), было проведено исследование по влиянию толщины подложки на степень миниатюризации. Для этого были спроектированы компактные ШКМ, реализованные на подложке ФАФ4Д с разной толщиной: $h = 0,5$ мм, $h = 1$ мм, $h = 1,5$ мм. Площадь, занимаемая ШКМ на печатной плате, была уменьшена на 85% (0,5 мм), 81,8% (1 мм) и 75,5% (1,5 мм).

На примере конструкции компактного моста, реализованного на подложке ФАФ4Д ($\epsilon = 2,5$ и $h = 0,5$ мм), было проведено исследование по влиянию центральной частоты устройства на степень миниатюризации. Для этого были спроектированы компактные ШКМ с разными рабочими частотами: $f = 0,5$ ГГц, $f = 1$ ГГц, $f = 1,5$ ГГц. Площадь, занимаемая ШКМ на печатной плате, была уменьшена на 92,2% (0,5 ГГц), 85% (1 ГГц) и 80,1% (1,5 ГГц). Предельная степень миниатюризации ШКМ зависит от параметров подложки и рабочей

частоты устройства. Чем меньше диэлектрическая проницаемость материала и толщина подложки, тем выше степень миниатюризации устройства. При уменьшении рабочей частоты устройства, также будет увеличиваться степень миниатюризации ШКМ.

С использованием методики, описанной выше, была получена конструкция компактного ШКМ, собранного на подложке из диэлектрика Arlon 28N ($\epsilon = 3,38$, $\text{tg}\delta = 0,001$) толщиной $h = 0,762$ мм. Топология компактного моста с центральной частотой 0,9 ГГц, полученная в программе Cadence AWR Design Environment, показана на рисунке 12. Площадь такого ШКМ составляет $19,8 \text{ мм} \times 20,8 \text{ мм} = 411,84 \text{ мм}^2$.

Площадь традиционного моста, спроектированного для такой же центральной частоты и на такой же диэлектрической подложке, равна $2985,3 \text{ мм}^2$. Без учета длин подводящих линий площадь компактного ШКМ на 86,2% меньше, чем площадь традиционной конструкции. Графики зависимостей S -параметров от частоты показаны на рисунке 13. Полоса рабочих частот моста, оцениваемая по уровню развязки 20 дБ, равна 71,5 МГц (7,94%). Дисбаланс между коэффициентами передачи на центральной частоте составляет 0,2 дБ, а разность фаз выходных сигналов – 90° .

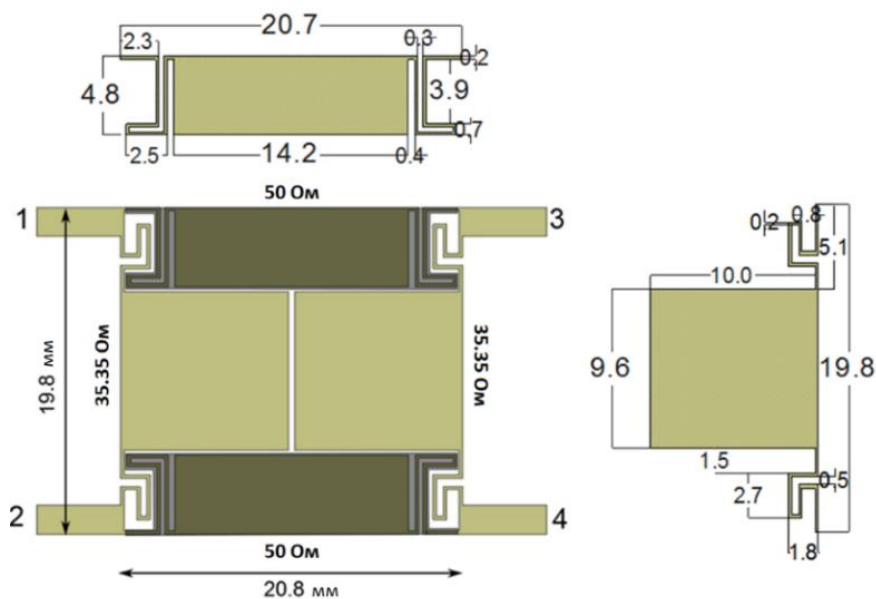


Рисунок 12 – Модель компактного ШКМ, полученная в AWR Design Environment

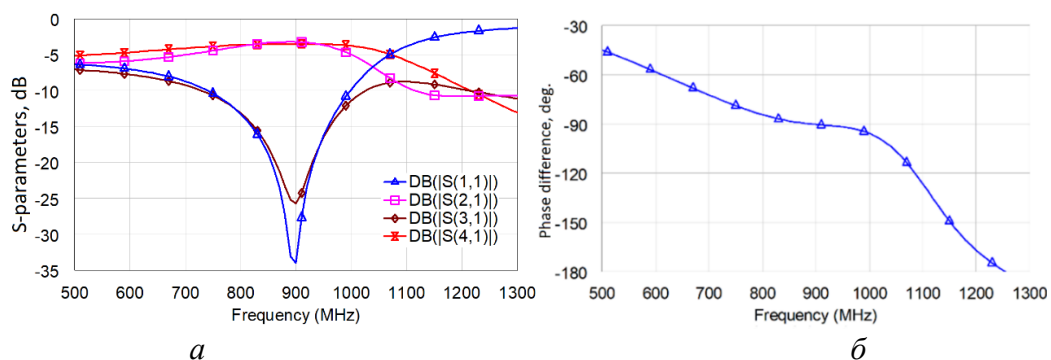


Рисунок 13 – Графики зависимостей S -параметров (а) и разности фаз между выходными сигналами (б) моста от частоты, полученные в AWR Design Environment

Вместо замены всех четвертьволновых отрезков МПЛ на звенья с эквивалентными частотными характеристиками была исследована конструкция у которой заменены лишь два идентичных отрезка МПЛ на Т-образные звенья. Топология такого устройства с центральной частотой 0,9 ГГц показана на рисунке 14а. Площадь рассматриваемого устройства составляет $51,5 \text{ мм} \times 12,4 \text{ мм} = 638,6 \text{ мм}^2$. В качестве подложки выступает Arlon 28N ($\epsilon = 3,38$, $\text{tg}\delta = 0,001$) толщиной 0,762 мм. Получившаяся топология компактного моста имеет некоторые

преимущества по сравнению с мостом, представленным на рисунке 12, у которого все четвертьволновые отрезки заменены на Т-образные звенья: уменьшение количества этапов проектирования устройства; почти не происходит ухудшения частотных характеристик.

Без учета длин подводящих линий это на 78,6% меньше, чем площадь традиционного устройства. Частотные характеристики моста, измеренные при помощи векторного анализатора цепей ZVA24, выпускаемого фирмой Rohde & Schwarz, представлены на рисунках 14б и 15. ШКМ работает в полосе частот, оцениваемой по уровню развязки 20 дБ, 92 МГц (10,2%), что на 5,2 МГц (0,6%) уже диапазона частот традиционной конструкции. На центральной частоте 0,9 ГГц дисбаланс между коэффициентами передачи составляет $\pm 0,3$ дБ, а разность фаз выходных сигналов устройства – 90° . Таким образом, согласно полученным результатам ШКМ, представленный на рисунке 14а, имеет в 1,55 раз больше площадь и в 1,3 раза шире полосу рабочих частот по сравнению с площадью и полосой моста, показанного на рисунке 12.

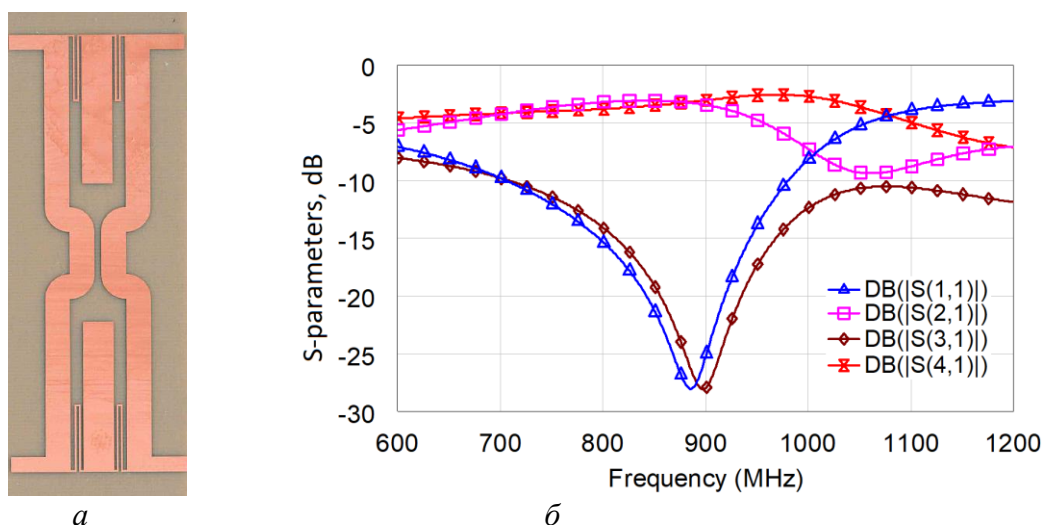


Рисунок 14 – Макет компактного ШКМ (а) и график его S-параметров от частоты (б)

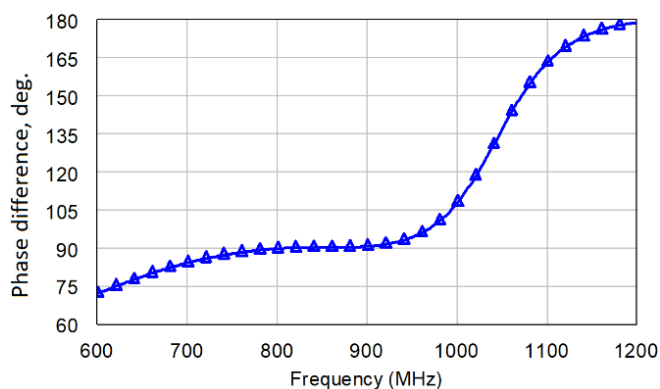


Рисунок 15 – График разности фаз выходных сигналов моста

Также был проведен сравнительный анализ предлагаемого способа миниатюризации моста (замена одной пары четвертьволновых отрезков на Т-образные звенья) с аналогами. Фотографии прототипов компактных ШКМ без установленных СВЧ разъемов и приведенных к одному масштабу представлены на рисунке 16.

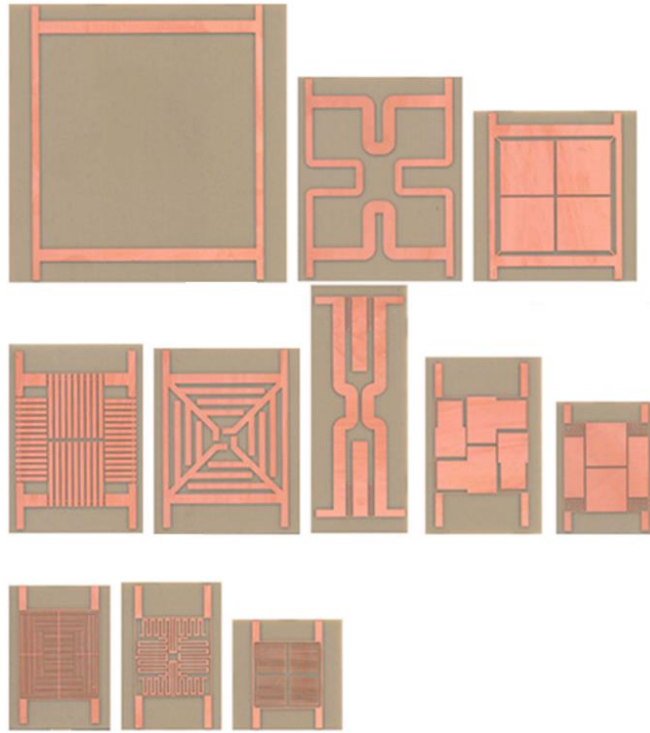


Рисунок 16 – Сравнение компактных ШКМ

Предложенный вариант реализации компактного моста (рисунок 14а) обладает компромиссным решением между габаритами устройства и шириной его полосы частот.

Принцип дуальности позволяет получать фильтры верхних частот (ФВЧ) из фильтров нижних частот (ФНЧ) за счет замены индуктивности на емкости, емкости на индуктивности. Полученные в результате такой замены Т- и П-образные звенья, показаны на рисунке 17.

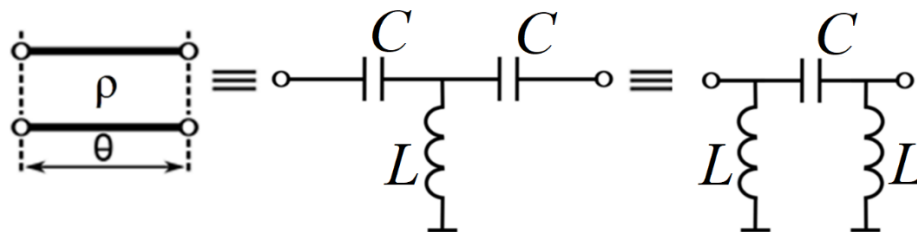


Рисунок 17 – Замещение отрезка длинной линии Т- или П-образными звеньями

Аналогичным образом, как и для фильтров нижних частот, за счет приравнивания друг другу элементов матриц передачи МПЛ и фильтров верхних частот, получаем выражения для определения индуктивностей и емкостей звеньев:

$$L_{\Pi} = \frac{\rho}{\omega_0} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}, \quad C_{\Pi} = \frac{1}{\omega_0 \rho \sin \theta}, \quad (3)$$

$$L_{\Gamma} = \frac{\rho}{\omega_0 \sin \theta}, \quad C_{\Gamma} = \frac{1}{\omega_0 \rho} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}. \quad (4)$$

На примере конструкции компактного моста на рисунке 14а в программе AWR Design Environment была спроектирована конструкция ШКМ с изменённым типом направленности. Для того, чтобы изменить тип направленности моста на противоположный, как было отмечено ранее, достаточно в одном из каналов заменить ФНЧ на ФВЧ. Такой фильтр реализован на сосредоточенных LC-элементах. Для реализации возможности переключения между двумя типами направленности были установлены *p-i-n*-диоды, позволяющие по

принципу работы фазовращателей коммутируемой линии подключать либо ФНЧ, либо ФВЧ. Топология такого ШКМ представлена на рисунке 18а. Графики частотных характеристик показаны на рисунке 18б, 19, где сплошными линиями показаны графики для сонаправленного типа направленности, а пунктирными для противоположного.

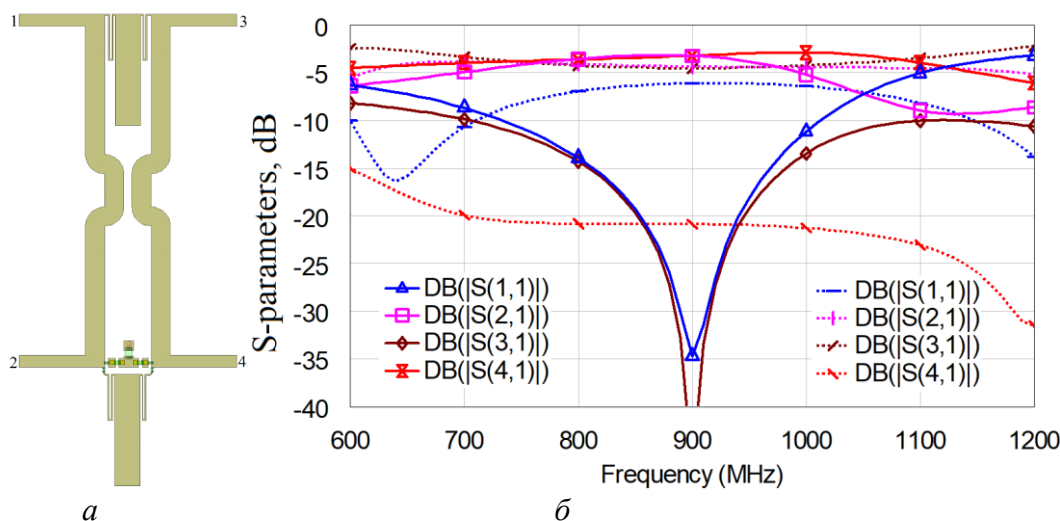


Рисунок 18 – Модель коммутируемого компактного ШКМ (а) и график его S-параметров от частоты (б)

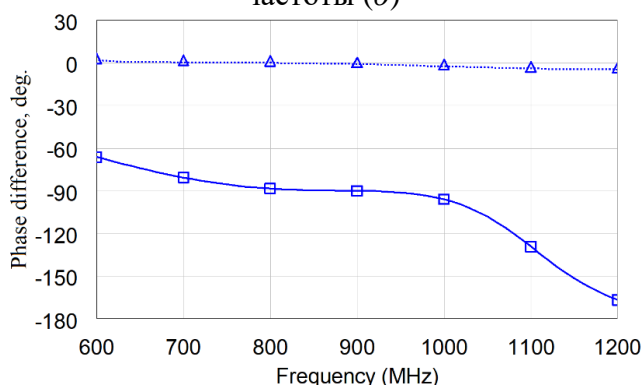


Рисунок 19 – График разности фаз выходных сигналов ШКМ (сплошными линиями $\Delta\varphi_{43}=\arg(S_{41}/S_{31})$, а пунктирными $\Delta\varphi_{32}=\arg(S_{31}/S_{21})$)

За счет подключения одного из фильтров достигается либо сонаправленный, либо противоположный тип направленности моста (рисунки 18б, 19). Площадь, занимаемая этим ШКМ, составляет $71,2 \times 12,8 = 911,36 \text{ мм}^2$. Предлагаемая конструкция моста может заменять два ШКМ с разными типами направленности, подключаемых через переключатель.

Полоса рабочих частот моста с сонаправленным типом направленности, оцениваемая по уровню развязки 20 дБ, равна 90,9 МГц (10,1%), а разность фаз выходных сигналов на центральной частоте 0,9 ГГц равна 90° . При замене ФНЧ на ФВЧ получаем мост с противоположным типом направленности. Полоса рабочих частот моста с противоположным типом направленности, оцениваемая по уровню развязки 20 дБ, равна 400 МГц (44,4%), а разность фаз выходных сигналов на центральной частоте 0,9 ГГц равна -1° . Однако при этом уменьшается уровень мощности на выходе моста из-за его рассогласования.

Сегодня на рынке можно встретить разнообразное контрольно-измерительное оборудование, позволяющее выполнять широкий спектр измерений с высокой точностью. Векторные анализаторы цепей выпускаются с двумя видами измерительных трактов 50 и 75 Ом. Сопротивление тракта — это важный параметр с точки зрения согласования, т.к. при подключении двух трактов с различными сопротивлениями появляется отражённая волна в месте их соединения.

Существует проблема, заключающаяся в том, что при наличии измерительного оборудования с измерительными трактами 50 Ом подключение 75 Ом кабелей без согласующих устройств невозможно (при условии недопустимости потери мощности при рассогласовании) и наоборот при наличии измерительного оборудования с измерительными трактами 75 Ом подключение 50 Ом кабелей без согласующих устройств невозможно. Поэтому разработка ШКМ с разными волновыми сопротивлениями подводящих линий является актуальной задачей. Поскольку это позволит суммировать мощности от двух источников с коаксиальными кабелями 75 Ом либо 50 Ом, а также подключать к измерительному оборудованию (например, векторному анализатору цепей), у которого измерительные тракты имеют сопротивления 50 Ом либо 75 Ом.

Мост является симметричным устройством и имеет две плоскости симметрии (вертикальную и горизонтальную), что используется для его анализа методом синфазного и противофазного возбуждения. Наличие двух плоскостей симметрии у ШКМ может быть использовано для расчета его конструкции с разными волновыми сопротивлениями подводящих линий. В этом случае удастся разделить конструкцию устройства на несколько частей, каждая из которых может быть объединена с такими же частями других мостов.

На рисунке 20 показана схема компактного ШКМ, у которого два порта имеют значения волновых сопротивлений по 50 Ом (1 и 2 порты), а другие два – по 75 Ом (3 и 4 порты). В нашем случае конструкция устройства получена за счет объединения половин от двух мостов с 50-омными подводящими линиями и 75-омными подводящими линиями. Стоит отметить, что при таком объединении двух схем происходит рассогласование в местах подключения отрезков с разными волновыми сопротивлениями 50 и 75 Ом. Вместо этих отрезков можно использовать, например, оптимальный Чебышевский фильтр с сопротивлениями входов и выходов 50 и 75 Ом соответственно.

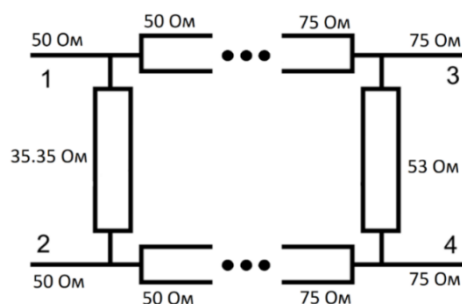


Рисунок 20 –Схема ШКМ с разными значениями волновых сопротивлений подводящих линий

Спроектированный в AWR Design Environment микрополосковый ШКМ (настроенный на центральную частоту 1 ГГц) с разными волновыми сопротивлениями подводящих линий показан на рисунке 21. В качестве подложки используется FR4 ($\epsilon = 4,4$, $\text{tg}\delta = 0,02$) толщиной $h = 1$ мм. Частотные характеристики устройства представлены на рисунке 22.

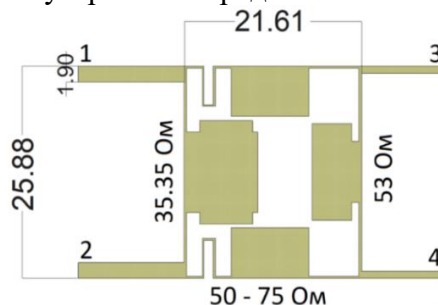


Рисунок 21 – Топология ШКМ с волновыми сопротивлениями входов/выходов 50 и 75 Ом

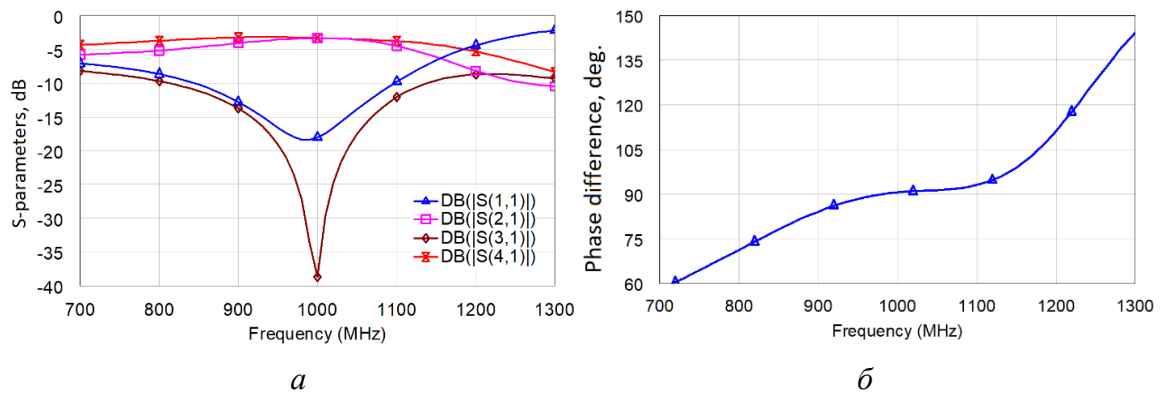


Рисунок 22 – Графики частотных зависимостей: S -параметров (а), разности фаз выходных сигналов (б) моста, полученные в AWR Design Environment

Предлагаемое конструктивное решение позволило получить оригинальную конструкцию компактного ШКМ с разными значениями волновых сопротивлений подводящих линий. Площадь устройства составляет $25,88 \times 21,61 = 559,27 \text{ мм}^2$, что на 70% меньше, чем площадь традиционной конструкции. Относительная рабочая полоса частот по уровню 20 дБ коэффициента развязки достигает 8,3%. Разность фаз выходных сигналов моста на центральной частоте составляет $90,5^\circ$. Коэффициенты передачи имеют значения $-3,3 \pm 0,15 \text{ дБ}$ на центральной частоте 1 ГГц.

Аналогичным образом был спроектирован компактный ШКМ, у которого два порта имеют значения волновых сопротивлений по 50 Ом (1 и 2 порты), а другие два – по 25 Ом (3 и 4 порты). Топология моста, настроенного на центральную частоту 1 ГГц, полученная в AWR Design Environment, показана на рисунке 23. Частотные характеристики устройства представлены на рисунке 24.

Применение ШКМ с разными сопротивлениями подводящих линий позволяет упростить задачу согласования ШКМ с транзисторным услителем в схемах усилительных каскадов т.к. уменьшается разница между согласуемыми сопротивлениями. Полностью решить задачу согласования не удастся, т.к. входное сопротивление усилителей составляет единицы Ом, а в отрезках МПЛ при таких волновых сопротивлениях присутствуют волны более высоких порядков, которые забирают на себя часть полезной мощности и приводят к искажению сигнала. С помощью встроенного инструмента TXLine в программе Cadence AWR Design Environment определено, что для подложки FR4 ($\epsilon = 4,4$, $\text{tg}\delta = 0,02$, $h = 1 \text{ мм}$) и центральной частоты 1 ГГц минимально возможная величина волнового сопротивления, которую можно реализовать, составляет 10 Ом ($w = 15,6 \text{ мм}$).

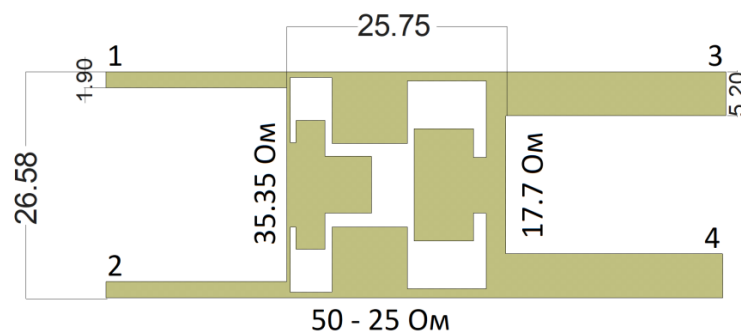


Рисунок 23 — Топология ШКМ с волновыми сопротивлениями входов/выходов 50 и 25 Ом

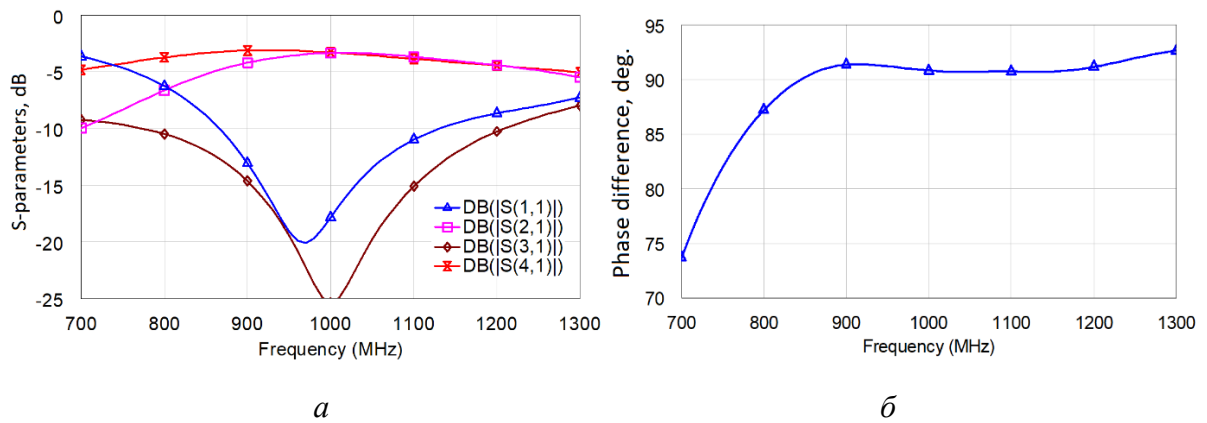


Рисунок 24 — Графики частотных зависимостей: S -параметров (а), разности фаз выходных сигналов (б) моста, полученные в AWR Design Environment

Площадь устройства составляет $26,58 \times 25,75 = 684,435 \text{ мм}^2$, что на 72,9% меньше, чем площадь традиционной конструкции. Относительная полоса рабочих частот по уровню 20 дБ коэффициента развязки достигает 9,45%. Разность фаз выходных сигналов моста на центральной частоте составляет $90,8^\circ$. Коэффициенты передачи имеют значения $-3,3 \pm 0,25 \text{ дБ}$ на центральной частоте 1 ГГц.

За счет использования двух плоскостей симметрии можно проектировать ШКМ, у которых изменено волновое сопротивление лишь у одной подводящей линии. На рисунке 25 показана схема такого моста, у которого три порта имеют значения волновых сопротивлений по 50 Ом (1, 2 и 4 порты), а оставшийся 75 Ом (3 порт). Вместо отрезков с разными волновыми сопротивлениями 50 и 75 Ом и 53 и 75 Ом устанавливаются фильтры с такими же сопротивлениями входов и выходов.

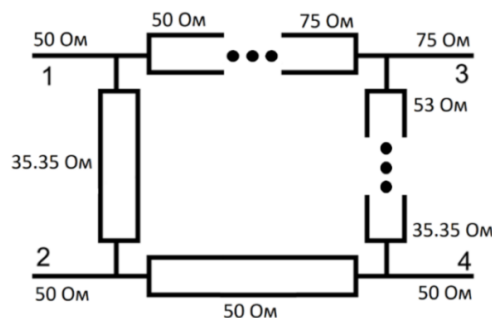


Рисунок 25 — Схема ШКМ с разными значениями волновых сопротивлений подводящих линий

Топология компактного моста, настроенного на центральную частоту 1 ГГц, полученная в AWR Design Environment, показана на рисунке 26. Частотные характеристики устройства представлены на рисунке 27.

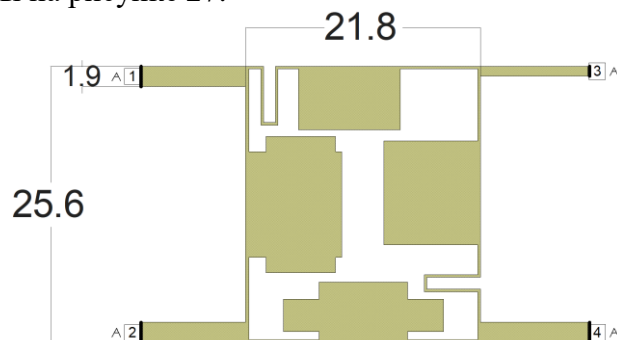


Рисунок 26 — Топология ШКМ с волновыми сопротивлениями входов/выходов 50 и 75 Ом

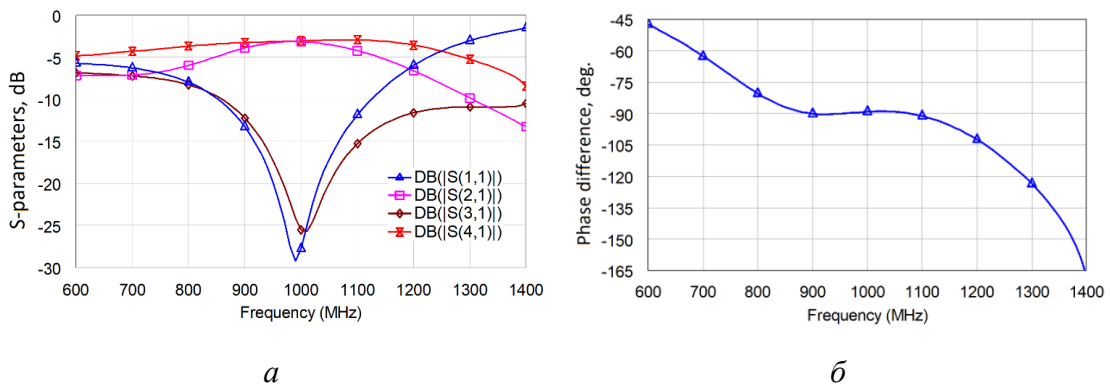


Рисунок 27 — Графики частотных зависимостей: S -параметров (а), разности фаз выходных сигналов (б) моста, полученные в AWR Design Environment

При такой реализации ШКМ можно подавать сигналы на его входы под номерами 3 и 4 от двух источников с разными волновыми сопротивлениями. Площадь устройства составляет $25,6 \times 21,8 = 558,1 \text{ мм}^2$, что на 70% меньше, чем площадь традиционной конструкции. Относительная полоса рабочих частот по уровню 20 дБ коэффициента развязки достигает 8,3%. Разность фаз выходных сигналов ШКМ на центральной частоте составляет 90° . Коэффициенты передачи имеют значения $-3,2 \pm 0,05$ дБ на центральной частоте 1 ГГц.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведённых исследований при написании диссертационной работы.

Основные выводы и результаты диссертации состоят в следующем.

1. Выполнен анализ существующих конструкций компактных мостов и методик их проектирования, подтверждающий актуальность работы. Конструкции устройств получены в основном заменой двух пар четвертьволновых отрезков на фильтры нижних частот, реализованные на комбинации сосредоточенных и/или распределенных элементов в виде Т- и/или П-образных звеньев.

2. Разработана методика проектирования компактных шлейфных квадратурных мостов с применением комбинации сосредоточенных и/или распределенных элементов в виде Т-образных звеньев. Предложенный подход позволяет выполнять проектирование топологии миниатюрных (в разы занимающих меньшие площади) ШКМ по заданным техническим характеристикам с использованием доступных диэлектрических подложек. Описанную методику можно использовать для миниатюризации не только ШКМ, но и для любых устройств, включающих в себя участки МПЛ, обеспечивающих нужный для функционирования устройства фазовый сдвиг.

3. Получены выражения для расчета погонных емкостей и индуктивностей, используемых в эквивалентной схеме разрабатываемых устройств. Данные выражения учитывают сохранение электрической длины применяемой структуры при сокращении её физической длины с сохранением необходимого входного сопротивления.

4. Предложен и исследован схемно-конструктивный способ реализации компактного квадратурного моста за счет замены только одной пары четвертьволновых отрезков на Т-образные звенья. Получена топология планарного ШКМ с площадью, на 78,6% меньшей по сравнению с площадью традиционной конструкции, при этом удалось получить частотные характеристики с наименьшим ухудшением по сравнению с известными конструкциями. Такой вариант реализации компактных ШКМ обладает компромиссным решением между габаритами устройства и шириной его полосы рабочих частот.

5. Впервые исследованы допустимые пределы миниатюризации ШКМ. Показано, что Т-образные звенья с индуктивными элементами в виде высокоомных отрезков и емкостными элементами в виде низкоомных отрезков позволяют уменьшить площади микрополосковых устройств на ~80–90% с уменьшением полосы развязки и согласования не более, чем на ~30–40%. Показано, что наибольшую степень миниатюризации удастся достичь при использовании тонких подложек с небольшой диэлектрической проницаемостью.

6. Разработана конструкция двухшлейфного моста с возможностью переключения типа направленности с сонаправленного на противонаправленный, и наоборот. Этого удалось добиться за счет того, что вместо исключительно ФНЧ в состав моста добавлен ФВЧ.

7. Разработаны топологии компактных ШКМ с разными значениями волновых сопротивлений подводящих линий (50 и 75 Ом, 50 и 25 Ом). Такие конструкции мостов получены за счет объединения двух половин от мостов с одинаковыми значениями волновых сопротивлений подводящих линий и применения ФНЧ с разными сопротивлениями входа и выхода. Такой вариант реализации компактного ШКМ упрощает процесс его согласования с последующим трактом.

8. Изложенные в работе подходы миниатюризации применимы и в более высокочастотных диапазонах с учетом технологических возможностей изготовления устройств.

9. Полученные результаты способствуют развитию теории и техники проектирования компактных мостовых устройств УВЧ диапазона.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

статьи и доклады, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Летавин, Д. А. Метод уменьшения размеров микрополосковых мостовых устройств / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Текст : непосредственный // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – № 5. – 2016. – С. 52-56; 0,39 п.л. / 0,3 п.л.
2. Летавин, Д. А. Способ миниатюризации микрополоскового двухшлейфного моста / Д. А. Летавин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – С. 41-46; 0,483 п.л.
3. Летавин, Д. А. Способ уменьшения размеров микрополоскового двухшлейфного моста / Д. А. Летавин. – Текст : непосредственный // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – № 10. – 2017. – С. 1-9; 0,324 п.л.
4. Летавин, Д. А. Разработка микрополоскового направленного ответвителя уменьшенных размеров / Д. А. Летавин. – Текст : непосредственный // Вестник СибГУТИ. – № 2. – 2018. – С. 32-38; 0,323 п.л.
5. Летавин, Д. А. Разработка микрополоскового двухшлейфного моста с высокой степенью миниатюризации / Д. А. Летавин. – Текст : непосредственный // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – № 3. – 2018. – С. 1-11; 0,3 п.л.
6. Letavin D.A. Two Methods for Miniaturization of Stub Quadrature Couplers / D. A. Letavin – Текст : электронный // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018. – Vol. 63, No. 8. – Pp. 933-935. – DOI : 10.1134/S1064226918080107 (дата обращения: 10.05.2021) (Scopus, WoS); 0,21 п.л.
7. Letavin D.A. Miniature microstrip branch line coupler with folded artificial transmission lines / D. A. Letavin. – Текст : электронный // AEU - International Journal of Electronics and Communications. – 2019. – Vol. 99. – Pp. 8-13. – DOI : 10.1016/j.aeue.2018.11.016 (дата обращения: 10.05.2021) (Scopus, WoS); 0,775 п.л.

Патенты:

8. Патент RU187315U1 Компактный СВЧ мост. – / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Оpubл. 03.08.2018.
9. Патент RU177305U1 Компактный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 15.02.2018.
10. Патент RU182106U1 Компактный кольцевой мост. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 03.08.2018.
11. Патент RU182122U1 Миниатюрный микрополосковый направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 03.08.2018.
12. Патент RU190044U1 Компактный трехшлейфный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Оpubл. 05.10.2018.

13. Патент RU180138U1 Компактный трехшлейфный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 05.06.2018.
14. Патент RU187315U1 Компактный квадратурный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Оpubл. 01.03.2019.
15. Патент RU189909U1 Миниатюрный трехшлейфный ответвитель. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 11.06.2019.
16. Патент RU187316U1 Компактный четырехшлейфный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Оpubл. 01.03.2019.
17. Патент RU190044U1 Компактный двойной кольцевой мост. – / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Оpubл. 17.06.2019.
18. Патент RU196285U1 Малоразмерный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 21.02.2020.
19. Патент RU196375U1 Компактный направленный ответвитель. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 26.02.2020.
20. Патент RU196284U1 Синфазно-противофазный кольцевой мост. – / Д. А. Летавин. – Оpubл. 21.02.2020.

Другие публикации:

21. Летавин Д. А. Миниатюризация мостовых устройств на отрезках линий передачи с использованием микрополосковых фильтров / Д. А. Летавин, В. А. Чечеткин, Ю. Е. Мительман. – Текст : электронный // 25-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии" (КрыМиКо'2015). – 2015. С. 550-551. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=35635436> (дата обращения: 10.05.2021); 0,185 п.л. / 0,1 п.л.
22. Letavin D.A. Realization of miniaturized branch-line coupler using lowpass microstrip filters / D. A. Letavin, V. A. Chechetkin, Y. E. Mitelman. – Текст : электронный // Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC). – 2015. – DOI : 10.1109/LAPC.2015.7366013 (дата обращения: 10.05.2021); 0,242 п.л. / 0,18 п.л.
23. Letavin D.A. A novel method of design of miniaturized microstrip microwave devices using filters / D. A. Letavin, V. A. Chechetkin, Y. E. Mitelman. – Текст : электронный // IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, (COMCAS). – 2015. – DOI : 10.1109/COMCAS.2015.7360482 (дата обращения: 10.05.2021); 0,222 п.л. / 0,18 п.л.
24. Letavin D.A. Investigation of the frequency influence on the miniaturization efficiency of microstrip devices using LPFs / D. A. Letavin, V. A. Chechetkin, Y. E. Mitelman. – Текст : электронный // 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2016. – DOI : 10.1109/EuCAP.2016.7481614 (дата обращения: 10.05.2021); 0,196 п.л. / 0,14 п.л.
25. Letavin D.A. Advantages and Disadvantages of the Miniaturization Method Based on the Use of a Lowpass Filter / D. A. Letavin, E. E. Malov. – Текст : электронный // Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC). – 2016. – DOI : 10.1109/LAPC.2016.7807560 (дата обращения: 10.05.2021); 0,278 п.л. / 0,22 п.л.
26. Letavin D.A. The substrate factor in the miniaturization efficiency of the microstrip branch-line couplers / D. A. Letavin, V. A. Chechetkin, Y. E. Mitelman. – Текст : электронный // 24th Telecommunications Forum, (TELFOR). – 2016. – DOI : 10.1109/TELFOR.2016.7818850 (дата обращения: 10.05.2021); 0,2925 п.л. / 0,2 п.л.
27. Letavin D.A. Research on low-pass filter use as a miniaturization tool / D. A. Letavin. – Текст : электронный // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, (APEDE). – 2016. – DOI : 10.1109/APEDE.2016.7878898 (дата обращения: 10.05.2021); 0,17 п.л.
28. Летавин, Д. А. Миниатюрные конструкции микрополосковых мостовых устройств / Д. А. Летавин. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 18. – № 2. – 2016. – С. 917-921; 0,36 п.л.
29. Letavin D.A. The branch-line couplers miniaturization method with microstrip filters / D. A. Letavin, V. A. Chechetkin, Y. E. Mitelman. – Текст : электронный // International Applied

- Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy, (ACES). – 2017. – DOI : 10.23919/ROPACES.2017.7916035 (дата обращения: 10.05.2021); 0,12 п.л. / 0,15 п.л.
30. Letavin D.A. Compact microstrip three-loop coupler / D. A. Letavin. – Текст : электронный // International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy, (ACES). – 2017. – DOI : 10.23919/ROPACES.2017.7916036 (дата обращения: 10.05.2021); 0,23 п.л.
31. Letavin D.A. Compact microstrip branch-line coupler with unequal power division / D. A. Letavin, V. A. Chechetkin, Y. E. Mitelman. – Текст : электронный // European Conference on Antennas and Propagation, (EuCAP). – 2017. – Pp. 1162-1165. – DOI : 10.23919/EuCAP.2017.7928144 (дата обращения: 10.05.2021); 0,295 п.л. / 0,2 п.л.
32. Letavin D.A. Study of the influence of dielectric permittivity on effectiveness of branch-line coupler miniaturization / D. A. Letavin, N. S. Knyazev. – Текст : электронный // IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). – 2017. – Pp. 1-4. – DOI : 10.1109/COMCAS.2017.8244721 (дата обращения: 10.05.2021); 0,31 п.л. / 0,25 п.л.
33. Letavin D.A. Study of substrate thickness influence on effectiveness of miniaturization, based on implementation of artificial transmission lines / D. A. Letavin. – Текст : электронный // 25th Telecommunication Forum (TELFOR). – 2017. – Pp. 1-3. – DOI : 10.1109/TELFOR.2017.8249379 (дата обращения: 10.05.2021); 0,26 п.л.
34. Letavin D.A. Miniaturization of a Branch-Line Coupler Using Microstrip Cells / D. A. Letavin, S. N. Shabunin. – Текст : электронный // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, (APEIE). – 2018. – Pp. 62-65. – DOI : 10.1109/APEIE.2018.8545811 (дата обращения: 10.05.2021); 0,31 п.л. / 0,22 п.л.
35. Letavin D.A. The universal structure of a segment of the microstrip transmission line as a basic element of compact microwave devices / D. A. Letavin, S. N. Shabunin. – Текст : электронный // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2018. – DOI : 10.1049/cp.2018.1244 (дата обращения: 10.05.2021); 0,419 п.л. / 0,3 п.л.
36. Летавин, Д. А. Миниатюризация квадратурных шлейфных направленных ответвителей / Д. А. Летавин. – Текст : непосредственный // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – № 2. – 2021. – С. 1-22; 0,69 п.л.