

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

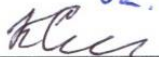
Кафедра радиотехники и электродинамики

**Разработка и исследование микрополоскового широкополосного
направленного ответвителя класса I**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4071 группы
направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
института физики
Сергеева Ильи Вячеславовича

Научный руководитель
Ст. преподаватель, к.ф.-м.н.


02.06.26
подпись, дата

К.А. Сяпин

Заведующая кафедрой
радиотехники и электродинамики
д.ф.-м.н., профессор


02.06.26
подпись, дата

О.Е. Глухова

Саратов 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современных системах радиосвязи, радиолокации и измерительной техники всё более жёсткие требования предъявляются к элементной базе сверхвысоких частот (СВЧ). Среди пассивных СВЧ-устройств особое место занимают направленные ответвители (НО) на микрополосковых линиях передачи. Они позволяют гибко управлять амплитудными и фазовыми соотношениями сигналов, что делает их незаменимыми в балансных усилителях, смесителях, модуляторах, делителях мощности, а также в составе векторных анализаторов цепей и систем контроля параметров трактов.

За последние десятилетия требования к миниатюризации, широкополосности и многофункциональности НО значительно возросли. Традиционные четвертьволновые ответвители на параллельных связанных линиях уже не всегда удовлетворяют современным запросам по габаритам и характеристикам. Это стимулировало активные исследования, направленные на модификацию топологий, внедрение новых материалов и технологий, а также на совершенствование методов проектирования. Наряду с аналитическими методиками всё большую роль играют численные методы трёхмерного электродинамического моделирования, позволяющие с высокой точностью учитывать дисперсию, потери и взаимное влияние элементов топологии.

Особую актуальность приобретает создание недорогих лабораторных макетов СВЧ-устройств с использованием доступного оборудования – лазерных гравиров и бюджетных векторных анализаторов цепей. Это особенно важно для учебных заведений и малых предприятий в условиях импортозамещения. Предлагаемая работа демонстрирует возможность проектирования, изготовления и исследования широкополосного ответвителя на основе доступной элементной базы и оборудования, что подтверждает практическую значимость исследования.

Цель работы – разработка, изготовление и экспериментальное исследование микрополоскового широкополосного направленного ответвителя с переходным ослаблением -15 дБ в диапазоне частот $0,1-4,4$ ГГц.

Задачи исследования:

1. Провести теоретический анализ существующих топологий направленных ответвителей и выбрать оптимальную для широкополосного применения.
2. Выполнить электродинамическое моделирование в среде Qucs, оптимизировать геометрические параметры (ширину проводников, зазоры, длины секций).
3. Разработать топологию печатной платы в Sprint Layout и подготовить файлы для изготовления.
4. Изготовить макет с использованием лазерного гравера Two Trees TTs-55, провести контроль качества с помощью микроскопа.
5. Провести измерения S-параметров с помощью векторного анализатора цепей NanoVNA-f v2, включая калибровку SOLT.
6. Сравнить экспериментальные характеристики с результатами моделирования, выявить причины расхождений и сформулировать рекомендации по улучшению.

Характеристика материалов исследования. В качестве подложки использован фольгированный стеклотекстолит FR-4 толщиной 1,5 мм с медной фольгой 35 мкм ($\epsilon_r \approx 4,85$, $\tan \delta \approx 0,02$). Высокочастотные разъёмы – SMA (female) с частотным диапазоном до 18 ГГц. Измерения выполнены на векторном анализаторе цепей NanoVNA-f v2 (рабочий диапазон 50 кГц – 3 ГГц, расширен программно до 4,4 ГГц) с двухпортовой калибровкой SOLT. Обработка и визуализация данных проводились в САПР Qucs.

Научная новизна (для бакалавриата – по усмотрению) заключается в экспериментальной верификации возможности использования лазерного гравера Two Trees TTs-55 для изготовления микрополосковых ответвителей с зазорами порядка 0,3 мм и сопоставлении расчётных и реальных S-параметров в широкой полосе.

Практическая значимость. Разработанный макет может быть использован в учебных лабораториях для демонстрации принципов работы

направленных ответвителей, а также в качестве базового элемента при создании недорогих распределительных систем в диапазоне 1–3,5 ГГц.

Структура работы. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы (22 наименования) и приложений, содержащих фотографии процесса изготовления и измерений. Первая глава посвящена обзору базовых топологий направленных ответвителей и методов их проектирования. Вторая глава содержит расчёт, моделирование в Qucs и разработку топологии печатной платы. Третья глава описывает изготовление макета, проведение измерений и анализ экспериментальных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические основы и выбор топологии. В первой главе рассмотрены физические принципы работы направленных ответвителей на связанных микрополосковых линиях. Классический четвертьволновый ответвитель представляет собой две параллельные линии длиной $\lambda/4$ на центральной частоте. Принцип действия основан на суперпозиции синфазной (чётной) и противофазной (нечётной) мод, для которых волновые сопротивления обозначаются Z_{0e} и Z_{0o} . Коэффициент связи определяется как $C = (Z_{0e} - Z_{0o}) / (Z_{0e} + Z_{0o})$, а характеристическое сопротивление $Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}}$.

Показано, что односекционный ответвитель имеет ограниченную полосу пропускания (20–30 %) из-за различия фазовых скоростей мод. Для расширения полосы применяются каскадные (многосекционные) структуры, тандемные ответвители, шлейфные мосты, трёхмерные топологии на комбинации микрополосковых и щелевых линий, а также меандровые, спиральные и зигзагообразные конфигурации. Для сильной связи и подавления гармоник используются структуры с дефектной заземляющей поверхностью (DGS). Методы проектирования разделены на аналитические (чётно-нечётное возбуждение, ABCD-матрицы, проекционная модель связанных линий) и численные – трёхмерное электродинамическое моделирование в САПР (Qucs, AWR DE, HFSS). Основные эксплуатационные параметры – направленность (25–40 дБ), развязка (не менее 30 дБ для сильной связи) и вносимые потери (менее 0,5 дБ). Тенденции развития включают миниатюризацию с использованием Т-структур и композитных линий, интеграцию функций фильтрации и управления фазой, а также применение новых материалов (керамика LTCC) и аддитивных технологий.

Расчёт и моделирование. Во второй главе выполнено проектирование трёхступенчатого направленного ответвителя с центральной частотой 2 ГГц и номинальным коэффициентом связи –15 дБ на подложке FR-4 ($\epsilon_r = 4,85$, $h = 1$ мм). Выбор трёх ступеней обусловлен необходимостью расширения рабочей полосы при сохранении технологической реализуемости.

Расчёт длин секций: $\lambda_0 = c/f_0 = 149,8$ мм, длина каждой четвертьволновой секции $L \approx \lambda_0/4 \approx 37,45$ мм (с учётом эффективной диэлектрической проницаемости в микрополосковой линии). По таблицам Фельдштейна для $n = 3$ и $C = 15$ дБ определены нормированные коэффициенты: $\rho_1 = 1,037$ (крайние секции), $\rho_2 = 1,283$ (центральная секция). Через них вычислены волновые сопротивления:

- Крайние секции: $Z_{0e1} \cdot \rho_1 = 50 \cdot 1,037 = 51,85$ Ом,
 $Z_{0o1} = \frac{Z_0^2}{Z_{0e1}} = 48,21$ Ом;
- Центральная секция: $Z_{0e2} \cdot \rho_2 = 50 \cdot 1,283 = 64,15$ Ом,
 $Z_{0o2} = \frac{2500}{64,15} = 38,97$ Ом.

С помощью встроенного калькулятора Qucs, решающего квазистатическую задачу для микрополосковых линий, получены геометрические размеры: для крайних секций ширина $W = 2,40$ мм, зазор $S = 4,55$ мм; для центральной $W = 2,48$ мм, $S = 0,58$ мм. Длины секций составили 9,61 мм и 19,99 мм соответственно.

Моделирование выполнялось в два этапа: идеализированная модель на элементах COUPLED (без потерь, фазовая скорость одинакова для мод) и реалистичная модель на элементах MCOUPLED с параметрами подложки FR-4 ($\epsilon_r = 4,85$, $h = 1,0$ мм, $t = 18$ мкм). Диапазон моделирования – 0,5–5 ГГц с шагом 4,5 МГц (1001 точка).

Результаты моделирования на частоте 2 ГГц сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования S-параметров на частоте 2 ГГц

Параметр, дБ	Идеализированная модель	Реалистичная модель	Отклонение
S ₁₁	-28,4	-18,2	10,2
S ₂₁	-0,1	-0,8	0,7
S ₃₁	-15,2	-16,8	1,6
S ₄₁	-32,5	-25,1	7,4

Анализ показал, что реалистичная модель даёт более высокие потери и худшую развязку, что объясняется диэлектрическими потерями и дисперсией в микрополосковой линии. Тем не менее, полученные значения находятся в приемлемых пределах для дальнейшей реализации.

Разработка топологии. Топология печатной платы разработана в Sprint Layout 6.0. Габариты платы – 50×100 мм. Реализованы три последовательно соединённые секции, четыре подводящих 50-омных линии с контактными площадками под SMA-разъёмы и сплошная заземляющая плоскость на обратной стороне. Подготовлены файлы Gerber для лазерного гравера.

Изготовление и контроль качества. Плата изготавливалась методом лазерного прямого экспонирования на гравере Two Trees TTs-55 (мощность 65%, скорость 150 мм/с). После экспонирования – травление в растворе хлорного железа при 45°C в течение 15 минут, затем зачистка и пайка разъёмов SMA. Готовый макет имеет размеры примерно 75×40 мм (с учётом разъёмов).

Контроль качества выполнен с помощью цифрового микроскопа Andostar (увеличение до 200×). Осмотр показал отсутствие заусенцев, равномерную ширину дорожек (отклонение ±15 мкм), чистоту зазоров, качественную пайку разъёмов. Микроскопия подтвердила пригодность макета для электрических измерений.

Измерения и результаты. Измерения S-параметров проведены на векторном анализаторе NanoVNA-f v2. Перед измерениями выполнена

двухпортовая калибровка SOLT (Short-Open-Load-Thru) в диапазоне 0,1–4,4 ГГц с учётом погрешности кабелей (два кабеля длиной 30 см). Количество точек – 1000 (шаг ~4,3 МГц). При измерении каждого параметра на свободные порты ответвителя устанавливались нагрузки 50 Ом.

Получены следующие экспериментальные значения на частоте 2 ГГц (таблица 2).

Таблица 2 – Экспериментальные S-параметры на частоте 2 ГГц

Параметр	Комплексное значение	Модуль	Значение, дБ
S_{21}	$0,89 - j0,255$	0,926	-0,67
S_{31}	$0,185 - j0,000289$	0,185	-14,6
S_{41}	$-0,12 - j0,0122$	0,1206	-18,4
S_{32}	$-0,865 - j0,254$	0,902	-0,89

Сравнение с моделированием (таблица 3) показало:

Таблица 3 – Сравнение моделирования и эксперимента на 2 ГГц

Параметр, дБ	Модель (реалистичная)	Эксперимент	Расхождение
S_{11}	-18,2	-20,9	2,7
S_{21}	-0,8	-0,67	0,13
S_{31}	-16,8	-14,6	2,2
S_{41}	-25,1	-18,4	6,7

Наибольшее расхождение наблюдается для развязки S_{41} (6,7 дБ) и коэффициента связи S_{31} (2,2 дБ). Причины: погрешности лазерной гравировки (зазор в центральной секции оказался шире расчётного на 5–7 мкм), потери в диэлектрике FR-4, неидеальные нагрузки 50 Ом, паразитные эффекты в местах

пайки разъёмов. Симметрия ответвителя подтверждена близостью S_{21} и S_{32} (различие 0,22 дБ).

Рабочая полоса, в которой коэффициент связи находится в пределах $-15 \pm 1,5$ дБ, составляет примерно 1,0–3,5 ГГц, что подтверждает широкополосность разработанного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы достигнута поставленная цель: спроектирован, изготовлен и экспериментально исследован микрополосковый широкополосный направленный ответвитель.

Основные результаты и выводы:

1. Теоретический анализ показал, что трёхступенчатая топология на связанных линиях с чебышевской характеристикой позволяет получить широкополосную связь -15 дБ при использовании классических таблиц Фельдштейна. Выявлено, что основным ограничением является различие фазовых скоростей чётной и нечётной мод в микрополосковых линиях.
2. Моделирование в Qucs подтвердило работоспособность выбранной топологии. Для идеализированной модели получены: $S_{31} = -15,2$ дБ, $S_{21} = -0,1$ дБ, развязка > -28 дБ. Учёт реалистичной подложки FR-4 привёл к ухудшению параметров: $S_{31} = -16,8$ дБ, $S_{21} = -0,8$ дБ.
3. Изготовление макета на лазерном гравере Two Trees TTs-55 показало, что технология позволяет формировать зазоры около $0,27-0,30$ мм, что достаточно для реализации связи -15 дБ, но недостаточно для высокой направленности из-за микронеровностей краёв дорожек.
4. Экспериментальные измерения на NanoVNA-f v2 на частоте 2 ГГц дали: $S_{21} = -0,67$ дБ, $S_{31} = -14,6$ дБ (близко к целевому -15 дБ), $S_{41} = -18,4$ дБ, $S_{32} = -0,89$ дБ. Устройство работоспособно в полосе $1,0-3,5$ ГГц.
5. Установлены причины расхождений с моделированием: потери в диэлектрике FR-4, погрешности лазерной гравировки (особенно в узком зазоре $0,58$ мм центральной секции), неидеальное согласование нагрузок 50 Ом и паразитные эффекты в местах пайки разъёмов.
6. Сформулированы рекомендации по улучшению конструкции: использование подложки с низкими потерями (Rogers RO4003, $\epsilon_r = 3,38$, $\tan \delta = 0,002$), применение фотолитографии или фрезерования для повышения точности, а также использование калиброванных СВЧ-нагрузок.

Таким образом, цель работы достигнута. Разработанный макет может быть использован в учебных лабораториях и при создании недорогих распределительных устройств для диапазона 1–3,5 ГГц. Предложенная методика проектирования и изготовления может служить основой для дальнейших исследований в области широкополосных СВЧ-устройств.