УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННЫХ КВАДРАТУРНЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА ЧАСТОТАХ СВЫШЕ 5 ГГЦ

А. С. Величкина[1], И. С. Коровченко[1], Г. К. Усков[1], С. П. Скулкин[1, 2]

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (ВГУ), Воронеж, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (ВШЭ), Москва, Россия

Аннотация. В работе предложен способ улучшения характеристик квадратурных ответвителей, таких как коэффициент отражения от входов (S11), изоляция (S41) и характеристики связи (S21 и S31) при разработке устройств на частотах порядка 5 ГГц и выше. Рассматриваются квадратурные ответвители, исполненные на полосковых платах с лицевой связью. Определены особенности, приводящие к ухудшению характеристик устройств при масштабировании моделей для работы на частотах 5 ГГц и выше, предложен способ улучшения параметров устройств. Описаны преимущества и недостатки предложенного решения.

Ключевые слова: квадратурный ответвитель, гибридный мост, сложение и деление сигналов, коэффициент отражения, изоляция, высокие частоты, заземление, возвратные токи.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF DIRECTIONAL HYBRID COUPLERS AT FREQUENCIES ABOVE 5 GHZ

A. S. Velichkina[1], I. S. Korovchenko[1], G. K. Uskov[1], S. P. Skulkin[1, 2]

[1]Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia
[2]National Research University «Higher School of Economics» (HSE), Moscow, Russia

Abstract. This paper proposes a method for improving the performance of hybrid couplers, including input reflection coefficient (S11), isolation (S41), and coupling characteristics (S21 and S31), when developing devices operating at frequencies of approximately 5 GHz and above. Quadrature couplers implemented on stripline boards with faceplate coupling are considered. The paper identifies the factors that lead to degraded device performance when scaling models for operation at frequencies of 5 GHz and above, and proposes a method for improving the device parameters. The advantages and disadvantages of the proposed solution are described.

Keywords: hybrid coupler, signal addition and division, reflection coefficient, isolation, high frequencies, grounding.

1. Введение

Квадратурные (гибридные) направленные ответвители широко применяются в СВЧ-трактах, включая усилители мощности, антенные решетки, фазовращатели и системы связи. Они обеспечивают деление и суммирование сигналов с заданным амплитудным соотношением и фазовым сдвигом 90°, что требует высокого уровня согласования, изоляции и точности фазовых характеристик [1].

При переходе к частотам выше 5 ГГц характеристики полосковых ответвителей ухудшаются вследствие усиления влияния паразитных параметров, прежде всего индуктивной составляющей импеданса, связанной с распределенным характером линий и особенностями протекания возвратных токов в многослойных структурах. Это

приводит к росту коэффициента отражения, снижению изоляции и искажению фазовых соотношений.

Оптимизация параметров за счет уменьшения толщины подложки ограничена дискретностью доступных материалов, что требует поиска альтернативных конструктивных решений [2-3].

В работе рассматриваются квадратурные ответвители на многослойных полосковых платах с лицевой связью. Предложен конструктивный подход, обеспечивающий управляемое изменение распределения возвратных токов и локализацию электромагнитного поля за счет введения дополнительных слоев заземления, что позволяет целенаправленно снижать паразитную индуктивность без изменения используемых материалов и технологических ограничений. Проведен сравнительный анализ характеристик различных вариантов стека на основе электродинамического моделирования.

2. Основные расчетные соотношения

В работе рассматриваются полосковые квадратурные (гибридные) мосты с лицевой связью. Работа квадратурного направленного ответвителя основана на возбуждении четного и нечетного режимов в системе связанных линий передачи. При этом амплитудно-фазовые характеристики устройства определяются соотношением волновых сопротивлений этих режимов — Z_{0e} и Z_{0o} [2].

Для одной секции линии $l = \lambda/4$ коэффициенты передачи в прямом и связанном каналах могут быть выражены через волновые сопротивления четного и нечетного режимов. При этом коэффициент связи определяется отношением [2]:

$$k = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \tag{1}$$

В работе рассматривается устройство типа «Тандем». В отличие от классических односекционных 3 дБ ответвителей, в тандемных структурах требуемое деление мощности достигается за счёт каскадного соединения нескольких секций с меньшей связью. В частности, квадратурный ответвитель может быть реализован в виде тандемного соединения двух секций с коэффициентом связи порядка 8,34 дБ каждая, что позволяет снизить требования к геометрии связанных линий и повысить технологическую реализуемость структуры.

При каскадировании двух идентичных секций результирующая матрица рассеяния определяется произведением матриц отдельных секций, а суммарный коэффициент передачи формируется за счёт интерференции сигналов, распространяющихся по различным путям. В этом случае амплитудные и фазовые характеристики выходных сигналов зависят как от величины связи в каждой секции, так и от их электрической длины. Волновые сопротивления четного и нечетного режимов для каждой секции определяются через погонные параметры связанных линий [2]:

$$Z_{0e} = \sqrt{\frac{L + M}{C + C_m}}, Z_{0o} = \sqrt{\frac{L - M}{C - C_m}} \tag{2}$$

где L и C — собственные погонные индуктивность и ёмкость линии, M и C_m – взаимная индуктивность и емкость.

Коэффициент связи каждой секции при этом определяется как функцией геометрии, так и параметрами диэлектрической среды, и для тандемных структур выбирается из условия обеспечения требуемого результирующего деления мощности и фазового сдвига:

$$|S_{21}| \approx |S_{31}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \tag{3}$$

На высоких частотах существенную роль начинает играть частотная зависимость погонных параметров. Импеданс линии может быть представлен в виде:

$$Z(\omega) = R + j\omega L_{eff}(\omega) \quad (4)$$

Где $L_{eff}(\omega)$ — эффективная индуктивность, учитывающая распределение токов в многослойной структуре. Увеличение $L_{eff}(\omega)$ приводит к изменению значений Z_{0e} и Z_{0o}, а также к нарушению их соотношения, определяющего коэффициент связи.

Для тандемных ответвителей данный эффект усиливается, поскольку отклонения параметров в каждой секции накапливаются при каскадировании, что приводит к более выраженному ухудшению согласования, изоляции и фазовых характеристик по сравнению с односекционными структурами [3-4].

Эффективная индуктивность линии в значительной степени определяется конфигурацией возвратных токов. В многослойных печатных платах токи замыкаются по заземляющим слоям, и увеличение расстояния до опорной земли приводит к росту площади контура тока и, как следствие, к увеличению индуктивности:

$$L_{eff} \sim \mu \cdot \frac{S}{l} \quad (5)$$

Таким образом, при проектировании тандемных квадратурных ответвителей на частотах свыше 5 ГГц ключевым фактором становится управление погонной индуктивностью и, соответственно, параметрами четного и нечетного режимов. Это требует не только оптимизации геометрии связанных линий, но и целенаправленного управления распределением возвратных токов за счёт модификации структуры заземляющих слоев [5].

3. Предложенное решение

Платы квадратурных (гибридных) мостов изготавливаются четырехслойными: два слоя с сигнальными дорожками, верхний и нижний слои заземления. При этом обычно платы спекаются следующим образом: берется три диэлектрических основания разной толщины, два более толстых диэлектрика формируют «крышки» устройства, на тонком диэлектрике с обеих сторон находятся сигнальные дорожки. Три диэлектрика спекаются двумя или тремя слоями препрега. Типичный пример стека устройств приведен в таблице 1.

Таблица 1. Типовой стек квадратурного гибридного моста

Тип слоя	Толщина, мм	Материал
Заземление	0,018	Медная фольга
Диэлектрик	0,76	Диэлектрик
Препрег	0,104	Диэлектрик
Препрег	0,104	Диэлектрик
Сигнальный слой	0,018	Медная фольга
Диэлектрик	0,51	Диэлектрик
Сигнальный слой	0,018	Медная фольга
Препрег	0,104	Диэлектрик
Препрег	0,104	Диэлектрик
Диэлектрик	0,76	Диэлектрик
Заземление	0,018	Медная фольга

Одной из проблем, возникающих при масштабировании моделей квадратурных (гибридных) мостов на более высокие частоты является возрастание индуктивности полосков питания.

Возрастание индуктивности с ростом частоты связано с толщиной: чем меньше длина волны, тем больший вклад начинает вносить индуктивная составляющая импеданса. Соответственно, при уменьшении толщины стека можно добиться уменьшения индуктивной составляющей импеданса. Однако, уменьшение толщин структуры упирается в производственные возможности производителей: толщины доступных материалов стандартизированы, соответственно, произвольные параметры толщин недостижимы.

Эффективная индуктивность полосковой линии в многослойной структуре определяется не только геометрией проводника, но и конфигурацией возвратного тока, замыкающегося через заземляющие слои. В первом приближении величина индуктивности пропорциональна площади контура тока, формируемого сигнальным и возвратным проводниками. Увеличение расстояния до опорной земли приводит к росту этой площади и, соответственно, к увеличению L_{eff}, что особенно существенно на высоких частотах.

Предлагаемое решение основано на уменьшении эффективной индуктивности линий за счёт сокращения расстояния до опорных заземляющих слоев и перераспределения возвратных токов внутри структуры. Введение дополнительных слоев заземления приводит к локализации электромагнитного поля вблизи сигнальных проводников и уменьшению площади контура тока, что обеспечивает снижение индуктивной составляющей импеданса без изменения используемых материалов и толщин диэлектрических слоев. Таким образом, в работе предлагается использовать стек, приведенный в таблице 2.

Таблица 2. Предлагаемый стек квадратурного гибридного моста

Тип слоя	Толщина, мм	Материал
Заземление	0,018	Медная фольга
Диэлектрик	0,76	Диэлектрик
Дополнительное заземление	0,018	Медная фольга
Препрег	0,104	Диэлектрик
Препрег	0,104	Диэлектрик
Сигнальный слой	0,018	Медная фольга
Диэлектрик	0,51	Диэлектрик
Сигнальный слой	0,018	Медная фольга
Препрег	0,104	Диэлектрик
Препрег	0,104	Диэлектрик
Дополнительное заземление	0,018	Медная фольга
Диэлектрик	0,76	Диэлектрик
Заземление	0,018	Медная фольга

Такое решение приводит к уменьшению эффективной области связи внутренних слоев. Соответственно, толщины дорожек связи уменьшаются, что приводит к уменьшению максимально допустимой рабочей мощности устройства. Далее рассмотрим

результаты моделирования и сравним результаты с классическим типом стека. Снижение эффективной индуктивности приводит к уменьшению волновых сопротивлений четного и нечетного режимов и стабилизации их соотношения, что, в соответствии с выражениями (раздел 2), обеспечивает улучшение коэффициента связи, согласования и изоляции.

Таким образом, введение дополнительных слоев заземления позволяет целенаправленно управлять распределением электромагнитного поля и параметрами связанных линий без изменения технологического процесса изготовления платы. В отличие от подходов, основанных на изменении толщины диэлектрика, предложенное решение реализуется в рамках стандартных стеков и не требует использования нестандартных материалов.

4. Сравнение результатов моделирования

Для определения применимости полученного решения были разработаны электродинамические модели квадратурных (гибридных) мостов в САПР CST Studio Suite. В ходе моделирования параметры устройств задавались исходя из соотношений, полученных в предыдущем разделе. В качестве основного диэлектрика для моделирования был выбран Rogers 4350B, $\varepsilon = 3.66$, $\tan\sigma = 0.0037$, толщина металлизации 18 мкм.

Исходя из написанного в предыдущем разделе, добиться сдерживания роста индуктивной составляющей импеданса можно уменьшением толщины стека. Соответственно, в работе рассматривается три варианта:

1. «Крышка»: диэлектрик толщиной 0,72 мм; «центральная карточка» толщиной 0.56 мм.
2. «Крышка»: диэлектрик толщиной 0,52 мм; «центральная карточка» толщиной 0.2 мм.
3. «Крышка»: диэлектрик толщиной 0,52 мм; «центральная карточка» толщиной 0.2 мм, дополнительные слои заземления.

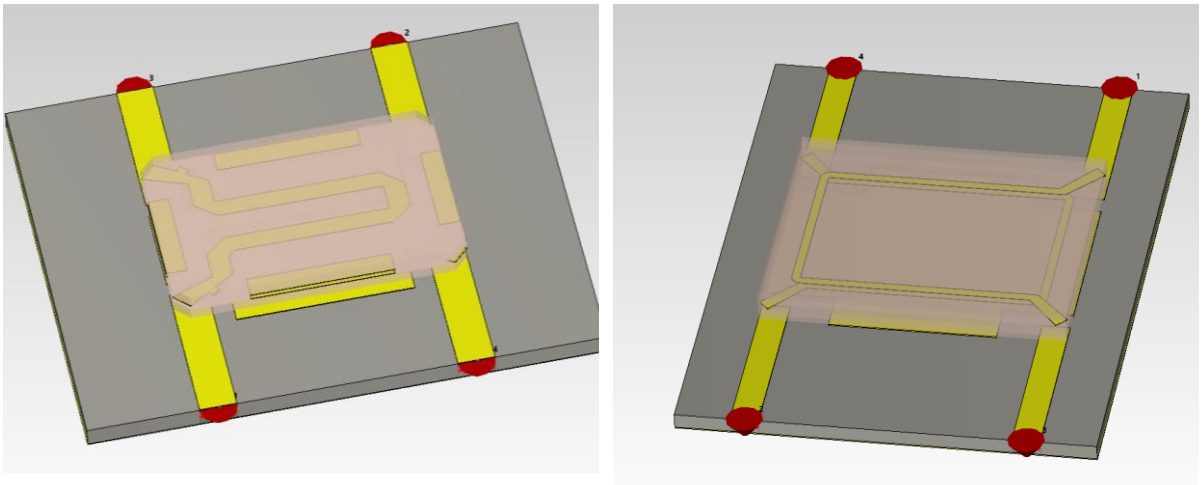
Моделирование устройств проводилось с учетом тестовой платы (или линий запитки). Внешний вид моделей показан на рис. 1, результаты моделирования показаны на рис. 2.

Результаты моделирования (рис. 2) показывают, что уменьшение толщины структуры (переход от стека 1 к стеку 2) приводит к улучшению коэффициента отражения и изоляции, что согласуется с уменьшением эффективной индуктивности линий за счет сокращения расстояния до опорных заземляющих слоев.

Наилучшие характеристики получены для стека 3 с дополнительными слоями заземления. Улучшение параметров S11 и S41 обусловлено дальнейшим снижением эффективной индуктивности L_{eff} за счет локализации возвратных токов и уменьшения площади их протекания. Это подтверждает предположение о доминирующем влиянии геометрии заземляющих слоев на СВЧ-характеристики устройства на частотах свыше 5 ГГц.

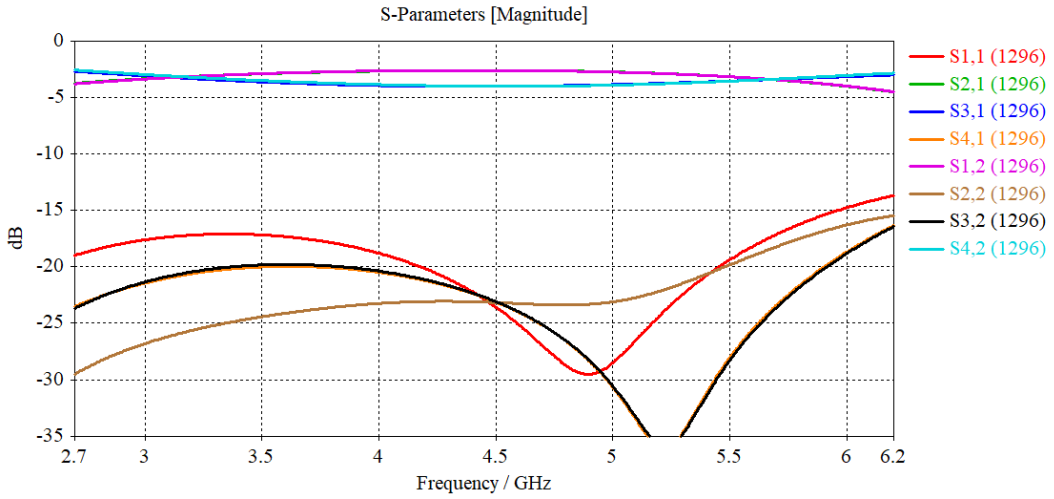
Дополнительно отмечается улучшение фазовых характеристик: максимальный разброс разности фаз между выходами для стека 3 составляет порядка 3°, тогда как для стеков 1 и 2 — около 5° (от 360 градусов). Это связано с более равномерным распределением параметров четного и нечетного режимов при уменьшении паразитной индуктивности.

Вместе с тем введение дополнительных слоев заземления приводит к уменьшению эффективной области связи и, как следствие, к снижению ширины проводников связанных линий (с ~0,87 мм до ~0,31 мм). Это сопровождается увеличением плотности тока и снижением максимально допустимой мощности устройства.

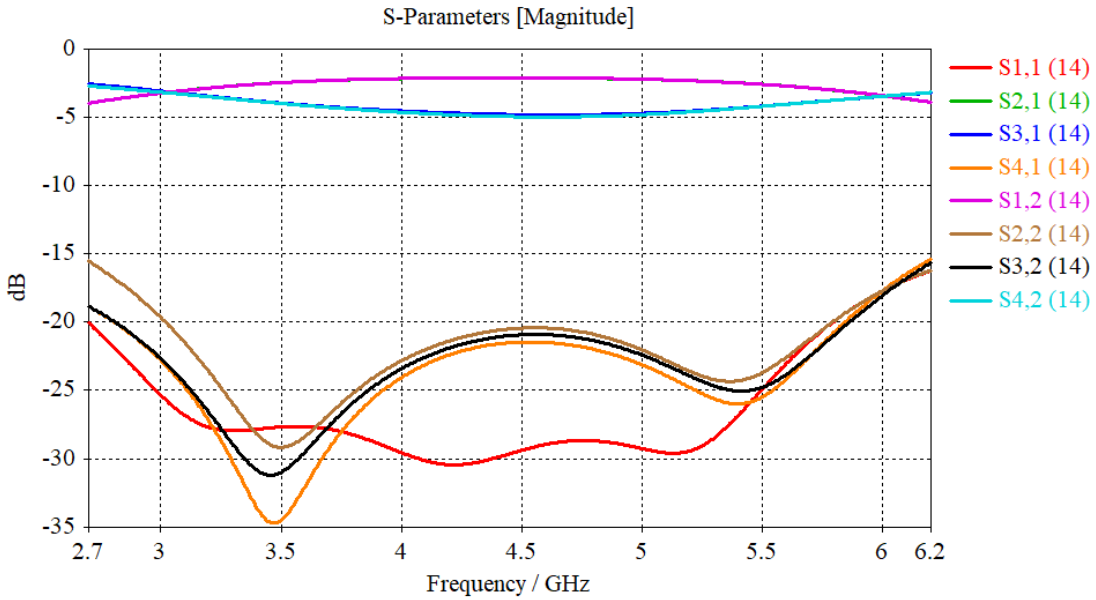


(а) (б)

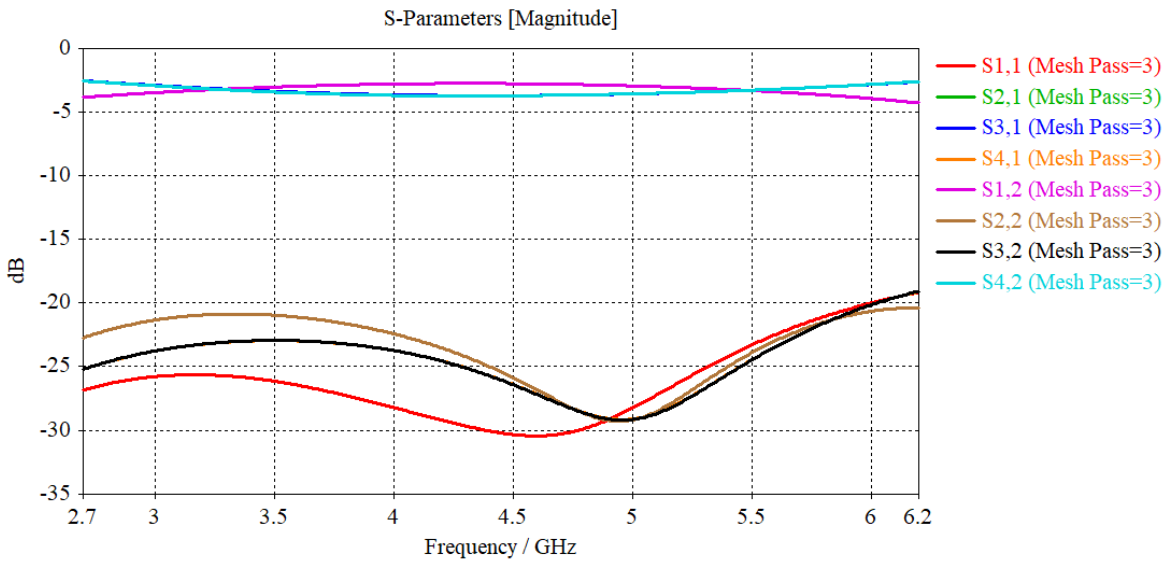
Рис. 1. Электродинамические модели квадратурных (гибридных) мостов в САПР CST Studio Suite: а) модель для первого и второго; б) модель для третьего стека со скрытым дополнительным заземлением.



(а)

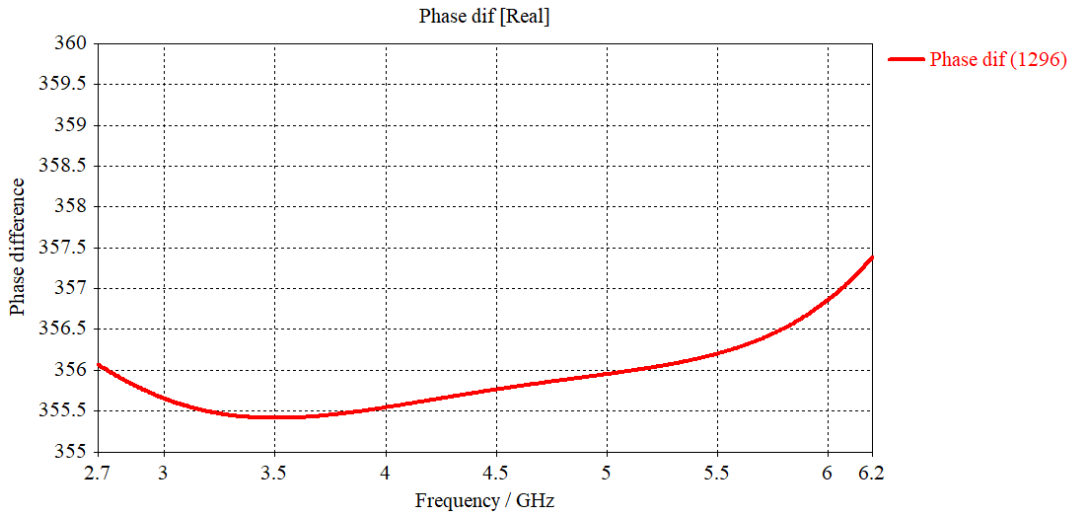


(б)

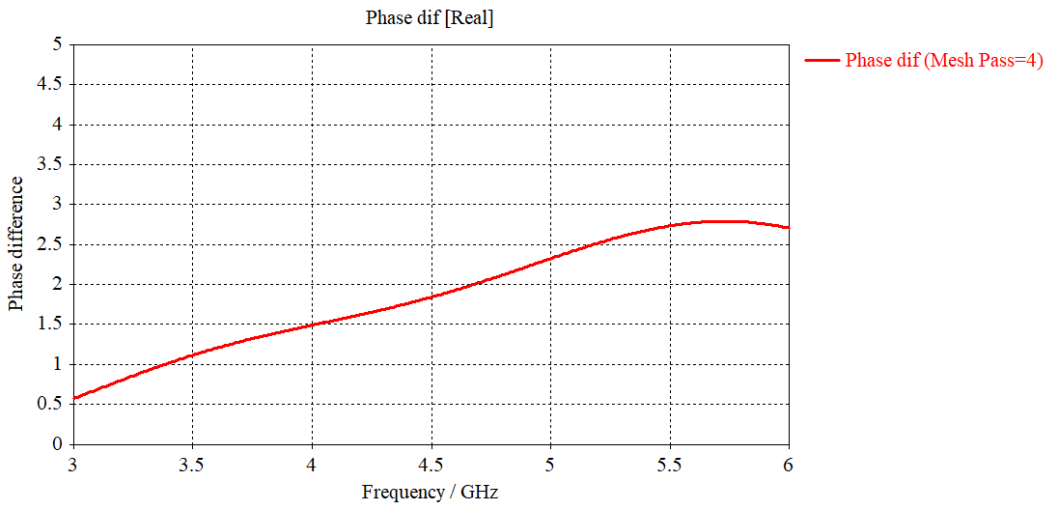


(в)

Рис. 2. Результаты моделирования квадратурных (гибридных) мостов: а) первый стек; б) второй стек; в) третий стек



(а)



(б)

Рис. 3. Фазовые характеристики моделей квадратурных (направленных) ответвителей: а) первый и второй стек; б) третий стек

Таким образом, результаты моделирования подтверждают, что предложенный подход позволяет целенаправленно управлять параметрами тандемного ответвителя за счет изменения структуры заземляющих слоев, обеспечивая улучшение согласования, изоляции и фазовых характеристик при сохранении технологической реализуемости конструкции.

5. Заключение

В работе исследовано влияние структуры многослойной печатной платы на характеристики квадратурных направленных ответвителей, реализованных по тандемной схеме, в диапазоне частот свыше 5 ГГц.

Показано, что ухудшение характеристик при переходе к высоким частотам обусловлено ростом эффективной индуктивности линий, связанной с особенностями протекания возвратных токов в многослойных структурах. Предложен конструктивный подход, основанный на введении дополнительных слоев заземления, позволяющий уменьшить индуктивную составляющую импеданса за счет локализации электромагнитного поля и сокращения площади контура тока.

Результаты электродинамического моделирования демонстрируют улучшение коэффициента отражения, изоляции и фазовых характеристик для предложенной структуры по сравнению с классическими вариантами стеков. Установлено, что снижение паразитной индуктивности приводит к более точному выполнению условий для четного и нечетного режимов, определяющих работу направленного ответвителя.

Вместе с тем выявлено, что улучшение СВЧ-параметров сопровождается снижением максимально допустимой мощности вследствие уменьшения ширины проводников связанных линий.

Таким образом, предложенное решение характеризуется компромиссом между качеством СВЧ-характеристик и мощностными возможностями устройства. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование предложенного подхода при проектировании тандемных квадратурных ответвителей в системах связи и других приложениях, где приоритетом являются характеристики согласования, изоляции и фазовой точности, а требования к передаваемой мощности являются умеренными.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, https://rscf.ru/project/24-19-00891/.

Для выполнения измерений в работе использовалось оборудование учебно-научного дизайн-центра проектирования радиоэлектронных систем СВЧ, терагерцового и оптического диапазонов на отечественной электронной компонентной базе ФГБОУ ВО «ВГУ» в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Литература

1. Позар Д. М. Микроволновая техника / Д. М. Позар. — 4-е изд. — Hoboken, NJ : Wiley, 2012. — 732 с.
2. Mongia R. K. RF and Microwave Coupled-Line Circuits / R. K. Mongia, I. J. Bahl, P. Bhartia. — 2nd ed. — Norwood, MA : Artech House, 2007. — 588 с.
3. Matthaei G. L. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures / G. L. Matthaei, L. Young, E. M. T. Jones. — Norwood, MA : Artech House, 1980. — 1096 с.