

Разработка микрополоскового направленного ответвителя уменьшенных размеров

Д. А. Летавин¹

Разработан компактный трехшлейфный мост с использованием микрополосковых ячеек, установленных вместо традиционных четвертьволновых отрезков. С помощью программы электродинамического моделирования AWR DE 13 были получены его частотные характеристики. Изготовлен опытный образец предлагаемого моста и измерены его характеристики, которые подтверждают работоспособность устройства. Площадь компактного моста получилась на 74 % меньше по сравнению с площадью традиционной конструкции.

Ключевые слова: микрополосковая линия, трехшлейфный мост, миниатюризация, микрополосковая ячейка.

1. Введение

Мостовые устройства играют важную роль в радиотехнических системах (радионавигация, тестовое оборудование), радиоизмерениях и других областях техники. Также они используются в качестве функционального узла для построения делителей мощности, смесителей, модуляторов, сумматоров мощности, диаграммообразующих элементов. В обычных конструкциях в качестве основного элемента для реализации моста выступают четвертьволновые линии передачи, которые на низких частотах оказываются громоздкими, из-за чего в некоторых случаях требуется их миниатюризация. Типичный квадратурный мост делит входную мощность поровну между двумя его выходами с разностью фаз 90° , при этом оставшийся вход развязан. Для увеличения рабочей полосы частот моста используется увеличение количества подключаемых шлейфов, что влечет за собой только увеличение продольных размеров конструкции.

В настоящее время в литературе описано множество компактных конструкций, уменьшение геометрических размеров которых варьируется от 40 до 90 процентов, но некоторые из них неудобны для изготовления, а большинство имеет гораздо худшие характеристики, чем у обычных конструкций [1–11]. В данной работе разработан компактный трехшлейфный мост с использованием микрополосковых ячеек, которые позволили значительно уменьшить его площадь и устранить паразитные полосы пропускания.

2. Методика проектирования

Обычный трехшлейфный мост, как правило, состоит из двух 35-омных микрополосковых линий (МПЛ), соединяемых одним центральным 35-омным шлейфом и двумя 120-омными шлейфами на расстоянии четверти длины волны друг от друга. Рабочая площадь такого устройства определяется размерами четвертьволновых отрезков. Исходя из этого, необ-

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.2538.2017/4.6).

ходимо заменить данные отрезки на микрополосковые ячейки, которые обладают такими же характеристиками на центральной частоте и в ее окрестности, но при этом имеют меньшие размеры. На рис. 1 приведено сравнение фазовых электрических длин четвертьволновой линии и соответствующей ей ячейки, а также их геометрических размеров. В качестве материала подложки был выбран стандартный СВЧ-материал FR-4 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.4$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0.02$ и толщиной $h = 1$ мм.

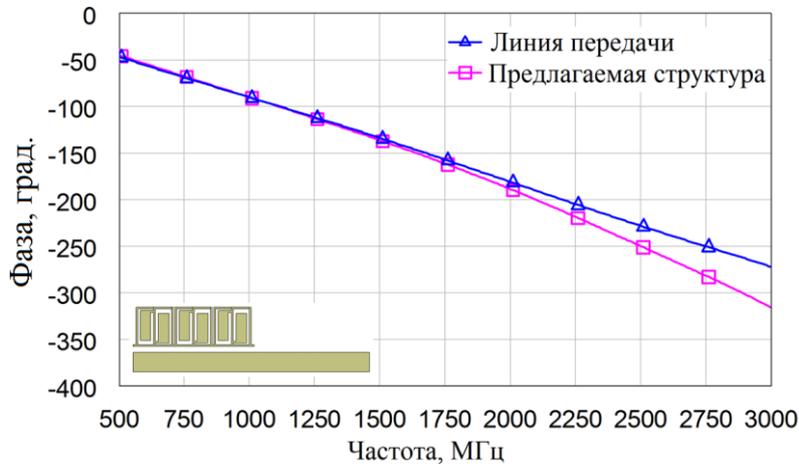


Рис. 1. Сравнение значений фазы микрополосковой линии и предлагаемой структуры

Очевидно, что фазо-частотные характеристики линии передачи и ячейки практически совпадают до частот около 1750 МГц. Микрополосковые ячейки представляют собой последовательность из высокоомных отрезков линии передачи, объединенных в виде прямоугольника, во внутреннее пространство которого устанавливается низкоомный отрезок, выступающий в роли емкости и имеющий электрический контакт с высокоомным отрезком. Толщина линий и зазоры между ними выбираются с точки зрения технологической реализуемости. Для электродинамического анализа проектируемой схемы использовалась программа NI AWR Design Environment 13. Первоначально с помощью данной программы был спроектирован трехшлейфный мост стандартной конструкции с центральной частотой 1000 МГц. Площадь такой конструкции составляет 3854 мм^2 , полоса рабочих частот, определяемая по уровню развязки, равному -20 дБ, составляет 333 МГц.

Для получения компактной конструкции необходимо спроектировать ячейки с входными сопротивлениями 35 Ом, а линии с сопротивлением 120 Ом просто изогнуть в виде меандра. Размеры обычных линий и ячеек представлены в табл. 1. Так, 35-омные ячейки оказались короче почти в два раза, чем обычные шлейфы. На рис. 2 показаны топологии полученных микрополосковых ячеек в результате проектирования.

Таблица 1. Сравнение длин традиционных отрезков и микрополосковых ячеек

Конструкции		L, мм	W, мм
35 Ом	Стандартная линия	41	3.3
	Микрополосковая ячейка	21.1	6.8
35 Ом	Центральный шлейф	46.6	3.3
	Микрополосковая ячейка	23.3	11.7

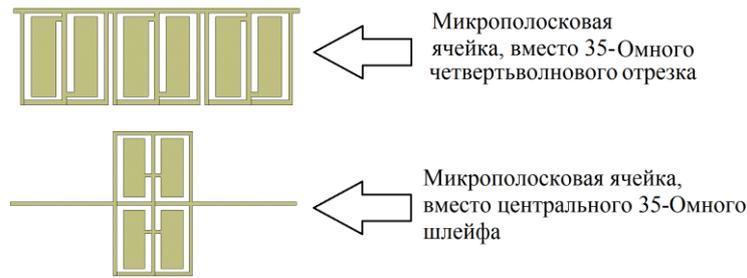


Рис. 2. Предлагаемые микрополосковые ячейки

После объединения всех ячеек в схеме из-за влияния элементов соседних токопроводящих линий друг на друга необходимо произвести оптимизацию всей конструкции для получения оптимальных характеристик. На рис. 3 показана топология компактного трехшлейфного моста, полученная в программе AWR. Площадь устройства составляет $43.1 \text{ мм} \times 23.3 \text{ мм} = 1004.2 \text{ мм}^2$. Эта конструкция работает на центральной частоте 1000 МГц и обеспечивает разность фаз между выходами моста 90 градусов.

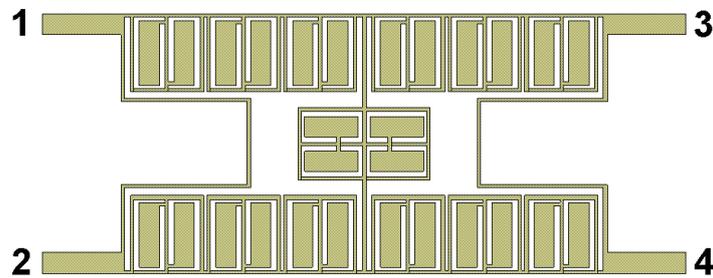


Рис. 3. Компактный мост, полученный в программе AWR

Результаты моделирования для предлагаемого устройства представлены на рис. 4. Полоса пропускания у компактной конструкции составляет 287 МГц (определяемая по развязке минус 20 дБ). Стоит отметить, что при уменьшении размеров конструкции появились такие недостатки, как сокращение полосы рабочих частот и уменьшение значений коэффициентов передачи. Причина этих недостатков заключается в том, что у миниатюрной конструкции получается более плотное расположение всех элементов, в результате чего они начинают взаимодействовать между собой. Также стоит учесть то, что характеристики ячейки совпадают с характеристиками обычной линии в ограниченной полосе частот. Однако при такой реализации у трехшлейфного моста появляется положительный эффект – отсутствие паразитных полос пропускания на других частотах. Также по результатам моделирования видно, что коэффициент отражения S_{11} составляет -36 дБ на центральной частоте. Разность фаз между выходами моста составляет 90 градусов на частоте 1000 МГц.

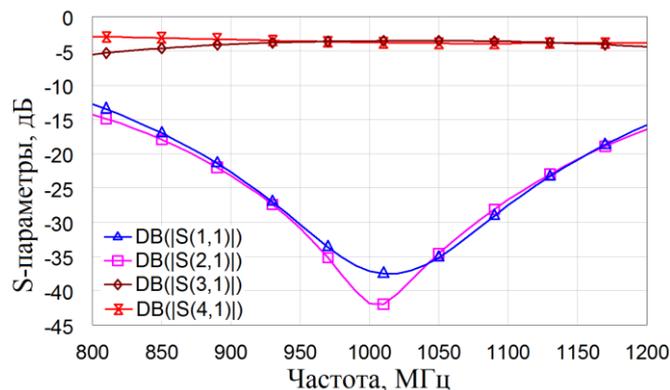


Рис. 4. Зависимость S-параметров от частоты для компактного моста

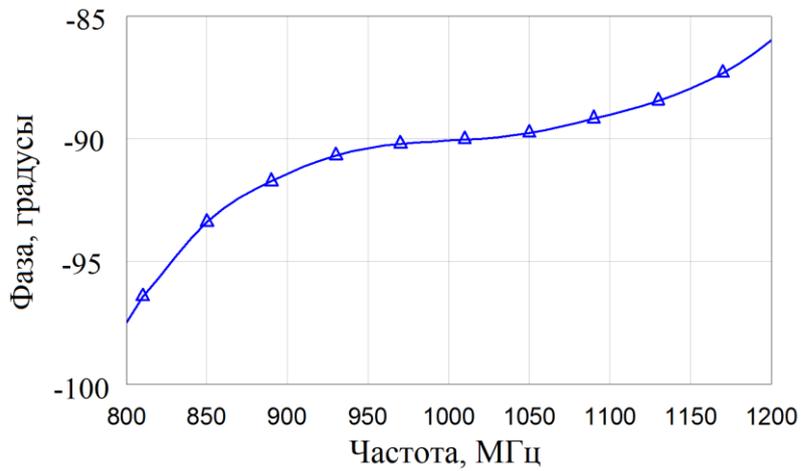


Рис. 5. Разность фаз между выходами компактного моста

3. Изготовление макета

После того как модель была готова, был изготовлен опытный образец с помощью стандартного метода изготовления печатных плат (рис. 6). Данный макет был исследован при помощи векторного анализатора цепей R&S ZVA24 и калибровочного набора ZV-Z52. Экспериментальные частотные зависимости представлены на рис. 7, 8.

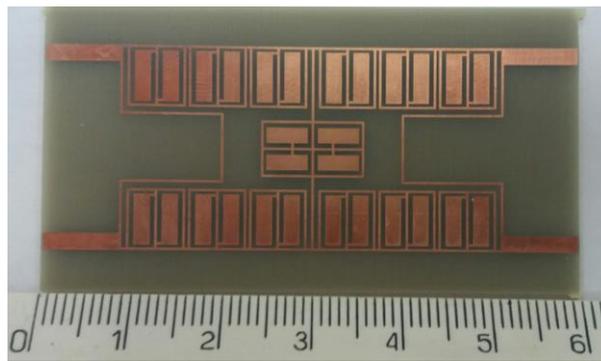


Рис. 6. Макет компактного трехшлейфного моста

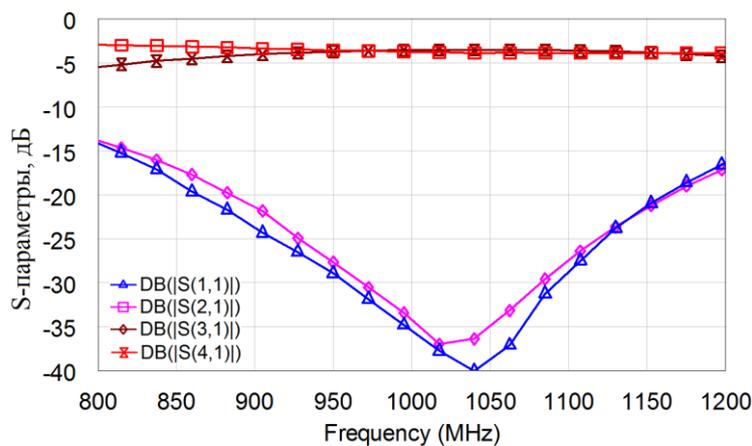


Рис. 7. Зависимость S-параметров от частоты для компактного моста

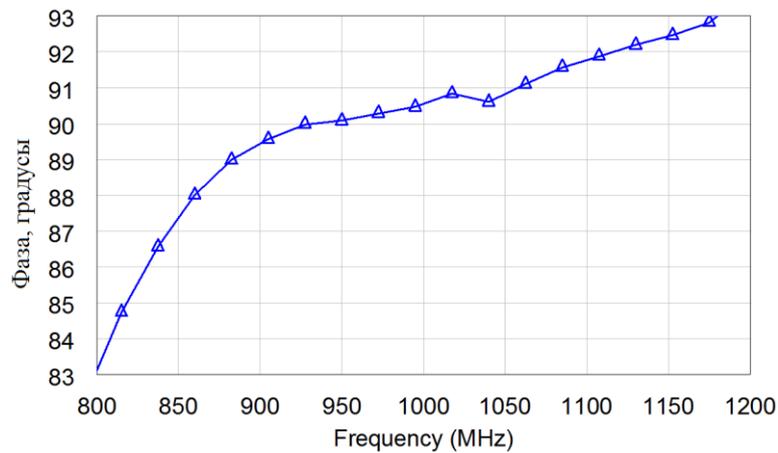


Рис. 8. Разность фаз между выходами компактного моста

Центральная рабочая частота моста сместилась на 2.4 % до 1024 МГц, полоса рабочих частот (по уровню развязки -20 дБ) составляет 280 МГц, дисбаланс между коэффициентами передачи на центральной частоте не превышает 0.3 дБ. Также по результатам моделирования видно, что коэффициент отражения S_{11} составляет -40 дБ на центральной частоте. Разность фаз между выходами моста составляет 90.5 градусов. Все полученные результаты для сравнения сведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики исследованных микрополосковых мостов

Тип устройства	Площадь, мм ²	Полоса частот по уровню развязки -20 дБ, МГц	Разность фаз на выходах, градусы	Коэффициенты передачи на выходах	
				S_{31}	S_{41}
Стандартный	3854	333	90	-3.3	-3.4
Компактная модель	1004.2	287	90	-3.8	-3.8
Компактный макет	1004.2	280	90.5	-3.7	-3.5

На основании вышеизложенного можно сказать, что общий подход к проектированию компактного моста заключается в синтезе микрополосковых ячеек, которые будут обладать схожими характеристиками с четвертьволновыми отрезками на центральной частоте и в ее окрестности. Также стоит отметить, что примерно такой же уровень миниатюризации ожидается получить при использовании других параметров подложки.

4. Заключение

В данной работе спроектирован и изготовлен трехшлейфный мост. Процесс миниатюризации заключается в простой замене четвертьволновых отрезков на микрополосковые ячейки, которые обладают эквивалентными характеристиками. Размещение элементов ячеек во внутренней области моста позволило дополнительно уменьшить площадь устройства. Весь процесс проектирования и оптимизация предлагаемой конструкции осуществлялись в программе NI AWR Design Environment 13. Площадь компактного моста получилась меньше на 74 % по сравнению с площадью традиционной конструкции. Однако такая конструкция имеет свои недостатки – это сокращение полосы рабочих частот, уменьшение значения коэффициента передачи и уменьшение максимально возможной подаваемой на вход мощности. При этом у предлагаемой конструкции отсутствуют паразитные полосы пропускания на соседних

частотах. Топология предлагаемого мостового устройства может быть легко изготовлена при помощи стандартных методов изготовления печатных плат. Для увеличения степени миниатюризации необходимо уменьшить толщину высокоомных линий, уменьшить зазоры между всеми элементами. Однако такие действия приведут к еще большему ухудшению получаемых характеристик устройства.

Литература

1. Щетинин Н. Н., Мельник В. А. Компактный микрополосковый 3 дБ квадратурный направленный ответвитель // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2014. № 4. С. 26–28.
2. Щетинин Н. Н., Останков А. В., Воробьёва Е. И. Математическая модель для проектирования микрополоскового направленного ответвителя на квазисосредоточенных элементах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 3–1. С. 66–70.
3. Zhu J., Zhou Y., Liu J. Miniaturization of broadband 3 dB branch-line coupler // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2011. V. 24. P. 169–176.
4. Wei-Shin Chang and Chi-Yang Chang. A high slow-wave factor microstrip structure with simple design formulas and its application to microwave circuit design // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2012. V. 60, № 11. P. 3376–3383.
5. Kai-Yu Tsai, Hao-Shun Yang, Jau-Horng Chen, and Yi-Jan Emery Chen. A miniaturized 3 dB branch-line hybrid coupler with harmonics suppression // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2011. V. 21, № 10. P. 537–539.
6. Kurgan P., Koziel S. A novel wideband microstrip branch-line coupler with compact footprint // 2015 IEEE European Microwave Conference (EuMC). DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345752.
7. Pischenko M. G., Pischenko D. G., Manuilov M. B. Design of compact strip-line directional couplers for high power operation within frequency band 4–12 GHz // Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). 2017. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262378.
8. Kanaparthi V Phani Kumar, Rusan Kumar Barik, Idury Satya Krishna, S. S. Karthikeyan. Design of compact 180° hybrid coupler for unequal power division ratio using slow wave structures // 2017 National Conference on Communications. DOI: 10.1109/NCC.2017.8077127.
9. Filipe Tabarani, Hermann Schumacher. Compact monolithic spiral quadrature coupler design. 2017. DOI: 10.1109/PRIME.2017.7974137.
10. Abinash Kumar Singh, Mrinal Kanti Mandal. A compact and wideband 90° cruciform coupler in SIW technology // 2016 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). DOI: 10.1109/APMC.2016.7931418.
11. Peng Liu, Dan Yang. A dual-band compact branch line coupler based on Γ -shaped transformer. 2016. DOI: 10.1109/ICEPT.2016.7583402

Выражение благодарности

Автор благодарен за программное обеспечение для моделирования NI AWR Design Environment, предоставленное компанией National Instruments. Исследование реализовано при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.2538.2017/4.6). Исследование проводилось на оборудовании Центра общего пользования Уральского федерального университета.

Статья поступила в редакцию 16.10.2017;
переработанный вариант — 21.02.2018.

Летавин Денис Александрович

аспирант, ассистент департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ-РТФ Уральского федерального университета (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32), тел. (343) 375-48-86, e-mail: d.a.letavin@urfu.ru.

Development of microstrip directional coupler of reduced dimensions**D. A. Letavin**

A compact coupler was developed using microstrip cells installed instead of traditional quarter-wave segments. Using the program of electrodynamic modeling AWR DE 13, its frequency characteristics were obtained. A prototype of the proposed coupler is made, and its characteristics are measured confirming the operability of the device. The area of the compact coupler turned out to be 74 % less than the area of the traditional construction.

Keywords: microstrip line, three-channel bridge, miniaturization, microstrip cell.