

УДК 621.396

МИНИАТЮРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ МОСТОВЫХ УСТРОЙСТВ

© 2016 Д.А. Летавин

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 29.09.2016

Статья посвящена исследованию возможности реализации миниатюрных конструкций мостовых устройств на основе простой замены четвертьволнового отрезка микрополосковой линии передачи на последовательность высоко- и низкоомных отрезков, представляющий собой фильтр нижних частот. Проведено сравнение данного способа уменьшения габаритов с одним из самых простых методов на основе простого изгиба микрополосковой линии передачи в виде меандра. Проведено моделирование предложенных конструкций мостов с рабочей частотой 1000 МГц и получены их частотные характеристики, сопоставимые с традиционными топологиями в заданной полосе частот. В качестве материала подложки выступает FR4 с диэлектрической проницаемостью 4.4 и толщиной 1 мм. Предлагаемый автором способ миниатюризации позволил уменьшить площадь устройств 72,4 и 66,2% двухшлейфного и трехшлейфного мостов соответственно, по сравнению со стандартными конструкциями.

Ключевые слова: миниатюризация, фильтр, нижние частоты, изгиб, микрополосковая линия

Мостовые устройства широко применяются для деления или сложения мощности в различных СВЧ-устройствах, таких, как фазовращатели, сумматоры, схемы питания многоэлементных антенн и др. Однако мостовые устройства, размеры которых определяются габаритами четвертьволновых отрезков, получаются громоздкими и не пригодными для использования, особенно на низких частотах, поэтому на сегодняшний день миниатюризация является актуальной задачей, и за последние годы появилось большое количество работ, посвященных вопросам миниатюризации. Например, в работе [1] предложено уменьшение габаритов при помощи изгиба микрополосковой линии, специально спроектированная линия передачи [2], шлейфов холостого хода [3], прерывистых структур [4], высокоомных линий передачи и распределенных конденсаторов [5], высокоомных линий передачи и встречноштыревых конденсаторов [6], асимметричных Т-структур [7], замедляющих структур [8] – эквивалентных схем на основе специальных линий передачи [9]. Последние исследования автора так же касаются случаев проектирования небольших традиционных микрополосковых мостовых устройств [10]–[12]. В табл. 1 приведено сравнение размеров, различных компактных двухшлейфных мостов.

Проектирование компактных устройств связано с решением противоречивой задачи обеспечением значительного уменьшения геометрических размеров при сохранении прежних характеристик моста стандартных размеров, что

не всегда удается. В этой работе предложен метод, основанный на замене отрезка линии передачи на фильтр нижних частот (ФНЧ), обладающий тем же фазовым сдвигом, что и заменяемый отрезок. Такой метод позволяет сохранить характеристики устройства в достаточно широкой полосе частот.

Мост – устройство с четырьмя входами, предназначенное для деления мощности поровну между двумя его выходами, притом, что оставшийся выход является развязанным. Используемые во всем мире микрополосковые мосты разнообразны по используемым в них конструктивным решениям. Стандартные конструкции двух- и трехшлейфных мостов состоят из двух отрезков полосковых линий передачи, соединенных между собой с помощью двух или трех шлейфов, длины которых равны $1/4$ длины волны в линии. Использование распределенных микрополосковых отрезков линии передачи приводит к весьма значительным размерам устройства, особенно при работе на низких частотах.

Цель работы: сравнение предлагаемого метода миниатюризации с одним из самых эффективных способов снижения габаритов мостовых конструкций за счет использования изгибов микрополосковой линии типа «змейка» вместо прямых отрезков микрополосковых линий.

Такие изгибы позволяют не только сократить расстояние между входами моста, но и эффективно использовать пространство внутри него. В разработанной конструкции материалом подложки был выбран стеклотекстолит с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=4,4$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,02$ и толщиной $h=1$

мм. Перед началом исследований были спроектированы мостовые устройства традиционной конструкции. Электродинамическое моделирование процессов в мостовых устройствах производится с

помощью программы AWR Design Environment 12. Все результаты численного моделирования этих образцов сведены в табл. 2.

Таблица 1. Сравнение методов миниатюризации

Источник	Технология миниатюризации	Относительный размер	Рабочая частота
	обычная микрополосковая линия	100%	-
[1]	изгиб микрополосковой линии	56%	3,25 ГГц
[2]	специально спроектированная линия передачи	27%	0,9 ГГц
[3]	шлейф ХХ	42%	1,8 ГГц
[4]	прерывистая структура	40%	1 ГГц
[5]	высокоомные линии передачи и распределенные конденсаторы	38%	3,45 ГГц
	Фильтр нижних частот	27,6%	1 ГГц
[6]	высокоомные линии передачи и встречноштыревые конденсаторы	27%	0,9 ГГц
[7]	асимметричная Т-структура	12%	0,9 ГГц
[8]	замедляющая структура	8,5%	0,9 ГГц
[9]	π-эквивалентная схема на основе специальных линий передачи	8,0%	0,9 ГГц

Таблица 2. Сравнение размеров обычных конструкций мостов

Конструкция	Полоса развязки по уровню -20 дБ, МГц	Площадь, мм ²
двухшлейфный мост	114	2051
трехшлейфный мост	331	3925

Можно заметить, что при увеличении количества шлейфов происходит увеличение полосы рабочих частот (определяемая по уровню развязки -20 дБ) с увеличением продольных размеров. Затем, используя изогнутые микрополосковые линии, были спроектированы аналогичные конструкции в миниатюрном исполнении. На рис. 1 приведено сравнение фазовых электрических длин четвертьволновой линии и соответствующего ей микрополоскового ФНЧ, а также их геометрических размеров.

Изгиб микрополосковых линий позволяет значительно сократить расстояние между входами

моста, а внесение изгибов внутрь позволило эффективно использовать пространство внутри самого моста. Топологии полученных конструкций и их частотные характеристики представлены на рис. 2-3. Все результаты численного моделирования сведены в табл. 3.

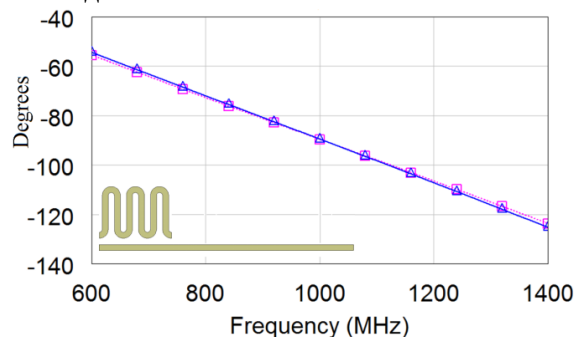


Рис. 1. Электрические длины отрезка микрополосковой линии (сплошная линия) и ФНЧ (пунктирная линия)

Таблица 3. Сравнение конструкций мостов при изгибе МПЛ

Конструкция	Полоса развязки по уровню -20 дБ, МГц	Площадь, мм ²	Уменьшение размеров, %	Уменьшение полосы пропускания, %
двухшлейфный мост с изогнутой МПЛ	110	1143	44,3	3,5
трехшлейфный мост с изогнутой МПЛ	324	1990	49,3	2

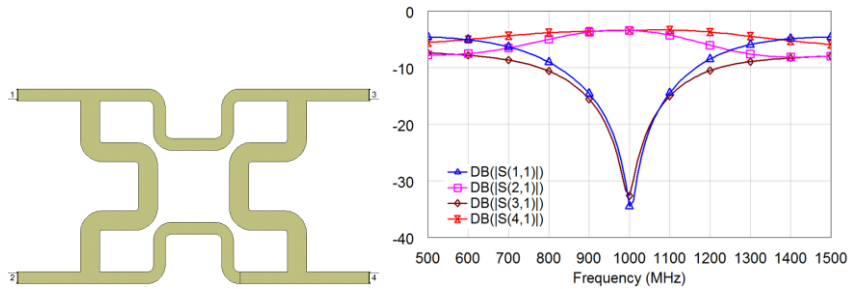


Рис. 2. Топология двухшлейфного моста и его численные результаты проектирования

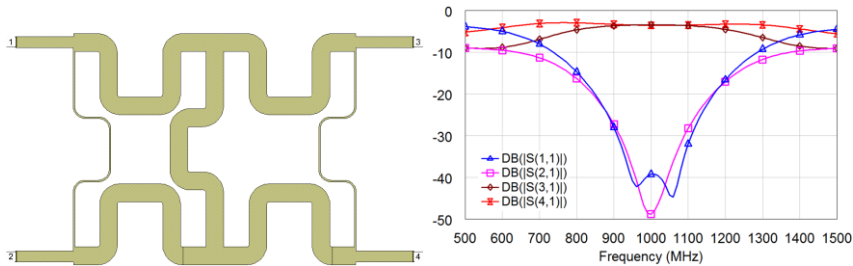


Рис. 3. Топология трехшлейфного моста и его численные результаты проектирования

Площади мостовых конструкций: двухшлейфного и трехшлейфного, были уменьшены на 44,3% и 47,3% соответственно. Метод миниатюризации мостовых конструкции с помощью изгиба микрополосковой линии (МПЛ) в виде меандра, в отличие от остальных методов, не обеспечивает существенное уменьшение размеров устройства, однако является оптимальным с точки зрения компактности и времени проектирования. Для того, чтобы повысить эффективность миниатюризации, приступаем к проектированию компактных конструкции с применением фильтров нижних частот. Применение ФНЧ существенно повысило эффективность миниатюризации. Топология двухшлейфного моста и его частотные характеристики представлены на рис.4-5.

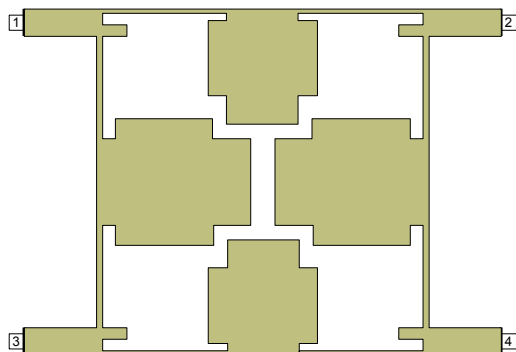


Рис. 4. Компактная топология двухшлейфного моста

Исходя из полученных результатов определяем, что центральная частота устройства составляет 1000 МГц. Дисбаланс коэффициентов

передачи составляет 0,1 дБ на центральной частоте. Полоса рабочих частот, определяемая по уровню развязки -20 дБ, равняется 90,5 МГц. Также результаты моделирования показывают, что коэффициент отражения на центральной частоте имеет значение равное -29 дБ. Геометрические размеры устройства составляют $24,3 \times 23,3 = 566,2 \text{ мм}^2$, это на 72,4% меньше по сравнению со стандартной конструкцией. Топология трехшлейфного моста и его частотные характеристики представлены на рис. 6-7.

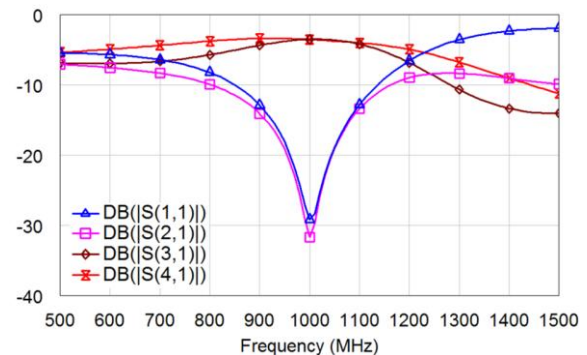


Рис. 5. Численные результаты проектирования компактного двухшлейфного моста

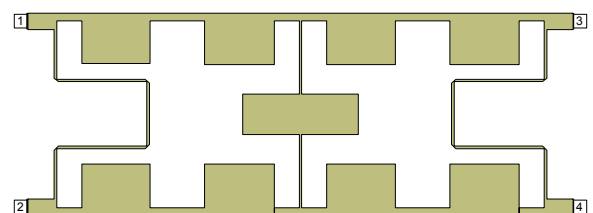


Рис. 6. Компактная топология трехшлейфного моста

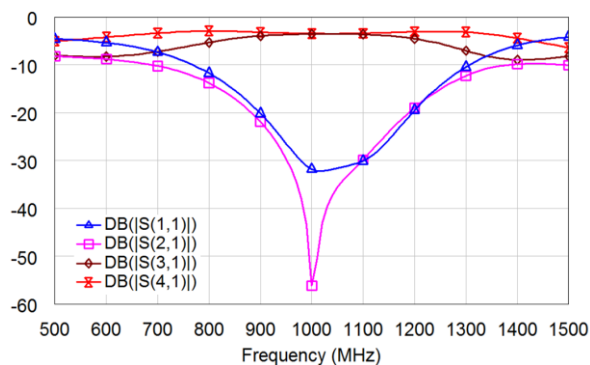


Рис. 7. Численные результаты проектирования компактного трехшлейфного моста

Дисбаланс коэффициентов передачи составляет 0,1 дБ на центральной частоте. Полоса рабочих частот, определяемая по уровню развяз-

ки -20 дБ, равняется 307 МГц. Также результаты моделирования показывают, что коэффициент отражения на центральной частоте имеет значение, равное -31,5 дБ. Геометрические размеры устройства составляют $23,3 \times 56,9 = 1325,8 \text{ мм}^2$, это на 66,2% меньше по сравнению со стандартной конструкцией. Все полученные результаты численного моделирования сведены в табл.4. Исходя из полученных результатов численного моделирования видно, что данный метод позволяет существенно уменьшить габариты мостовых устройств. Также можно отметить, что данный способ миниатюризации отличается своей простотой и быстротой проектирования компактных конструкций.

Таблица 4. Сравнение компактных конструкций мостов

Конструкция	Полоса развязки по уровню -20 дБ, МГц	Площадь, мм^2	Уменьшение размеров, %	Уменьшение полосы пропускания, %
двухшлейфный мост с изогнутой МПЛ	90,5	566,2	72,4	20,6
трехшлейфный мост с изогнутой МПЛ	307	1325,8	66,2	7,25

Выводы: исследован простой и быстрый способ миниатюризации микрополосковых мостовых устройств. Уменьшение геометрических размеров мостов основано на использовании фильтров нижних частот, имеющих такой же фазовый сдвиг на центральной частоте. Были получены компактные топологии двухшлейфного, трехшлейфного мостов, работающих на центральной частоте 1 ГГц и отличающихся компактными размерами по сравнению с обычными конструкциями и конструкциями с изогнутой микрополосковой линией в виде меандра. Площади мостовых конструкций: двухшлейфного, трехшлейфного мостов были уменьшены на 72,4% и 66,2% соответственно. При уменьшении геометрических размеров получилось сохранить характеристики устройства в широкой полосе частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Das, A.C. A Compact Branch-Line Coupler Using Folded Microstrip Lines / Das, A.C. L. Murmu, S. Dwari // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Dec. 2013. V. 10, No. 7. P. 1-3.
2. Wang, Ch.-W. A new planar artificial transmission line and its applications to a miniaturized butler matrix / Ch.-W. Wang, T.-Gh. Ma, C.-Fa Yang // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. Dec. 2007. V. 55, No. 12. P. 2792-2801.
3. Eccleston, K.W. Compact planar microstripline branch-line and rat-race couplers / K.W. Eccleston, S.H.M. Ong // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. Oct. 2003. Vol. 51, No. 10. P. 2119-2125.
4. Sun, K.-Oh. A Compact Branch-Line Coupler Using Discontinuous Microstrip Lines / K.-Oh Sun, S.-J. Ho, Ch.-C. Yen, D. van der Weide // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Aug. 2005. V. 15, N. 8. P. 519-520.
5. Jung, S.-Ch. A design methodology for miniaturized 3-dB branch-line hybrid couplers using distributed capacitors printed in the inner area / S.-Ch. Jung, R. Negra, F.M. Ghannouchi // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. Dec 2008. VI. 56, No. 12. P. 2950-2953.
6. Tsai, K.-Yu. A miniaturized 3 dB branch-line hybrid coupler with harmonics suppression / K.-Yu. Tsai, H.-Sh. Yang, J.-H. Chen, Yi-J. E. Chen // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Oct 2011. V. 21, N. 10. P. 537-539.
7. Tseng, Ch.-H. A rigorous design methodology for compact planar branch-line and rat-race couplers with asymmetrical T-structures / Ch.-H. Tseng, Ch.-L. Chang // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. July 2012. V. 60, No. 7. P. 2085-2092.
8. Chang, W.-Sh. A high slow-wave factor microstrip structure with simple design formulas and its application to microwave circuit design / W.-Sh. Chang, Chi-Ya. Chang // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. Nov 2012. Vol. 60, No. 11. P. 3376-3383.

9. Wu, Ch.-H. A Compact Branch-Line Coupler Using π -Equivalent Shunt-Stub-Based Artificial Transmission Lines / Ch.-H. Wu, Ch.-H. Tseng // Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference. Dec 2010. V. 17, No. 43. P. 802-805.
10. Letavin, D.A. Investigation of the frequency influence on the miniaturization efficiency of microstrip devices using LPFs / D.A. Letavin, Y.E. Mitelman, V.A. Chechetkin // 2016 10-th European Conf. on Antennas and Propagation, EuCAP 2016, DOI: 10.1109 / EuCAP.2016.7481614.
11. Letavin, D.A. Realization of miniaturized branch-line coupler using lowpass microstrip filters / D.A. Letavin, Y.E. Mitelman, V.A. Chechetkin // 2015 Loughborough Antennas and Propagation Conf., LAPC 2015, DOI:10.1109 / LAPC.2015.7366013.
12. Letavin, D.A. A novel method of design of miniaturized microstrip microwave devices using filters / D.A. Letavin, Y.E. Mitelman, V.A. Chechetkin // 2015 IEEE Intern. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2015, DOI:10.1109 / COMCAS.2015.7360482.

MINIATURE CONSTRUCTIONS OF MICROSTRIP COUPLERS

© 2016 D.A. Letavin

Ural Federal University, Ekaterinburg

Article is devoted to the research of a possibility to realize miniature constructions of microstrip couplers on the basis of simple replacement of a quarter-wave section of microstrip transmission line by a succession of high- and low-ohmic sections representing low-frequency filters. This way of dimensions reduction is compared to one of the simplest methods based on plain meander-like bend of microstrip transmission line. We have performed the simulation of presented coupler constructions with 1,000 MHz operation frequency and obtained their frequency characteristics comparable to traditional layouts within the given frequency range. FR4 with 4,4 dielectric permittivity and 1 mm thickness is taken as the material of the substrate. The miniaturization method featured by the author allowed to reduce the surface of two- and three-line couplers by 72,4% and 66,2% correspondingly in comparison with standard constructions.

Key words: *miniaturization, filter, lower frequencies, bend, microstrip line*