

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА МИКРОПОЛОСКОВОГО ДВУХШЛЕЙФНОГО МОСТА С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ МИНИАТЮРИЗАЦИИ

Д. А. Летавин

**Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.32**

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2018 г., после доработки – 23 марта 2018 г.

Аннотация. В данной работе разработана конструкция компактного двухшлейфного микрополоскового моста. Процедура миниатюризации заключается в использовании эквивалентных схем, чьи продольные размеры более чем в 2 раза меньше по сравнению с обычными четвертьволновыми отрезками. Для более значительного уменьшения площади моста элементы эквивалентных схем располагаются во внутренней области моста. С помощью метода травления печатных плат был изготовлен опытный образец предлагаемого моста. Полученная конструкция имеет площадь на 75.1% меньше по сравнению с площадью традиционной конструкции при сокращении относительной полосы частот всего на 1%.

Ключевые слова: микрополосковая линия, миниатюризация, двухшлейфный мост.

Abstract. In this paper the design of a compact branch-line coupler has been developed. The procedure of miniaturization consists in the use of equivalent circuits whose longitudinal dimensions are more than 2 times less as compared with the usual quarter-wave segments. For a more significant reduction in the area of the coupler, the elements of equivalent circuits are located in the inner area of the coupler. Using the method of etching printed circuit boards, a prototype of the proposed coupler was manufactured. The resulting design has an area of 75.1% less than the traditional design area, with a reduction in the relative frequency band by only 1%.

Key words: microstrip line, miniaturization, branch-line coupler.

1. Введение

Двухшлейфный мост является одним из ключевых компонентов радиотехнических систем [1]. Он может быть использован в фазовращателях, смесителях, диаграммообразующих схемах. Мощность, поступившая на порт моста 1, делится поровну между двумя его выходами портами 3 и 4, при этом порт 2 является изолированным. Разность фаз между выходами составляет 90 градусов. Одной из широко распространенных конструкций является конструкция из четырех четвертьволновых отрезков линии передачи с волновыми сопротивлениями 35 и 50 Ом (рис.1). Однако требуемая площадь такого устройства определяется размерами четвертьволновых отрезков, которые в ряде случаев могут быть непрактичными, особенно на низких частотах.

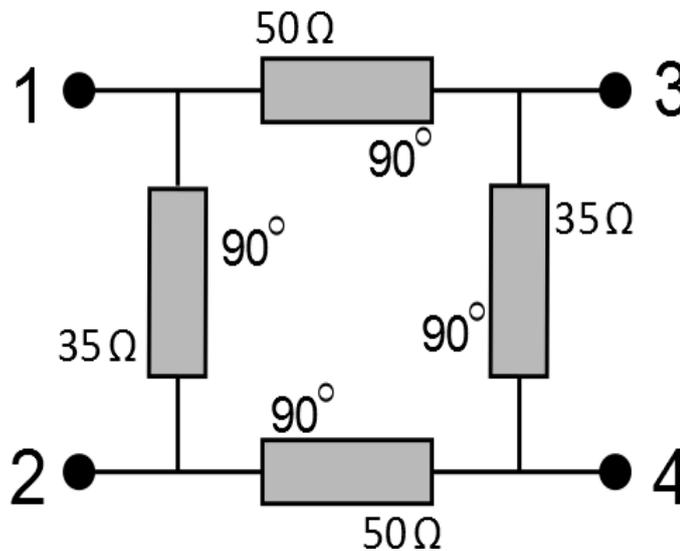
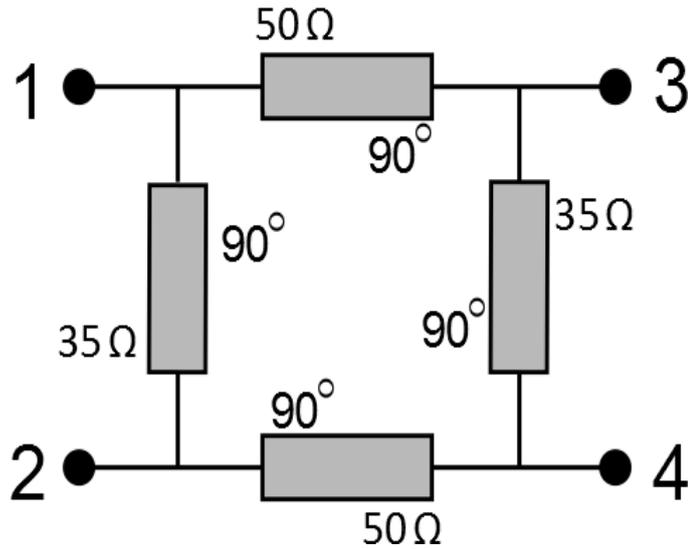


Рис.1 Эквивалентная схема стандартного двухшлейфного моста

В связи с этим были предложены различные методы по уменьшению их размеров [2]-[12]. Встречно-штыревые конденсаторы в [2], высокоомные структуры в [3], плоские искусственные линии передачи в [4,5], квази-сосредоточенные элементы в [6,7,8], несимметричные Т-образных структуры в [9], периодические емкостные нагрузки в [10], замедляющие структуры в [11], фрактальные структуры в [12]. В этой работе описана конструкция малоразмерного двухшлейфного моста, размеры которого были уменьшены путем использования высокоомных меандровых линий, представляющих

эквивалентные индуктивности, к которым подключены низкоомные сегменты, представляющие эквивалентные емкости.



2. Методика проектирования

Первоначально с помощью программы NI-AWR Design Environment 13 была получена топология традиционной конструкции в микрополосковом исполнении, с центральной частотой 1000 МГц (рис.2). Результаты численного моделирования показаны на рисунке 3,4. В качестве материала подложки был выбран FR-4, с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.4$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0.02$ и толщиной $h = 1$ мм. Стоит отметить, что традиционная конструкция работает как на своей центральной частоте, так и на кратных гармониках.

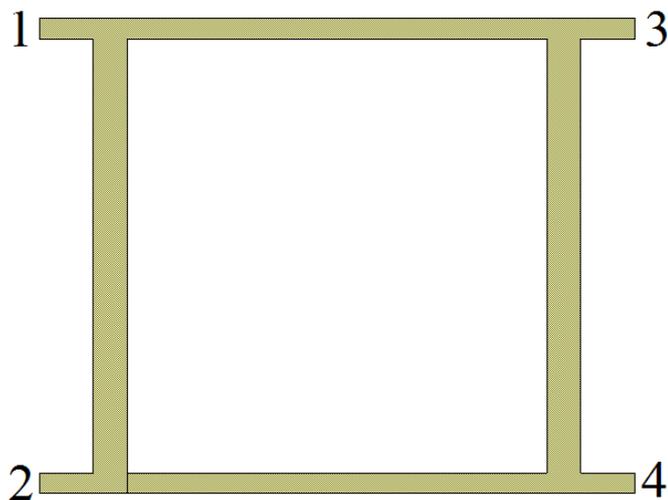


Рис.2 Топология стандартного двухшлейфного моста

Площадь традиционной конструкции составляет 2043 мм². Неиспользуемая внутренняя область моста составляет 78% от общей площади всего устройства.

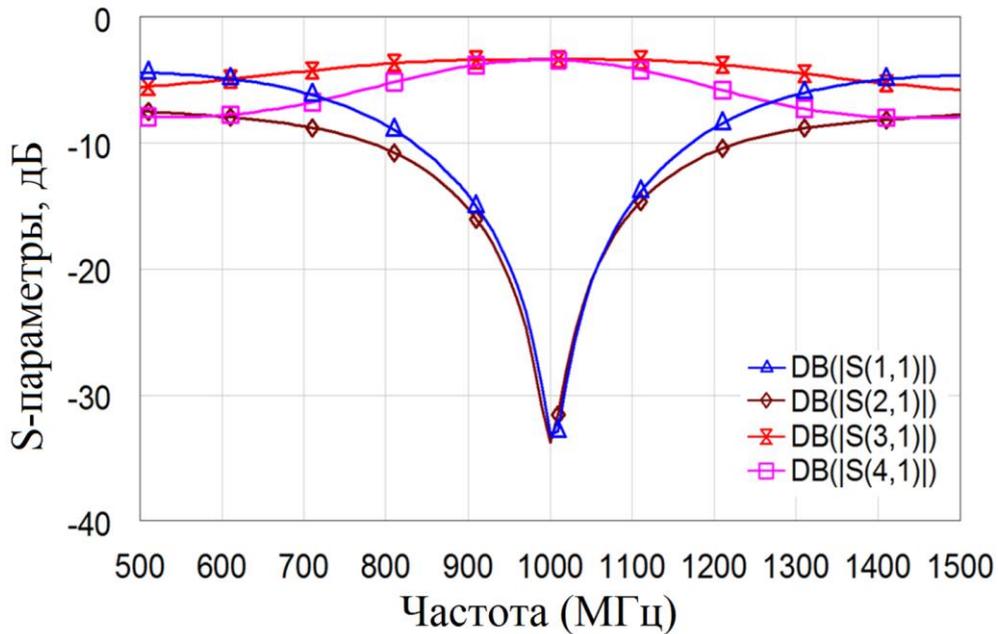


Рис.3 Зависимость S-параметров от частоты для традиционного моста

Результаты численного моделирования показывают, что рабочая полоса (определяемая по уровню -20 дБ развязки S21) составляет 112 МГц. Дисбаланс между коэффициентами передачи на центральной частоте составляет 0,05 дБ. Результаты моделирования также показывают, что параметр S11 равен -33 дБ на частоте 1 ГГц. Разность фаз между коэффициентами передачи на центральной частоте равна 90 градусам.

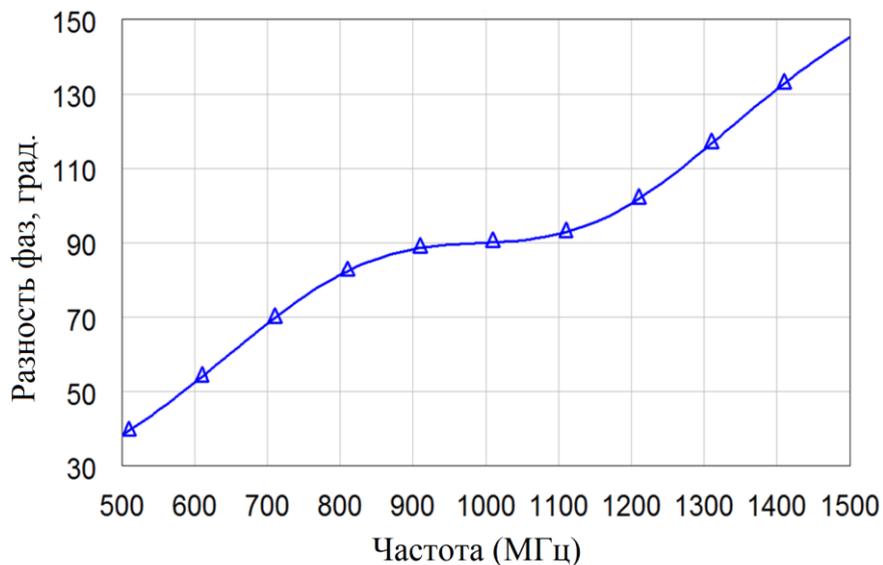


Рис. 4. Разность фаз между выходами традиционного моста

Процесс миниатюризации начинается с синтеза эквивалентных схем, состоящих из индуктивностей и емкостей. На рис. 5 приведено сравнение набега фазы от частоты для четвертьволновой линии и эквивалентной ей по фазовому сдвигу миниатюрной структуры в виде печатных проводников. Из приведенных характеристик видно, что набег фазы для четвертьволнового отрезка и эквивалентной схемы совпадают с некоторой погрешностью до частот около 1300 МГц, а на частоте 1000 МГц имеют одинаковую фазу 90 градусов.

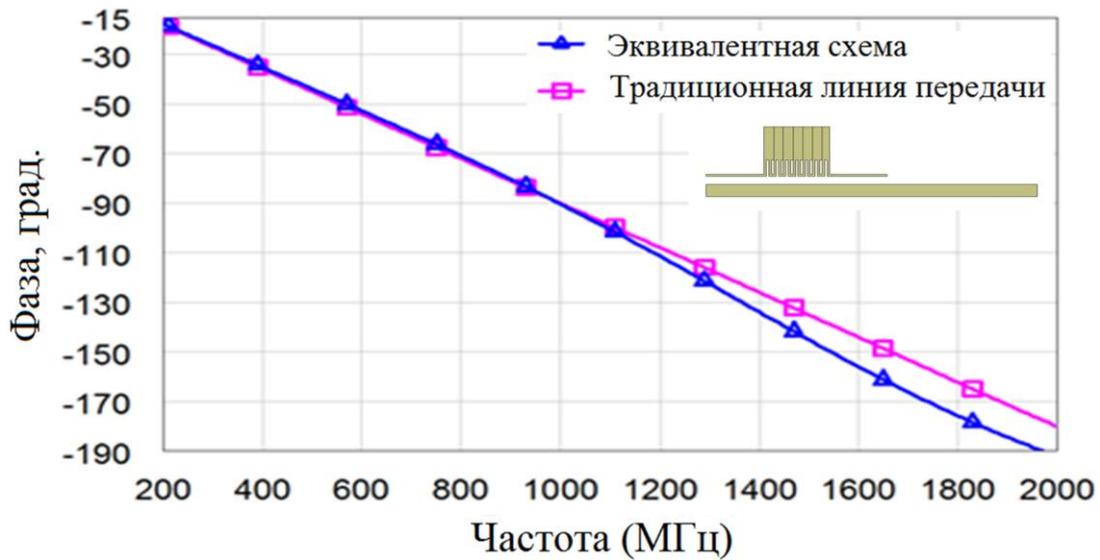


Рис. 5 Сравнение фазочастотных характеристик для традиционного отрезка и эквивалентной схемы

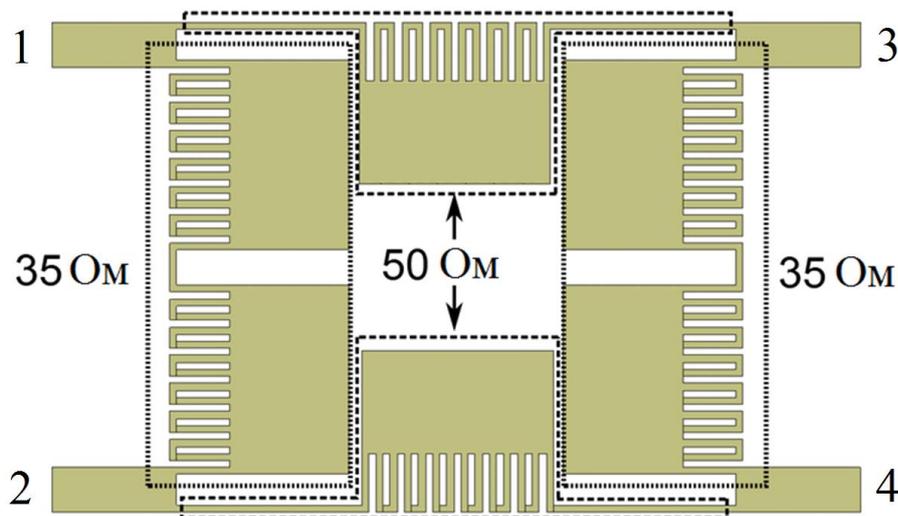


Рис. 6 Топология компактного двухшлейфного моста

После замены четырех четвертьволновых отрезков на их миниатюрный эквивалент получили топологию компактного двухшлейфного моста (рис.6). Характерной особенностью данной конструкции является то, что низкоомные сегменты располагаются внутри свободного пространства моста. Площадь устройства составляет $20,5 \text{ мм} \times 24,8 \text{ мм} = 508,4 \text{ мм}^2$.

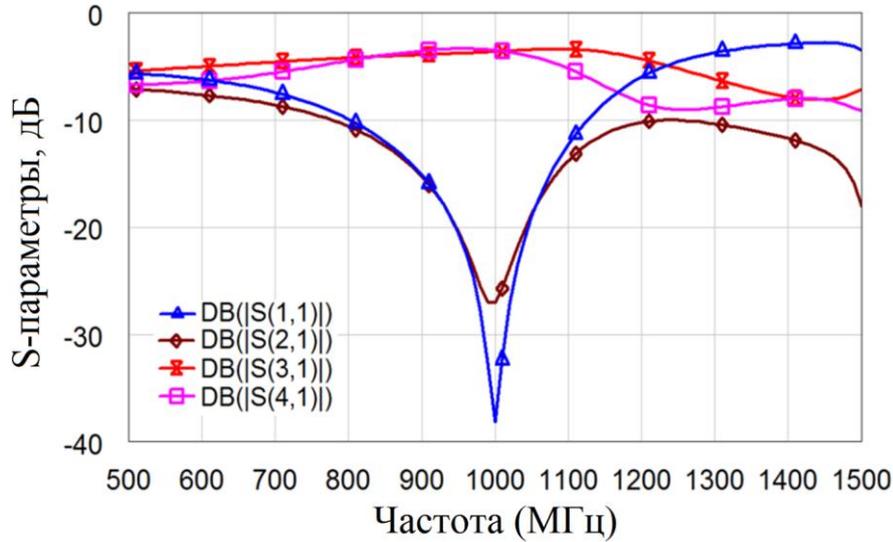


Рис.7 Зависимость S-параметров от частоты для компактного моста

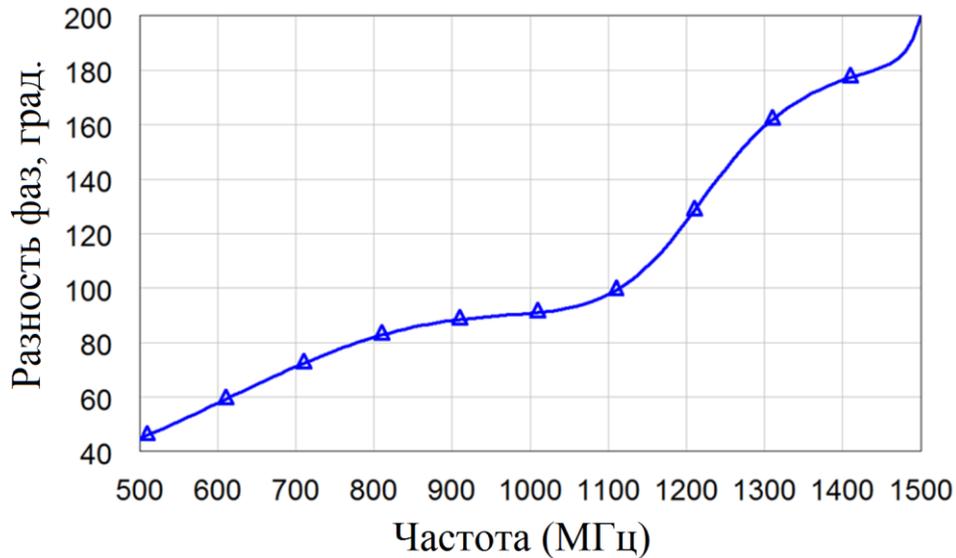


Рис. 8. Разность фаз между выходами компактного моста

Результаты численного моделирования компактного моста показаны на рис. 7, 8. Рабочая полоса компактной конструкции по уровню развязки – 20 дБ составляет 96 МГц. Следует отметить, что предлагаемые малоразмерные структуры ведут себя как четвертьволновые отрезки в более узкой полосе частот, что позволяет получить работоспособную конструкцию только для

одного рабочего диапазона. Результаты моделирования также показывают, что параметр S_{11} составляет - 38 дБ на частоте 1000 МГц. Максимальное значение дисбаланса между коэффициентами передачи S_{31} и S_{41} составляет 0,6 дБ. Разность фаз между коэффициентами передачи на центральной частоте равна 90 градусов.

Попытка дальнейшего уменьшения размеров ведут к сокращению зазоров между соседними элементами моста и деградации его частотных характеристик – уменьшению полосы и увеличению дисбаланса между коэффициентами передачи. Поскольку более плотное расположение приведет к большему взаимодействию соседних токопроводящих линий и перетеканию электромагнитного поля с одной структуры на другую.

2. Измерение опытного образца

Для экспериментальной проверки результатов численного моделирования был изготовлен макет миниатюрного моста с помощью традиционного метода изготовления печатных плат (рис.9). Площадь компактного моста на 75.1% меньше, чем площадь обычной конструкции. С помощью векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA 24 были измерены частотные характеристики опытного образца.

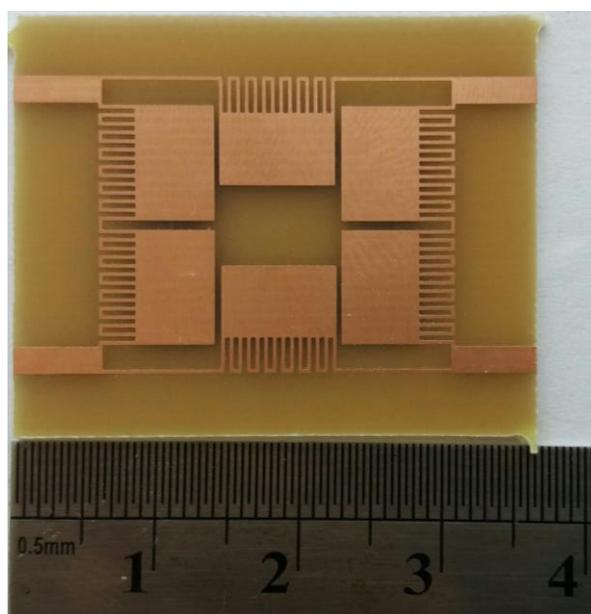


Рис. 9. Макет компактного моста

Как видно из рисунка 9, компактный мост является технологически просто реализуемым. На рис. 10, 11 показаны измеренные характеристики моста. Измеренная центральная частота миниатюрного моста составляет 990 МГц (отклонение от моделируемой частоты составляет 1%). Максимальный дисбаланс между коэффициентами передачи составляет 0,7 дБ. Рабочая полоса составляет 110 МГц. Полученные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 Сравнение характеристик традиционной и компактной конструкций

Параметры	Стандартный	Компактный
Полоса пропускания по уровню развязки -20 дБ, МГц	112	111
Относительная полоса пропускания, %	11.2	11
Площадь, мм ²	2043	508.4
Центральная частота, МГц	1000	990
Разность фаз между коэффициентами передачи, °	90	89.8
Подавление гармоник	Нет	Да

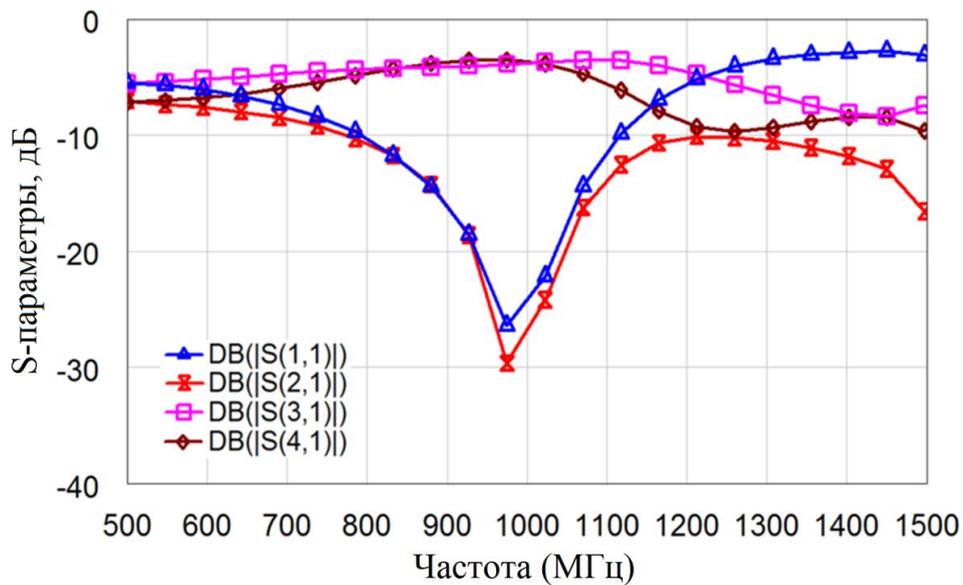


Рис. 10. Зависимость S-параметров от частоты для макета

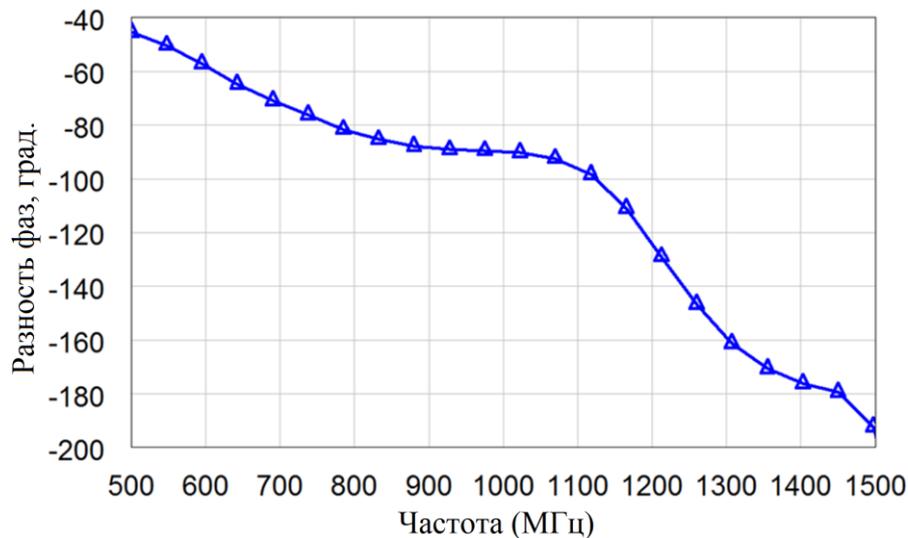


Рис. 11. Разность фаз между выходными плечами макета

3. Заключение

В результате исследования была разработана компактная конструкция микроплоскового двухшлейфного моста. Габариты данного устройства были уменьшены с помощью малоразмерных структур. Геометрия таких структур выбирается таким образом, чтобы получить фазовый сдвиг 90 градусов на центральной частоте. Для повышения эффективности миниатюризации низкоомные сегменты располагаются внутри моста. Моделирование предлагаемой конструкции было проведено в программе NI-AWR Design Environment 13. Также был изготовлен макет предлагаемого моста и измерены его характеристики с помощью векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz. Площадь миниатюрного моста на 75,1% меньше, чем площадь стандартного. Следует отметить, что относительная полоса частот сократилась всего на 1%. Таким образом, был получен компактный двухшлейфный мост, простой в изготовлении, который может найти применение при построении компактных СВЧ-цепей (фазовращатели, диаграммообразующие схемы) и в других системах, где используются микрополосковые линии передачи.

Литература

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика – «Связь», 1971.-487с..

2. Kai-Yu Tsai, Hao-Shun Yang, Jau-Horng Chen, and Yi-Jan Emery Chen, "A miniaturized 2 dB Branch-Line Hybrid Coupler With Harmonics Suppression," IEEE Microw. Wireless Compon.Lett., vol. 21, no. 10, pp. 537-539, Oct. 2011.
3. C. W. Tang and M.-G.Chen, "Synthesizing microstrip branch-line coupler with predetermined compact size and bandwidth," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, pp. 1926-1934, Sep. 2007.
4. Chao-Wei Wang, Tzyh-Ghuang Ma and Chang-Fa Yang, "A new planar artificial transmission line and its applications to a miniaturized butler matrix," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, no. 12, pp. 2792-2801, Dec. 2007.
5. Kimberley W. Eccleston and Sebastian H. M., "Compact planar microstripline branch-line and rat-race couplers," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no. 10, pp. 2119-2125, Oct. 2003.
6. S.-S. Liao and J.-T. Peng, "Compact planar microstrip branch-line couplers using the quasi-lumped elements approach with nonsymmetrical and symmetrical T-shaped structure," IEEE Trans. Microw. TheoryTech.,vol. 54, pp. 3508-3514, Sep. 2006.
7. Н. Н. Щетинин, В. А. Мельник, «Компактный микрополосковый 3 дБ квадратурный направленный ответвитель», Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2014. № 4. С. 26-28.
8. Н. Н. Щетинин, А. В. Останков, Е. И. Воробьёва «Математическая модель для проектирования микрополоскового направленного ответвителя на квазисосредоточенных элементах» Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3-1. с. 66-70.
9. Chao-Hsiung Tseng and Chih-Lin Chang, "A rigorous design methodology for compact planar branch-line and rat-race couplers with asymmetrical T-structure," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 60, no. 7, pp. 2085-2092, July 2012.
- 10.K. W. Eccleston and S. H. M. Ong, "Compact planar microstripline branch-line and rat-race coupler," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, pp. 2119-2125, Oct. 2003.

11. 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., vol. 60, no. 11, pp. 3376-3383, Nov. 2012.
12. Hani Ghali and Tarek A. Moselhy “Miniaturized fractal rat-race, branch-line, and coupled-line hybrids,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 52, no. 11, pp. 2513-2520, Nov. 2004.

Для цитирования:

Д. А. Летавин. Разработка микрополоскового двухшлейфного моста с высокой степенью миниатюризации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/9/text.pdf>