

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.11>

УДК 621.396

## МИНИАТЮРИЗАЦИЯ МАТРИЦЫ БАТЛЕРА 4Х4

Льу Куанг Хынг

Вьетнамский морской университет, 484 Lạch Tray, Хайфон, Вьетнам

Статья поступила в редакцию 22 августа 2020 г.

**Аннотация.** Исследован подход в миниатюризации матрицы Батлера 4x4, собранной на компактных двухшлейфных мостах с рабочей частотой 1 ГГц. Сама процедура миниатюризации заключается в простой замене четвертьволновых отрезков на компактные структуры. С использованием программы были получены такие структуры под нужные характеристики. Предложенная матрица Батлера была изготовлена и промерена. Площадь матрицы была уменьшена на 55%.

**Ключевые слова:** микрополосковая линия, миниатюризация, матрица Батлера.

**Abstract.** An approach to miniaturization of a 4x4 Butler matrix assembled on compact two-loop bridges with an operating frequency of 1 GHz is investigated. The miniaturization procedure itself consists in simply replacing the quarter-wave segments with compact structures. Using the program, such structures were obtained for the desired characteristics. The proposed Butler matrix was fabricated and measured. The die area has been reduced by 55%.

**Key words:** microstrip line, miniaturization, Butler matrix.

### Введение

Матрицы Батлера - это микрополосковая схема питания антенных решеток, позволяющая получать несколько независимых лучей диаграммы направленности у антенной решетки. Количество независимых лучей зависит от количества входов и выходов матрицы. Однако большая размерность матриц редко используется в силу сложности их расчета и изготовления. Типовая матрица состоит из направленных ответвителей, кроссоверов либо двух

пересекающихся линий и фиксированных фазовращателей. Габариты матрицы будут зависеть от габаритов перечисленных устройств, площадь которых связана с их рабочей частотой. Известно, что чем ниже частота, тем больше будет площадь этого устройства.

Именно поэтому актуально такое направление, как миниатюризация СВЧ устройств. Большое количество работ посвящено этому вопросу [1-14]. Например, в [1] уменьшение размеров достигается за счет использования квазиконцентрированных элементов, периодических емкостных нагрузок в [2], асимметричных Т-образных структур [3], замедляющих структур [4], фрактальных структур [5], высокоомных структур [6], нагруженных контуров [7] и т.д.

В данной работе были предложены авторские компактные структуры, которые имеют длину меньше четвертьволновых отрезков, что и позволило использовать их для миниатюризации направленных ответвителей. Разработанные ответвители затем были использованы для построения компактной матрицы Батлера.

### **Методика проектирования**

Направленный ответвитель - это устройство, используемое для деления мощности с каким-то коэффициентом деления между его выходами. Количество шлейфов будет определять ширину полосы пропускания, в нашем случае был рассмотрен двухшлейфный ответвитель. Для того чтобы он выполнял деление мощности поровну, необходимо, чтобы четвертьволновые отрезки, из которых он состоит, имели волновые сопротивления 50 и 35 Ом соответственно. Материалом подложки был выбран дешевый и распространённый материал FR4 со следующими параметрами подложки: толщина 1 мм, а диэлектрическая проницаемость 4.4. В качестве рабочей частоты выступает частота равная 1 ГГц.

Начало процедуры миниатюризации начиналось с проектирования традиционного направленного ответвителя на подложке ФР4. Расчет четвертьволновых отрезков под конкретное волновое сопротивление не

составляет никакого труда. Следующим этапом является проектирование компактных структур, состоящих в нашем случае из индуктивности, которая выполнена как высокоомный отрезок, и плоскопараллельного конденсатора овальной формы. Геометрия таких структур рассчитывалась по принципу получения такого же фазового набега на рабочей частоте, при этом структура должна иметь необходимое волновое сопротивление. На рис. 1 показаны топологии компактной конструкции и четвертьволнового сегмента, а на рис. 2, 3 - график сравнения их фаз и амплитуды в полосе частот.

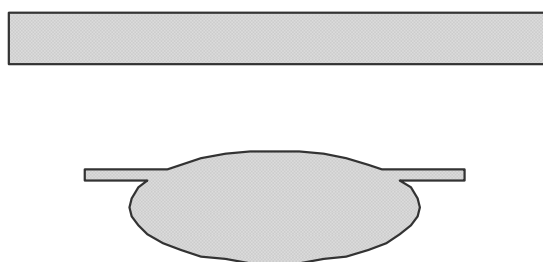


Рис. 1. Топология компактной структуры и четвертьволнового отрезка.

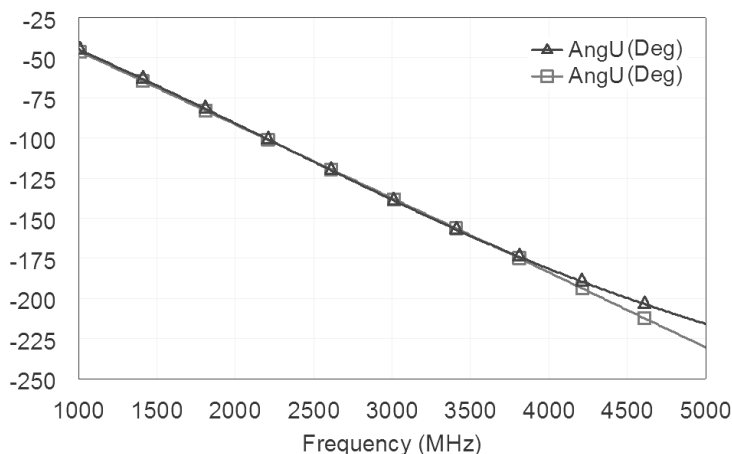


Рис. 2. График сравнения фазового набега структуры и отрезка.

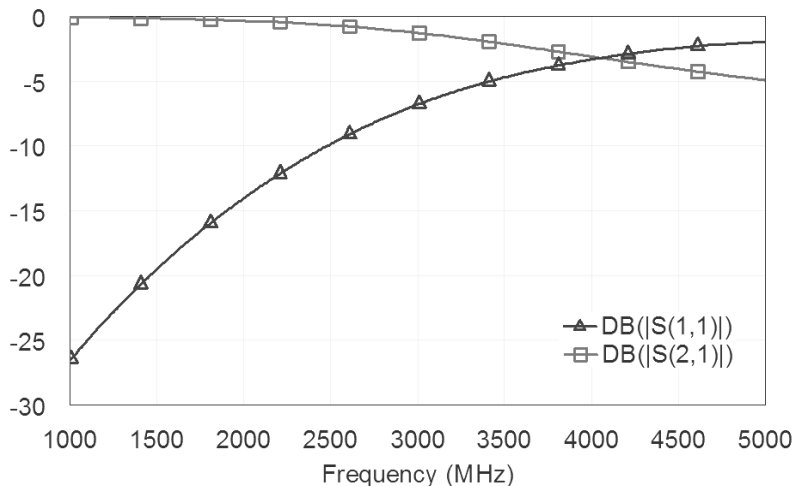


Рис. 3. График S-параметров компактной структуры.

Миниатюризация происходила не только за счет того, что компактные структуры короче, но и использовалось внутреннее пространство устройства.

Недостатком таких структур является то, что их геометрию необходимо рассчитывать, а также то, что они более подвержены различным паразитным явлениям, чем обычные отрезки. Процедура моделирования компактных структур выполнялась для обоих волновых сопротивлений. После того как топологии структур получены, они устанавливаются на места соответствующих им четвертьволновым отрезкам. При необходимости проводится корректировка геометрии ответвителя для получения наилучших показателей по габаритам и характеристикам. На рисунке 4 показана топология получившегося компактного ответвителя в результате установки компактных структур в его конструкцию. На рисунке 5 показан график зависимостей S-параметров от частоты. Площадь такого устройства уменьшена в 2 раза по сравнению с площадью стандартной конструкции.

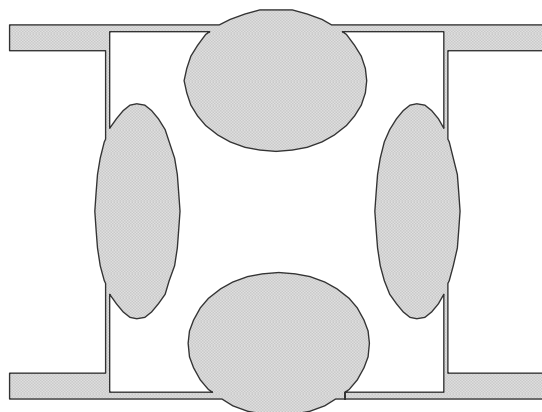


Рис. 4. Топология компактного ответвителя.

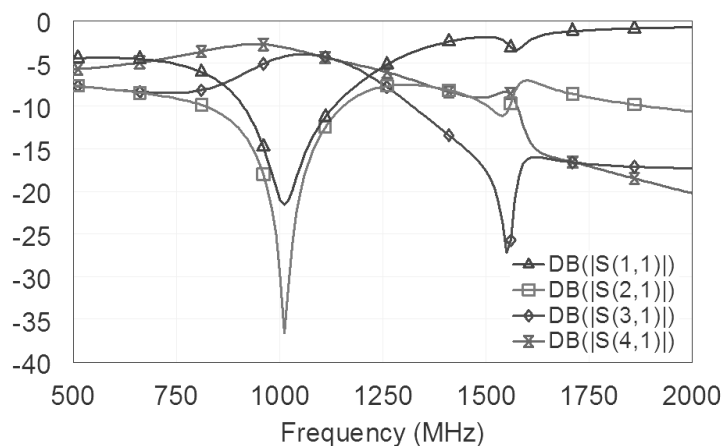


Рис. 5. S-параметры.

Затем были предварительно рассчитаны размеры всех элементов и сложив их вместе, мы получили стандартную топологию матрицы Батлера, площадь которой составляет  $9947 \text{ мм}^2$  (рис. 6). Расчетные характеристики матрицы представлены на рис.7.

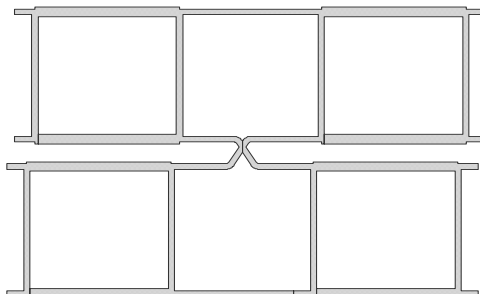


Рис. 7. Топология стандартной матрицы Батлера 4x4.

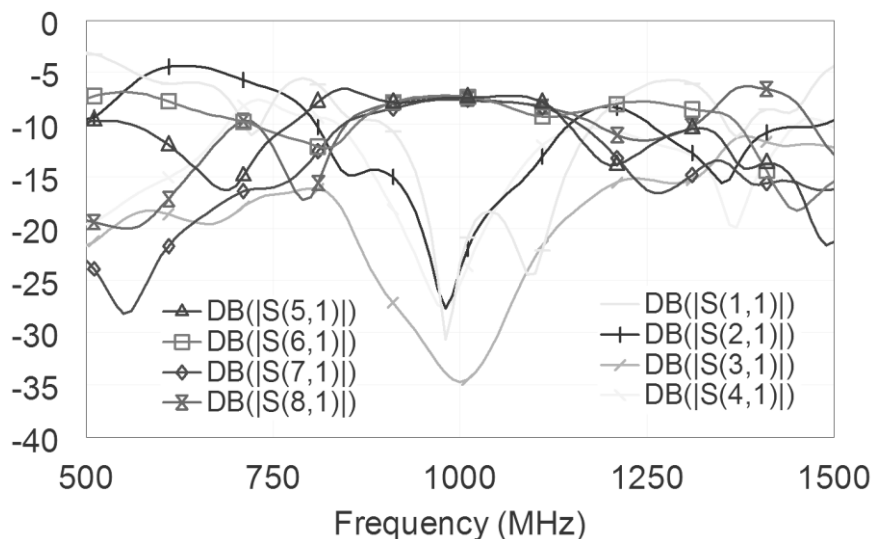


Рис. 8. S-параметры матрицы.

При определении ширины полосы развязки  $-10 \text{ дБ}$  мы обнаруживаем, что матрица работает в полосе частот от  $900$  до  $1100 \text{ МГц}$ , а коэффициенты передачи меняются от  $-7,1 \text{ дБ}$  до  $-7,7 \text{ дБ}$ . Видно, что большую часть площади занимают направленные ответвители. Были установлены компактные ответвители вместо стандартных конструкций. Пересечение двух линий реализовано на основе двухслойной печатной платы.

Миниатюрная матрица Батлера показана на рис. 8. Видно, что фазосдвигающие ячейки изогнуты, чтобы обеспечить желаемый фазовый набег, как в стандартной конструкции. Характеристики, полученные с помощью

программы, показаны на рис. 9. Площадь матрицы составляет  $84,85 \times 58,5 = 4963,725 \text{ мм}^2$ .

Дополнительное уменьшение площади устройства на печатной плате возможно за счет изгиба линий передачи с высоким сопротивлением (индуктивности) или оптимизации топологии конструкций таким образом, чтобы максимально использовать внутреннее пространство устройства и пространство между соседними элементами.

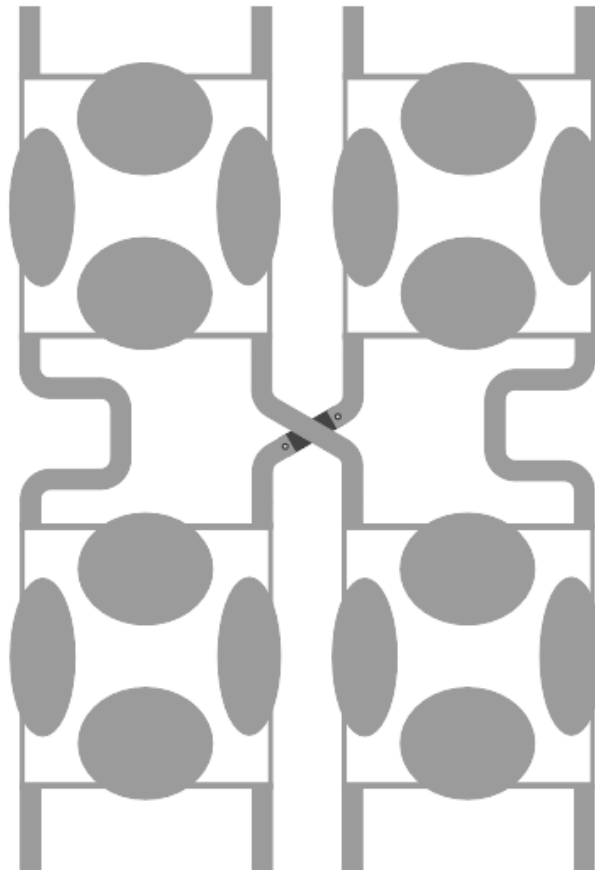


Рис. 9. Топология компактной матрицы Батлера 4x4.

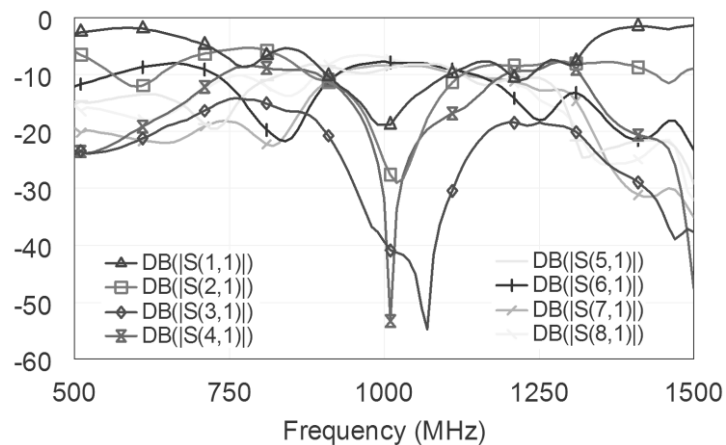


Рис. 10. S-параметры компактной матрицы Батлера.

При определении ширины полосы развязки -10 дБ мы обнаруживаем, что матрица работает в полосе частот от 900 до 1100 МГц, а коэффициенты передачи меняются от -7,2 дБ до -8,8 дБ. Рассматриваемое устройство было изготовлено и измерено для получения зависимостей, которые сравнивались с теоретическими результатами.

Миниатюрная матрица Батлера показана на рис. 10. Можно видеть, что фазосдвигающие ячейки изогнуты для обеспечения желаемого фазового набега, как и в стандартной конструкции. Характеристики, полученные с помощью программы, показаны на рис.11.

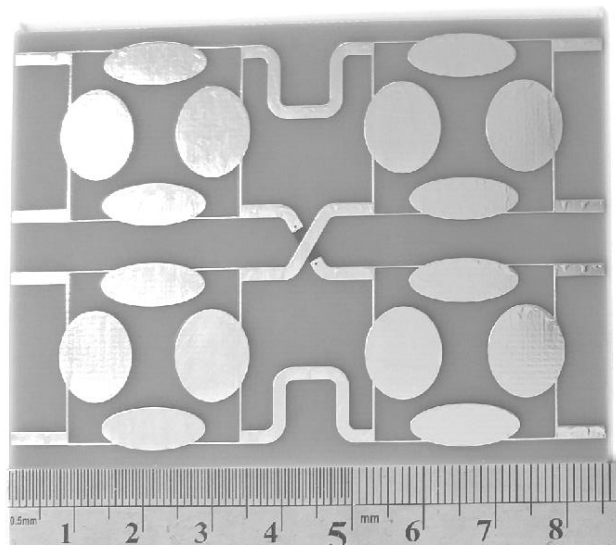


Рис. 11. Макет матрицы Батлера.

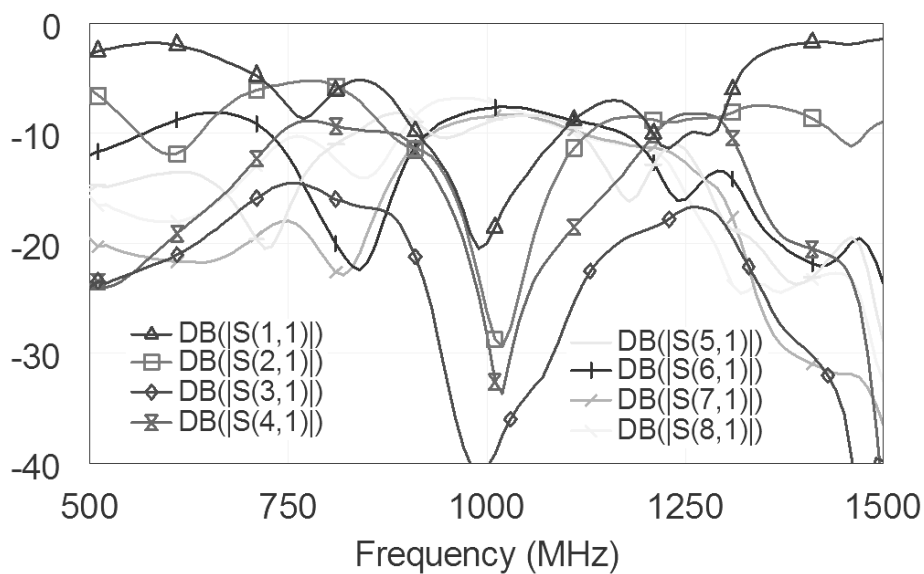


Рис. 12. S-параметры.

При определении ширины полосы развязки -10 дБ мы обнаруживаем, что матрица работает в полосе частот от 920 до 1090 МГц, а коэффициенты передачи меняются от -7 дБ до -9 дБ.

### **Заключение**

Описан процесс миниатюризации схемы формирования луча, реализованный по матричной схеме Батлера с возможностью генерации 4 независимых диаграмм направленности. Предлагаемая конструкция была изготовлена и обмерена. Площадь матрицы на частоте 1 ГГц уменьшается вдвое. Возможна дальнейшая миниатюризация за счет более плотного расположения элементов между собой, но это приведет к еще большему ухудшению характеристик. Предлагаемые конструкции могут быть использованы для миниатюризации различных микрополосковых устройств.

### **Литература**

1. Letavin D.A. Miniature microstrip branch line coupler with folded artificial transmission lines. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. 2019. Vol.99. P.8-13. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.11.016>.
2. Eccleston K.W., Ong S.H.M. Compact Planar Microstripline Branch-Line and Rat-Race Couplers. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2003. Vol.51. No.10. P.2119-2125. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.817442>
3. Kuo T.N., Lin Y.S., Wang C.H., Chen C.H. A compact LTCC branch-line coupler using modified-T equivalent-circuit model for transmission line. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* 2006. Vol.16. No.2. P.90-92. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.863194>
4. Liao S.-S., Sun P.-T., Chin N.-C., Peng J.-T. A novel compact-size branch-line coupler. *IEEE Microw. Wireless Compon.Lett.* 2005. Vol.15. P. 588-590. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.855378>
5. Tang C.W., Chen M.-G. Synthesizing microstrip branch-line coupler with predetermined compact size and bandwidth. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2007. Vol.55. P.1926-1934. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.904331>



6. Letavin D.A. Compact microstrip three-loop coupler. *2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium*. Italy, ACES 2017, Ma. 2017. <https://doi.org/10.23919/ROPACES.2017.7916036>.
7. Wang J., Wang B.Z., Guo Y.-X., Ong L.-C., Xiao S. A compact slow-wave microstrip branch-line coupler with high performance. *IEEE Microw. Wireless Compon.Lett.* 2007. Vol.17. P.501-503. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2007.899307>
8. Chang W.-S., Chang C-Y. A High Slow-Wave Factor Microstrip Structure With Simple Design Formulas and Its Application to Microwave Circuit Design. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2012. Vol. 60. No.11. P. 3376-3383.
9. Letavin D.A. Two Methods for Miniaturization of Stub Quadrature Couplers. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018. Vol.63. P.933-935. <https://doi.org/10.1134/S1064226918080107>
10. Ghali H., Moselhy T.A. Miniaturized fractal rat-race, branch-line, and coupler-line hybrids. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2004. Vol. 52. P.2513-2520.
11. Zhu J., Zhou Y., Liu J. Miniaturization Of Broadband 3-Db Branch-Line Coupler. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2011. Vol. 24. P. 169-176. <https://doi.org/10.2528/PIERL11051706>
12. Liao S.-S., Peng J.-T. Compact planar microstrip branch-line couplers using the quasi-lumped elements approach with nonsymmetrical and symmetrical T-shaped structure. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2006. Vol.54. P.3508-3514. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.880650>
13. Hung, L.Q. Directional coupler on compact structures. *International Conference on High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing, HIRM 2019*. May 2019. Vol. 1353. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012074>
14. Hung L.Q. Description of a Miniaturization Tool for a Directional Coupler on a Microwave Substrate. *1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019*. Nov. 2019. P.482-485. <https://doi.org/10.1109/SUMMA48161.2019.8947612>

**Для цитирования:**

Лыу Куанг Хынг. Миниатюризация матрицы Батлера 4x4. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.11>