

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.19>

УДК: 621.396.676

ШИРОКОПОЛОСНАЯ МАТРИЦА БАТЛЕРА 4Х4 С КРОССОВЕРОМ В КАЧЕСТВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ

С.А. Алексейцев, А.П. Горбачев, Ю.Н. Паршин

Новосибирский государственный технический университет
630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20

Статья поступила в редакцию 12 августа 2024 г.

Аннотация. Целью работы является разработка на основе системного подхода к проектированию широкополосного диаграммообразующего устройства. Компоновка матрицы Батлера 4x4, представленная в работе, позволяет минимизировать габаритные размеры диаграммообразующего устройства. Примененный в работе метод позволяет обойти проблемы с наводками в узлах пересечения линий с противоположных сторон платы, исключая тем самым лишнюю емкостную связь. Сформированный из двух последовательно установленных направленных ответвителей кроссовер из-за противофазного деления обеспечивает отсутствие сигнала на выходе, который приходит с гальванически связанного входа. Оценены основные электродинамические характеристики как составных частей диаграммообразующего устройств, таких как направленный ответвитель и кроссовер, так и всего устройства в целом. Вся конструкция матрицы Батлера скомпонована на диэлектрической подложке из отечественного материала ФАФ-4Д с относительной диэлектрической проницаемостью 2.5 толщиной 0,3 мм, которая расположена между двумя слоями диэлектрика толщиной 1,5 мм.

Ключевые слова: диаграммообразующее устройство, матрица Батлера, направленный ответвитель, кроссовер.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20048, <https://rscf.ru/project/24-29-20048/>.

Автор для переписки: Паршин Юрий Николаевич, jurparnik@mail.ru

Введение

В условиях совершенствования фазированных антенных решеток для локаторов кругового и секторного типов требуется разработка и исследование новых технических решений, способных увеличить электромагнитный ресурс системы в целом.

В настоящее время в научной литературе предложено огромное количество решений для систем распределителей и диаграммообразующих устройств для фазированных антенных решеток [1-10].

В данной работе представлен вариант широкополосного диаграммообразующего устройства – матрицы Батлера 4x4 с полосой рабочих частот 43%. Отличительной особенностью является то, что кроссовер, используемый в топологии для исключения пересечения линий, может выступать в качестве широкополосного дифференциального фазовращателя с рабочей полосой частот 87%. Из-за перекрытия большого частотного диапазона устройств возможно их применение в двух и более диапазонных системах, где поддиапазоны имеют куда меньшие полосы рабочих частот.

Процесс работы производился по проверенному временем методу «от простого к сложному», поэтому далее представлены результаты электродинамического моделирования направленного ответвителя, кроссовера с линиями задержки и в конце диаграммообразующего устройства целиком. Компьютерное электродинамическое моделирование производилось в программе CST Studio Suite.

1. Направленный ответвитель

Направленный ответвитель (НО) – это восьмиполюсная система, служащая для направленного ответвления энергии [11]. В нашем случае это устройство с четырьмя плечами, которое представляет из себя связанные симметричные полосковые линии, между которыми имеется лицевая непрерывная, распределенная по длине электромагнитная связь. На рис. 1 показана топология оптимизированного направленного ответвителя.

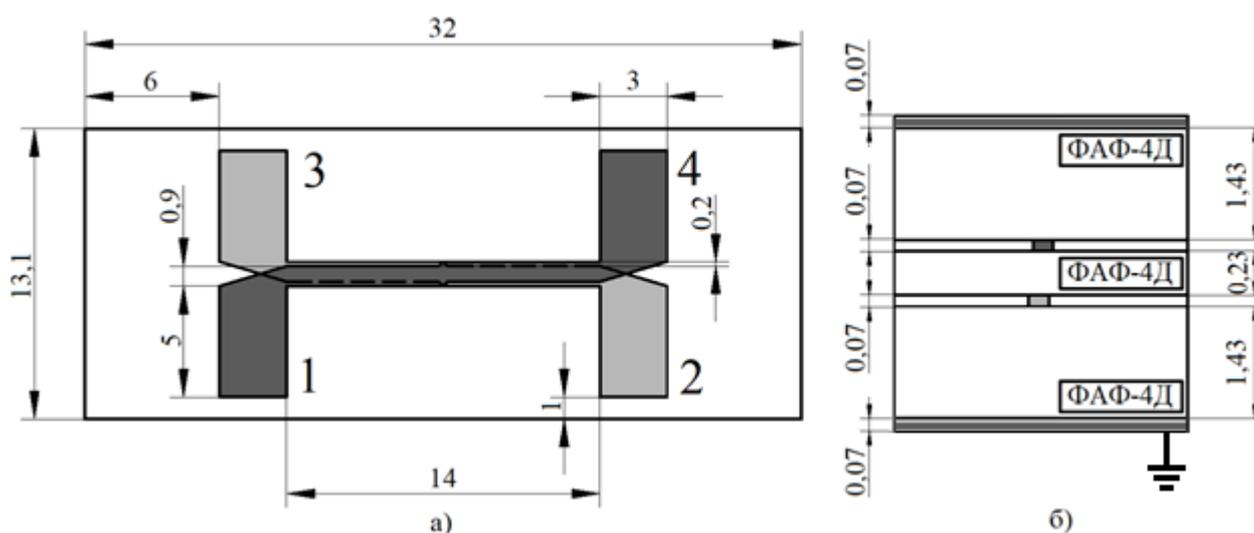


Рис. 1. Размеры: а) топологии НО; б) поперечного сечения НО.

На рис. 2 расположены амплитудные характеристики НО, полученные в ходе электродинамического моделирования. Если использовать стандартную систему оценки качества системы распределителей, в которую закладывается $\pm 0,5$ дБ на один каскад и согласование не хуже минус 20 дБ, то НО при распределении минус $3 \pm 0,5$ дБ имеет полосу рабочих частот 2,15-4 ГГц (1,85 ГГц или 62%).

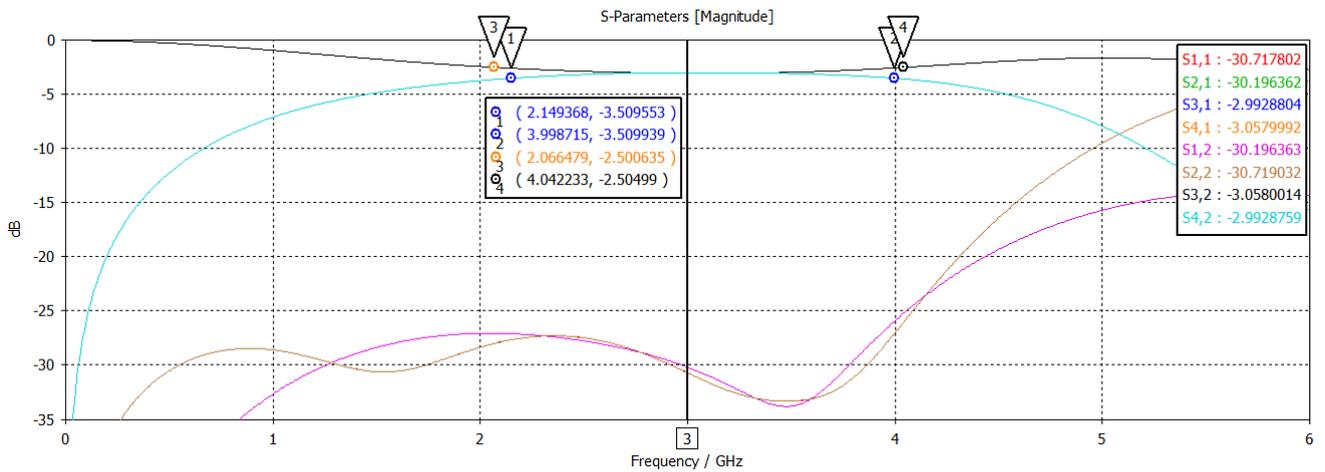


Рис. 2. Амплитудные характеристики НО.

На рис. 3 приведена разность фазовых задержек между выходами НО. Если использовать стандартную систему оценки качества системы распределителей, в которую закладывается $\pm 0,5^\circ$ на один каскад, то НО при фазовой задержке $90 \pm 0,5^\circ$ имеет полосу рабочих частот 0,2-4,1 ГГц (3,9 ГГц или 130%).

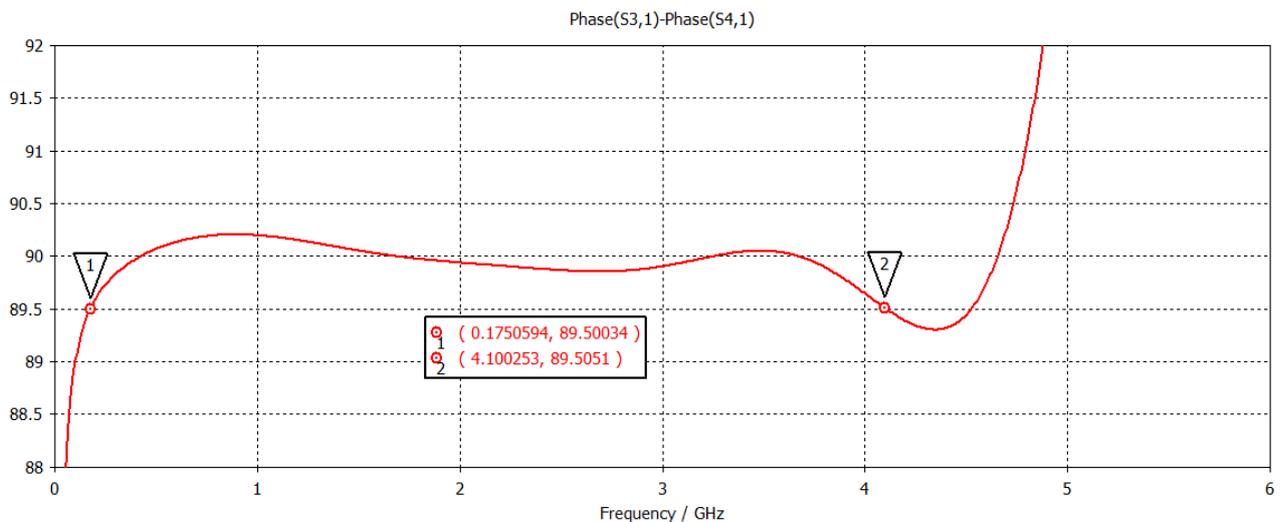


Рис. 3. Разница фаз между выходами НО.

Таким образом, если анализировать по наименьшей полосе частот с удовлетворительными характеристиками, то полоса рабочих частот НО составляет 2,15-4 ГГц (1,85 ГГц или 62%).

2. Кроссовер в качестве дифференциального фазовращателя

Кроссовер представляет из себя тандемное соединение двух НО [11, 12], которое позволяет из-за противофазного деления обеспечить отсутствие сигнала на выходе, гальванически связанном со входом. Эквивалентная схема такого соединения представлена на рис. 4, где обозначено: 1, 2 – связанные линии первого НО; 3, 4 – связанные линии второго НО; 1', 2', 3', 4' – плечи первого НО; 1'', 2'', 3'', 4'' – плечи второго НО.

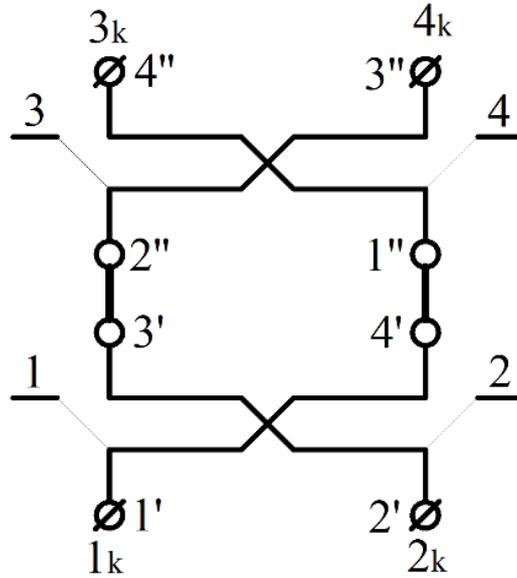


Рис. 4. Эквивалентная схема кроссовера.

Согласно общепринятой классификации восьмиполюсники с нумерацией плеч 1', 2', 3', 4' и 1'', 2'', 3'', 4'' являются противоположенными квадратурными четвертьволновыми ответвителями с матрицами рассеяния $[S']$ и $[S'']$ и коэффициентами связи k_{12} , k_{34} соответственно [12]:

$$[S'] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S'_{13} & S'_{14} \\ 0 & 0 & S'_{14} & S'_{13} \\ S'_{13} & S'_{14} & 0 & 0 \\ S'_{14} & S'_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [S''] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S''_{13} & S''_{14} \\ 0 & 0 & S''_{14} & S''_{13} \\ S''_{13} & S''_{14} & 0 & 0 \\ S''_{14} & S''_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$S'_{13} = \frac{\sqrt{1-k_{12}^2}}{\sqrt{1-k_{12}^2} \cos \theta + j \sin \theta}, \quad S'_{14} = j \frac{k_{12} \sin \theta}{\sqrt{1-k_{12}^2} \cos \theta + j \sin \theta},$$

$$S''_{13} = \frac{\sqrt{1-k_{34}^2}}{\sqrt{1-k_{34}^2} \cos \theta + j \sin \theta}, \quad S''_{14} = j \frac{k_{34} \sin \theta}{\sqrt{1-k_{34}^2} \cos \theta + j \sin \theta},$$

здесь $\theta = (\pi/2)(f/f_0)$ – электрическая длина полосковых линий 1, 2, 3, 4 каждого НО (рис. 4); f_0 – центральная частота; f – текущая частота.

Тогда матрица рассеяния кроссовера $[S_k]$ примет вид:

$$[S_k] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S'_{13} \cdot S''_{13} + S'_{14} \cdot S''_{14} & S'_{13} \cdot S''_{14} + S'_{14} \cdot S''_{13} \\ 0 & 0 & S'_{14} \cdot S''_{13} + S'_{13} \cdot S''_{14} & S'_{14} \cdot S''_{14} + S'_{13} \cdot S''_{13} \\ S'_{13} \cdot S''_{13} + S'_{14} \cdot S''_{14} & S'_{13} \cdot S''_{14} + S'_{14} \cdot S''_{13} & 0 & 0 \\ S'_{14} \cdot S''_{13} + S'_{13} \cdot S''_{14} & S'_{13} \cdot S''_{13} + S'_{14} \cdot S''_{14} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Однако, если используются идентичные НО, то $k_{12} = k_{34}$, тогда матрицы рассеяния будут равны, т.е. $[S'] = [S'']$, а матрица рассеяния кроссовера $[S_k]$ запишется как:

$$[S_k] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S'^2_{13} + S'^2_{14} & 2 \cdot S'_{13} \cdot S'_{14} \\ 0 & 0 & 2 \cdot S'_{13} \cdot S'_{14} & S'^2_{13} + S'^2_{14} \\ S'^2_{13} + S'^2_{14} & 2 \cdot S'_{13} \cdot S'_{14} & 0 & 0 \\ 2 \cdot S'_{13} \cdot S'_{14} & S'^2_{13} + S'^2_{14} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Рассчитав значения матрицы (3) для центральной частоты, получим матрицу рассеяния кроссовера $[S_k]$ в более удобном для интерпретации виде:

$$[S_k] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Топология кроссовера с линиями задержки (ЛЗ) на 45° продемонстрирована на рис. 5. Конструкция «сэндвича» сохраняется как на рис. 1, б.

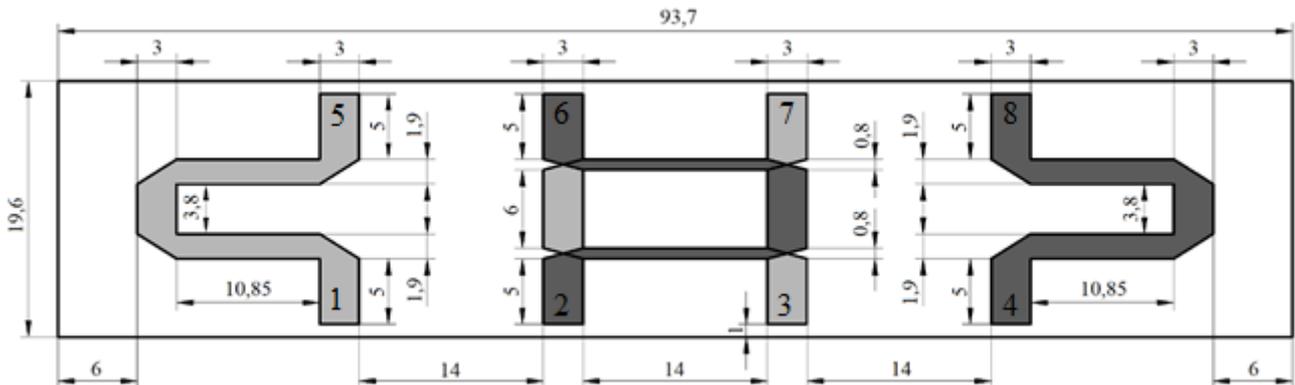


Рис. 5. Размеры топологии кроссовера с ЛЗ.

На рис. 6 изображены амплитудные характеристики кроссовера. Так как конструкция полностью симметричная, то результаты представлены только для двух из четырех портов для более удобного анализа характеристик. При условии уровня сигнала на выходе кроссовера и ЛЗ не хуже минус 0,5 дБ то выходит, что полоса рабочих частот составляет 1,4-4 ГГц (2,6 ГГц или 87%).

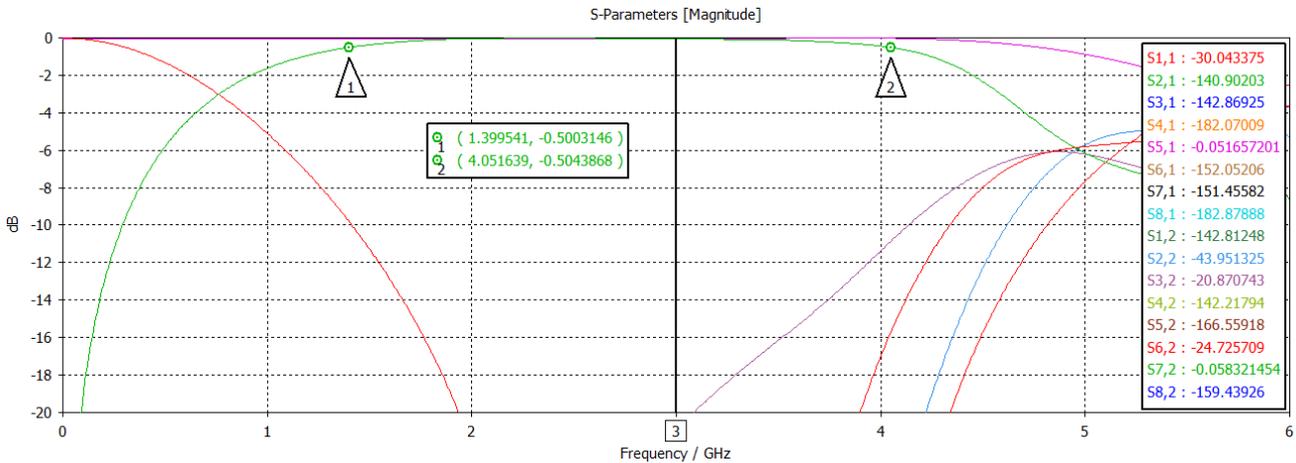


Рис. 6. Амплитудные характеристики кроссовера с ЛЗ.

На рис. 7 представлена разность фазовых задержек между выходами кроссовера и ЛЗ, полученные в результате электродинамического моделирования. При условии отклонения разности фаз между выходами кроссовера и ЛЗ от требуемого значения в пределах $\pm 2,5^\circ$, то фазовая задержка $45 \pm 2,5^\circ$ имеет полосу рабочих частот 1,4-4,8 ГГц (3,4 ГГц или 113%).

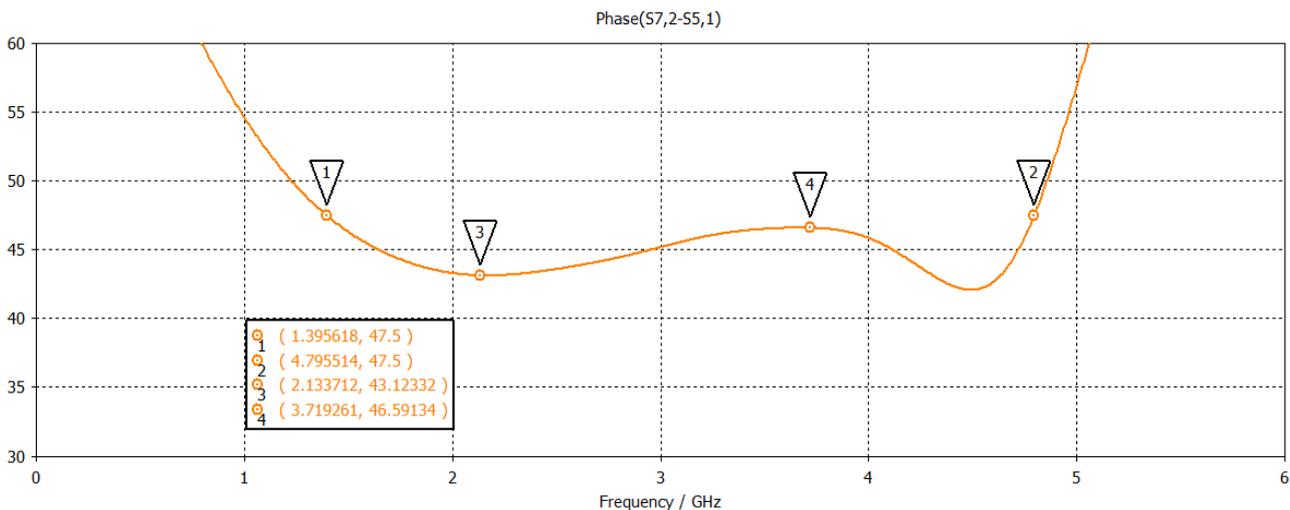


Рис. 7. Разность фаз между выходами кроссовера и ЛЗ.

Таким образом, если анализировать по наименьшей полосе частот с удовлетворительными характеристиками, то полоса рабочих частот кроссовера

с ЛЗ составляет 1,4-4 ГГц (2,6 ГГц или 87%). Анализ результатов свидетельствует о том, что для изменения величины фазовой задержки достаточно в топологии изменить длину линии задержки с 10,85 мм в большую сторону для увеличения фазовой задержки или наоборот для её уменьшения. Уменьшая или увеличивая ширину связанных линий 0,8 мм, можно варьировать полосу рабочих частот дифференциального фазовращателя.

3. Матрица Батлера 4x4

Для компоновки составных частей диаграммообразующего устройства (ДОУ) в единую конструкцию была использована классическая схема матрицы Батлера 4x4, которая представлена на рис. 8. Она содержит два каскада трехдецибельных НО и один ряд фазовращателей на 45° . При этом последний узел пересечения линий был исключен, так как устройство предлагается для коаксиального сочленения с остальными элементами схемы распределения. Для реализации полного совпадения структурной схеме достаточно к выходным портам присоединить кроссовер из раздела 2. Топология получившегося итогового изделия продемонстрирована на рис. 9. Конструкция поперечного сечения сохраняется как на рис. 1, б.

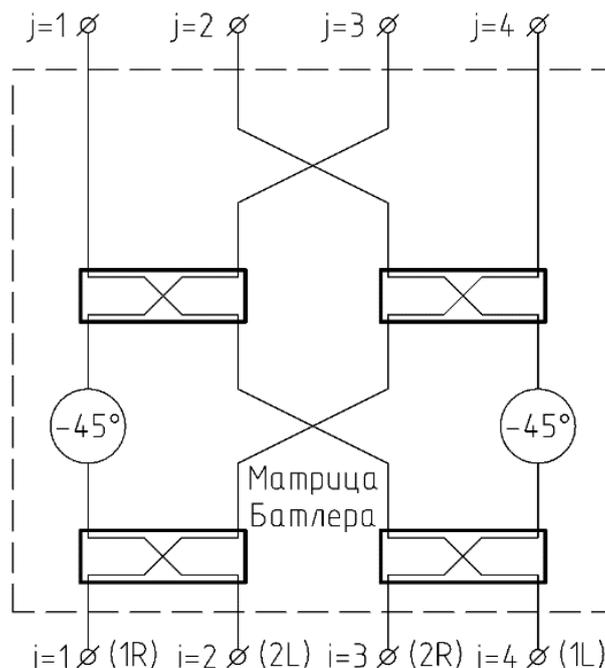


Рис. 8. Структурная схема матрицы Батлера 4x4.

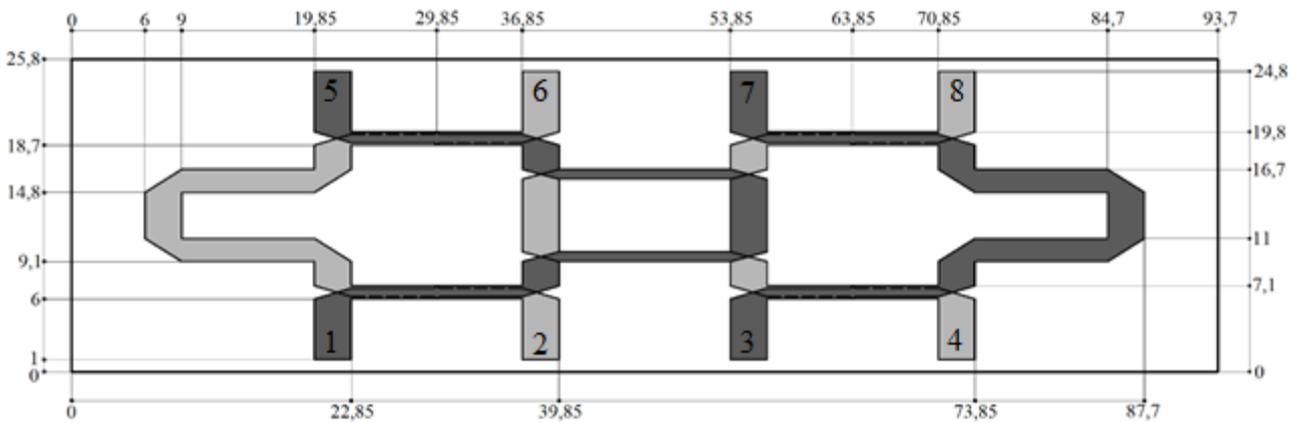


Рис. 9. Топология матрицы Батлера 4x4.

На рис. 10 изображены амплитудные характеристики ДОУ. С учетом стандартной системы оценки качества распределителей амплитуда сигнала на выходах устройства должна составлять минус 6 ± 1 дБ. Исходя из этого устройство имеет полосу рабочих частот 2,3-3,8 ГГц (1,5 ГГц или 50%).

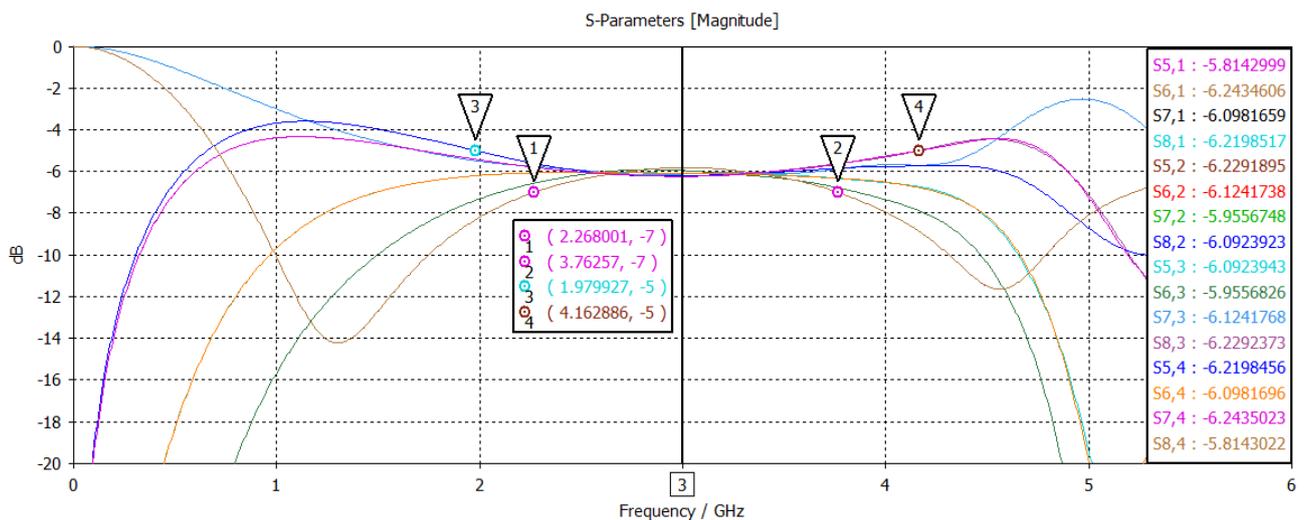


Рис. 10. Амплитудные характеристики матрицы Батлера 4x4.

На рис. 11 представлены характеристики согласования портов ДОУ. По уровню КСВН 1,3 рабочая полоса составила 4,3 ГГц или 143%.

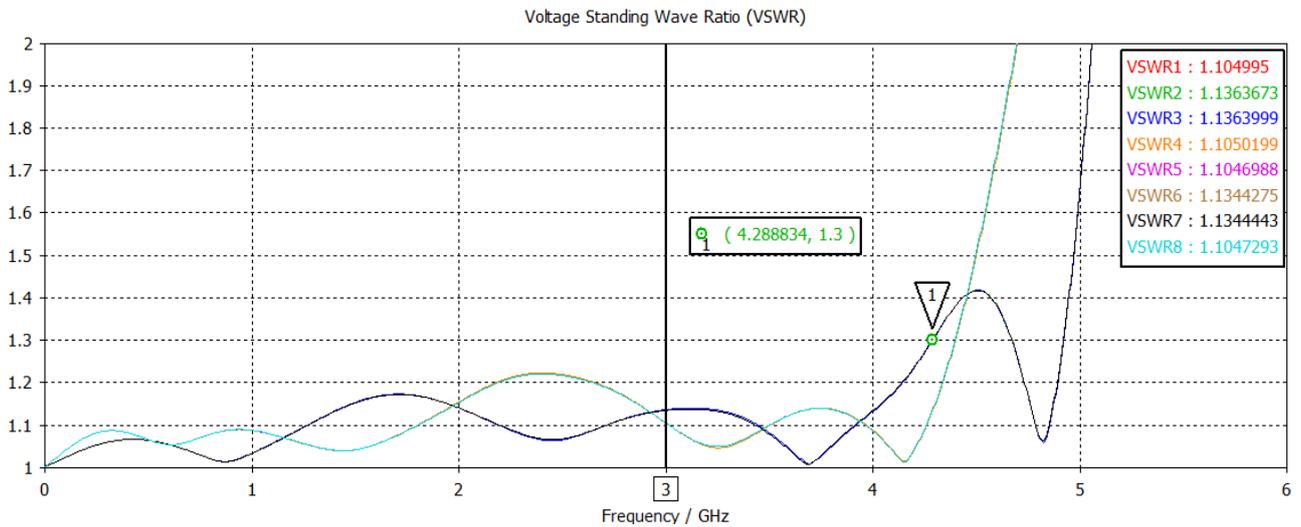


Рис. 11. Согласование портов матрицы Батлера 4x4.

На рис. 12 продемонстрированы фазочастотные характеристики, включая соответствующие разности фаз, полученные в результате электродинамического моделирования. Полосы рабочих частот при условии отклонения разности фаз между выходами ДООУ от требуемого значения в пределах $\pm 5^\circ$ получены следующие: $\pm (135 \pm 5)$ от 1,9 до 3,6 ГГц (1,7 ГГц или 57%); $\pm (45 \pm 5)$ от 2,1 до 3,7 ГГц (1,6 ГГц или 53%).

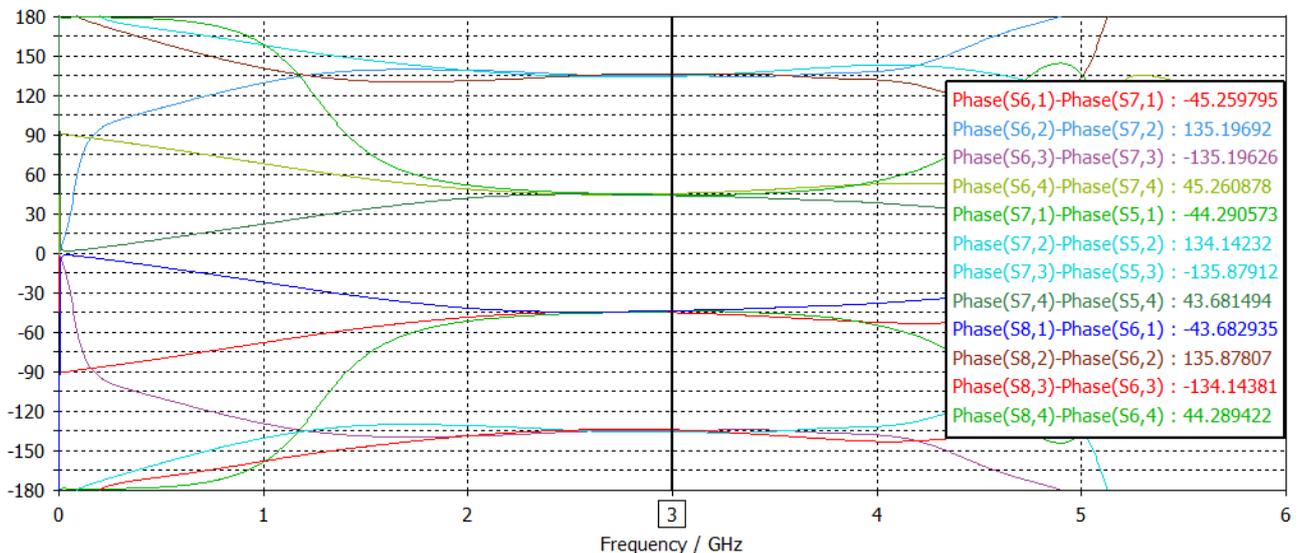


Рис. 12. Фазочастотные характеристики матрицы Батлера 4x4.

Таким образом, если анализировать по наименьшей полосе частот с удовлетворительными характеристиками, то полоса рабочих частот матрицы Батлера 4x4 составляет 2,3-3,6 ГГц (1,3 ГГц или 43%).

Заключение

В работе впервые представлены результаты электродинамического моделирования широкополосного диаграммообразующего устройства Батлера 4x4 с кроссовером в качестве дифференциального фазовращателя. При реализации на отечественном материале ФАФ-4Д это компоновка, будучи самой широкополосной (43%) при минимальных габаритных размерах (93,7x25,8 мм), является вполне приемлемой для построения многолучевых антенных систем высокой степени готовности к размещению на различных носителях. Также в работе охарактеризованы конструктивно-технологические особенности дифференциального фазовращателя и даны рекомендации по его настройке.

Кроме того, устройство можно рекомендовать для использования в устройствах распределения СВЧ сигналов и формирования диаграмм направленности не только в одной рабочей полосе частот, но в системах, предназначенных для работы в двух и более диапазонах частот.

В дальнейшем авторами планируется детальная проработка вопросов применения данного ДОУ в составе двухдиапазонной четырехлучевой фазированной антенной решетки с заметным разнесением обоих рабочих диапазонов на оси частот.

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-29-20048, <https://rscf.ru/project/24-29-20048/>.

Литература

1. Butler J.L., Lowe R. Beam forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas // Electronic Design. – 1961. – Т. 9. – С. 170-173.
2. Патент США № 3255450, J.L. Butler / Multiple beam antenna system employing multiple directional couplers in the leadin. – Опубл. 07.06.1966.

3. Grau A., Romeu J., Blanch S., Jofre L., Flaviis F.D. Optimization of linear multielement antennas for selection combining by means of a Butler matrix in different MIMO environments // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2006. – Т. 54. – № 11. – С. 3251-3264. <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.883971>
4. Chang C.-C., Lee R.-H., Shih T.-Y. Design of a beam switching / steering Butler matrix for phased array system // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Т. 58. – № 2. – С. 367-374. <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2037693>
5. Wincza K., Gruszczynski S., Sachse K. Broadband planar fully integrated 8x8 Butler matrix using coupled-line directional couplers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Т. 59. – № 10. – С. 2441-2446. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2164092>
6. Shao Q., Chen F.-C., Wang Y., Chu Q.-X., Lancaster M.J. Design of modified 4x6 filtering Butler matrix based on all-resonator structures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Т. 67. – № 9. – С. 3617-3627.
7. Wu Q., Zhang A., Yang Y., Yu M., Shi X. Computer-aided tuning of Butler matrices // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Т. 67. – № 11. – С. 4386-4393. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2937784>
8. Nasser H., Bemani M., Ghaffarlou A. A new method for arbitrary amplitude distribution generation in 4x8 Butler matrix // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2020. – Т. 30. – № 3. – С. 249-253. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2966929>
9. Лыу Куанг Хынг. Миниатюризация матрицы Батлера 4x4. // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.11>
10. Gorbachev A.P., Parshin Y.N. All-pass phaser on a base of half-wave coupled-line section and its application // Microwave and Optical Technology Letters. – 2021. – Т. 63. – № 10. – С. 2570-2575. <https://doi.org/10.1002/mop.32925>

11. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ // Москва: Советское Радио. – 1976. – 216 С.
12. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ // Москва: Высшая школа. – 1988. – 432 С.

Для цитирования:

Алексеяцев С.А., Горбачев А.П., Паршин Ю.Н. Широкополосная матрица Батлера 4x4 с кроссовером в качестве дифференциального фазовращателя // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.19>