

А. П. Горбачев¹, Ю. Н. Паршин¹

¹ Новосибирский государственный технический университет

ПЕЧАТНАЯ ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯМИ

В работе представлены результаты проектирования четырехлучевой фазированной антенной решетки с применением диаграммообразующей матрицы Батлера. Сама матрица выполнена на основе трехдецибелных направленных ответвителей и модифицированных фазовращателей. Новизна предлагаемой разработки обусловлена большей широкополосностью запатентованных полосковых фазовращателей, которая, в свою очередь, определяется более стабильным в диапазоне частот характером электромагнитного взаимодействия двух проводников, связанных с каждой половиной печатного кольцевого резонатора. Использование в ответвителях и фазовращателях симметричных полосковых линий с волной Т-типа снимает ограничения, связанные с влиянием дисперсии на уравновешенность электрической и магнитной связей в областях электромагнитного взаимодействия двух параллельных связанных передающих линий. Выбранные в качестве элементной базы проектируемой матрицы Батлера трехдецибелный направленный ответвитель и модифицированный фазовращатель обеспечили приемлемую полосу пропускания при центральной частоте 2,2 ГГц. Исходя из системного подхода к проектированию антенных решеток, выбраны следующие ключевые этапы разработки: трехдецибелный направленный ответвитель, модифицированный фазовращатель, печатный дипольный излучатель, матрица Батлера 4x4, четырехлучевая фазированная антенная решетка. Для создания топологий на отечественном материале ФАФ-4Д использовалась среда NanoCAD5.1, а для моделирования – среда WIPL-D.

Ключевые слова: матрица Батлера, диаграммообразующее устройство, направленный ответвитель

Введение

Многолучевые фазированные антенные решетки (ФАР) широко применяются в радиотехнических и инфокоммуникационных системах различного назначения [1, 2]. При их проектировании, а также в процессе доработок и модернизации уже существующих антенн приходится решать взаимосвязанные конструктивно-технологические вопросы компоновки и реализации печатных направленных ответвителей, дифференциальных фазовращателей и пересечений печатных полосковых линий в двух уровнях [3].

В настоящей работе исследуется модернизированная 4-лучевая решетка, в конструкции которой требуется реализовать наряду с ответвителями и пересечениями модифицированные дифференциальные фазовращатели с улучшенными показателями по широкополосности [4]. Поэтому ниже на основе системного подхода описываются ключевые этапы построения такой решетки в печатном исполнении на отечественном диэлектрике ФАФ-4Д. При этом проектируемая ФАР позволяет

реализовать с одной конструктивно-компоновочной единицы четыре разнонаправленных в окружающем пространстве диаграммы направленности. Их направление зависит от номера входа диаграммообразующей матрицы Батлера, а ширина в плоскости электрического вектора E примерно одинакова. Такие ФАР востребованы при построении инфокоммуникационных систем с повышенной степенью защищенности от электромагнитных излучений с нежелательных направлений [5–9].

Цель работы – в рамках эскизного проектирования доказать возможность улучшения показателей широкополосности 4-лучевой антенной решетки за счет использования модифицированных в [4] дифференциальных фазовращателей при сохранении формы и уровня боковых лепестков всех четырех диаграмм направленности в плоскости электрического вектора E .

Системный анализ ключевых этапов проектирования

Описанный в [1] системный подход в компоновке и конструировании многолучевых антенн рекомендует придерживаться ряда ключевых этапов при проектировании. Эти этапы описаны в [3], и в ходе их выполнения предстоит заново реализовать следующие устройства:

- трехдецибелльный направленный ответвитель (мостовой восьмиполосник);
- модифицированный дифференциальный фазовращатель;
- матрица Батлера [10] с четырьмя входами и выходами.

При этом из соображений унификации печатный дипольный излучатель остается неизменным по структуре (то есть аналогичен работе [3]), и лишь некоторые его установочные и присоединительные геометрические размеры слегка изменены для качественной состыковки с выходами вновь реализованной матрицы Батлера.

Направленный ответвитель

Направленный ответвитель (НО) является ключевым элементом диаграммообразующего устройства, так как он отвечает за деление по ровну (в отношении 1:1) сигнала между его выходами. В результате расчетов по материалам

справочника [11] и проектирования была получена симметричная конструкция НО со смещением связанных полосковых линий, которая представлена на рис. 1.

Результаты проектирования для затухания и фазовой задержки между выходами представлены на рис. 2. Компьютерное моделирование показало, что этот НО обеспечивает в полосе частот 2–2,4 ГГц затухания $-3,15 \pm 0,02$ дБ и набег фазы на третьем порту относительно второго $90 \pm 0,5^\circ$, что является приемлемым результатом.

Модифицированный фазовращатель

Для того чтобы устройство работало в полосе частот, а не только на определенной частоте, было принято решение использовать модифицированный фазовращатель.

Модифицированный полосковый фазовращатель [4] представляет собой два отрезка связанных линий, смежные концы которых соединены, а два других конца являются соответственно входом и выходом фазовращателя. Главное отличие предложенного фазовращателя состоит в том, что с целью уменьшения искажений временных интервалов в импульсном режиме за счет увеличения его широкополосности дополнительно введен кольцевой проводник, электромагнитно связанный по всему периметру с отрезками связанных линий (рис. 3).

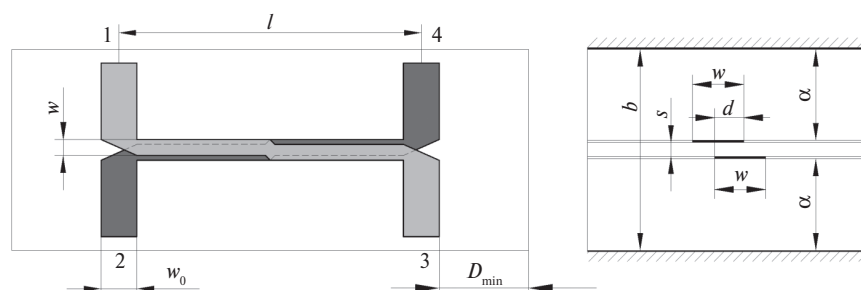


Рисунок 1. Четвертьволновый трехдецибелльный направленный ответвитель. Светло-серым цветом обозначена металлизация лицевой стороны пленки, темно-серым – металлизация обратной стороны пленки, белым – фольгированная с двух сторон пленка из материала ФАФ-4Д толщиной 0,3 мм

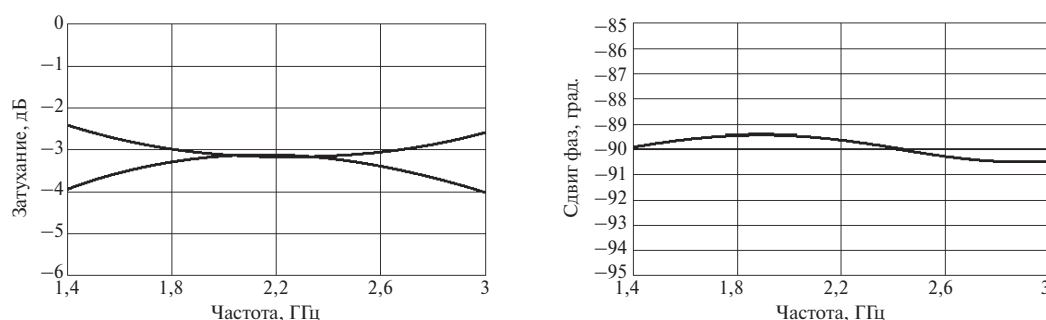


Рисунок 2. Графики неравномерности затухания и фазовой задержки

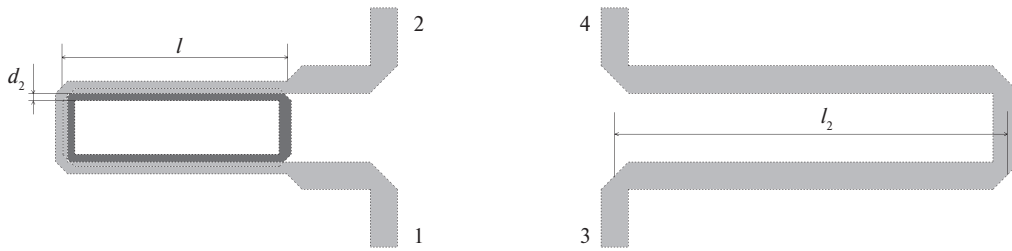


Рисунок 3. Модифицированный фазовращатель: линия 1–2 – модифицированный фазовращатель; линия 3–4 – компенсационная линия для обеспечения дифференциального фазового сдвига

Результаты электродинамического моделирования (затухания в обеих линиях и фазовый сдвиг в линии 3–4 относительно 1–2) изображены на рис. 4. Согласно полученным результатам, фазовращатель в полосе частот 1,4–3 ГГц имеет вполне приемлемые параметры: затухание $-0,1 \pm 0,1$ дБ; разность фаз $45 \pm 1^\circ$.

Печатный дипольный излучатель

В качестве излучателя использовалась топология из работы [3], доработанная в связи с другими стандартными толщинами диэлектрического

материала (рис. 5). Буквой А на схеме обозначена точка пайки центрального штырька коаксиально-полоскового разъема типа Э2–116/2, а металлизация обратной стороны подложки под точкой А гальванически соединена с металлическим корпусом несущей конструкции по всей поверхности прилегания. Топология обеспечивает вполне приемлемое согласование с подводящей линией волнового сопротивления 50 Ом (рис. 6).

Матрица Батлера 4×4

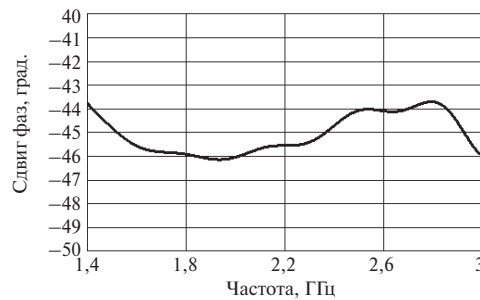
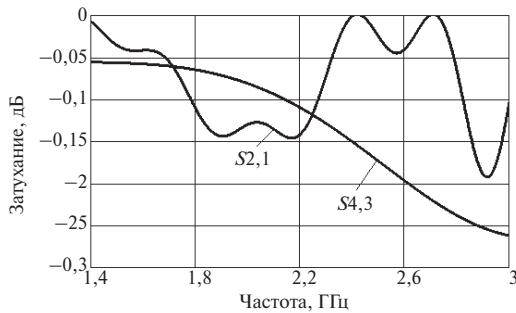


Рисунок 4. Графики затухания и фазового сдвига

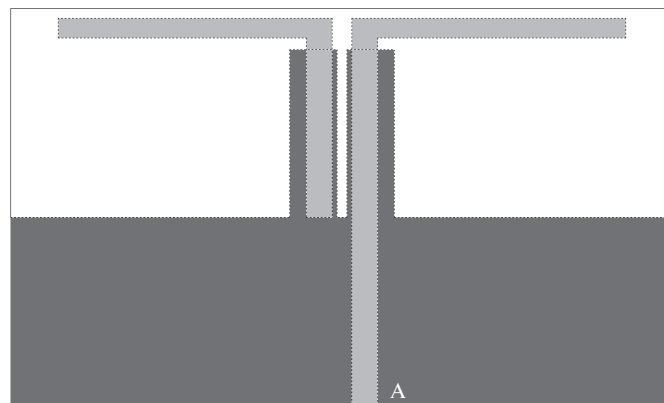


Рисунок 5. Дипольный излучатель на 2,2 ГГц. Светло-серым цветом обозначена металлизация лицевой стороны диэлектрика, темно-серым – металлизация обратной стороны диэлектрика, белым – сам диэлектрик из материала ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм

В проектировании [11, 12] диаграммообразующего устройства (рис. 7) по аналогии с работой [3] использовались упомянутые выше элементы – направленный ответвитель и модифицированный фазовращатель. Для электрического контакта между слоями диэлектрической пленки использовались сквозные металлизированные отверстия размером $0,3 \times 2,6$ мм.

После анализа данной топологии посредством трехмерного полноволнового моделирования [13] получили результаты, представленные на рис. 8. Величины затухания составили $-6,2 \pm 0,6$ дБ, а максимальное отклонение от номинальных разностей фаз не превысило 8° . При этом поперечные геометрические размеры полосковых линий составили $2,6 \times 0,035$ мм, что удовлетворяет конструкторско-технологическим ограничениям при печатной реализации проводников на тонком (0,3 мм) двухстороннем фольгированном диэлектрике [14, 15].

Четырехлучевая фазированная антенная решетка

Заключительным этапом являлось сочленение матрицы Батлера 4×4 и антенного полотна, состоящего из четырех дипольных излучателей. Для этого необходимо было доработать участок соединения, добавив еще один узел пересечения линий с противоположных сторон пленки. Кроме того, выходные

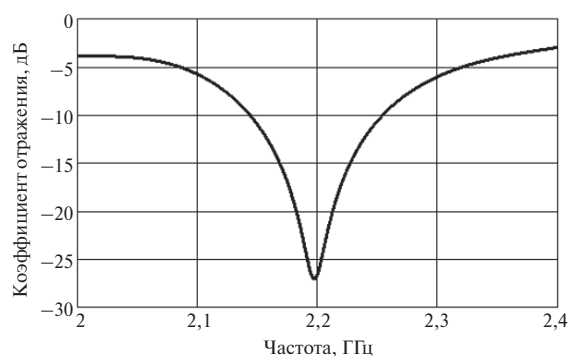


Рисунок 6. Частотная характеристика согласования дипольного излучателя

выводы были размещены на расстоянии 68 мм друг от друга. Топология разведенной платы представлена на рис. 9.

После трехмерного полноволнового электродинамического моделирования топологии в системе автоматизированного проектирования WIPL-D оказалось, что антенная решетка обеспечивает достаточно хорошее согласование с 50-омными коаксиальными кабелями, что подтверждается характеристикой, представленной на рис. 10. Также получились вполне приемлемые диаграммы направленности в плоскостях векторов электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей, которые представлены на рис. 11. Они свидетельствуют

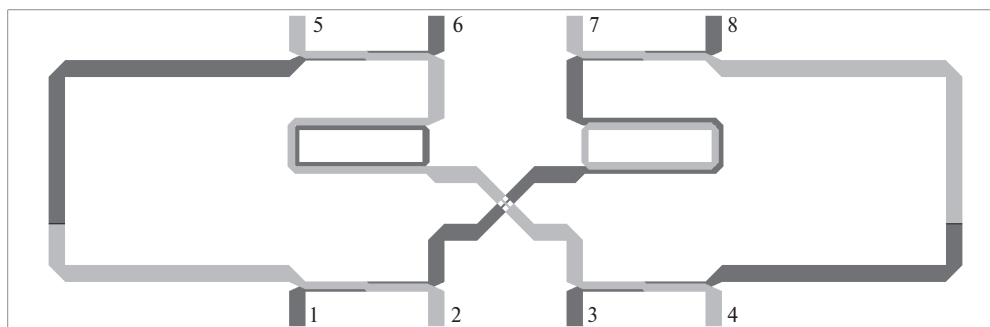


Рисунок 7. Топология матрицы Батлера 4×4 : 1–4 – входы; 5–8 – выходы

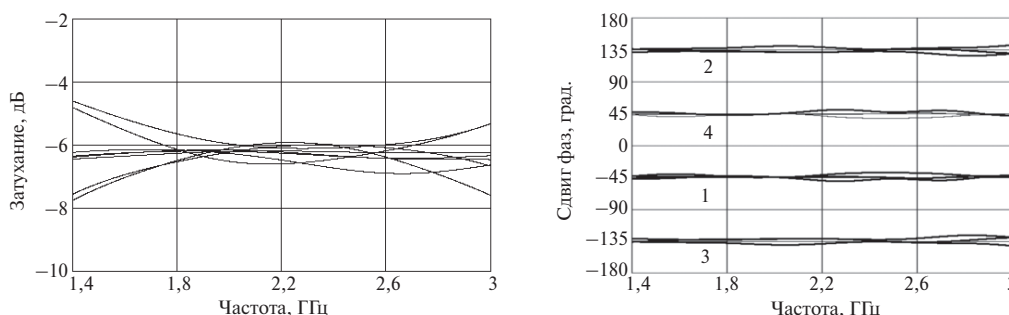


Рисунок 8. Графики затухания и фазового сдвига в каналах матрицы Батлера

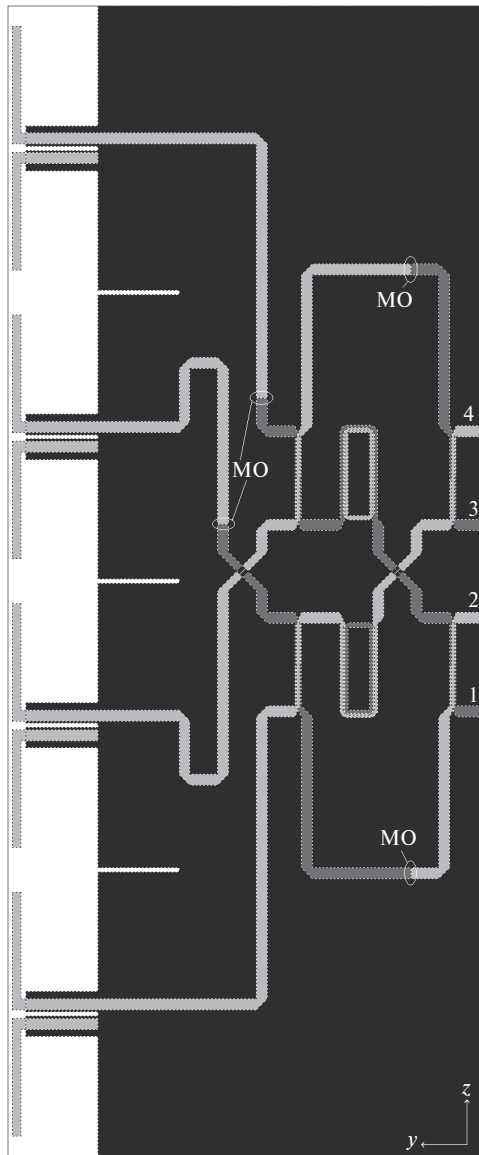


Рисунок 9. Топология четырехлучевой фазированной антенной решетки

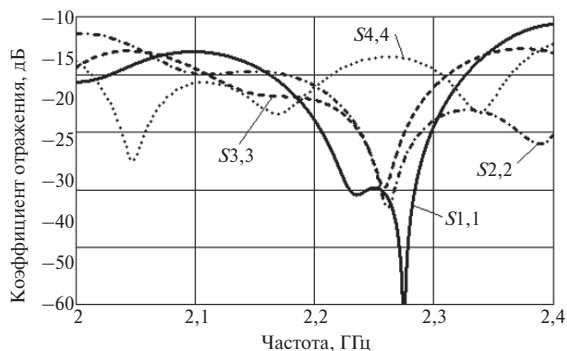


Рисунок 10. Частотная характеристика согласования входов четырехлучевой фазированной антенной решетки

о соответствии углов отклонения максимумов диаграмм направленности в плоскости вектора E

спроектированной на ФАФ-4Д антенны тем значениям, которые обусловлены классической теорией диаграммообразования в многолучевых ФАР [1, 9]. Среднее значение коэффициента усиления составило 6,8 дБ, что также соответствует теории линейных эквидистантных ФАР с числом элементов, равным 4 [1, 2]. Поскольку в спроектированной антенне амплитудное распределение возбуждения вдоль дипольных излучателей равномерное, то, согласно [1, 2], уровень боковых лепестков в плоскости вектора E убывает по мере роста их номера (главный лепесток диаграммы имеет нулевой номер). При этом уровень первого бокового лепестка всех диаграмм направленности не превышает -12 дБ по отношению к их максимуму, что также находится в приемлемом соответствии с теорией, согласно которой при четырех излучателях максимум первого бокового лепестка интерференционного множителя решетки должен быть равен $-13,46$ дБ [1, 2]. Кроме того, ширина по уровню половинной мощности всех четырех диаграмм направленности в E -плоскости, значения которых определяются согласно теореме перемножения как произведение диаграммы направленности классического диполя и интерференционного множителя эквидистантной решетки из четырех элементов [1, 2], составляет в среднем 34° , что также вполне соответствует классическим положениям теории ФАР.

Согласно этой теории, в антенных решетках из линейно поляризованных в E -плоскости дипольных излучателей диаграммы направленности в плоскости магнитного вектора H для всех четырех лучей должны быть всенаправлены. Однако это справедливо лишь при обособленных излучателях, эквидистантно расположенных в свободном безграничном пространстве. В рассматриваемом же проекте дипольные излучатели ФАР возвышаются над кромкой (по другой терминологии: выступают за границу кромки) заземленной металлизации обратной стороны печатных заготовок толщиной 1,5 мм приблизительно на четверть длины волны, соответствующей центральной частоте 2,2 ГГц (рис. 9). В заземленной металлизации были реализованы три узкие, достаточно протяженные щели, перпендикулярные кромке (рис. 9), для уменьшения влияния излучения вторичных токов проводимости, наведенных на этой кромке первичным электромагнитным излучением диполей. Тем не менее влияние вторичного излучения наведенных как в кромке фольги, так и в узкой кромке соответствующей части несущей конструкции корпуса ФАР токов проводимости заметно сказалось на форме диаграмм направленности спроектированной антенны в «задней» полусфере (рис. 9, $y < 0$). В то же время вторичные токи проводимости не оказали существенного

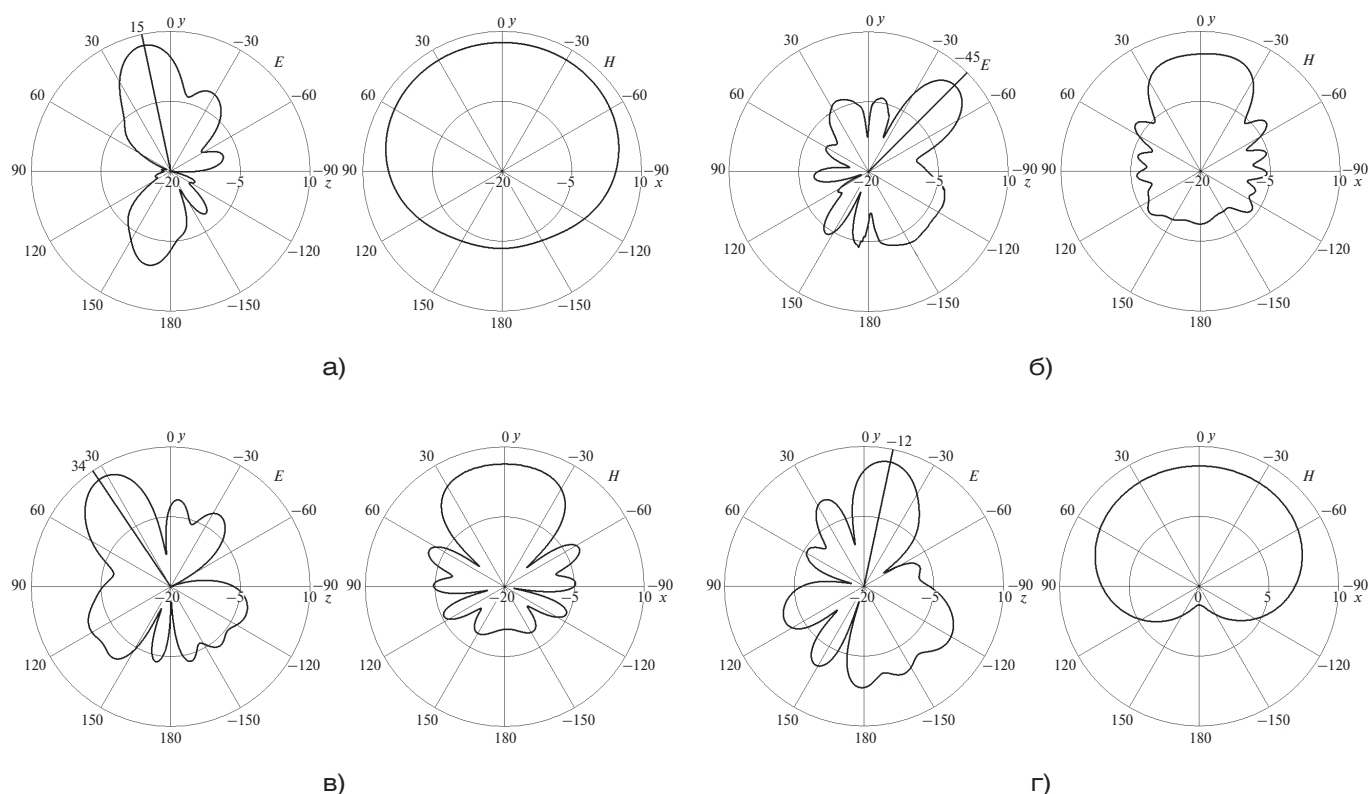


Рисунок 11. Диаграммы направленности фазированной антенной решетки в E - и H -плоскостях на входах со следующими номерами: а – один; б – два; в – три; г – четыре

влияния на форму диаграмм в «верхней» – рабочей (рис. 9, $y > 0$) полусфере.

Сопоставление полученных результатов с данными других авторов свидетельствует о том, что углы отклонения лучей ФАР, их коэффициенты усиления и уровни боковых лепестков не хуже опубликованных в работах [5–9]. В то же время относительная полоса рабочих частот лучей спроектированной ФАР на 13–16% больше (значение зависит от номера луча), чем у матриц Батлера и антенных решеток, описанных в работах [5–9].

Заключение

Полученные в работе результаты свидетельствуют о достижении положительного эффекта

от использования модифицированных дифференциальных фазовращателей в проектировании четырехлучевой ФАР. Наихудшее значение входного коэффициента отражения в рабочей полосе частот 2–2,4 ГГц составило –11 дБ по первому входу. Неравномерность затухания сигналов на входах антенного полотна составила $-6,2 \pm 0,6$ дБ, а расфазировка не превысила 8° от номинальных значений. В итоге можно заключить, что модифицированные печатные фазовращатели вполне результативно применены в конструкции четырехлучевого диаграммообразующего устройства, что позволяет считать перспективным их использование при проектировании ФАР с большим числом лучей (диаграмм направленности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
2. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. 4th ed. New Jersey, Wiley & Sons, 2016. 1072 p.
3. Горбачев А. П., Паршин Ю. Н. Печатная дипольная 8-лучевая антенная решетка с диаграммообразующей матрицей Батлера на связанных полосковых линиях // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 65–70.
4. Патент СССР на изобретение № 1334221 / 30.08.1987. Бюл. № 32. Горбачев А. П. Полосковый фазовращатель.
5. Gandini E., Ettore M., et al. A lumped-element unit cell for beam-forming networks and its application to a miniaturized Butler matrix // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2013. Vol. 61. No. 4. P. 1477–1487.
6. Lin T.-H., Hsu S.-K., Wu T.-L. Bandwidth enhancement of 4×4 Butler matrix using broadband forward-wave directional coupler and phase difference compensation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2013. Vol. 61. No. 12. P. 4099–4109.

7. Wincza K., Gruszczynski S. Broadband integrated 8x8 Butler matrix utilizing quadrature couplers and Schiffman phase shifters for multibeam antennas with broadside beam // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2016. Vol. 64. No. 8. P. 2596–2604.
8. Chu H. N., and Ma T.-G. An extended 4x4 Butler matrix with enhanced beam controllability and widened spatial coverage // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2018. Vol. 66. No. 3. P. 1301–1311.
9. Bantavis P. I., Kolitsidas C. I., et al. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2018. Vol. 66. No. 12. P. 6851–6861.
10. Butler J. L., Lowe R. Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas // *Electronic Design*. 1961. Vol. 9. No. 4. P. 170–173.
11. Справочник по элементам полосковой техники / под ред. А. Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.
12. Бахарев С. И., Вольман В. И. и др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.
13. Kolundzija B. M., et al. WIPL-D: Microwave circuit and 3D EM simulation for RF and microwave applications. Norwood, MA, Artech House, 2005. 414 p.
14. Алексеев В. Г., Гриднев В. Н. и др. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация. М.: Высшая школа, 1984. 528 с.
15. Балакирев М. В., Вохмяков Ю. С. и др. Радиопередающие устройства. М.: Радио и связь, 1982. 257 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбачев Анатолий Петрович, д. т. н., профессор, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (913) 761-91-08, e-mail: argor@ngs.ru.

Паршин Юрий Николаевич, аспирант, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20; инженер-электроник, АО «НПО «Научно-исследовательский институт измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», Российская Федерация, 630015, Новосибирск, ул. Планетная, д. 32, тел.: 8 (965) 829-12-41, e-mail: jurparnik@mail.ru.

For citation: Gorbachev A. P., Parshin Yu. N. Printed four-beam phased antenna array with modified differential phase shifters. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 38–45. DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-38-45

A. P. Gorbachev, Yu. N. Parshin

PRINTED FOUR-BEAM PHASED ANTENNA ARRAY WITH MODIFIED DIFFERENTIAL PHASE SHIFTERS

The paper presents the results of designing a four-beam phased antenna array using a Butler matrix. The matrix itself is made on the basis of three-decibel directional couplers and modified phase shifters. The novelty of the proposed development is due to the greater broadband of the patented strip phase shifters, which, in turn, is determined by the more stable in the frequency range nature of the electromagnetic interaction of the two conductors associated with each half of the printed ring resonator. The use of symmetrical strip lines with a T-wave in taps and phase shifters removes the restrictions associated with the effect of dispersion on the balance of electric and magnetic bonds in the areas of electromagnetic interaction of two parallel coupled transmission lines. The basis for the construction of the device was a three-decibel directional coupler and a modified phase shifter, which provide an acceptable bandwidth at a center frequency of 2.2 GHz. Based on a systematic approach to the design of antenna arrays, the following key development stages were selected: a three-decibel directional coupler; a modified phase shifter; a printed dipole radiator; matrix Butler 4x4; 4-beam phased antenna array. As a dielectric, two-sided foil-coated material FAF-4D with a dielectric constant of 2.5 with thicknesses of 0.3 mm and 1.5 mm was selected. NanoCAD5.1 was used to create the topologies, and WIPL-D was used for modeling.

Keywords: Butler matrix, diagram-forming device, directional coupler

REFERENCES

1. Voskresensky D. I., editor. *Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* [Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays]. 4th ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, 744 p. (In Russian).
2. Balanis C. A. *Antenna theory: analysis and design*. 4th ed. New Jersey, Wiley & Sons, 2016, 1072 p.
3. Gorbachev A. P., Parshin Yu. N. Printed dipole 8-beam antenna array with chart-forming matrix Butler on connected strip lines. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 4, pp. 65–70. (In Russian).
4. Patent RUS No. 1334221 / 30.08.1987. Byul. № 32. Gorbachev A. P. *Stripe phase shifter*.
5. Gandini E., Ettorre M., et al. A lumped-element unit cell for beam-forming networks and its application to a miniaturized Butler matrix. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1477–1487.
6. Lin T.-H., Hsu S.-K., Wu T.-L. Bandwidth enhancement of 4x4 Butler matrix using broadband forward-wave directional coupler and phase difference compensation. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2013, vol. 61, no. 12, pp. 4099–4109.
7. Wincza K., Gruszczynski S. Broadband integrated 8x8 Butler matrix utilizing quadrature couplers and Schiffman phase shifters for multibeam antennas with broadside beam. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2016, vol. 64, no. 8, pp. 2596–2604.

8. Chu H.N., and Ma T.-G. An extended 4×4 Butler matrix with enhanced beam controllability and widened spatial coverage. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2018, vol. 66, no. 3, pp. 1301–1311.
9. Bantavis P.I., Kolitsidas C.I., et al. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 6851–6861.
10. Butler J.L., Lowe R. Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas. *Electronic Design*, 1961, vol. 9, no. 4, pp. 170–173.
11. Feldstein A.L., editor. *Spravochnik po elementam poloskovoi tekhniki* [Reference on the elements of strip technology]. Moscow, Svyaz Publ., 1979, 336 p. (In Russian).
12. Bakharev S.I., Volman V.I., et al. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv* [Handbook for the calculation and design of microwave strip devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 328 p. (In Russian).
13. Kolundzija B.M., et al. *WIPL-D: Microwave circuit and 3D EM simulation for RF and microwave applications*. Norwood, MA, Artech House, 2005, 414 p.
14. Alekseev V.G., Gridnev V.N., et al. *Tekhnologiya EVA, oborudovanie i avtomatizatsiya* [Computer technology, equipment and automation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984, 528 p. (In Russian).
15. Balakirev M.V., Vokhmyakov Yu. S., et al. *Radioperedayushchie ustroystva* [Radio transmitting devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 257 p. (In Russian).

AUTHORS

Gorbachev Anatoliy, D. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (913) 761-91-08, e-mail: apgor@ngs.ru.

Parshin Yuriy, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation; engineer, JSC NPO Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after the Komintern, 32, Planetnaya St., Novosibirsk, 630015, Russian Federation, tel.: +7 (965) 829-12-41, e-mail: jurparnik@mail.ru.