

Моделирование и экспериментальный тест фазированных антенных решеток с малым уровнем боковых лепестков и круговой поляризацией

Лу Гомин,* П. Н. Захаров,[†] А. Ф. Королев[‡]

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 18.12.2017)

В работе изучены две геометрических формы элемента для построения фазированных антенных решеток с круговой поляризацией; разработана фидерная система, обеспечившая Чебышевское распределение амплитуд токов по элементам и равномерное распределение фаз для решеток 4×4 ; проведено моделирование решеток 4×4 с элементами геометрической формы, позволившей подавить боковые лепестки до -26 ; проведено сравнение параметров двух типов антенных решеток; проведены экспериментальные измерения характеристик ФАР.

PACS: 84.40.Va УДК: 537.87, 621.396

Ключевые слова: фазированные антенные решетки, микрополосковые антенны, Чебышевское распределение, круговая поляризация.

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах беспроводной связи свойства антенн в значительной степени определяют энергетическую и спектральную эффективность системы [1]. При использовании фазированных антенных решеток существует необходимость расширения рабочей полосы частот, подавления боковых лепестков и уменьшения взаимной электромагнитной связи между излучателями [2]. Оптимизация данных параметров позволяет повысить коэффициент направленного действия антенн, энергетическую эффективность систем связи, в частности, для ММО-систем, беспроводных локально-высокочислительных сетей [3, 4] и др.

Путем оптимизации относительного расположения излучателей и возбуждения в них токов определенных амплитуд и фаз можно получить различные диаграммы направленности [5]. Один из многих способов, позволяющих получить существенное подавление боковых лепестков (в т.ч. дифракционных) — управление распределением мощностей по элементам антенной решетки [5]. Такое распределение может быть сформировано как аналоговыми, так и цифровыми методами.

В настоящей работе исследуется возможность построения антенных решеток с низким уровнем боковых лепестков, выполненных по микрополосковой технологии, излучающих волну с круговой поляризацией в удаленном поле [6, 7]. Микрополосковая антенна была выбрана ввиду ее малой толщины, возможности размещения антенны и элементов тракта на единой печатной плате, простоты технологического процесса при производстве [8]. Исследования проводились при помощи моделирования в программном па-

кете CST Microwave Studio, использующем численное решение уравнений Максвелла в интегральной форме. Параметры антенной решетки оптимизировались для получения следующих характеристик: центральная частота $f_0 = 1.616$ ГГц, полоса частот не менее 120 МГц, круговая поляризация излучения, уровень боковых лепестков не более -20 дБ.

Структура данной статьи следующая: в первой части описывается выбор элементов, обеспечивших центральную частоту 1.6 ГГц и круговую поляризацию излучения в удаленном поле; во второй части рассматривается фидерная система, состоящая из делителя мощности и модифицированного направленного ответвителя, обеспечившая соотношение мощностей 1:9:9:1 (Чебышевское распределение) в вертикальном и горизонтальном направлениях на плоскости антенной решетки с целью уменьшения боковых лепестков; в третьей части представлены результаты экспериментальных измерений антенной решетки и планируемые будущие исследования.

1. ВЫБОР ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТКИ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Моделирование показало, что оба элемента обеспечивают центральную частоту 1.616 ГГц, при этом коэффициенты эллиптичности элементов при изменении угла отклонения от нормали антенной плоскости θ от 0 до 90° были не хуже -5 дБ, таким образом, на центральной частоте элементы обеих форм излучают волну с круговой поляризацией в верхней полуплоскости удаленного поля. Ввиду этого обе формы элемента были выбраны для последующего моделирования решеток.

Для уменьшения электромагнитной взаимосвязи между элементами антенны и фидерной системой была разработана структура, состоящая из пяти слоев. На верхнем слое размещаются антенные элементы (медь),

*E-mail: luguoming.hit@gmail.com

[†]E-mail: zakharov@phys.msu.ru

[‡]E-mail: korolev_phys@mail.ru

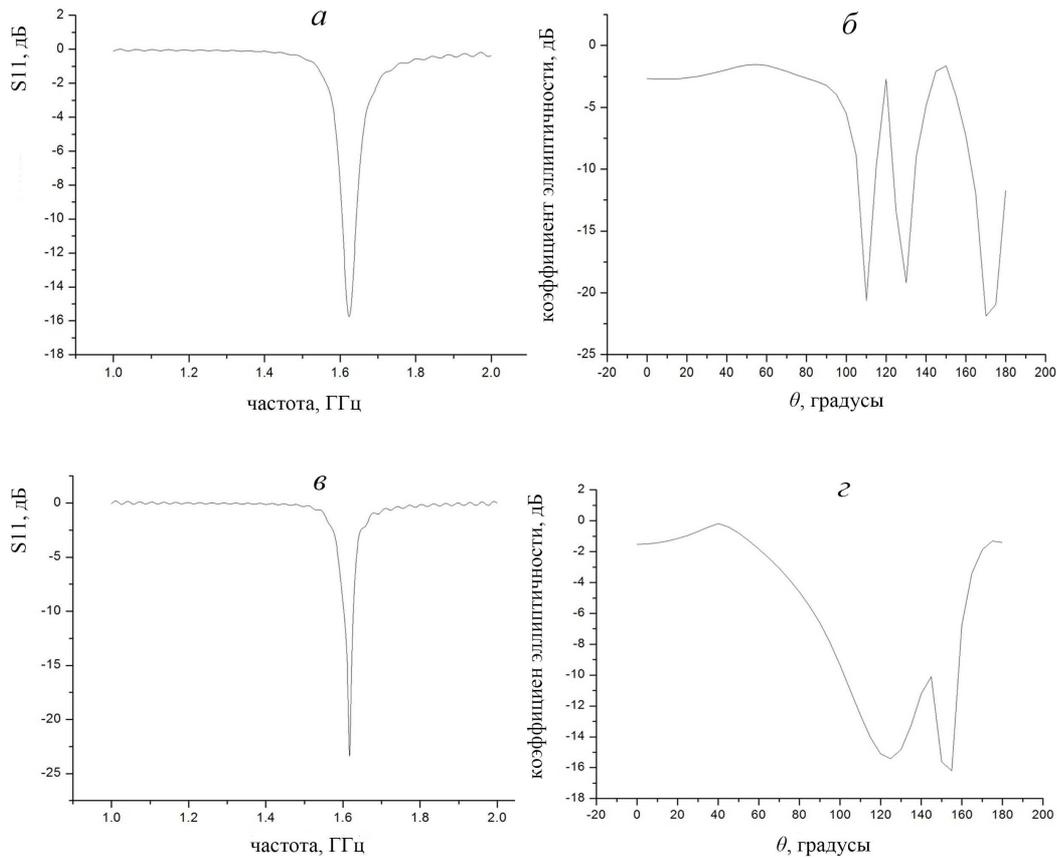


Рис. 1: Полоса частот и коэффициент эллиптичности элементов двух различных форм

далее: диэлектрик–1, земля (медь), диэлектрик–2, фидерная система. Размещение антенных элементов и фидерной системы на отдельных слоях позволяет уменьшить электромагнитную взаимосвязь между ними [15].

С целью получения заданной центральной частоты элемента антенной решетки проведено моделирование элемента в форме квадрата с усеченными углами с размером 28×28 мм, толщиной меди антенных элементов 18 мкм и элемента в форме диска с прямоугольными вырезами с радиусом 18 мм, также с толщиной меди антенных элементов 18 мкм. При моделировании использовались следующие параметры: материал диэлектрика–1 — керамика с $\epsilon = 9.8$, толщина диэлектрика–1 3.2 мм, толщина меди земли 18 мкм. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) элемента в форме квадрата и его коэффициент эллиптичности представлены на рис. 1,а и б соответственно, КСВН элемента в форме диска и его коэффициент эллиптичности представлены на рис. 1,в и г соответственно [21].

Моделирование показало, что оба элемента обеспечивают центральную частоту 1.616 ГГц, при этом коэффициенты эллиптичности элементов при изменении угла отклонения от нормали антенной плоскости θ от 0 до 90° были не хуже -5 дБ, таким об-

разом, на центральной частоте элементы обеих форм излучают волну с круговой поляризацией в верхней полуплоскости удаленного поля. Ввиду этого обе формы элемента были выбраны для последующего моделирования решеток.

2. РАЗРАБОТКА ФИДЕРНОЙ СИСТЕМЫ И ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

2.1. Разработка делителя мощности

С целью уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности в удаленном поле антенной решетки используются следующие способы [16]: уменьшение расстояний между элементами до величин менее $\lambda_0/2$; неэквидистантное расположение элементов; использование остронаправленных элементов; неравномерное распределение токов по элементам. В настоящей работе использовалось неравномерное распределение токов по элементам. В аналоговых фидерных системах часто применяется T -образный делитель мощности, выполненный по микрополосковой технологии. Для решеток с топологией 4×4 требуется распределение мощностей по элементам с коэффициентами 1:9:9:1 (что обеспечивает Чебышевское распределение токов), однако

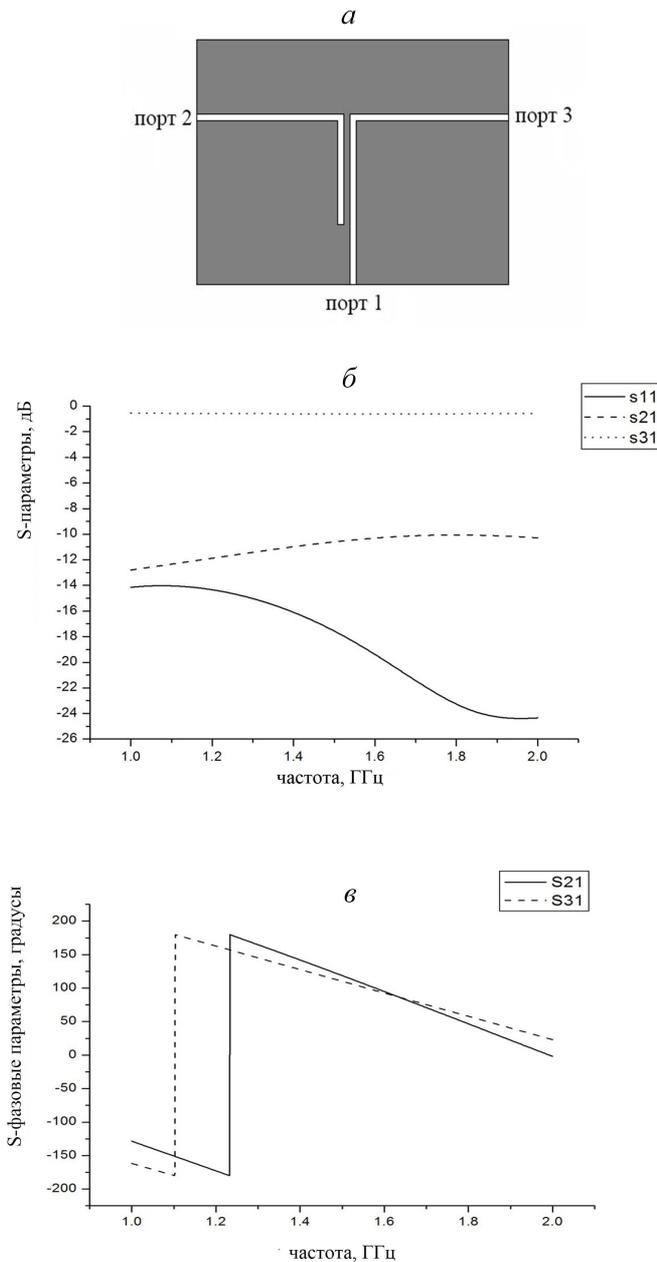


Рис. 2: Форма делителя мощности и его АЧХ и ФЧХ

при использовании T -образных делителей мощности трудно получить указанное распределение мощностей. Ввиду этого в настоящей работе был разработан новый делитель мощности, представляющий собой модификацию направленного ответвителя. Форма делителя мощности представлена на рис. 2,а [21]. Порт 1 является входным, порты 2 и 3 — выходными. Расстояние между портами 2 и 3 равно $\lambda_0/2$, расстояние от порта 1 до линии, соединяющей порты 2 и 3, составляет $\lambda_0/4$. При моделировании использовались следующие параметры: центральная частота 1.616 ГГц, диэлектрик—2 FR-4 $\varepsilon = 4$, толщина меди 18 мкм, толщина диэлектрика 2 мм. Модули S -параметров делителя мощности

представлены на рис. 2,б, фазы — на рис. 2в [21].

Моделирование показало, что на центральной частоте 1.616 ГГц $S_{11} = -17.9$ дБ(11-индекс), $S_{21} = -10.27$ дБ, $S_{31} = -0.59$ дБ, $S_{31} - S_{21} = 9.68$ дБ, фазы выходных сигналов на портах 2 и 3 равны. $10 \cdot \lg 9 = 9.5$ дБ, что близко к значению $S_{31} - S_{21} = 9.68$ дБ. Таким образом, обеспечиваются распределение мощностей с коэффициентами 1:9 и равные фазы на выходных портах делителя мощности. Разработанный делитель мощности был выбран для построения фидерной системы.

2.2. Создание фидерной системы для решеток с элементами до 16

При построении решетки с расположением 4×4 была использована фидерная система для формирования диаграммы направленности, состоящая из двух типов делителей мощности [17, 18]. Первый тип — T -образный делитель мощности, второй — разработанный делитель мощности с коэффициентами 1:9. В разрабатываемой антенной решетке существует необходимость уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности (в том числе дифракционных) и электромагнитной взаимосвязи между элементами [10]. Использование диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью уменьшает относительную длину волны в диэлектрике, что приводит к увеличению относительного расстояния между элементами, и, следовательно, к уменьшению электромагнитной взаимосвязи между элементами. Ввиду этого при моделировании элементов и разработке решеток в качестве диэлектрика—1 была выбрана керамика с $\varepsilon = 9.8$. При расстоянии между элементами более $\lambda_0/2$ образуются дифракционные максимумы; при расстоянии менее $\lambda_0/2$ увеличивается электромагнитная взаимосвязь между элементами. Поэтому было выбрано расстояние между элементами, равное $\lambda_0/2$; при моделировании делителя мощности расстояние между портами также составляло $\lambda_0/2$. Моделирование электромагнитной взаимосвязи между элементами показало, что на центральной частоте 1.616 ГГц при расстоянии $\lambda_0/2$ между элементами в форме квадрата $S_{21} = -27$ дБ, а между двумя элементами в форме диска $S_{21} = -33$ дБ. Решетка 4×4 , составленная из элементов в форме квадратов с усеченными углами представлена на рис. 3,а; решетка, составленная из элементов в форме дисков с прямоугольными вырезами представлена на рис. 3,б [21]. Фидерная система представлена на рис. 3,в [21]. Моделирование фидерной системы показало, что в вертикальном и горизонтальном направлениях распределение мощностей по элементам удовлетворяет соотношению 1:9:9:1 [19, 20] (что соответствует Чебышевскому распределению токов по элементам).

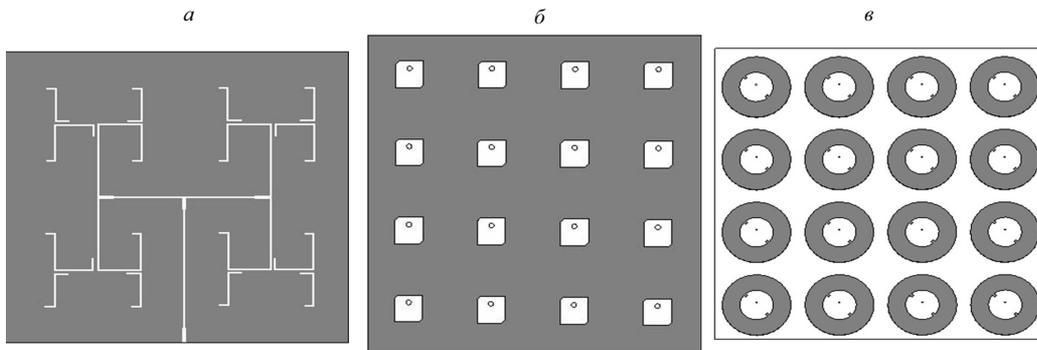


Рис. 3: Фидерная система и решетка с элементами в форме квадрата и диска

2.3. Моделирование решеток 4x4

Для построения решеток использовались элементы двух форм и разработанная фидерная система. С целью оценки поляризации, полосы частот и диаграммы направленности было проведено моделирование решеток с элементами двух форм в среде CST Microwave Studio.

КСВН, диаграмма направленности, коэффициент эллиптичности решеток 4x4 с элементами в форме квадрата и элементами в форме диска представлены на рис. 4 [21].

Моделирование показало, что у решеток с элементами в форме квадрата с усеченными углами центральная частота составляет 1.616 ГГц, ширина полосы частот 132.49 МГц (по уровню $S_{11} = -10$ дБ), боковой лепесток диаграммы направленности -22 дБ, коэффициент эллиптичности не хуже -5 дБ в диапазоне углов отклонения от нормали к антенной плоскости $0^\circ \dots 45^\circ$. У решеток с элементами в форме диска с прямоугольными вырезами центральная частота составила 1.616 ГГц, полоса частот 129.34 МГц, боковой лепесток диаграммы направленности -26 дБ, коэффициент эллиптичности не хуже -5 дБ в диапазоне углов отклонения от нормали к антенной плоскости $0^\circ \dots 45^\circ$. Таким образом, у решеток с элементами в форме квадрата по сравнению с решеткой с элементами в форме диска полоса частот несколько шире, боковые лепестки — выше, поляризация менее соответствует круговой. Обе решетки удовлетворяют заданным параметрам [21].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ТЕСТ РЕШЁТКИ С 4 ЭЛЕМЕНТАМИ В ФОРМЕ КВАДРАТА

Для проверки КСВН и поляризации тестовой антенной решетки, состоящей из четырех элементов в форме квадрата и фидеров, проведены экспериментальные измерения. Элементы в тестовой решетке были расположены на выходных портах первого типа делителей фидерной системы. КСВН, диаграмма направленности **Е** и **Н** показаны на рис. 5,а,б и в соответственно. Из

рис. 5,а видно, что рабочий диапазон частот решётки соответствует расчетному. На рис. 5,б и рис. 5,в показаны диаграммы в сечении **Е** и диаграммы в сечении **Н** соответственно, демонстрирующие круговую поляризацию излучения. В виду погрешностей при изготовлении образца в некоторых направлениях появляются различия в сечениях **Е** и **Н**.

КСВН, диаграмма направленности в сечениях **Е** и **Н** показаны на рис. 5,а, б, в соответственно. В дальнейшей работе планируется изготовление антенных решеток с полной фидерной системой с 16 элементами двух геометрических форм, экспериментальные измерения их характеристик: КСВН, параметров поляризации и диаграммы направленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор геометрической формы элементов фазированных антенных решеток в виде квадратов с усеченными углами и в виде дисков с прямоугольными вырезами позволил обеспечить круговую поляризацию излучения. Применение диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 9.8$) позволило увеличить относительное расстояние между элементами, что привело к уменьшению электромагнитной взаимосвязи между ними (для элементов в форме квадрата до -27 дБ, для элементов в форме диска — до -33 дБ). Разработан делитель мощности в виде направленного ответвителя, обеспечивший Чебышевское распределение токов по элементам и равномерное распределение фаз, что позволило получить для решеток 4x4 уровень боковых лепестков диаграммы направленности -26 дБ. Решетка с элементами в форме диска по сравнению с решеткой с элементами в форме квадрата обеспечила меньший уровень боковых лепестков и более близкую к круговой поляризацию, однако меньшую ширину полосы частот. Экспериментальные измерения характеристик тестовой решётки с 4 элементами в форме квадрата с усеченными углами показали соответствие измеренных параметров и результатов моделирования по КСВН, форме диаграммы и параметрам поляризации.

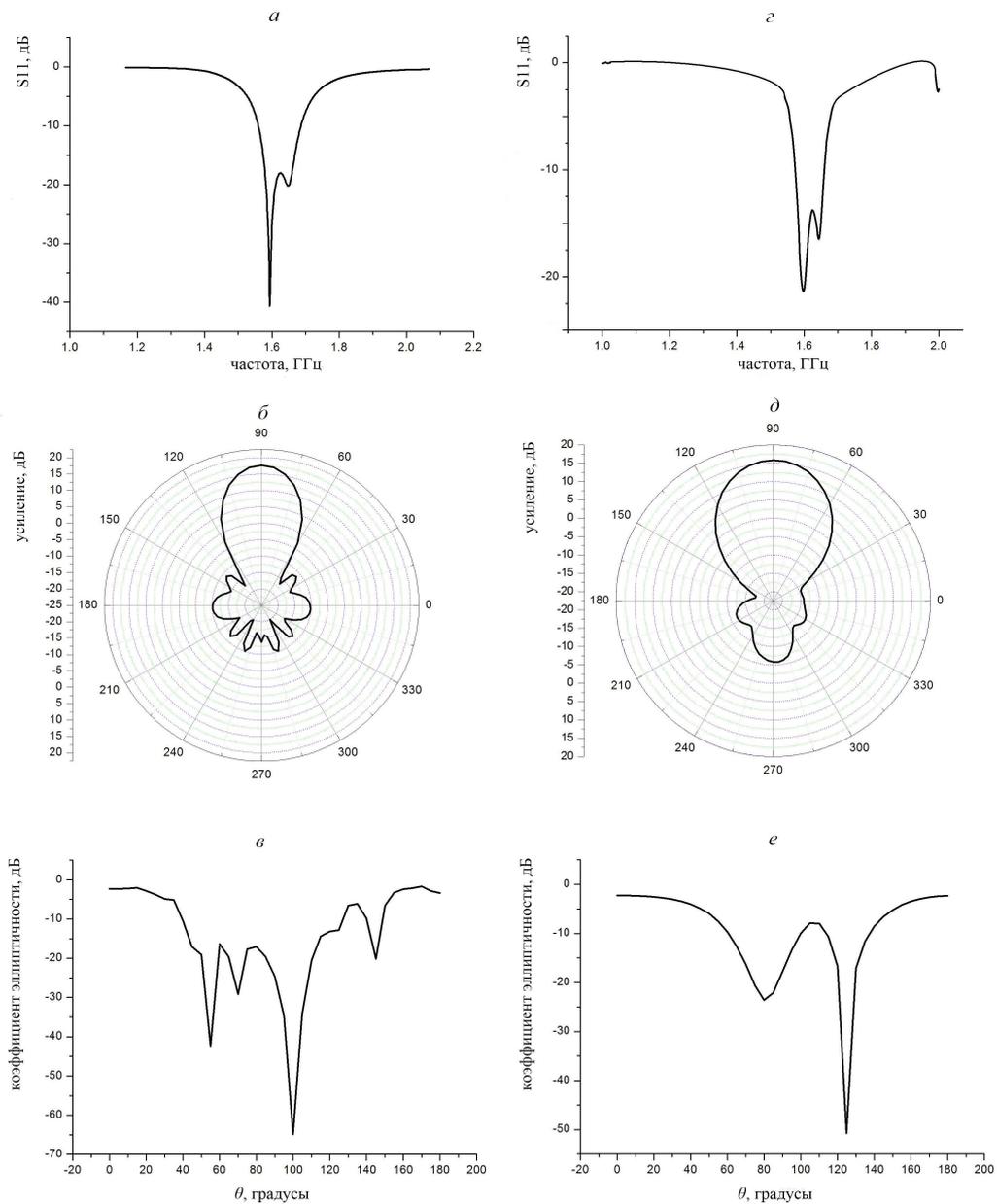


Рис. 4: Характеристики элемента в форме квадрата и диска

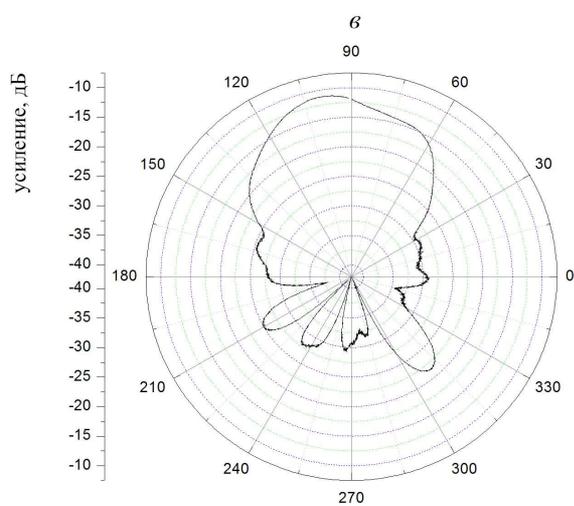
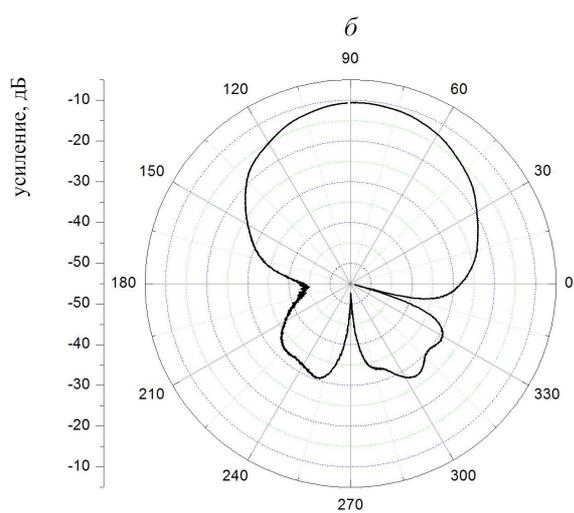
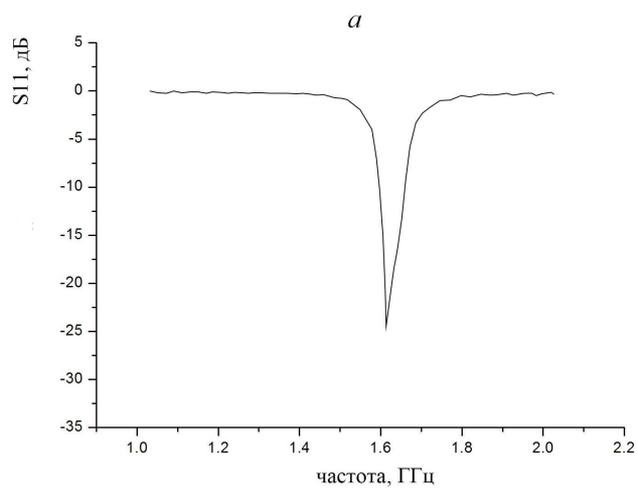


Рис. 5: Результаты экспериментального измерения

- [1] Коляденко Ю. Ю., Коляденко А. В. Журнал «Проблемы телекоммуникаций». 2012. **2**, № 7. С. 91.
- [2] Муравьев В. В., Тамело А. А., Лебедев В. М., Степук А. А. Радиотехника и связь. 2013, № 4. С. 49.
- [3] Слюсар В. И., Масесов Н. А. Радиотехника, Радиотехника, радиолокация, электроника, зв'язок. 2008. **1**, № 16. С. 39.
- [4] Дубик А. Н., Слюсар В. И., Зинченко А. А. Радиоэлектроника и компьютерные системы. 2006. **6**, № 18. С. 206.
- [5] Заикин И. П., Тоцкий А. В., Абрамов С. К., Лукин В. В. Основы теории антенн: учебное пособие. М., 2005.
- [6] Zaghrou Amir I., Kilic O., Kohls E. C. System Aspects of Active Phased Arrays. Satellite Communications. 2010. September 18. P. 513.
- [7] Uthansakul M., Attakitmongkol K., Bunsanit Ch., Uthansakul P. Microwave & Optical Technology Letters. 2010. November 52 (11). P. 2423.
- [8] Pham Nhi T., Lee Gye-An, De Flaviis F. Antennas and Propagation Society. International Symposium 2005. IEEE. 2005. 3-8 July. P. 267.
- [9] Петров Б. М. Электродинамика и распространения радиоволн: М., 2007.
- [10] Гостев В. И., Конин В. В., Маценура А. Л. Линейные многоканальные устройства сверхвысоких частот. М., 1997.
- [11] Пластиков А. Н. Журнал Радиоэлектроники. 2012. **8**. С. 1.
- [12] Ku Bon-Jun, Ahn Do-Seob, Lee Seong-Pal, Shishlov A. V., Reutov A. S., Ganin S. A., Shubov A. G. ETRI Journal. 2002. **24**, N 3. P. 197.
- [13] Joshi N. K., Verma K. K., Yadav S. International Journal of Scientific Engineering and Technology. 2012. **2**. С. 103. P. 103.
- [14] Marco L. Antennas and Propagation (EUCAP). Proceedings of the 5th European Conference. 2011, 11–15 April. P. 1051.
- [15] Beenamole K. S. DRDD Science Sepctrum. 2009. **2**. P. 84.
- [16] Вендик О. Г., Парнес. М. Д. Антенны с электронным движением луча. М., 2001.
- [17] Вечтомов В. А., Зимин В. Н., Кузенков А. Н., Дропов Д. В., Козлов А. А. Инженерный журнал «Наука и инновация». 2012. **8**, № 8. С. 70.
- [18] Жексенов М. А., Печурин В. А., Волченков А. С. Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. **45**. С. 1.
- [19] Cetinoneri B., Atesal Yu. A., Rebeiz G. M. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2011. **59**, Iss. 2. P. 295.
- [20] Gruszczynski S., Wincza K., Sachse K. Electronics Letters. 2007. **43**, Iss. 11. P. 635.
- [21] Лу Гомин, Захаров П. Н., Сухоруков А. П. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. 2013. № 6. С. 3. (Lu Guoming, P. N. Zakharov, A. P. Sukhorukov. Mosc. Univ. Phys. Bull. 2013. **68**, N 6. P. 437.)

Simulation and measurement of low-sidelobe phased antenna array with circular polarization

Lu Guoming^a, P. N. Zakharov^b, A. F. Korolev^c

¹Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aluguoming.hit@gmail.com, ^bzakharov1@mail.ru, ^ckorolev_phys@mail.ru

Two shapes of antenna elements providing circular polarization in the far field have been investigated and compared; feeder network providing Chebyshev distribution of currents and uniform distribution of phases has been designed for 4x4 arrays; phased arrays with modified square and circular patches have been designed and compared, providing sidelobe reduction up to -26 dB; experimental tests of the trial array have been performed.

PACS: 84.40.Ba.

Keywords: phased antenna array, sidelobe reduction, circular polarization.

Received 26 July 2017.

Сведения об авторах

1. Лу Гомин — научный стажер; e-mail: luguoming.hit@gmail.com.
2. Захаров Петр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент.; e-mail: zakharov@phys.msu.ru.
3. Анатолий Федорович Королев — канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-42-09, e-mail: korolev_phys@mail.ru.