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

Лу Гомин^a, П. Н. Захаров, А. П. Сухоруков^b

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^a luguoming.hit@gmail.com, ^bapsmsu@gmail.com

Статья поступила 10.07.2013, подписана в печать 10.09.2013.

В работе исследованы 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 в форме квадрата и диска, позволивших получить подавление боковых лепестков до -26 дБ; проведено сравнение параметров двух типов антенных решеток.

Ключевые слова: фазированные антенные решетки, подавление боковых лепестков, круговая поляризация. УДК: 537.87, 621.396.677. PACS: 84.40.Ва.

Введение

Свойства антенных систем в существенной степени определяют энергетическую и спектральную эффективность современных систем беспроводной связи. При использовании фазированных антенных решеток существует необходимость подавления боковых лепестков, расширения рабочей полосы частот и уменьшения взаимной электромагнитной связи между элементами. Оптимизация данных параметров позволяет повысить коэффициент направленного действия антенн, энергетическую эффективность систем связи, в частности MIMO-систем, беспроводных локально-высоковычислительных сетей и др.

При помощи оптимизации расположения излучателей и возбуждения в них токов определенных амплитуд и фаз можно получить различные диаграммы направленности [1]. Один из многих способов, позволяющих получить существенное подавление боковых лепестков (в том числе дифракционных), — управление распределением мощностей по элементам антенной решетки [1]. 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. Микрополосковая антенна была выбрана ввиду ее малых размеров, возможности размещения антенны и элементов тракта на единой печатной плате, простоты технологического процесса при производстве. Исследования проводились при помощи моделирования в программном пакете 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.

1. Выбор формы элементов решетки, обеспечивающих круговую поляризацию излучения

Поляризация электромагнитной волны, излучаемой антенной, зависит от многих факторов, в частности от геометрической формы элементов антенны, топологии фидерной системы [2] и др. Один из способов получения круговой поляризации — использование элементов в форме квадрата с усеченными углами или диска с прямоугольными вырезами [3].

Для уменьшения электромагнитной взаимосвязи между элементами антенны и фидерной системой была разработана структура, состоящая из пяти слоев. На верхнем слое размещаются антенные элементы, далее — диэлектрик-1, земля (металл), диэлектрик-2, фидерная система. Размещение антенных элементов и фидерной системы на отдельных слоях позволяет уменьшить электромагнитную взаимосвязь между ними [4].

С целью получения заданной центральной частоты элемента антенной решетки проведено моделирование элемента в форме квадрата с усеченными углами размером 28×28 мм и элемента в форме диска радиусом 18 мм с прямоугольными вырезами, в качестве материала элементов выбрана медь толщиной 18 мкм. При моделировании использовались следующие параметры: материал диэлектрика-1 — керамика с $\varepsilon = 9.8$, толщина диэлектрика-1 З.2 мм, толщина меди 18 мкм. КСВН элемента в форме квадрата и его коэффициент эллиптичности представлены на рис. 1, *а* и 1, *б* соответственно, КСВН элемента в форме диска и его коэффициент эллиптичности представлены на рис. 1, *в* и 1, *е* соответственно.

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 цен-



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

тральной 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 [5]: 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 Т-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 при

использовании Т-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. 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. 2, *в*.

Моделирование показало, что на центральной частоте 1.616 ГГц $S_{11} = -17.9$ дБ, $S_{21} = -10.27$ дБ, $S_{31} = -0.59$ дБ, $S_{31} - S_{21} = 9.68$ дБ, фазы выходных сигналов на портах 2 и 3 равны. 10 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.



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

2.2. Создание фидерной системы решеток 4×4

Для построения решетки с расположением 4×4 была использована фидерная система для формировния диаграммы направленности, состоящая из двух типов делителей мощности [6]. Первый класс — Т-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. 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 ними. 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 $\lambda_0/2$. Моделировании 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.







Рис. 3. Фидерная система и решетка в форме квадрата и диска

Решетка 4×4 , составленная из элементов в форме квадратов с усеченными углами представлена на рис. 3, *a*; решетка, составленная из элементов в форме дисков с прямоугольными вырезами, представлена на рис. 3, *б*. Фидерная система представлена на рис. 3, *в*. Моделирование фидерной системы показало, что в вертикальном и горизонтальном направлениях распределение мощностей по элементам удовлетворяет соотношению 1:9:9:1 (что соответствует чебышевскому распределению токов по элементам).

3. Моделирование решеток 4 × 4

Для построения решеток использовались элементы двух форм и разработанная фидерная система. С целью сравнения 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 4 × 4 с элементами в форме квадрата и диска представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Моделирование показало, что у решетки с элементами в форме квадрата с усеченными углами центральная

а



Рис. 4. Характеристики элемента в форме квадрата

Рис. 5. Характеристики элемента в форме диска

100

θ, градусы

140

180

60

20



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 0-45°. У решетки 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 0-45°. Таким образом, у решетки с элементами в форме квадрата по сравнению с решеткой с элементами в форме диска полоса частот шире, боковые лепестки — больше, поляризация менее соответствует круговой. Обе решетки удовлетворяют заданным параметрам.

Заключение

Элементы фазированных антенных решеток в форме квадрата с усеченными углами и в форме диска с прямоугольными вырезами позволяют обеспечить излучение волны с круговой поляризацией. Применение диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью (керамики с $\varepsilon = 9.8$) увеличило относительное расстояние между элементами, что позволило уменьшить электромагнитную взаимосвязь между элементами (для элементов в форме квадрата — до -27 дБ, для элементов в форме диска — до -33 дБ). Разработан делитель мощности в виде направленного ответвителя, обеспечивающий чебышевское распределение токов по элементам и равномерное распределение фаз, что позволило получить для решеток 4×4 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.

Список литературы

- 1. Заикин И.П., Тоцкий А.В., Абрамов С.К., Лукин В.В. Основы теории антенн: Учеб. пособие. М., 2005.
- 2. Пластиков А.Н. // Журн. радиоэлектроники. 2012. **8**. С. 3.
- Naresh Kumar Joshi, Kamal Kumar Verma, Sandeep Yadav. // Intern. J. of Scientific Engineering and Technology. 2012.
 P. 103.
- 4. Beenamole K.S. // DRDD Science Sepctrum. 2009. 2. P. 84.
- 5. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электронным движением луча. М., 2001.
- 6. Жексенов М.А., Печурин В.А., Волченков А.С. // Электронный журн. «Труды МАИ». 2011. **45**. С. 1.

Simulation of low-sidelobe phased antenna array with circular polarization

Lu Guoming^a, P. N. Zakharov, A. P. Sukhorukov^b

Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a luguoming.hit@gmail.com, ^b apsmsu@gmail.com.

Two shapes of antenna elements have been investigated and compared to obtain circular polarization in the far field; feed network providing Chebyshev distribution of current amplitudes and uniform distribution of phases has been designed for 4×4 arrays; phased arrays with modified square and circular patches have been designed and compared, providing sidelobe reduction up to -26 dB.

Keywords: phased antenna array, sidelobe reduction, circular polarization. PACS: 84.40.Ba. *Received 10 July 2013*.

English version: Moscow University Physics Bulletin 6(2013).

Сведения об авторах

- 1. Лу Гомин аспирант; e-mail:luguoming.hit@gmail.com.
- 2. Захаров Петр Николаевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: zakharov@phys.msu.ru.
- 3. Сухоруков Анатолий Петрович доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-44-18, e-mail: aspmsu@gmail.com.