

УДК 621.396.677

ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С ЦИФРОВОЙ СХЕМОЙ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

© 2023 г. Лу Гомин¹ *, П. Н. Захаров¹, А. Ф. Королев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет,
кафедра фотоники и физики микроволн, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 28.06.2023 г.

Предложена цифровая схема формирования многолучевого излучения для реализации беспроводных систем связи следующего поколения; параметры и структура плоской антенной решетки обеспечили изоляцию между портами не менее 15 дБ; проведены экспериментальные измерения характеристик излучения многолучевой диаграммы направленности перестраиваемой цифровой схемы формирования лучей в горизонтальной и вертикальной плоскостях излучения.

DOI: 10.31857/S0367676523702575, EDN: XVTGAC

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многолучевые антенные решетки с цифровой схемой формирования многолучевой диаграммы направленности начинают применяться в пятом поколении сетей мобильной связи (5G) [1]. В сетях 5G и в следующих поколениях беспроводной связи (6G) многолучевая диаграмма используется для формирования направленного излучения/приема радиоволн от базовой станции сразу на нескольких абонентов, а также для отслеживания направления на каждого отдельного абонента, обеспечивая таким образом наилучшие условия передачи сигнала [1, 2, 11, 18]. Многолучевая диаграмма приводит к большей доступности широкополосной мобильной связи.

Одной из ключевых технологий для реализации сетей сотовой связи 5G является использование в составе базовых станций многоэлементных антенных решеток [2]. Соответствующие системы получили наименование Массивных систем связи с разнесенным приемом и передачей (Massive MIMO). Антенные решетки, используемые в MIMO, состоят из множества антенных элементов, имеющих слабую степень корреляции [3–5]. Излучатели расположены друг к другу под прямым углом, что позволяет добиться эффективного дублирования сигнала под разными углами [6–8, 17]. Технология MIMO успешно применяется в сетях четвертого поколения. В 5G сетях качество сигнала улучшается при приеме сигнала сразу несколькими антеннами за счет разнесенного

приема, скорость передачи данных возрастает практически пропорционально количеству антенн [2, 9–11]. 5G сети будут обеспечивать значительно большую пропускную способность каналов, что позволит удовлетворить бурно возрастающие запросы пользователей и обеспечить высокую эффективность потребляемой энергии [2, 11].

Методы формирования многолучевой диаграммы направленности в фазированных антенных решетках по формам реализации делятся на аналоговые и цифровые [3, 4, 12]. В аналоговых методах формирования многолучевой диаграммы применяются матричные схемы, линзы, структуры с волноводом в подложке и микро-электромеханические системы.

В настоящее время матрица Батлера, матрица Бласса и матрица Нолен получили широкое применение в формировании многолучевой диаграммы направленности антенных решеток в системах беспроводной радиосвязи [13, 14]. В матрице Батлера выполняется пространственное преобразование Фурье и обеспечивается $2n$ ортогональных лучей, эти лучи являются линейно независимыми комбинациями диаграмм направленности всех антенных излучателей. При излучении многих лучей схема приводит к неизбежным пересечениям. В матрице Бласса используются направленные ответвители и линии передачи, обеспечивающие сдвиги фаз для формирования многолучевой диаграммы антенной

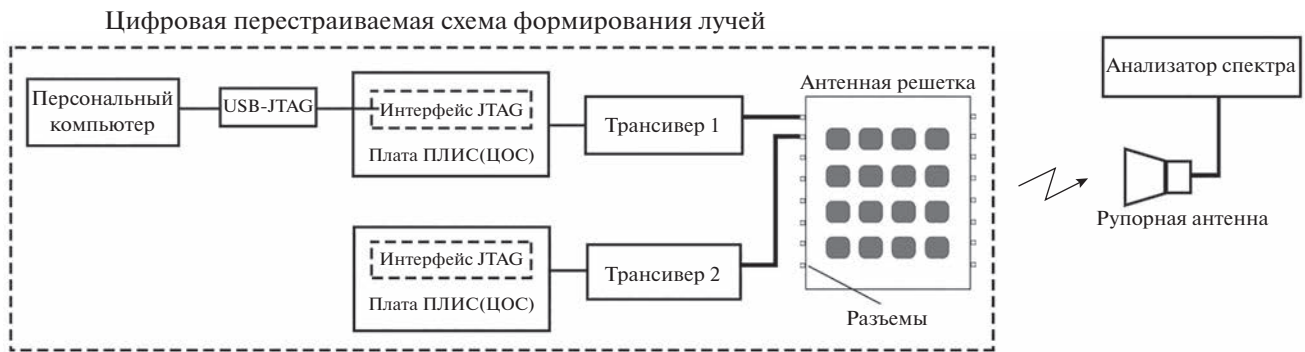


Рис. 1. Блок-схема цифрового формирования многолучевой диаграммы направленности и проведения измерений.

решетки. При возбуждении нескольких входных портов матрица Бласса может излучать несколько лучей одновременно. При излучении множества лучей данная схема требует большого количества линий соединения. Схема на основе матрицы Но-лена выполняет дискретное преобразование Фурье для выходных портов. Для формирования заданной диаграммы направленности вычисляются амплитуды и фазовые сдвиги входных сигналов. Линза может сформировать несколько лучей без использования аналоговых компонентов (ответвителей, переключателей и фазовращателей). Фазовые сдвиги (временные задержки) при прохождении радиоволн в линзе обеспечивают возможность формирования многолучевого излучения.

В последние годы интегрированные волноводы в подложке (SIW — Substrate Integrated Waveguide), Микроволновые монолитные интегральные схемы (MMIC — Monolithic Microwave Integrated Circuit) и Микро-электромеханические системы (MEMS — Micro-Electro-Mechanical System) часто используются в антенных решетках для реализации многолучевой диаграммы излучения. Цифровое образование диаграммы направленности антенны обеспечивает формирование множества независимо настраиваемых и динамически перенастраиваемых лучей; цифровая антенная решетка (ЦАР) представляет собой совокупность аналого-цифровых каналов с общим фазовым центром; в ЦАР формирование диаграммы направленности осуществляется в цифровой форме и без использования аналоговых фазовращателей [15, 16]. ЦАР позволяет контролировать и компенсировать паразитные изменения амплитуды и фазы сигналов на трассе распространения между приемопередатчиками, а также применять крупноапертурные антенные решетки при высоких градиентах изменения температуры по их раскрытию [15, 16]. В данной работе исследовалась микрополосковая форма реализации фазированной антенной решетки (ФАР) с цифровой схемой формирования лучей.

СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ ПЛОСКОЙ ФАР ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ

Для уменьшения взаимной электромагнитной связи между излучающими элементами ФАР и фидерами была использована структура, состоящая из семи слоев. На верхнем слое размещаются антенные элементы с расположением 4×4 , далее: диэлектрик-1 (Arlon AD255 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.55$ и толщиной 2.032 мм), земля (медь), связующий диэлектрик-2 (FR-4 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.34$ и толщиной 0.1 мм), земля (медь), диэлектрик-3 (Rogers 4003 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.55$ и толщиной 0.305 мм), фидерные линии (медь). Использовались элементы в виде прямоугольников размером 16×12.8 мм со скругленными краями. Данная форма и параметры элементов были выбраны посредством 3D электромагнитного моделирования с целью обеспечения широкой полосы частот от 6.8 до 7.4 ГГц. Все широкие стороны элементов в решетке располагались параллельно друг другу (рис. 1).

Расстояния между центрами элементов в горизонтальном и вертикальном направлениях были равны 20 мм. На нижнем слое фидерные линии размещены симметрично в левой и правой частях, ширина фидерной линии 0.58 мм обеспечила импеданс 50 Ом для согласования подводящих кабелей и элементов решетки. Фидерные линии возбуждают элементы через переходные отверстия.

ПРОГРАММНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ЦИФРОВАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

В работе представлена цифровая перестраиваемая схема вместо сложной аналоговой фидерной системы для формирования лучей. Программирование ПЛИС для формирования определенной диаграммы направленности осуществлялось по-

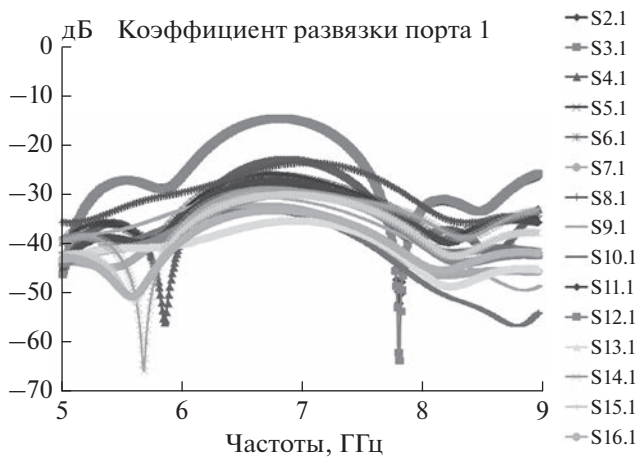


Рис. 2. Коэффициенты развязки (изоляции) первого порта антенной решетки.

средством загрузки разработанных микрокодов с ПК через JTAG-интерфейс. Цифровые сигналы поступали на 16 трансиверов, преобразовывались трансиверами на радиочастоту и через СВЧ-кабели подключались к элементам антенной решетки.

Были разработаны микрокоды на языке VHDL для платы с ПЛИС Xilinx XC7K325T-676FFG для возбуждения плоской ФАР. Разработанные микрокоды осуществляют формирование сигналов для элементов ФАР и обеспечивают интерфейс с трансиверами. Микрокоды позволяют формировать многолучевую диаграмму направленности цифровым способом. Для каждого элемента ФАР использовались ядра DDS (Direct Digital Frequency Synthesis) в ПЛИС. Каждое ядро формировало синусоидальный сигнал с фазой, определяемой необходимыми углами луча к нормали и номером элемента ФАР. Цифровая перестраиваемая схема формирования многолучевой диаграммы направленности экспериментальных измерений показана на рис. 1, в целях упрощения отображения на рис. 1 показаны только 2 трансивера и 2 платы ЦОС с ПЛИС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОМ ЦИФРОВОМ ФОРМИРОВАНИИ ЛУЧЕЙ

Вначале были определены коэффициенты развязки между портами антенной решетки. Поскольку формирование многолучевой диаграммы направленности осуществляется методом суперпозиции и весовые коэффициенты сигналов вычисляются в предположении идеальной развязки между элементами, значения коэффициентов изоляции менее 10 дБ приведут к деформации

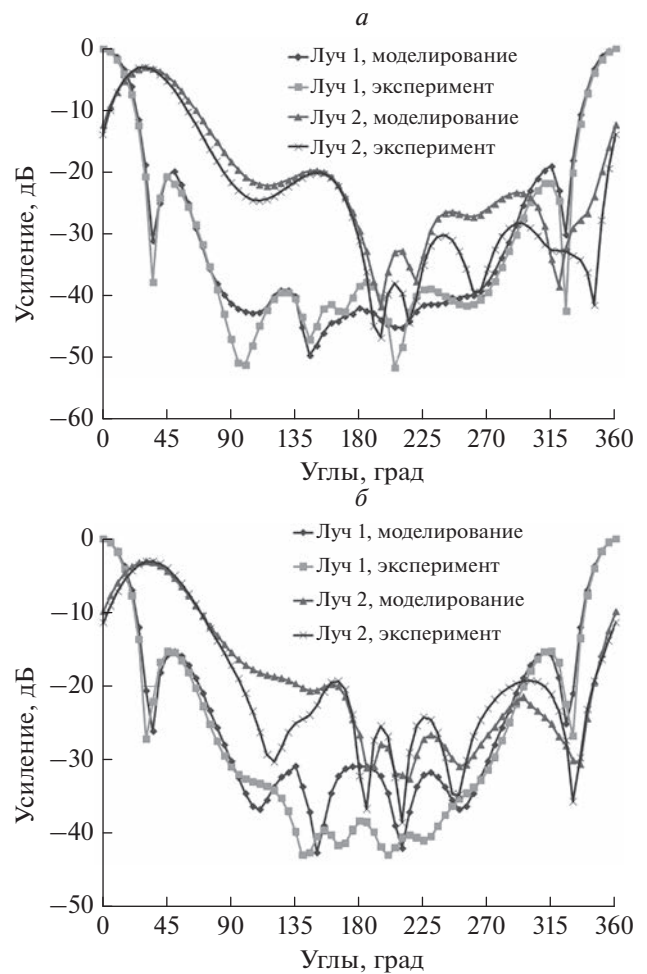


Рис. 3. Сформированная двухлучевая диаграмма направленности в горизонтальной плоскости (а). Сформированная двухлучевая диаграмма направленности в вертикальной плоскости (б).

диаграммы направленности, уменьшению КНД лучей и отклонению их направлений от расчетных [9, 19].

Экспериментальные измерения S-параметров разработанной антенной решетки проводились с помощью векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA-40 с 4 измерительными портами. При измерениях коэффициента развязки первый порт векторного анализатора подключался к первому порту антенной решетки, третий порт векторного анализатора подключался поочередно к каждому порту антенной решетки, другие свободные порты антенной решетки к согласованной нагрузке, полоса частот измерений 5.5–8.5 ГГц, результаты экспериментальных измерений коэффициентов развязки первого порта антенной решетки показаны на рис. 2. По аналогии были проведены экспериментальные измерения коэффициентов развязки других портов

Таблица 1. Сравнение результатов экспериментальных измерений и моделирования двухлучевой диаграммы направленности цифровой антенной решетки в горизонтальной плоскости

Луч 1		
Характеристики излучения	Эксперимент	Моделирование
Направление луча, град	0	0
Коэффициент усиления, дБи	16.8	17
Ширина основного лепестка по уровню -3 дБ, град	26	28
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	-20.7	-19
Луч 2		
Характеристики излучения	Эксперимент	Моделирование
Направление луча, град	30	30
Коэффициент усиления, дБи	13.8	14.2
Ширина основного лепестка по уровню -3 дБ, град	35	40
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	-17.1	-16.9

Таблица 2. Сравнение результатов экспериментальных измерений и моделирования двухлучевой диаграммы направленности цифровой антенной решетки в вертикальной плоскости

Луч 1		
Характеристики излучения	Эксперимент	Моделирование
Направление луча, град	0	0
Коэффициент усиления, дБи	16.8	17.1
Ширина основного лепестка по уровню -3 дБ, град	26	28
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	-15.3	-15
Луч 2		
Характеристики излучения	Эксперимент	Моделирование
Направление луча, град	30	30
Коэффициент усиления, дБи	13.5	14.2
Ширина основного лепестка по уровню -3 дБ, град	36	39
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	-15.9	-16.3

антенной решетки. Результаты измерений показали, что коэффициент развязки портов антенной решетки составляет не менее 15 дБ.

Экспериментальные измерения характеристик диаграммы излучения перестраиваемой многолучевой цифровой ФАР было проведено на стенде, состоящем из антенной решетки с 16 патчами, платы с ПЛИС, ЭВМ и разработанных трансиверов [7, 12]. Рупорная антенна и анализатор спектра Rohde&Schwarz FSVR40 использовались в качестве детектора мощности. Измерения проводились на открытом пространстве, антенная решетка и рупор размещались на расстоянии 6 м (более десяти длин волны), что можно считать дальней зоной излучения, частота измерения 7.15 ГГц. Схема проведения экспериментальных измерений диаграммы направленности показана на рис. 1.

Для формирования лучей использовалась суперпозиция групп сигналов возбуждения, каждая из

которых отвечала за формирование определенного луча. На рис. 3а показана диаграмма направленности для двух лучей в горизонтальной плоскости. На рис. 3б представлена диаграмма направленности для двух лучей в вертикальной плоскости.

Из рис. 3а видно, что в горизонтальной плоскости первый луч излучается в направлении нормали к плоскости антенной решетки, второй луч – в направлении 30° относительно нормали. Из рис. 3б видно, что в вертикальной плоскости первый луч излучается в направлении нормали к плоскости антенной решетки, второй луч – в направлении 30° относительно нормали. Результаты экспериментальных измерений двухлучевой диаграммы в горизонтальной и вертикальной плоскостях представлены в табл. 1 и 2 соответственно, из которых видно соответствие результатов моделирования и измерений в пределах 2 дБ по коэффици-

енту усиления, 5 дБ по уровню боковых лепестков, 6 градусов по ширине основного лепестка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программно-перестраиваемая схема формирования многолучевой диаграммы направленности позволяет обеспечить формирование заданной лучевой структуры в горизонтальной и вертикальной плоскостях цифровым методом. Схема обеспечивает преимущества относительно аналоговых решений ввиду гибкого управления лучевой структурой и возможности независимой передачи информации по каждому из лучей. Изоляция между портами антенной решетки составила более 15 дБ, что обеспечивает корректность формирования многолучевой диаграммы.

Экспериментально измеренный коэффициент направленного действия (КНД) разработанной программно-перестраиваемой ЦАР при двухлучевой диаграмме составил 16.8 и 13.8 дБ и для первого (в направлении нормали) и второго (в направлении 30°) лучей соответственно. Сопоставление результатов экспериментальных измерений и моделирования двухлучевой диаграммы направленности показало соответствие по значению КНД в пределах 2 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Osseiran A., Boccardi F., Braun V.* // Commun. Mag. 2014. V. 52. No. 5. P. 26.
2. *Кушназаров А.А.* // Сб. матер. всеросс. студ. форума "Инженерные кадры — будущее инновационной экономики России". Ч. 3. 2018. С. 88.
3. *Слюсар В.И.* // Первая миля. 2018. № 1. С. 72.
4. *Слюсар В.И.* // Первая миля. 2018. № 2. С. 74.
5. *Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б.* Технология ММО. Принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия — Телеком, 2014. 244 с.
6. *Muhannad Y. Muhsin, Ali J. Salim, Jawad K. Ali* // Prog. Electromagn. Res. C. 2022. V. 118. P. 247.
7. *Ting P.-H., Yu S.-H., Huang Z.-W. et al.* // Access. 2022. V. 10. P. 236.
8. *Chataut R., Akl R.* // Sensors. 2020. V. 20. No. 10. Art. No. 2753.
9. *Abdullah M., Altaf A., Anjum M.R. et al.* // Access. 2021. V. 9. P. 91593.
10. *Hussain R., Abou-Khousa M., Iqbal N. et al.* // Sensors. 2022. V. 22. No. 5. Art. No. 1808.
11. *You X., Wang C.-X., Huang J. et al.* // Sci. China Inf. Sci. 2021. V. 64. Art. No. 110301.
12. *Лу Гомин, Захаров П.Н., Королев А.Ф.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 1. С. 50; *Lu Guoming, Zakharov P.N., Korolev A.F.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 1. P. 40.
13. *Guo Y.J., Ansari M., Fonseca N.J.G.* // J. Microwaves. 2021. V. 1. No. 3. P. 704.
14. *Dimitrios I.L., Ntetsikas N., Paschaloudis K.D. et al.* // Electronics. 2020. V. 9. No. 8. Art. No. 1331.
15. *Гениатулин К.А., Носов В.И.* // Вестн. СибГУТИ. 2009. № 4. С. 11.
16. *Слюсар В.И.* // Первая миля. 2008. № 4. С. 10.
17. *Галкин В.А.* Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия — Телеком, 2012. 592 с.
18. *Bailey W.H., Cotts B.R.T., Dopart P.J.* // Access. 2020. V. 8. Art. No. 140792.
19. *Jiang W., Cui Y., Liu B. et al.* // Access. 2019. V. 7. P. 112554.

Phased antenna array with digital scheme formation multibeam radiation pattern

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

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Photonics and Microwave Physics, Moscow, 119991 Russia*

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

A digital synthesis of multibeam radiation pattern is implemented. The parameters and structure of the designed planar antenna array provided isolation between the ports of more than 15 dB. Measurements of the multibeam radiation pattern in the horizontal and vertical radiation planes were carried out.