

УДК 621.396.677

ТРАНСИВЕР ЦИФРОВОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

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

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Разработан трансивер для цифрового формирования многолучевой диаграммы направленности цифровой антенной решетки, состоящий из передатчика и приемника, интегрированных на единой печатной плате. Экспериментально измерены параметры трансивера и многолучевой диаграммы направленности фазированной антенной решетки с цифровой схемой.

DOI: 10.31857/S0367676522700119, EDN: JJGRDD

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы увеличивается интерес к цифровому формированию диаграммы направленности для пятого и будущих поколений (5G/6G) систем сотовой связи. Цифровое формирование лучей в системах с разнесенным приемом и передачей (MIMO) позволяет увеличить зону покрытия и емкость сети в системах сотовой связи 5G. По сравнению с аналоговой многолучевой антенной решеткой, цифровая схема формирования лучей обеспечивает более высокую энергетическую эффективность и гибкое формирование лучей [1]. В MIMO-системах связи при использовании предварительного кодирования осуществляется формирование нескольких лучей, передающих потоки данных в однопользовательском и многопользовательском режимах [2–5]. MIMO-системы с формированием лучей имеют повышенную устойчивость к помехам с направлений, не соответствующих сформированным лучам в диапазоне миллиметровых волн в 5G-системах связи [1]. В [6–8] рассмотрено использование аналоговых фазированных антенных решеток, реализованных по технологии интегральных схем в миллиметровой 5G-связи. Комбинированная аналогово-цифровая фазированная антенная решетка для формирования лучей предложена в [9, 10]. Использование линз для формирования и переключения лучей в 5G-системах связи описано в [11, 12].

В [1] описывается трансивер (приемопередатчик) для MIMO-системы с полным цифровым формированием многолучевой диаграммы для 5G-связи, в трансивере интегрированы 64 канала формирования лучей, компоненты фильтров и

соединений трансивера выполнены по технологии “волновод в подложке” (SIW, Substrate Integrated Waveguide); трансивер работает в режиме дуплекса с временным разделением (TDD), обеспечивает выходную мощность в линейном режиме не менее 12 дБм на канал и общую мощность передачи решетки до 30 дБм; трансивер с 64 каналами возбуждает антенную решетку с количеством элементов 16×4 и коэффициентом направленного действия 17.4 дБи; расположение 16 элементов в горизонтальном направлении и 4 элементов в вертикальном направлении обеспечивает более узкую азимутальную ширину диаграммы, что приводит к лучшему пространственному разделению абонентов. В [3] описан трансивер, изготовленный по стандартной 65 нм КМОП-технологии (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник); в трансивере использованы локальные генераторы с управляемыми фазовыми сдвигами, что позволяет достичь независимости фазы от амплитуды; для управления трансивером используется последовательный периферийный интерфейс (SPI); антенные элементы выполнены в формате патчей с коэффициентом направленного действия 3.9 дБи, антенная решетка имеет расположение элементов 16×1 и обеспечивает качание лучей в диапазоне углов от -30° до 30° относительно нормали. В [13] представлена двухлучевая система передачи/приема (трансивер) с рабочей полосой частот 28–32 ГГц в 5G-связи, трансивер возбуждает фазированную антенную решетку с количеством элементов 2×64 и двойной поляризацией волн излучения, решетка выполнена на SiGe-чипах с двойным лу-

чевым формирователем, 6 битами фазы и диапазоном регулировки коэффициента усиления до 25 дБ; чип выдает мощность 11–12 дБм на канал в режиме передачи и имеет коэффициент шума 4.8 дБ в режиме приема; на печатной плате 16 чипов возбуждает двухлучевую решетку с количеством элементов 2×64 , решетка выполнена с использованием технологии флип-чип, обеспечивает качание каждого луча в диапазоне $\pm 50^\circ$ по азимуту и $\pm 25^\circ$ по углу места. При излучении двух лучей в MIMO-системе скорость передачи данных достигала 9.6 Гбит/с в диапазоне качания лучей $\pm 50^\circ$ при использовании квадратурной амплитудной модуляции (QAM-64). В [14] в трансивере использован микроконтроллер и радиочастотная интегральная микросхема (RFIC) для управления формированием лучей. В [15] трансивер с фазированной антенной решеткой выполнен по технологии 65 нм КМОП в рабочем диапазоне частот 28 ГГц для 5G и следующих поколений связи, элемент решетки занимает площадь всего 0.48 мм^2 благодаря бисимметричной структуре. В [16] 16-канальный трансивер с фазированной антенной решеткой выполнен по 28 нм КМОП-технологии, предназначен для использования в MIMO-системе 5G-базовой станции связи; количество элементов фазированной антенной решеткой достигает 1024, при использовании решетки с количеством элементов 16×16 диапазон углов сканирования лучей составляет $\pm 60^\circ$, уровень боковых лепестков не превышает 10 дБ, ширина луча 6° . В [17] описан трансивер с гибридным (аналоговым и цифровым) методом формирования лучей в MIMO-системе, проведена оптимизация количества элементов и расстояний между ними, оценка влияния параметров на диаграмму излучения. В [18] описаны перспективные радиофотонный и оптические методы формирования диаграммы направленности в будущих поколениях беспроводной связи.

РАЗРАБОТКА ТРАНСИВЕРА

Трансивер состоит из передатчика и приемника. Передатчик выполняет функции перевода сигнала из цифровой в аналоговую форму, переноса сигнала на несущую частоту, усиления и фильтрации сигнала. Приемник реализует фильтрацию, усиление, перенос на нулевую частоту, аналогово-цифровое преобразование (АЦП). Основные компоненты трансивера: сдвоенные интегрированные ЦАП и АЦП, усилители низкой частоты, фильтры низких частот (ФНЧ), квадратурный модулятор и демодулятор (квадратурные смесители), фильтры высоких частот (ФВЧ), усилители радиочастоты, элементы питания.

Обработанный с учетом диаграммообразования и модуляции в ПЛИС (программируемой логической интегральной схеме) платы ЦОС (циф-

ровой обработки сигналов) цифровой сигнал поступает на вход передатчика трансивера через многоконтактный высокоскоростной разъем; 12-битные выборки сигнала подаются на ЦАП передатчика и проходят фильтры защиты от наложения спектров, усиливаются и поступают на квадратурный смеситель. В трансивере была использована микросхема ЦАП/АЦП AFE7225 с частотой дискретизации 125 МГц, что обеспечивает ширину полосы до 80 МГц на радиочастоте. С выхода ЦАП квадратурные модулирующие сигналы поступают на два идентичных операционных усилителя OPA695IDBV, затем проходят Чебышевские фильтры нижних частот девятого порядка для защиты от наложения спектров. ФНЧ на L–C компонентах обеспечил подавление не менее 50 дБ на частоте 50 МГц и неравномерность в полосе пропускания 1 дБ. С выходов ФНЧ сигналы поступают на квадратурный смеситель на GaAs с полосой частот 4–8 ГГц, подавлением зеркального канала до –40 дБ. Смеситель осуществляет перенос сигналов с нулевой частоты в рабочий диапазон частот фазированной антенной решетки (ФАР) 7.0–7.4 ГГц. Далее сигнал поступает на усилитель радиочастоты (РЧ) на микросхеме NBB-400 с усилением порядка 12 дБ. Усиленный сигнал поступает на усилитель мощности GVA-82+, обеспечивающий максимальную выходную мощность до +20 дБм. На выходе передатчика формируется сигнал возбуждения элемента фазированной антенной решетки, что обеспечивает формирование диаграммы направленности излучения. В приемнике (приемном тракте трансивера) осуществляются преобразования, обратные выполненным в передатчике. На рис. 1 представлена схема приемопередатчика (трансивера).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТРАНСИВЕРА И ИЗЛУЧЕНИЯ ФАР

Экспериментальные измерения характеристик разработанного трансивера было проведено в комплексе, состоящем из анализатора спектра Rohde & Schwarz FSVR40 и ЭВМ с telnet-клиентом, осуществляющим удаленное управление приборами и проведение измерений.

Радиочастотный выход трансивера подключался ко входу анализатора спектра Rohde & Schwarz FSVR40; с командной строки через telnet-клиент задавалась выходная частота трансивера 2 ГГц, выходная мощность 20 дБм. Анализатором спектра с помощью маркера измерялась центральная частота спектра сигнала и выходная мощность. Далее аналогичные измерения проводились для верхней граничной частоты 8.5 ГГц, а также контролировалась мощность на промежуточных частотах. В результате измерений установлено, что передатчик обеспечивает рабочий диапазон частот от 2 до 8.5 ГГц по уровню –3 дБ

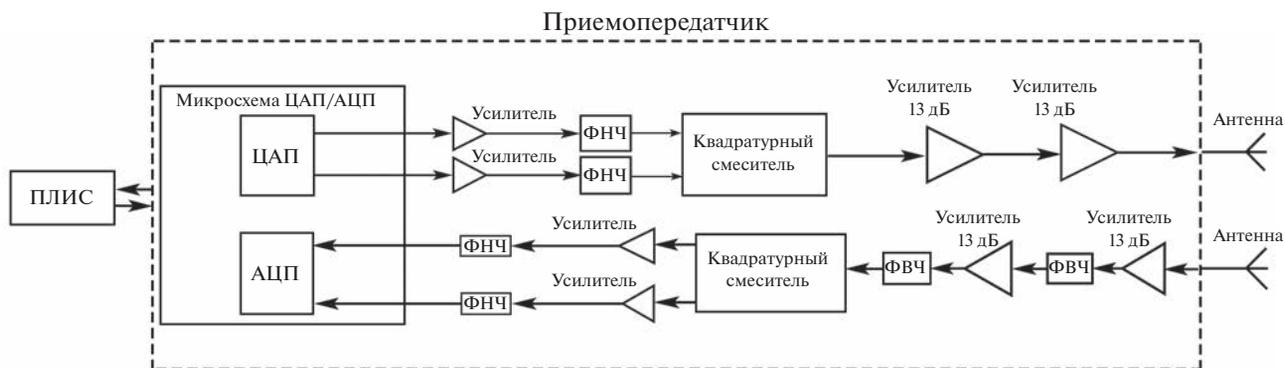


Рис. 1. Блок-схема приемопередатчика.

при выходной мощности не менее +20 дБм. При экспериментальных измерениях ширины полосы радиочастотный выход трансивера подключался ко входу анализатора спектра FSVR40; с командной строки через telnet-клиент задавалась выходная частота трансивера 4 ГГц, выходная мощность 20 дБм. Анализатором спектра с помощью двух маркеров измерялась ширина полосы спектра сигнала по уровню -3 дБ. Полученное значение составило 77 МГц.

Экспериментальное измерение диаграммы направленности цифровой антенной решетки (ЦАР), построенной на трансиверах, проведено на стенде [3], [19], состоящем из ЭВМ, анализатора спектра, приемной антенны, платы с ПЛИС, антенной решетки с топологией 4 × 4 и трансиверов. На рис. 2 представлена полученная диаграмма направленности ЦАР, излучающей три луча в горизонтальной плоскости. На рис. 3 представле-

на измеренная диаграмма направленности ЦАР, излучающей три луча в вертикальной плоскости. Результаты экспериментальных измерений представлены в табл. 1 и 2.

Из рис. 2 видно, что в горизонтальной плоскости при излучении трех лучей коэффициент направленного действия составил 13.1–16.8 дБи, качание лучей осуществлялось в диапазоне углов от -45° до 45° относительно нормали. Из рис. 3 видно, что в вертикальной плоскости при излучении трех лучей коэффициент направленного действия составил 12.3–16.8 дБи, качание лучей осуществлялось в диапазоне углов от -45° до 45° относительно нормали. В горизонтальной и вертикальной плоскостях характеристики излучения лучей в направлениях 45° и 315° симметричны относительно нормали; чем больше угол излучения луча, тем больше боковой лепесток. Различия ширины основного лепестка лучей по уровню -3 дБ в

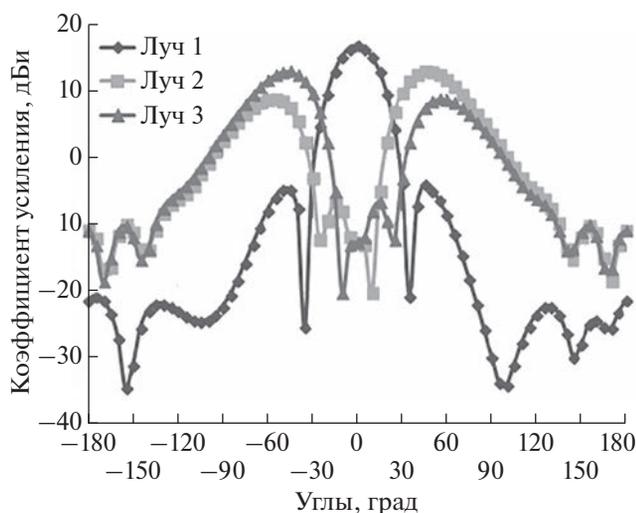


Рис. 2. Диаграмма направленности цифровой антенной решетки, излучающей три луча в горизонтальной плоскости.

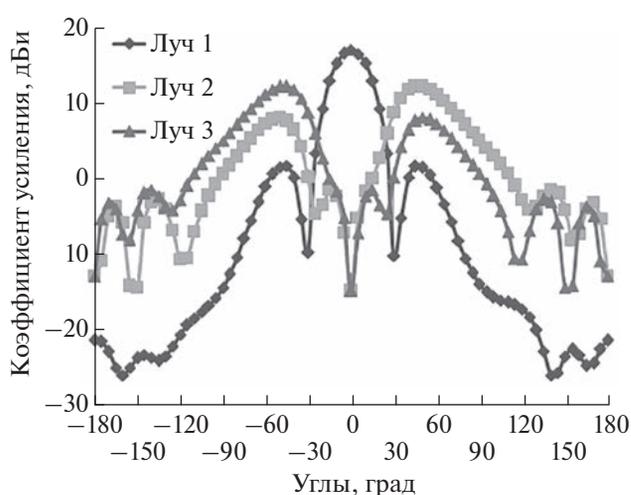


Рис. 3. Диаграмма направленности цифровой антенной решетки, излучающей три луча в вертикальной плоскости.

Таблица 1. Результаты экспериментальных измерений многолучевой диаграммы в горизонтальной плоскости

Луч 1	
Характеристики излучения	Результаты экспериментальных измерений
Направление излучения луча, град	0
Коэффициент направленного действия, дБи	16.8
Ширина основного лепестка по уровню –3 дБ, град	26
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	–20.7
Луч 2	
Характеристики излучения	Результаты экспериментальных измерений
Направление излучения луча, град	45
Коэффициент направленного действия, дБи	13.1
Ширина основного лепестка по уровню –3 дБ, град	37
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	–4.2
Луч 3	
Характеристики излучения	Результаты экспериментальных измерений
Направление излучения луча, град	315
Коэффициент направленного действия, дБи	13.1
Ширина основного лепестка по уровню –3 дБ, град	36
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	–4.4

Таблица 2. Результаты экспериментальных измерений многолучевой диаграммы направленности в вертикальной плоскости

Луч 1	
Характеристики излучения	Результаты экспериментальных измерений
Направление излучения луча, град	0
Коэффициент направленного действия, дБи	16.8
Ширина основного лепестка по уровню –3 дБ, град	26
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	–15.3
Луч 2	
Характеристики излучения	Результаты экспериментальных измерений
Направление излучения луча, град	45
Коэффициент направленного действия, дБи	12.3
Ширина основного лепестка по уровню –3 дБ, град	39
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	–4.2
Луч 3	
Характеристики излучения	Результаты экспериментальных измерений
Направление излучения луча, град	315
Коэффициент направленного действия, дБи	12.3
Ширина основного лепестка по уровню –3 дБ, град	39
Уровень максимального бокового лепестка, дБ	–4.5

горизонтальной и вертикальной плоскостях не превышает 3 градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный трансивер обеспечил формирование сигнала в диапазоне рабочих частот от 2 до 8.5 ГГц для возбуждения элементов ФАР. Сигнал позволяет сформировать многолучевую диаграмму направленности, а также использовать различные виды модуляции лучей. Цифровая схема обеспечивает формирование нескольких лучей в пространстве с независимым управлением направлением каждого из них. Трансивер изготовлен на единой печатной плате и совместим с разработанной многолучевой фазированной антенной решеткой. Цифровая схема формирования лучей позволяет формировать многолучевую диаграмму излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Binqi Yang, Zhiqiang Yu, Ji Lan et al.* // IEEE Transact. Microwave Theory Technique. 2018. V. 66. No. 7. P. 3403.
2. *Shu Sun, Rappaport T.S., Heath R.W. et al.* // IEEE Commun. Magazine. 2014. V. 52. No. 12. P. 110.
3. *Yun Wang, Rui Wu, Jian Pang et al.* // IEEE J. Solid-State Circuits. 2020. V. 55. No. 5. P. 1249.
4. *Biao Long, Dake Liu, Yipeng Sun* // Sensors. 2022. V. 22. No. 3. Art. No. 753.
5. *Tong Wu, Zixiong Wang, Shiyang Han et al.* // Photonics. 2022. V. 9. No. 3. Art. No. 168.
6. *Bodhisatwa Sadhu, Yahya Tousei, Joakim Hallin et al.* // Digest Tech. Papers. IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2017. P. 128.
7. *Kibaroglu K., Sayginer M., Rebeiz G.M.* // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS), 2017. P. 1892.
8. *Garg R., Natarajan A.S.* // IEEE Transact. Microwave Theory Techniques. 2017. V. 65. No. 11. P. 4703.
9. *Wonil Roh, Ji-Yun Seol, Jeongho Park et al.* // IEEE Commun. Magazine. 2014. V. 52. No. 2. P. 106.
10. *Yungsoo Kim, Hyun-Yong Lee, Jongho Oh et al.* // IEEE J. Select. Top. Signal Process. 2016. V. 10. No. 3. P. 589.
11. *Juha Ala-Laurinaho, Jouko Aurinsalo, Aki Karttunen et al.* // IEEE Trans. Microwave Theory Techniques. 2016. V. 64. No. 7. P. 2244.
12. *Brady J., Hogan J., Sayeed A.* // IEEE Globecom Workshops, 2016. P. 1.
13. *Nafe A., Sayginer M., Kibaroglu K. et al.* // IEEE Transact. Microwave Theory Techniques. 2020. V. 68. No. 9. P. 3872.
14. *Jungwoo Kim, Jae Min Kim, Sangwook Han et al.* // IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp. (RFIC). 2020. P. 203.
15. *Okada K.* // IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM), 2020. P. 753.
16. *Park H.-C., Kang D., Lee J. et al.* // IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM), 2020. P. 355.
17. *Kavya K., Murty V.S.S.C.S., Sujanth Narayan K.G. et al.* // Sixth Int. Conf. Wireless Commun. Signal Process. Network. (WiSPNET), 2021. P. 143.
18. *Kanta K., Toumasis P., Tokas K. et al.* // Appl. Sci. 2022. V. 12. No. 4. Art. No. 2122.
19. *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.

Digital phased antenna array transceiver with multibeam radiation pattern

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

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Photonics and Microwave Physics, Moscow, 119991 Russia

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

A transceiver has been designed for the digital generation of a multibeam radiation pattern in this work. The transceiver consists of a transmitter and receiver, both are integrated on a single printed circuit board. The transceiver provides the formation of multiple beams in the far field of the radiation zone. The experimental measurement of the multibeam radiation pattern of a phased antenna array with a digital pattern synthesis was carried out.