

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.9>

УДК: 621.396.677.31

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОФОТОННЫХ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИХ СХЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В МИКРОВОЛНОВОЙ САПР AWR DE

В.В. Головин¹, Ю.Н. Тыщук², М.Е. Белкин³, М.О. Ткаченко⁴

^{1,2,4}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
³Московский технологический университет (МИРЭА),
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 07 июля 2022 г.

Аннотация. В статье представлены разработанные в специализированной микроволновой САПР AWR DE две модели радиотонных диаграммообразующих устройств фазированных антенных решеток, реализованные на основе электрических эквивалентных моделей оптических модулей (электрооптического модулятора, линий задержки на брегговских решетках и др.), в которых формирование требуемых амплитудно-фазовых распределений поля в апертуре решетки реализуется на основе оптических линий задержки. Выполнено сквозное нелинейное имитационное моделирование диаграммообразующих устройств, при котором в моделях одновременно анализируются сигналы в микроволновом и оптическом диапазонах. Определены амплитудно-фазовые распределения сигналов на антенных портах, рассчитаны диаграммы направленности линейных эквидистантных фазированных антенных решеток изотропных излучателей. Показано, что вторая схема радиотонного диаграммообразующего устройства отличается лучшими тактико-техническими характеристиками. Для этой схемы также выполнены расчеты диаграмм направленности для случая антенной решетки, состоящей из

четырёхэлементных кластеров широкополосных печатных излучателей с переключаемой поляризацией излучения.

Ключевые слова: радиофотоника, фазированная антенная решетка, линия задержки, диаграммообразующее устройство, 5G NR.

Автор для переписки: Тыщук Юрий Николаевич, y.tyschuk@gmail.com

Введение

Сеть беспроводной связи следующего поколения (5G NR) обещает обеспечить беспрецедентные объемы данных и услуг для мобильных и фиксированных пользователей, представляя собой как эволюцию, так и революцию мобильных технологий [1]. Растущий спрос на широкополосные услуги и передачу более высоких скоростей передачи данных привели к рассмотрению беспроводных линий связи, работающих на более высоких несущих частотах и выходящих далеко в микроволновый диапазон, где общая пропускная способность одной ячейки может приближаться к нескольким гигабитам в секунду. Развитие технологий 5G позволит решить ряд перспективных задач: свертывание зон обслуживания и пользователей (предложено решение на основе архитектура фемтосотовой волоконно-оптической структуры (radio-over-fiber, RoF)) [2], использование спектра миллиметровых волн [3] (ММВ, в том числе в полосе частот 57—76 ГГц), экстремальное наращивание трафика. В связи с этим на передний план выходит проектирование аналоговых модулей базовых станций 5G с применением радиофотонных технологий.

Как показано в большом количестве исследований [3,4], инфраструктура беспроводной сети ММВ 5G должна быть построена с большим количеством небольших сот, контролируемых соответствующими базовыми станциями (БС). Чтобы избежать взаимных помех в этих сотах, одним из перспективных подходов является оснащение БС фазированной антенной решеткой (ФАР) со сканированием несколькими лучами. Согласно оценкам, ММВ БС будет использовать ФАР с сотнями антенных элементов для формирования

направленных лучей для передачи и приема аналогичных лучей от соседних БС и центральных станций (ЦС).

При разработке широкополосных ФАР БС в ММВ необходимо учесть следующие факторы.

Применение ФАР с диаграммобразующими устройствами (ДОУ) на основе линий задержки (ЛЗ) обеспечивает наиболее эффективное выполнение требований к характеристикам антенных систем БС.

Технологии радиофотоники открывают путь к сверхширокополосным характеристикам передачи при меньших размерах, весе и мощности по сравнению с традиционным электронным подходом [5].

Радиофотонная ДОУ на основе ЛЗ должна иметь достаточную полосу пропускания и диапазон временных задержек и обеспечивать допустимое полное время перекоммутации и уровень перекрестных помех, при этом перестройка луча может быть как дискретная, так и непрерывная.

В процессе проектирования разработчик новых СВЧ-аппаратов и их систем на основе радиофотоники сталкивается с проблемой выбора соответствующего программного обеспечения. Современные мощные микроволновые САПР решают эту задачу достаточно просто и с высокой точностью, но в их библиотеках отсутствуют модели конкретных активных и пассивных компонентов фотоники. Для решения этой проблемы предложен и экспериментально подтвержден новый подход к моделированию широкого класса перспективных аналоговых СВЧ-радиоэлектронных систем на основе технологии СВЧ-фотоники. На их основе были предложены и проверены модели электрических эквивалентных схем для различных типов полупроводниковых лазеров, фотоприемников, оптических модуляторов [6] и др. С использованием этих компонентов был предложен и первоначально исследован простой вариант ДОУ ФАР с использованием программного обеспечения NI AWRDE [7]. В статье приведены результаты моделирования схем радиофотонных ДОУ, включающих набор переключаемых оптических линий задержки в двух модификациях.

Основная часть

Существует достаточно много решений для реализации радиопотонных ДОУ на ЛЗ, в которых временная задержка реализуется на модификациях брегговских решеток, на дисперсионной волоконной призме, на волокне с компенсацией дисперсии, на голографических решетках, интегрированных кольцевых резонаторах [8-12]. ДОУ на основе радиопотонных ЛЗ обеспечивают задержки от десятков пикосекунд до единиц наносекунд в полосе пропускания до десятков ГГц.

На рис. 1 показана первая схема радиопотонной ДОУ для 16-элементной ФАР на основе переключаемых оптических линий задержки.

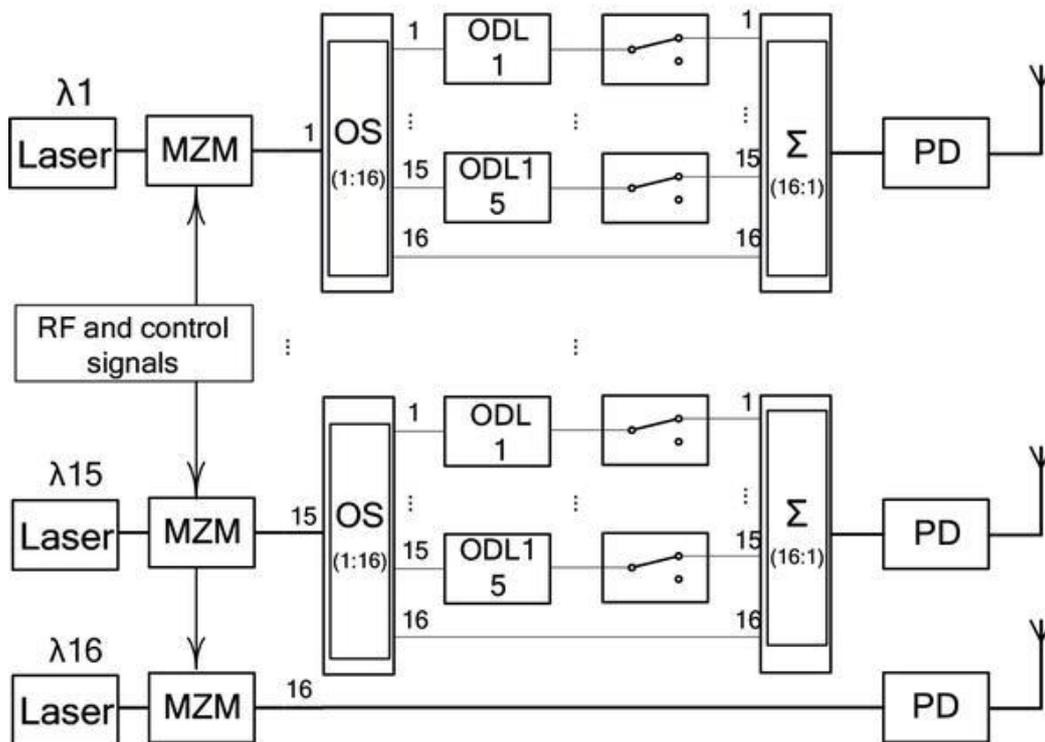


Рис. 1. Структурная схема радиопотонной ДОУ для 16-элементной ФАР на основе 5-битных переключаемых оптических линий задержки

В этой схеме используются 16 немодулированных настраиваемых лазеров с различными длинами волн λ_1 – λ_{16} . Каждый оптический канал модулируется с помощью модулятора Маха-Цандера (MZM) одним и тем же радиочастотным сигналом и разделяется на 16 каналов оптическим разветвителем (OS), затем задерживается в переключаемых оптических линиях задержки (ODL), стоящих в

каждом канале. Задерживаемые оптические сигналы детектируются с помощью фотодетекторов (PD) и подаются на антенные элементы.

Важным недостатком данной схемы является необходимость использования большого количества лазеров и модуляторов (16 лазеров и столько же MZM для 16-элементной решетки), что делает ее нецелесообразной из-за громоздкости и большого энергопотребления даже для такой малоэлементной ФАР. Кроме того, каждая ODL должна обеспечивать общую задержку не менее 71 пс и разрядность не менее 5 бит. То есть, даже при реализации этой ДОУ в интегрированном варианте с использованием материала с наименьшими оптическими потерями [13], разница потерь на минимальном и максимальном шаге ODL составляет более 30 раз, что приводит к недопустимым искажениям диаграммы направленности.

Для преодоления вышеуказанных проблем предлагается показанная на рис. 2 усовершенствованная схема радиофотонной ДОУ.

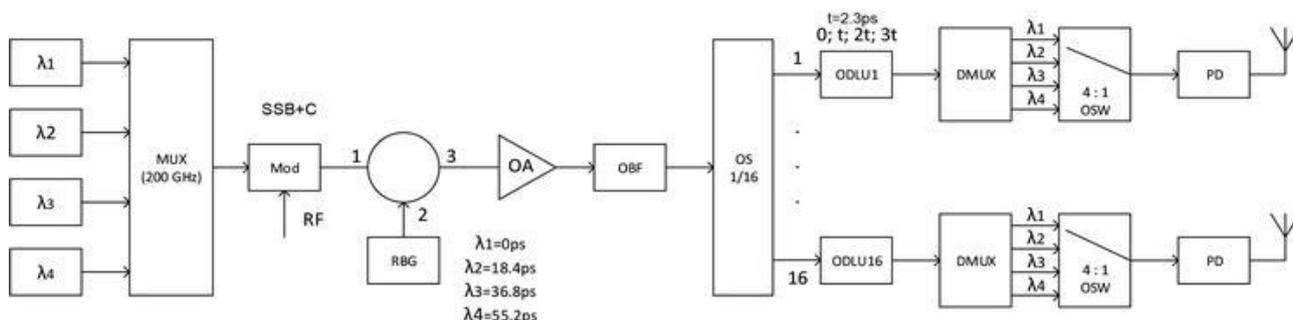


Рис. 2. 16-канальная радиофотонная ДОУ, построенной на основе многоканальной RBG и переключаемых ODL

В схеме используются четыре немодулированных настраиваемых лазерных излучателя с различными длинами волн λ_1 - λ_4 с шагом 200 ГГц в соответствии с ITU WDM. Лазерные излучения суммируются в спектральном мультиплексе (MUX), модулируются в общем MZM радиочастотным сигналом и через оптический циркулятор поступают на четырехканальную отражающую брэгговскую решетку (RBG). Уровни соответствующих задержанных сигналов восстанавливаются оптическим усилителем (OA) с оптическим полосовым фильтром-эквалайзером (OBF), после чего разделяются OS на 16 каналов. В каждом канале стоят:

- 3-битные ODL, задерживающие еще раз оптические сигналы на 2,3 , 4,6 и 9,2 пс;
- спектральные демультиплексоры (DMUX);
- оптические переключатели 1 × 4 (OSW);
- PD и антенного элемента ФАР.

Схема 3-битной двоичной линии задержки показана на рис. 3.

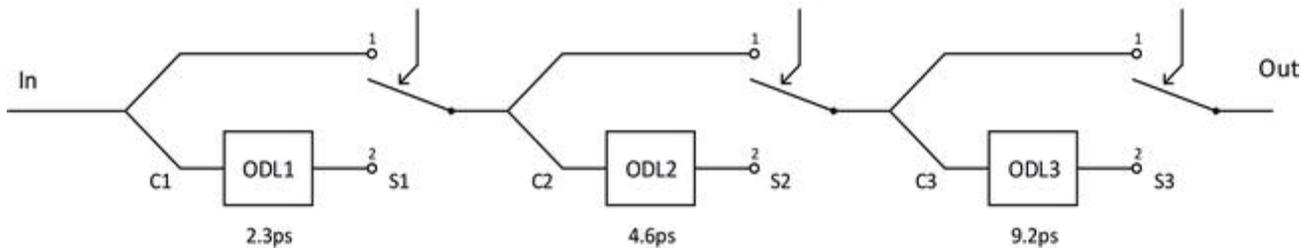


Рис. 3. Структурная схема 3-битной двоичной линии задержки

На рис. 4 и 5 показаны модели рассмотренных выше схем ДОУ, разработанные с использованием СВЧ САПР NI AWRDE.

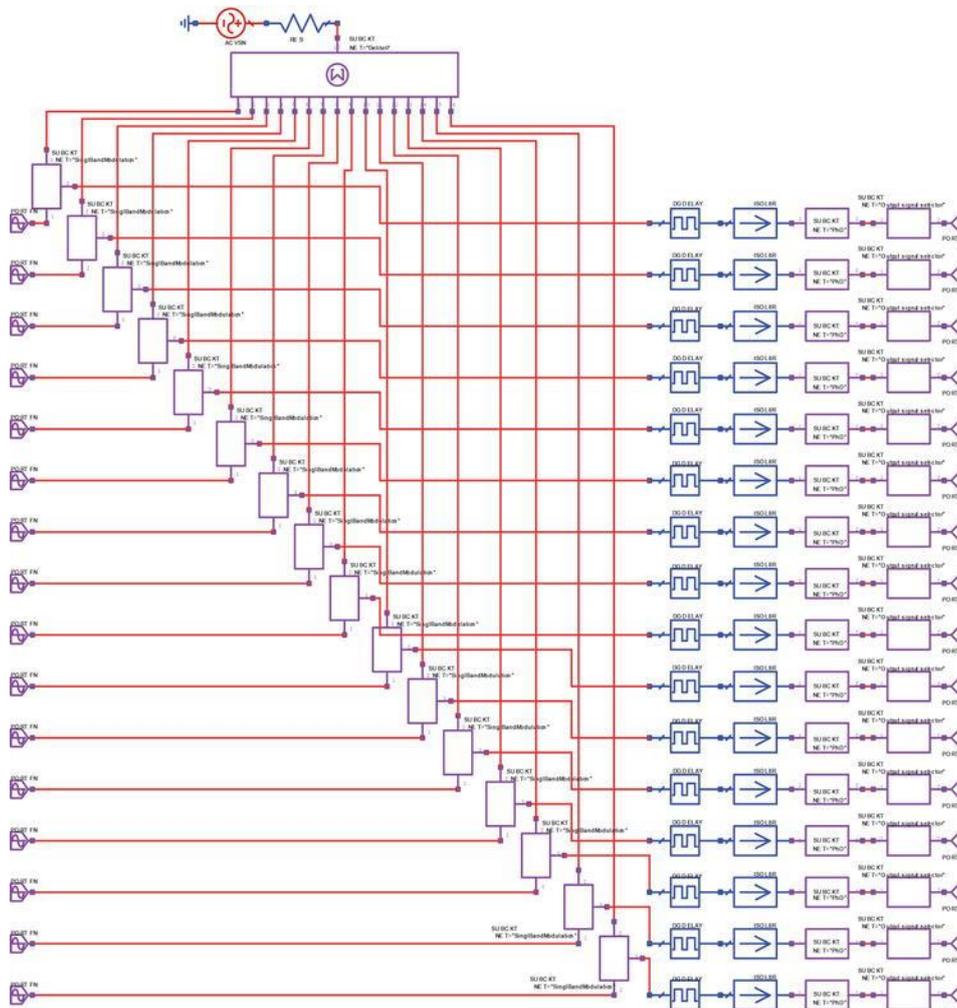


Рис. 4. Модель первой схемы радиопотонной ДОУ в САПР AWRDE

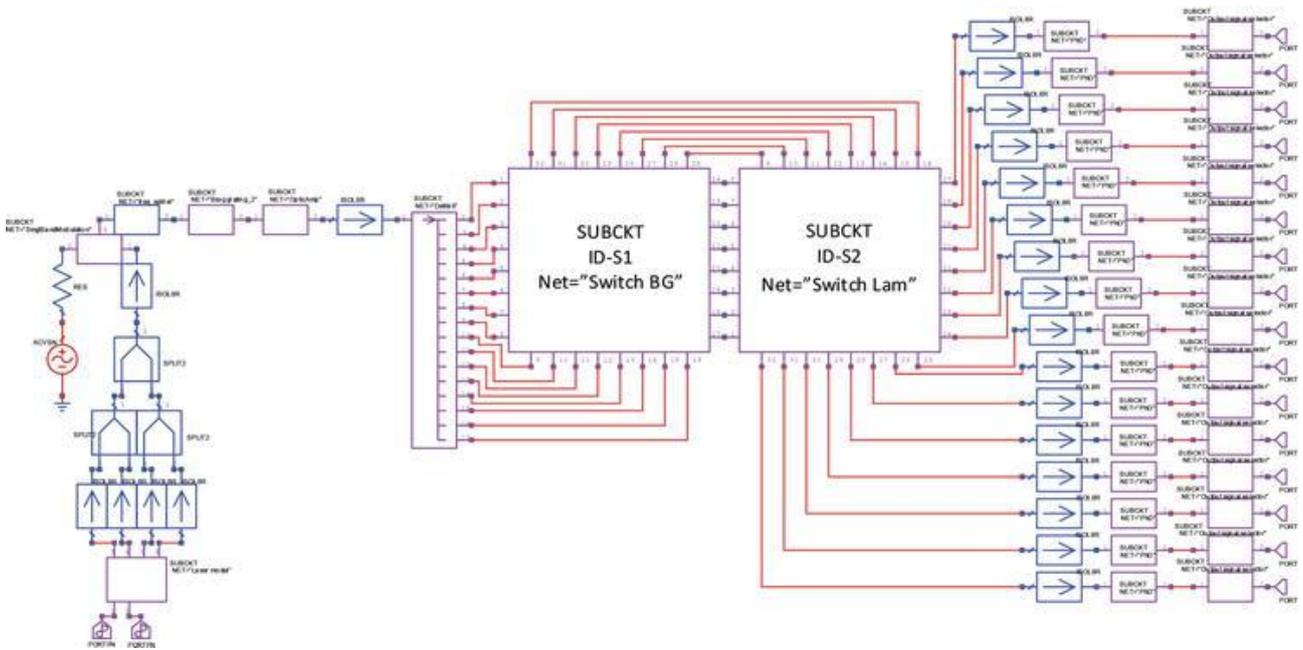


Рис. 5. Модель второй схемы радиофотонной ДОУ в САПР AWRDE

Схема на рис. 5 содержит два блока: 3-битную оптическую линию задержки и четырехканальный отраженный модуль брэгговской решетки. Эти блоки могут быть реализованы в интегральном виде.

Эквивалентная модель 3-битной оптической линии задержки показана на рис. 6. Эквивалентная модель четырехканального отраженного модуля брэгговской решетки в NI AWRDE была предложена и подробно изучена в работе [14] (рис. 7).

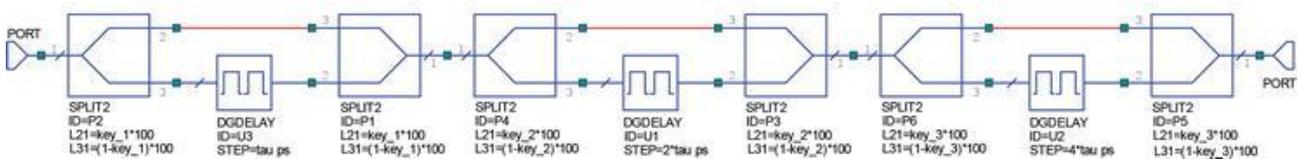


Рис. 6. Модель 3-битной оптической линии задержки в САПР AWRDE

С помощью разработанных моделей выполнены расчёты характеристик двух приведённых схем ДОУ. В результате были получены 16 СВЧ сигналов, подаваемых на антенные элементы.

Для случая линейной решётки изотропных излучателей с учётом сформированных СВЧ сигналов рассчитаны диаграммы направленности на частотах 57 ГГц, 66,5 ГГц и 76 ГГц. Важно отметить, что результаты расчёта фазовых распределений СВЧ сигналов на выходах схем полностью совпадают.

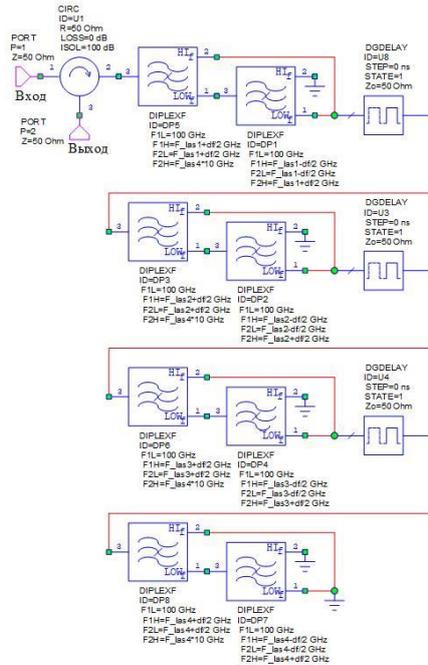


Рис. 7. Эквивалентная модель четырехканального отраженного модуля брэгговской решетки в NI AWRDE

На рис. 8 приведены результаты расчета нормированных диаграмм направленности ФАР для углов отклонения луча 45° (а) и 30° (б).

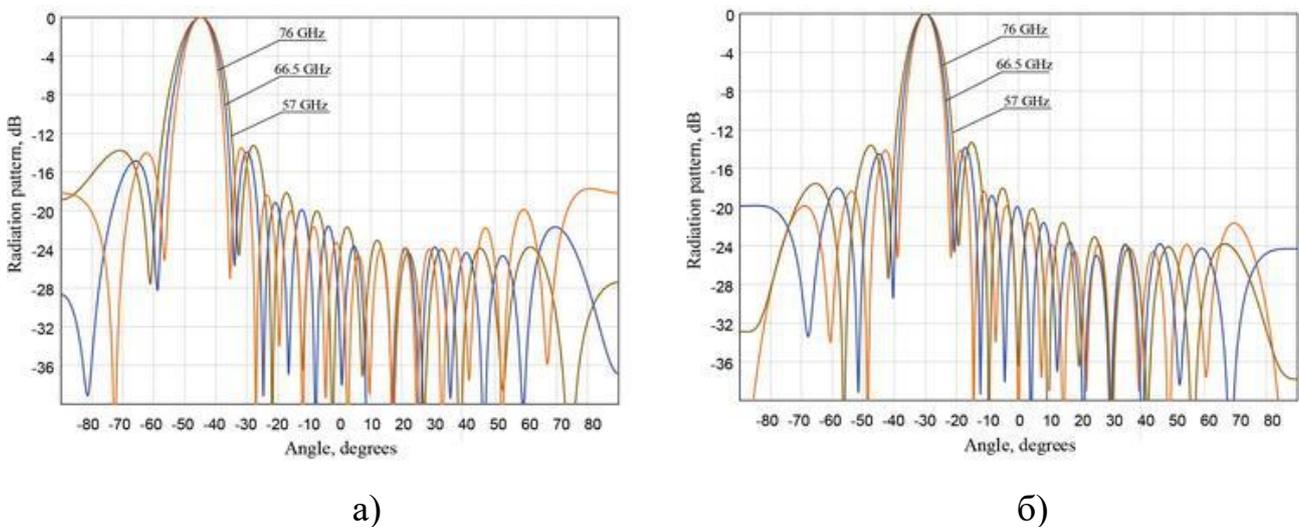


Рис. 8. Нормированные диаграммы направленности ФАР для углов отклонения луча 45° (а) и 30° (б)

На рис. 9 показана электродинамическая модель полотна излучателей ФАР, выполненного в виде массива четырехэлементных кластеров широкополосных печатных излучателей диапазона частот 57 — 76 ГГц. Кластер позволяет сформировать поле излучения с возможностью переключения между

ортогональными линейными поляризациями или двумя встречными круговыми поляризациями [15].

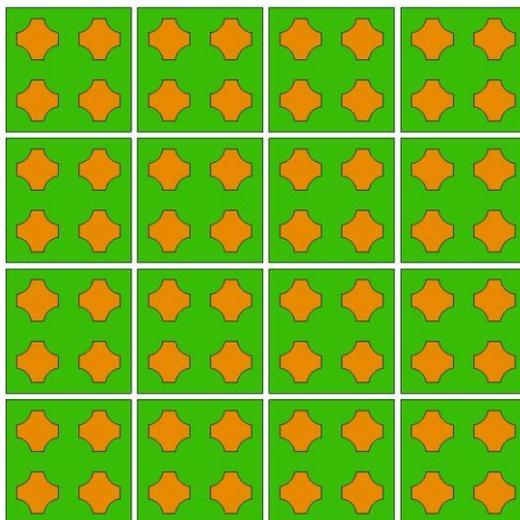


Рис. 9. Электродинамическая модель полотна излучателей ФАР

На каждый из 16 входов ФАР подаются сигналы с выходов разработанной второй схемы ДОС. На рис. 10 показаны результаты моделирования диаграмм направленности ФАР печатных излучателей на частоте 76 ГГц.

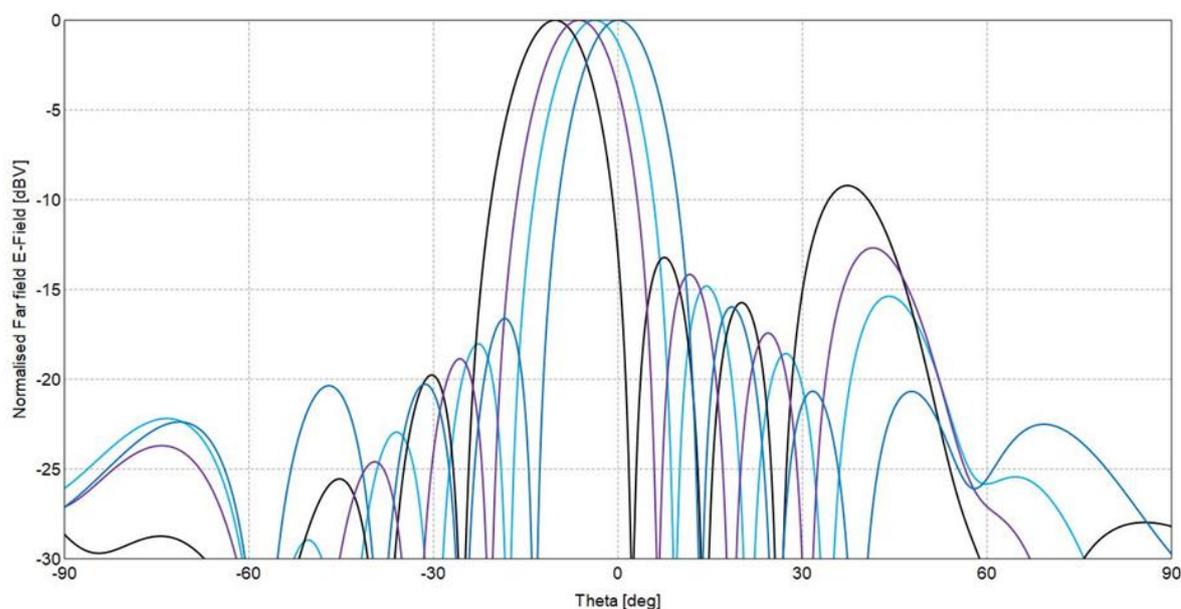


Рис. 10. Диаграммы направленности ФАР печатных излучателей на частоте 76 ГГц при линейной поляризации излучения

Заключение

Рассмотрены особенности техники микроволновой радиофотоники в беспроводных сетях 5G с архитектурой radio-over-fiber. Представлен краткий анализ развития радиофотонных диаграммобразующих устройств фазированных антенных решеток, изготовленных на оптических волокнах, брэгговских решетках или интегральных схемах фотоники. Разработаны модели и выполнено моделирование двух вариантов радиофотонных диаграммобразующих устройств на основе известной схемы, включающей набор оптических линий задержки, и новой конструктивно и экономически эффективной конфигурации с использованием методов мультиплексирования с разделением длин волн и линий задержки. Показаны преимущества предлагаемой схемы с точки зрения простоты, ключевых показателей качества, размеров, веса и мощности.

Литература

1. Chen S., Zhao J. The requirements, challenges and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE Communications Magazine*. 2014. V.52(5). P.36-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815891>
2. Novak D., Waterhouse R. Emerging disruptive wireless technologies – Prospects and challenges for integration with optical networks. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC)*. 2013. P.3. <http://dx.doi.org/10.1364/OFC.2013.OTu3E.2>
3. Alavi S.E., Soltanian R., et al. Towards 5G: A photonic based millimeter wave signal generation for applying in 5G access fronthaul. *Scientific Reports*. 2016. V.6(1). P.11. <http://dx.doi.org/10.1038/srep19891>
4. Browne J. What role will millimeter waves play in 5G wireless systems? [WEB] *Microwaves & RF*. 2018. Date of access: 01.06.2022. URL: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849083/what-role-will-millimeter-waves-play-in-5g-wireless-systems>

5. Paoletta A.C., De Salvo R., Middleton C., Logan C. Direction in radio frequency photonic systems. *Proceedings of the IEEE 16th Wireless and Microwave Technology Conference WAMICON 2015*. Cocoa Beach. USA. 2015. P.6. <http://dx.doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120359>
6. Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y., Vasil'ev M., Sigov A.S. *Computer-aided design of microwave-photonicsbased RF circuits and systems*. United Kingdom, IntechOpen Publishing. 2018. 20 p. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78945>
7. Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y., Sigov A.S. Comparison of RF photonicsbased beamformers for super-wide bandwidth phased array antennas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V.198. P.4. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/198/1/012010>
8. Shahoei H., Li M., Yao J.P. Continuously tunable time delay using an optically pumped linearly chirped fiber Bragg grating. *Journal of Lightwave Technology*. 2011. V.29(10). P.1465-1472. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2011.2132754>
9. Vidal B., Mengual T., Marti J. Fast optical beamforming architectures for satellite-based applications. *Advances in Optical Technologies*. 2012. V.5. P.5. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/385409>
10. Shi N., et al. Experimental demonstration of a multi-target detection technique using an X-band optically steered phased array radar. *Optics Express*. 2016. V.24(13). P.14438-14450. <https://doi.org/10.1364/oe.24.014438>
11. Yihong C., Chen R.T. A fully packaged true time delay module for a K-band phased array antenna system demonstration. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2002. V.14(8). P.1175-1177. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2002.1022009>
12. Zhuang L., et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas— Part II: Experimental prototype. *Journal of Lightwave Technology*. 2010. V.28(1). P.19-31. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2009.2032137>
13. Zhuang L., et al. Low-loss, high-index-contrast Si₃N₄/SiO₂ optical waveguides for optical delay lines in microwave photonics signal processing. *Optics Express*. 2012. V.19(23). P.23162-23170. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.02316214>

14. Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y., Sigov A.S. A simulation technique for designing next-generation information and communication systems based on off-the-shelf microwave electronics computer tool. *International Journal of Simulation and Process Modelling*. 2018. V.13(3). P 238-254.
<http://dx.doi.org/10.1504/IJSPM.2018.093104>
15. Afonin I.L., Golovin V.V., Tyschuk Y.N. Antenna array of patch radiators with controlled polarization. Proceedings of Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves Conference (RSEMW). 2017. Divnomorskoe. Russia. P.55-57.
<http://dx.doi.org/10.1504/IJSPM.2018.093104>

Для цитирования:

Головин В.В., Тыщук Ю.Н., Белкин М.Е., Ткаченко М.О. Проектирование радиофотонных диаграммообразующих схем фазированных антенных решеток в микроволновой САПР AWR DE. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.9>