

Двухполяризационная антенная решетка X-диапазона со спадающим к краям распределением поля

© С.В. Балландович, Г.А. Костиков, Л.М. Любина, Ю.Г. Антонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lmyubina@etu.ru

Поступило в Редакцию 4 июня 2025 г.

В окончательной редакции 28 июня 2025 г.

Принято к публикации 29 июня 2025 г.

Представлены результаты исследования двухполяризационной антенной решетки X-диапазона. Особенностью конструкции является использование фрезерованного основания, позволяющего снизить взаимное влияние между микрополосковыми линиями диаграммообразующей схемы и тем самым добиться требуемого спадающего к краям амплитудного распределения в раскрыве. Экспериментальные исследования макета синфазной двухполяризационной антенной решетки размером $3\lambda_0 \times 6.7\lambda_0$ (λ_0 соответствует центральной частоте рабочего диапазона) демонстрируют относительную полосу рабочих частот 12% по уровню коэффициента стоячей волны лучше 2 и развязке между поляризационными каналами не менее -27 dB. Уровень боковых лепестков в ортогональных плоскостях не превышает -18 dB.

Ключевые слова: двухполяризационная антенная решетка, уровень боковых лепестков, X-диапазон, спадающее амплитудное распределение.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.19.61141.20397

Важным требованием, предъявляемым к антенным решеткам (АР) в составе различных систем связи, локации и навигации, является уровень боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН). Высокие значения УБЛ при некоторых алгоритмах обработки могут привести к появлению ложных целей и снизить системные характеристики радиолокационной станции [1–4]. В связи с этим реализация спадающего к краям амплитудного распределения, обеспечивающего минимизацию УБЛ, остается актуальной задачей современных антенных систем. При отсутствии ограничений на габаритные размеры может быть использована зеркальная антенна, в которой параметры рефлектора и облучателя подобраны соответствующим образом. Но зачастую к массогабаритным параметрам предъявляются достаточно высокие требования, которым не удовлетворяют зеркальные антенны. В связи с этим получили распространение волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) [5], печатные микрополосковые антенные решетки (МПАР) [6], а также печатные АР с диаграммообразующей схемой на основе SIW-технологии [7–10].

Значительно расширить функциональные возможности радиолокационных систем позволяет работа на двух поляризациях. Однако проектирование двухполяризационных антенн с низким УБЛ является нетривиальной задачей из-за необходимости совмещения двух систем деления мощности. Например, конструкция двухполяризационных ВЩАР существенно усложняется в сравнении с однополяризационными [11], увеличивается их вес. Микрополосковые антенны намного проще в производстве, но их эффективность ниже из-за тепловых потерь в диэлектрике, а излучаемая мощность ограничена по

причине нагрева полосковых линий передачи [12]. Тем не менее по совокупности факторов (простота, вес, технологическая вариативность при производстве) они являются привлекательными для разработчиков в том числе.

В отличие от однополяризационных МПАР [6,13,14] практическая реализация двухполяризационной МПАР приводит к необходимости построения разветвленной диаграммообразующей схемы (ДОС) для каждой поляризации. Например, в [15] описан вариант антенны, в котором система деления мощности для обеих поляризаций расположена в одном слое. Однако из-за особенностей архитектуры количество излучателей оказывается ограниченным. Можно разместить ДОС для каждой поляризации в отдельном слое, но тогда значительно увеличиваются сложность и стоимость печатной платы. Также ДОС для разных поляризаций могут быть выполнены на отдельных платах [16,17]. Однако в таком случае снижается технологичность конструкции, поскольку появляется необходимость в фиксации отдельных плат на разной высоте от экрана. Решением может быть переход к последовательно-последовательной или последовательно-параллельной ДОС. Схемы с последовательным питанием компактные и легко масштабируются. Две последовательные ДОС для требуемого количества элементов могут быть размещены в одном слое печатной платы. Полоса рабочих частот при этом будет уже, так как в последовательных АР она обратно пропорциональна числу элементов [1]. Тем не менее для узкополосных систем такой вариант является перспективным.

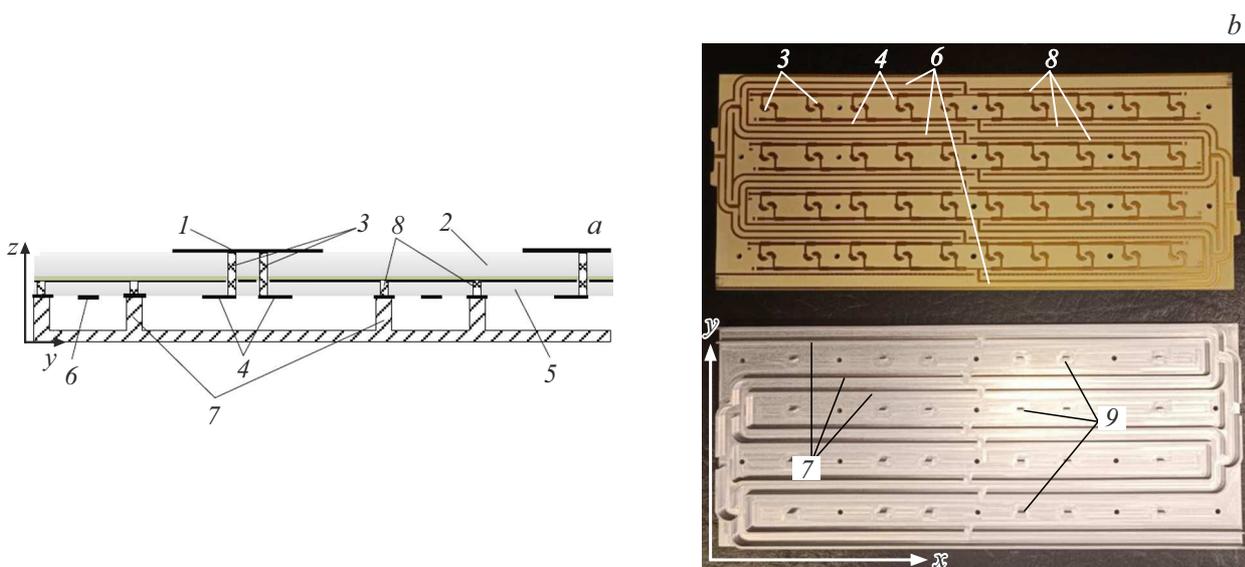


Рис. 1. *a* — поперечное сечение элемента AP; *b* — элементы макета подрешетки.

В настоящей работе описывается макет узкополосной двухполяризационной микрополосковой AP, предназначенный для отработки технических решений, позволяющих обеспечить низкий уровень боковых лепестков ДН. Макет представляет собой четыре линейки из десяти элементов каждая. Линейки питаются в центре и состоят из двух половин по пять последовательно соединенных элементов. Распределение мощности между линейками излучателей осуществляется по параллельной схеме. В результате исследования нескольких вариантов ДОС выяснилось следующее.

Во-первых, даже отдельные элементы ДОС не должны размещаться в излучающем раскрыве, так как уровень излучения от них соизмерим с уровнем поля в области боковых лепестков ДН.

Во-вторых, при размещении ДОС в одном слое для нейтрализации взаимного влияния между ее отдельными элементами необходимо предпринимать дополнительные меры. Взаимное влияние между элементами ДОС приводит к ошибкам в амплитудно-фазовом распределении и, как следствие, к искажению ДН.

В итоге в качестве базового элемента AP был выбран дисковый печатный излучатель на основе многослойной печатной платы, прикрепленной к фрезерованному основанию. Диаметр излучателя равен $0.265\lambda_0$ (λ_0 соответствует центральной частоте рабочего диапазона), размер ячейки — $0.607\lambda_0 \times 0.678\lambda_0$. Общий вид и элементы конструкции показаны на рис. 1, где цифрами обозначены: 1 — дисковый микрополосковый излучатель; 2 — слой WL-CT338 (аналог RO 4003) толщиной 1.524 mm; 3 — металлизированные отверстия, связывающие излучатели с ДОС линеек 4, напечатанных на слое 5 (WL-CT338 толщиной 0.813 mm). Стенки фрезерованного основания 7 вместе с металлизированными отверстиями 8 образуют сплошные перегородки, кото-

рые предотвращают взаимное влияние между системой деления мощности линеек 4 и питающими линиями 6 (см. также рис. 1, *b*). Если бы ДОС была на основе симметричной микрополосковой линии, то изолирующие стенки могли бы быть выполнены по технологии SIW [10]. Но при этом снизился бы КПД антенны из-за роста погонных потерь в схеме питания. По этой причине выбор был сделан в пользу описанной конструкции. Полости во фрезерованном основании образуют отрезки прямоугольных волноводов с поперечным размером $0.47\lambda_0$, равным максимальному расстоянию между стенками 7. С учетом слоя диэлектрика печатной платы частота отсечки такого волновода оказывается ниже нижней рабочей частоты, следовательно, возникает опасность его возбуждения. Это может привести к ошибкам в амплитудно-фазовом распределении, искажению ДН и снижению коэффициента усиления (КУ). Для предотвращения возбуждения полостей на фрезерованном основании между стенками 7 располагаются шипы 9 (высота такая же, как у стенок 7). Шипы увеличивают частоту отсечки волноводов. Они не контактируют с элементами ДОС и поэтому не оказывают влияния на характеристики антенны.

Для проверки предложенных технических решений был разработан и изготовлен макет двухполяризационной печатной AP, элементы которого показаны на рис. 1, *b*. В целях упрощения разработки использовались одинаковые последовательные делители (коэффициент отклонения — 3.5 dB), а конец линейки был нагружен на согласованную нагрузку. Печатная плата и фрезерованное основание стягиваются винтами М 2.5 (монтажные отверстия видны на рис. 1, *b*). Собранный макет представлен на рис. 2, *a*.

Было выполнено полноволновое моделирование антенны FEM-методом, в результате которого получены

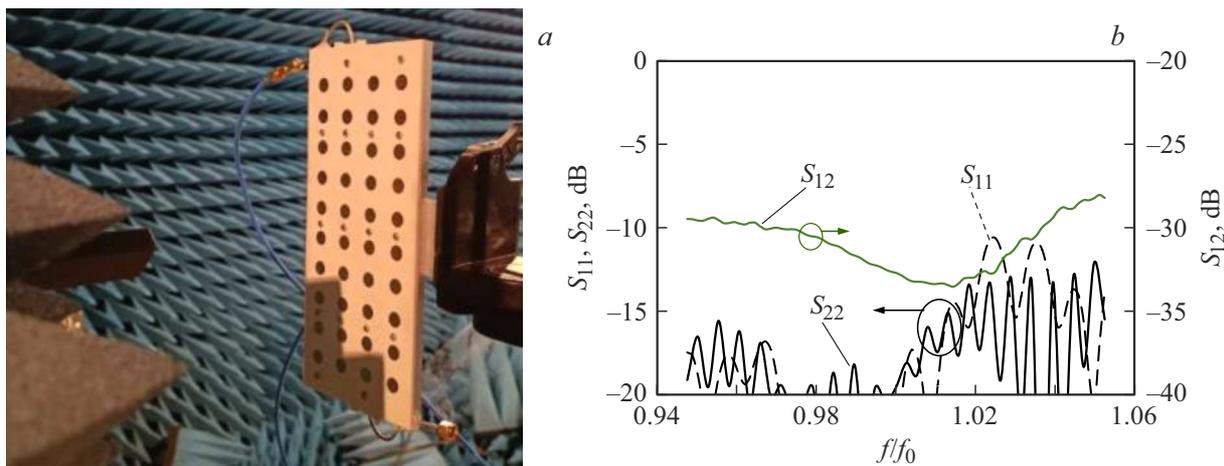


Рис. 2. *a* — вид экспериментальной установки; *b* — измеренные S -параметры макета подрешетки.

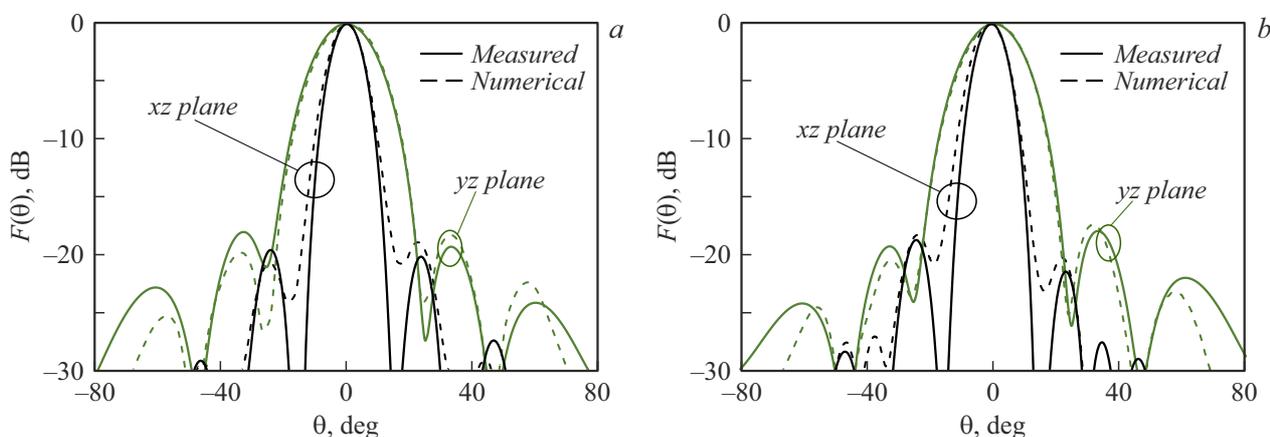


Рис. 3. Диаграммы направленности на рабочей частоте. *a* — первая поляризация, *b* — вторая поляризация.

следующие характеристики на центральной частоте: УБЛ на первой поляризации -19.8 dB, на второй -18 dB, тепловые потери в диэлектрике -0.83 dB, потери в нагрузках -0.14 dB, коэффициент направленного действия составляет 22.4 dB, КУ равен 21.4 dB. Ключевой величиной, характеризующей эффективность предложенного решения, являются потери в диэлектрике. Потерь в нагрузках можно избежать, так как их наличие обусловлено исключительно использованием одинаковых делителей (нагрузки убирают скачок в амплитудном распределении на крайних элементах). При более тщательной проработке ДОС с разными делителями они не требуются.

Измерения макета, представленного на рис. 2, *a*, проводились в безэховой камере ЦКП БЭК „ЛЭТИ“. При проведении измерений установлено, что относительная полоса рабочих частот по уровню коэффициента стоячей волны (КСВ) лучше 2 и по развязке между поляризационными каналами не менее -30 dB составила 6 % (рис. 2, *b*). По более слабому критерию — поляризационной развязке — не хуже -27 dB при том же уровне

КСВ полоса оказывается лучше 12%. Полоса по уровню -1 dB от максимального значения КУ составила 4.6%. При этом наблюдается высокая степень совпадения расчетных и экспериментальных ДН, как это следует из рис. 3. Измеренное значение КУ на центральной частоте равно 19.8 dB. Уровень боковых лепестков на центральной частоте равен -20 dB для первой поляризации и -18 dB для второй.

В работе продемонстрирована возможность реализации двухполяризационной печатной антенной решетке X-диапазона с низким УБЛ. Описанная антенная решетка представляет собой комбинацию печатной платы и фрезерованного основания. Такая конструкция позволяет реализовать ДОС для обеих поляризаций в одном слое и таким образом минимизировать количество слоев печатной платы (используется два спекаемых ядра). Предложенная конструкция легко масштабируется, но следует помнить, что увеличение числа элементов ведет к сужению полосы рабочих частот из-за последовательной схемы питания. Фрезерованное основание необходимо для устранения взаимного влияния между отдельными

элементами ДОС. Экспериментальные данные хорошо соотносятся с расчетными, что подтверждает верность выбора используемых технических решений.

Наиболее близкими аналогами являются антенны, описанные в [11,16,17]. Они конструктивно сложнее, но обладают большей полосой рабочих частот. Таким образом, предложенная конструкция является предпочтительной для узкополосных антенн.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Josefsson, S.R. Rengarajan, *Slotted waveguide array antennas: theory, analysis and design* (Scitech Publ., Southampton, 2018), p. 377. DOI: 10.1049/SBEW517E
- [2] M. Skolnik, *Introduction to radar systems* (McGraw-Hill, N.Y., 2002).
- [3] Y.-J. Ren, C.-P. Lai, in *Radar technology* (InTech, Rijeka, 2010). DOI: 10.5772/7187
- [4] J.N. Sahalos, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **68** (7), 5415 (2020). DOI: 10.1109/TAP.2020.2981735
- [5] K.S. Pradeep, N.N. Nagendra, R.K. Manjunath, in *2018 4th Int. Conf. for Convergence in Technology (I2CT)* (IEEE, 2018), p. 1–6. DOI: 10.1109/I2CT42659.2018.9058176
- [6] M. Pehlivan, Y. Asci, K. Yegin, C. Ozdemir, in *2018 22nd Int. Microwave and Radar Conf. (MIKON)* (IEEE, 2018), p. 50–51. DOI: 10.23919/MIKON.2018.8405268
- [7] A. Borji, D. Busuioc, S. Safavi-Naeini, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, **8**, 336 (2009). DOI: 10.1109/LAWP.2008.2004973
- [8] K.V. Lemberg, O.A. Nazarov, V.S. Panko, Y.P. Salomatov, in *2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)* (IEEE, 2013), p. 1–2. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693589
- [9] J. Cao, X. Chen, Y. Liu, H. Xu, T. Wang, J. Lin, in *2024 14th Int. Symp. on Antennas, Propagation and Theory (ISAPE)* (IEEE, 2024), p. 1–4. DOI: 10.1109/ISAPE62431.2024.10840941
- [10] F. Karami, H. Boutayeb, A. Amn-e-Elahi, A. Ghayekhloo, L. Talbi, *Sensors*, **22**, 3268 (2022). DOI: 10.3390/s22093268
- [11] Ю.П. Саломатов, Р.О. Рязанцев, *Компактная широкополосная двухполяризационная антенная решетка (варианты)*, патент РФ № 2659699 С1 (заявл. 05.10.2017; опубл. 03.07.2018).
- [12] *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, ed. by K. Chang (John Wiley, Hoboken, N.J., 2005).
- [13] T. Metzler, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **29** (1), 174 (1981). DOI: 10.1109/TAP.1981.1142543
- [14] T. Horng, N.G. Alexopoulos, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **41** (12), 1615 (1993). DOI: 10.1109/8.273304
- [15] D. Thalakituna, K.P. Esselle, in *Printed antennas for 5G networks*, ed. by L. Matekovits, B.K. Kanaujia, J. Kishor, S.K. Gupta, *PolITo Springer Ser.* (Springer, Cham, 2022), p. 1–27. DOI: 10.1007/978-3-030-87605-0
- [16] Н.Д. Бульгин, О.В. Сойкин, С.С. Чуркин, А.В. Можаровский, М.С. Муравьев, М.Е. Суворова, в сб. *Всерос. науч.-техн. конф. „Антенны и распространение радиоволн“* (СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, СПб., 2023), с. 54–57.
- [17] D. Lorente, M. Limbach, B. Gabler, H. Esteban, V.E. Boria, *IEEE Access*, **12**, 435 (2024). DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3347197