

11

Некоторые результаты применения спиральных излучателей в линейных антенных решетках для формирования столообразных диаграмм направленности

© К.М. Сидоров¹, С.П. Скобелев^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

² ПАО „Радиофизика“, Москва, Россия
E-mail: s.p.skobelev@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 января 2025 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2025 г.

Принято к публикации 19 мая 2025 г.

Проведено электродинамическое моделирование линейных антенных решеток, состоящих из трех и пяти цилиндрических спиральных излучателей. Моделирование включает оптимизацию геометрических параметров излучателя с целью формирования столообразных (секторных) диаграмм направленности элемента в решетке и обеспечения низких потерь на отражение. Приведены результаты, характеризующие достаточно высокое качество секторных диаграмм направленности в полосе частот 2.7–2.9 GHz при межэлементных расстояниях 0.9–1.1 от длины волны, а также влияние краев решетки на форму диаграммы направленности элемента.

Ключевые слова: спиральные излучатели, фазированные антенные решетки, секторные диаграммы направленности.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.16.60925.20260

Задача формирования столообразных диаграмм направленности (ДН) элемента в линейных и планарных фазированных антенных решетках, предназначенных для сканирования в ограниченном секторе, продолжает представлять большой интерес. Ее решение позволяет либо обеспечить заданный коэффициент усиления (КУ) решетки в заданной области сканирования при минимальном числе дорогостоящих управляемых элементов, либо обеспечить максимальный коэффициент усиления в области сканирования максимально широкой для заданного межэлементного расстояния. Различные подходы к решению указанной задачи и результаты, полученные на их основе, описаны в книгах [1,2], а также в многочисленных журнальных и конференционных публикациях. Последние результаты и ссылки на другие недавние работы, отражающие интерес к теме в настоящее время, можно найти в [3–5].

Один из подходов к формированию столообразных ДН элементов основан на использовании элементов продольного излучения, таких как выступающие диэлектрические стержни, многодисковые излучатели и директорные излучатели [1]. Известно (см., например, [6]), что цилиндрические спиральные антенны также могут обеспечивать режим продольного (осевого) излучения. Благодаря своей относительно простой и легкой конструкции, работе в сравнительно широкой полосе частот и низкой стоимости спиральные излучатели находят применение в качестве элементов антенных решеток [7–9]. Однако обзор литературы показал, что формирование столообразных диаграмм направленности в таких ре-

шетках не рассматривалось, хотя спиральная антенна в работе [10] была предложена в качестве элемента решетки, предназначенной для сканирования в ограниченной области пространства.

Цель работы — демонстрация впервые полученных результатов, характеризующих возможности спиральных излучателей по формированию столообразных диаграмм направленности элемента в линейных фазированных антенных решетках, предназначенных для сканирования в ограниченном секторе.

Результаты, представленные далее, были получены путем численного моделирования линейной решетки в известном пакете CST Studio Suite с использованием раздела Frequency Domain Solver с функцией адаптивного разбиения на ячейки при размере максимальной ячейки, равном $1/6$ от длины волны (шесть ячеек на длину волны). Одна из моделей показана на рис. 1. Излучатель содержит проволочную спираль цилиндрической формы, возбуждаемую через пятидесятиомную коаксиальную линию. Спираль выступает из соосного металлического цилиндра, установленного на экране. Согласование спирали по входу обеспечивается применением тонкой металлической пластинки, закрепленной на проволоке спирали, как показано на рис. 1.

Как известно (например, [6]), режим осевого излучения спирали обеспечивается при выполнении условия $3\lambda/4 < C < 4\lambda/3$, где C — длина окружности, определяемая диаметром спирали D как $C = \pi D$, и λ — длина волны в свободном пространстве. Кроме того, угол намотки $\alpha = \arctan(S/C)$, где S — расстояние

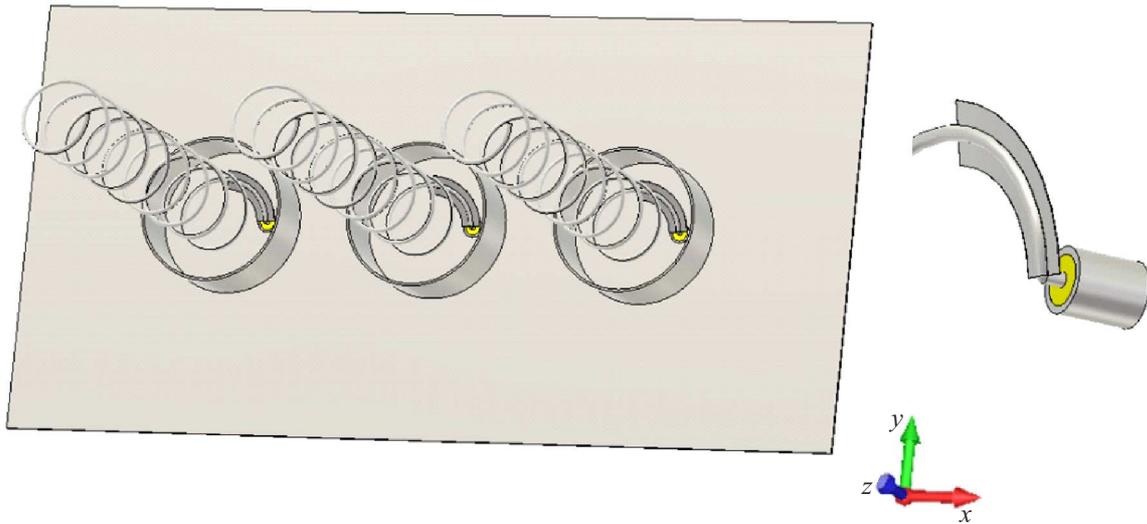


Рис. 1. Линейная решетка из трех спиральных излучателей и геометрия согласующей пластины (справа).

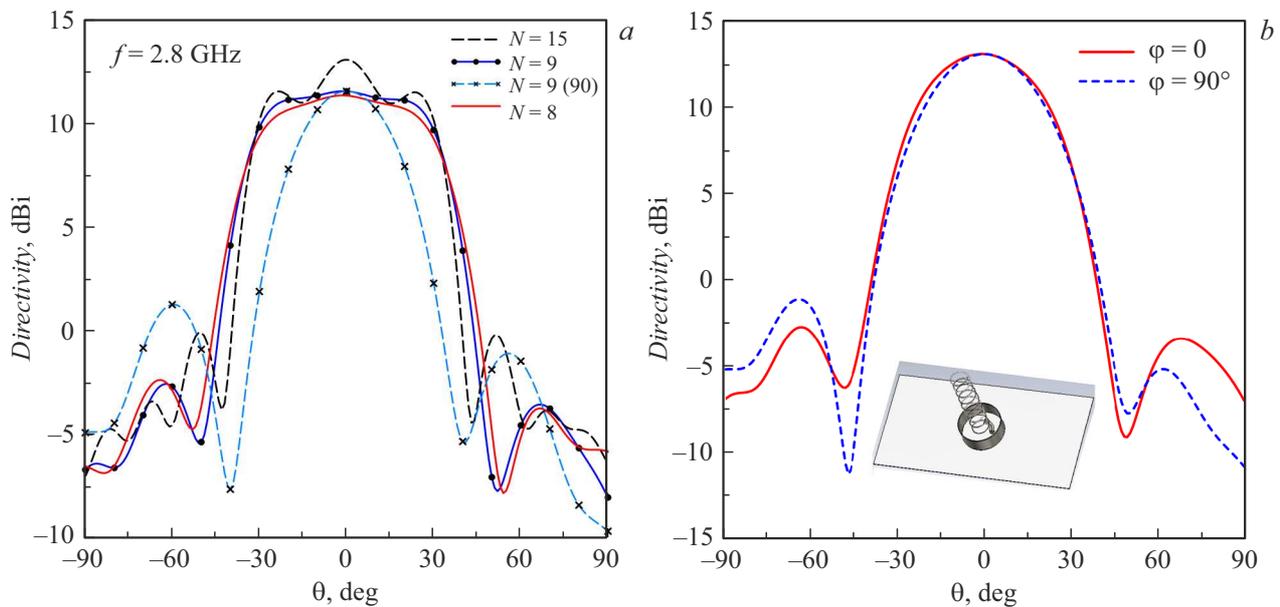


Рис. 2. ДН центрального элемента решетки при разном числе витков N (а) и ДН одиночного спирального излучателя в плоскостях $0xz$ ($\varphi = 0$) и $0yz$ ($\varphi = 90^\circ$) при $N = 9$ (b) на частоте 2.8 GHz.

между соседними витками, должен удовлетворять условию $12^\circ < \alpha < 14^\circ$. Наконец, число витков для осевого режима обычно берется не менее пяти.

Решетка, показанная на рис. 1, состоит из трех спиральных излучателей, расположенных на идеально проводящем экране с межэлементным расстоянием d_x вдоль оси x . Предполагается, что возбуждается вход только центрального элемента, а входы остальных элементов подключены к согласованным нагрузкам, что как раз соответствует условиям, при которых определяется ДН элемента в решетке.

Оптимизация параметров элемента решетки проводилась на центральной частоте 2.8 GHz ($\lambda \approx 107.14$ mm)

при $d_x = 0.9\lambda$ и диаметре проволоки 2 mm ($\approx 0.019\lambda$). В результате были выбраны следующие значения других параметров излучателя, включая число витков $N = 9$, длину окружности $C = \lambda$, ширину согласующей пластины 8.3 mm ($\approx 0.077\lambda$), длину пластины 25.7 mm (0.24λ), толщину пластины 0.5 mm (0.005λ), расстояние от нижнего края пластины до экрана 2.6 mm, диаметр цилиндра 81.8 mm ($\approx 0.76\lambda$) и высоту цилиндра 34 mm ($\approx 0.317\lambda$).

Моделирование структуры при различных числах витков N показало, что плоская вершина ДН сохраняется при значениях N , не превышающих 12. Подтверждающие результаты приведены на рис. 2, а, где показаны ДН центрального элемента решетки на центральной частоте

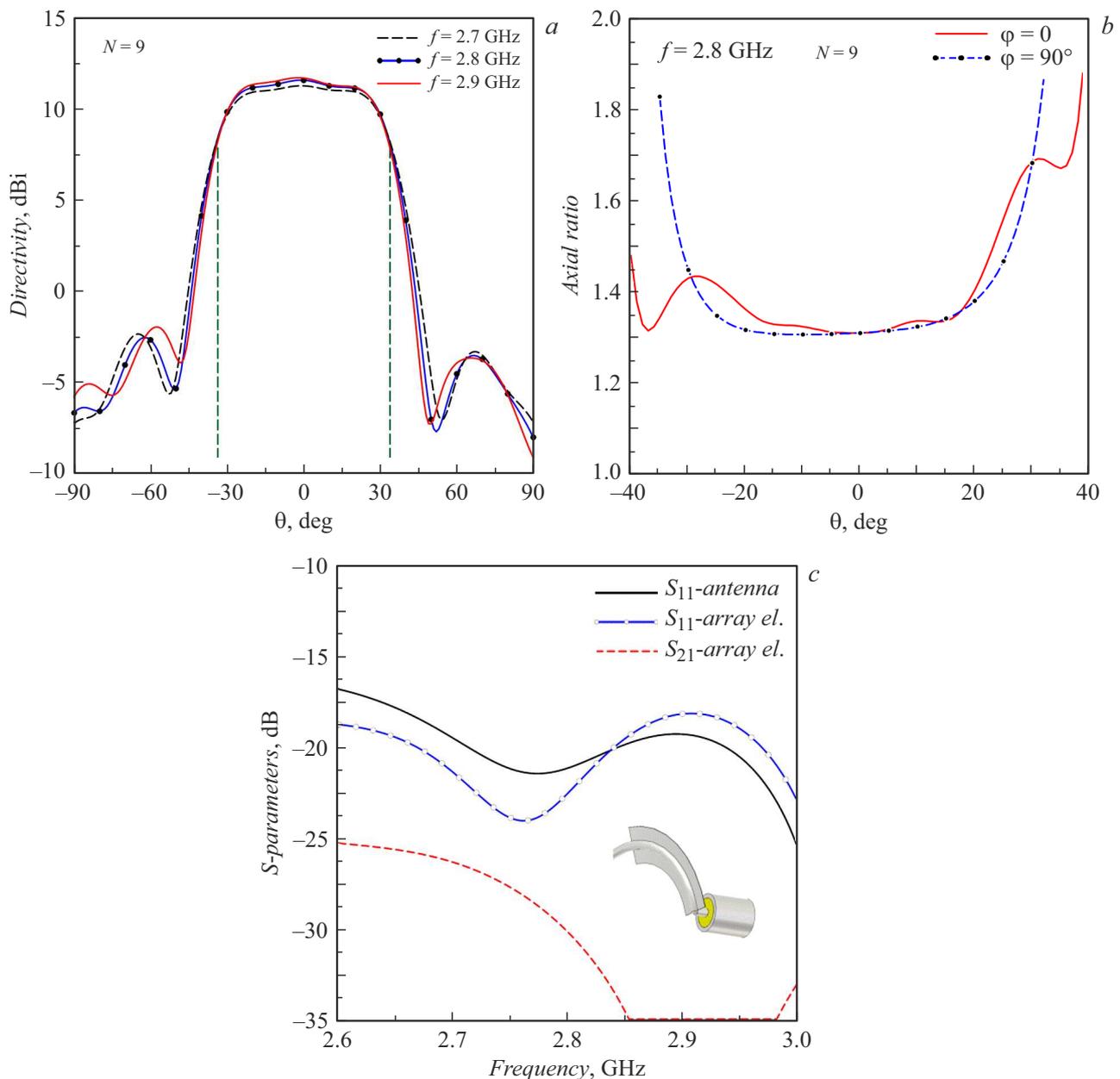


Рис. 3. ДН элемента решетки трех излучателей на различных частотах (a), коэффициент эллиптичности в главных плоскостях на частоте 2.8 GHz (b) и сравнение S-параметров в полосе частот (c).

при различных значениях N . Результаты показывают, что форма диаграммы заметно отличается от желаемой формы при большом значении N . Секторная форма диаграммы возможна при $N < 9$, но с некоторым снижением уровня. Диаграмма направленности одиночного излучателя с параметрами, перечисленными выше, приведена на рис. 2, b для сравнения и использования при последующем анализе.

Столообразная ДН, соответствующая параметрам указанным выше, имеет полуширину, равную $\approx 29^\circ$ по уровню -1 dB. Результаты расчета формы ДН элемента на частотах 2.7, 2.8 и 2.9 GHz, приведенные на рис. 3, a,

показывают, что секторная форма ДН сохраняется в диапазоне частот примерно $\pm 4\%$ без значительных изменений уровня плоской вершины и уровня боковых лепестков. Вертикальные штриховые линии, показанные на рис. 3, a, соответствуют краям идеальной секторной диаграммы направленности [1], полуширина которой равна $\theta_{\max} = \arcsin(\lambda_0/2d_x) \approx 33.75^\circ$ на центральной частоте. Рис. 3, b содержит зависимость коэффициента эллиптичности от угла наблюдения в главных плоскостях. Поведение коэффициента отражения (параметр S_{11}), характеризующего согласование элемента в решетке в полосе частот, показано на рис. 3, c линией с кружка-

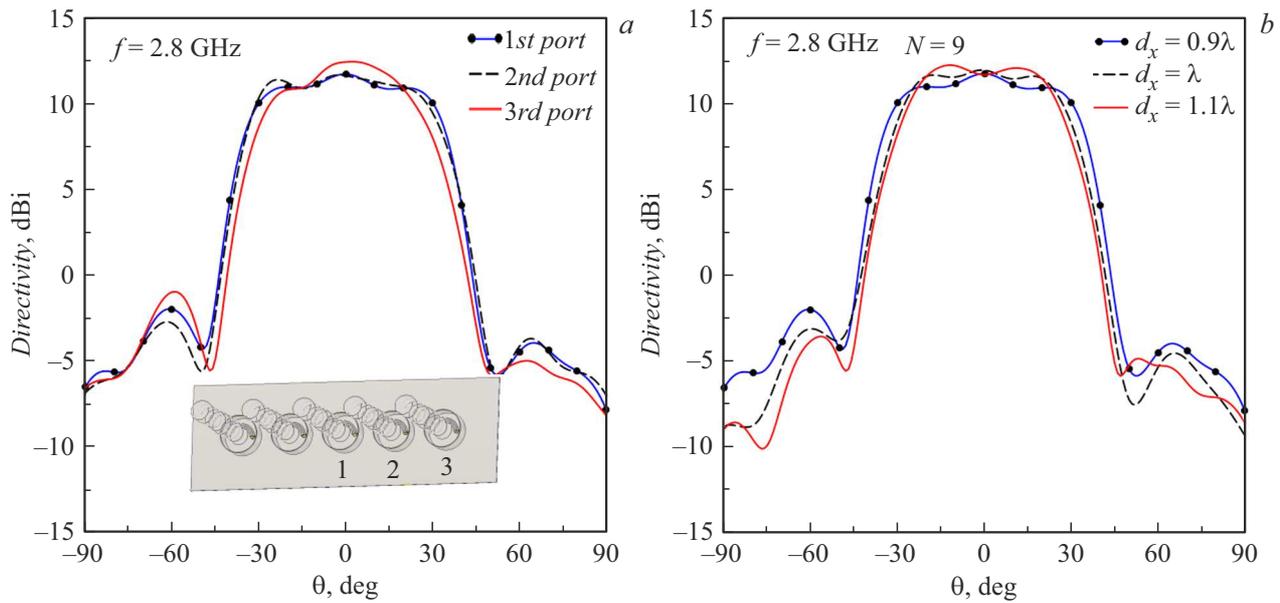


Рис. 4. ДН центрального, соседнего и крайнего элементов решетки из пяти излучателей с $d_x = 0.9\lambda$ (a) и ДН центрального элемента в пятиэлементной решетке при различных межэлементных расстояниях (b).

ми. Указанный коэффициент сравнивается с коэффициентом отражения одиночного спирального излучателя, представленным сплошной кривой. Штриховая кривая (параметр S_{21}) показывает, что уровень взаимной связи между излучателями по входу является очень низким.

Представляет интерес сравнение значения КУ спирального элемента в решетке в области плоской вершины, полученного в результате оптимизации, с максимальным достижимым значением КУ элемента G_m , соответствующим рассматриваемому случаю. Указанное значение можно определить формулой $G_m = 4\pi A_m / \lambda^2$, где A_m — максимальная эффективная площадь, соответствующая площади эквивалентного плоского раскрыва с равномерным амплитудно-фазовым распределением, приходящаяся на элемент решетки. Так как размер указанного раскрыва вдоль решетки ограничен периодом решетки d_x , площадь раскрыва может быть определена как $A_m = d_x d_m$, где d_m — максимальный поперечный размер раскрыва. Указанный максимальный размер предлагается определить с использованием КУ одиночного спирального элемента, приведенного на рис. 2, b. Эффективная площадь указанного элемента может быть определена как $A_{eff} = G_0 \lambda^2 / (4\pi)$, где G_0 — КУ одиночного элемента в максимуме. Результаты, приведенные на рис. 2, b, показывают, что диаграммы направленности одиночного спирального элемента в ортогональных плоскостях являются практически одинаковыми. Этот факт позволяет считать эквивалентный раскрыв квадратным. Тогда его эффективная площадь может быть определена как $A_{eff} = d^2$, где d — сторона квадрата. Учитывая, что, согласно рис. 2, b, КУ одиночного спирального элемента в максимуме равен 12.97 dB или $G_0 \approx 19.8153$, получим $d \approx 1.2557\lambda$. Полученный размер далее предла-

гается считать максимальным эффективным поперечным размером излучателя в решетке, т.е. $d_m = d$. Используя это обстоятельство, получим $A_m = d_x d_m = 1.035\lambda^2$ и, следовательно $G_m \approx 14.2013$ или 11.5233 dB. Сравнение полученного значения с уровнем плоской вершины ДН элемента (11.52 dB), приведенной на рис. 2, a и 3, a на частоте 2.8 GHz, показывает, что КУ спирального элемента в решетке составляет $\approx 100\%$ от оценки максимального значения КУ, т.е. эффективность формирования столбчатой ДН элемента оказывается достаточно высокой.

Так как секторные ДН элемента решетки формируются путем образования перекрывающихся подрешеток [1,2], форма ДН элементов, расположенных на краях решетки или вблизи краев решетки, может заметно отличаться от ДН элементов, удаленных от краев. Исследование краевых эффектов здесь было проведено с использованием пятиэлементной решетки с геометрическими параметрами спирального элемента такими же, как и у трехэлементной решетки. Результаты расчетов ДН решетки с периодом $d_x = 0.9\lambda$ при возбуждении центрального элемента (первый вход), соседнего элемента (второй вход) и крайнего элемента (третий вход) на частоте 2.8 GHz приведены на рис. 4, a. Результаты показывают, что ДН центрального и соседнего элементов имеют секторные формы, лишь незначительно отличающиеся друг от друга. При этом форма ДН крайнего элемента уже более заметно отличается от секторной формы. Таким образом, как и в других исследованиях, касающихся формирования секторных ДН путем применения элементов продольного излучения [1], необходимая связь между элементами по свободному пространству имеет место только между соседними элементами.

Наконец, ДН центрального элемента в пятиэлементной решетке с $d_x = 0.9\lambda$ сравнивается на рис. 4, *b* с ДН центрального элемента решетки с периодами $d_x = \lambda$ и 1.1λ . Результаты показывают, что увеличение периода решетки до указанных значений не приводит к заметному ухудшению секторной формы, а приводит лишь к сужению плоской вершины и повышению уровня последней, что находится в соответствии с известной зависимостью ширины секторной ДН элемента от периода решетки [1,2].

Таким образом, настоящая работа содержит новые результаты, характеризующие эффективность применения цилиндрических спиральных элементов для формирования столообразных секторных диаграмм направленности в линейных антенных решетках, предназначенных для сканирования в ограниченном секторе. Результаты, полученные путем численного электродинамического моделирования, включающего оптимизацию геометрических параметров трех- и пятиэлементных решеток с использованием известного пакета CST Studio Suite, показывают возможность формирования секторных диаграмм направленности достаточно высокого качества в полосе частот 2.7–2.9 GHz при межэлементных расстояниях 0.9–1.1 от длины волны. Кроме того, результаты исследования влияния краев решетки на форму диаграммы направленности элемента показали, что связь между элементами по свободному пространству, необходимая для формирования секторных диаграмм, имеется только между соседними элементами.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности дальнейших исследований в направлении использования спиральных элементов другой конструкции, включая двух- или четырехзаходные спирали и спирали с плавно меняющимся диаметром витков, а также в направлении использования спиральных элементов в планарных антенных решетках.

Благодарности

Авторы благодарны рецензентам за замечания, способствовавшие улучшению содержания работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.П. Скобелев, *Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности* (Физматлит, М., 2010). [S.P. Skobelev, *Phased array antennas with optimized element patterns* (Artech House, Norwood, MA, 2011)].
- [2] R.J. Mailloux, *Phased array antenna handbook*, 3rd ed. (Artech House, Norwood, MA, 2017), ch. 8.
- [3] К.М. Сидоров, С.П. Скобелев, in *2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conf. (RMC)* (IEEE, 2022), p. 199–202. DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079638
- [4] С.Е. Банков, Е.В. Фролова, *Радиотехника и электроника*, **68** (9), 835 (2023). DOI: 10.31857/S0033849423080028 [S.E. Bankov, E.V. Frolova, *J. Commun. Technol. Electron.*, **68**, 925 (2023). DOI: 10.1134/S1064226923080028].
- [5] К.М. Сидоров, С.П. Скобелев, in *2021 Int. Conf. Engineering and Telecommunication (En&T)* (IEEE, 2021), p. 1–5. DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681787
- [6] C.A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 4th ed. (John Wiley Sons, Inc., 2016).
- [7] E. Lier, R. Melcher, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, **51**, 80 (2009). DOI: 10.1109/MAP.2009.4939021
- [8] S.S. Kumar, H.C. Sanandiyaa, R.J. Sharma, A.K. Singhal, D.K. Jangid, R.C. Gupta, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, **59**, 98 (2017). DOI: 10.1109/MAP.2016.2629181
- [9] X. Liu, S. Yao, N. Russo, S. Georgakopoulos, in *2018 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* (IEEE, 2018), p. 1231. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608197
- [10] V. Volman, in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium & USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting* (IEEE, 2003), vol. 1, p. 257. DOI: 10.1109/APS.2003.1217447