

20. Dunaev N.P., Kuz'min S.V., Makarov V.A. Opyt primeneniya geneticheskogo algoritma dlya na-stroyki i kalibrovki antennoy reshetki v dal'ney zone [Experience in applying a genetic algorithm to far-field antenna array tuning and calibration], *Antenny i rasprostraneniye radiovoln: Sb. dokl. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Antennas and Radio Wave Propagation: Collection of Papers from the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg: SPbGETU "LETI", 2023, pp. 75-77.
21. pinv, *MATLAB Exponenta: dokumentatsiya* [MATLAB Exponenta: documentation]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/pinv.html> (accessed 21 August 2024).
22. Strang G. Introduction to Linear Algebra. 5th ed. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 2016 574 з. ISBN 978-0-9802327-7-6.
23. lsqminnorm, *MATLAB Exponenta: dokumentatsiya* [MATLAB Exponenta: documentation]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/lsqlminnorm.html#d123e829846> (accessed 21 August 2024).
24. svd, *MATLAB Exponenta: dokumentatsiya* [MATLAB Exponenta: documentation]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/double.svd.html> (accessed 21 August 2024).
25. Decomposition, *MATLAB Exponenta: dokumentatsiya* [MATLAB Exponenta: documentation]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/decomposition.html#d123e318933> (accessed 21 August 2024).
26. Golub Dzh., Van Loan Ch. Matrichnye vychisleniya [Matrix computations]: transl. from Engl. [and scientific editor] B.V. Sayfulina, Yu.A. Kuznetsova, V.B. Stepanova. 3rd ed. Moscow: Mir, 1999, 548 p. ISBN 5-03-002406-9.

Быбин Сергей Сергеевич – АО "Навигатор"; e-mail: bybins@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79219895199; начальник отдела.

Дунаев Николай Павлович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: ndunaev@inbox.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79026261644; ассистент кафедры радиотехнических систем; инженер АО "Навигатор".

Кузьмин Сергей Викторович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: sergey-v-kuzmin@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79119643306; к.ф.-м.н.; доцент кафедры радиотехнических систем; главный специалист АО "Навигатор".

Морозов Александр Николаевич – АО "Навигатор"; e-mail: MorozovAN@navigat.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79214204299; начальник научно-исследовательского сектора.

Bybin Sergey Sergeevich – JSC Navigator; e-mail: bybins@gmail.com; St. Petersburg, Russia; phone: +79219895199; head of unit.

Dunaev Nikolay Pavlovich – Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: ndunaev@inbox.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79026261644; assistant of the Department of Radio Engineering Systems; engineer of the JSC Navigator.

Kuzmin Sergey Viktorovich – Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: sergey-v-kuzmin@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79119643306; cand. of phys. and math. sc.; associate professor of the Department of Radio Engineering Systems; chief specialist of the JSC Navigator.

Morozov Alexander Nikolaevich – JSC Navigator; e-mail: MorozovAN@navigat.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79214204299; head of the Research sector.

УДК 621.371: 538.574

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-208-218

А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина, А.М. Зыкина

МЕТАПОВЕРХНОСТИ С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ НА ОСНОВЕ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СНИЖЕНИЯ РАССЕЙЯНИЯ

Статья посвящена актуальной проблеме – исследованию возможностей фазового гашения рассеянных электромагнитных волн с помощью тонких непоглощающих метаповерхностей Панчаратна-Берри (ПБ) с генерацией вихревых волн с орбитальным угловым моментом (ОУМ) и спиралевидным фазовым фронтом. Целью работы является проектирование таких метаповерхностей (МП) на основе единичных ячеек гексагональной формы и традиционной квадратной формы и сравнение их характери-

стик рассеяния и возможностей широкополосного фазового гашения рассеяния. Метаповерхности с бездисперсной ПБ-фазой для волн круговой поляризации (КП-волн) состоят из ячеек, в которых углы поворота мета-частиц изменяются по заданному закону. Гексагональная ячейка (типа пчелиная сота) имеет шесть осей симметрии (вместо четырех у квадратной ячейки), что должно обеспечивать меньшее влияние разных углов поворота соседних мета-частиц МП на свойства коэффициентов отражения ячеек. В статье предложена мета-частица в виде перфорированного полоска в гексагональной ячейке, которая эффективно отражает ко-поляризованные КП-волны в полосе от 8,5 до 19,7 ГГц независимо от угла поворота мета-частицы. Спроектированы четыре модели МП из таких ячеек с генерацией ОУМ разного порядка. Симуляция рассеяния КП-волн методом конечных элементов подтвердила, что модели с гексагональными ячейками эффективнее снижают поле обратного рассеяния (свыше 10 дБ) по сравнению с квадратными ячейками (лишь на 8 дБ) в сверхширокой полосе частот от 8,5 до 20,8 ГГц. Обратное рассеяние снижается за счет генерации воронкообразных вихревых волн с модами ОУМ минус первого или плюс третьего порядков и фазовой сингулярности поля на оси вихрей. Полученные результаты могут быть полезны при выборе формы единичных ячеек метаповерхностей, предназначенных для широкополосного гашения рассеяния.

Метаповерхность Панчаратнама-Бэрри; гексагональная единичная ячейка; вихревая волна; орбитальный угловой момент; снижение рассеяния.

A.I. Semenikhin, D.V. Semenikhina, A.M. Zikina

HEXAGONAL CELL-BASED ORBITAL ANGULAR MOMENTUM METASURFACES FOR BROADBAND SCATTERING REDUCTION

The article is devoted to the actual problem to study of the possibilities of phase cancellation of scattered electromagnetic waves using thin non-absorbing Pancharatnam-Berry (PB) metasurfaces with the generation of vortex waves with orbital angular momentum (OAM) and a spiral phase front. The aim of the work is to design such metasurfaces (MS) based on unit cells of hexagonal shape and traditional square shape and to compare their scattering characteristics and the possibilities of broadband phase cancellation of scattering. Metasurfaces with a dispersionless PB-phase for circular polarized waves (CP-waves) consist of cells in which the rotation angles of meta-particles change according to a given law. A hexagonal unit cell (like a honeycomb) has six axes of symmetry (instead of four in a square unit cell), which should provide a smaller influence of different rotation angles of adjacent meta-particles of an MS on the properties of the reflection coefficients of the cells. In this paper, a meta-particle in the form of a perforated patch in a hexagonal cell is proposed, which effectively reflects co-polarized CP-waves in the range from 8.5 to 19.7 GHz regardless of the rotation angle of the meta-particle. Four models of metasurfaces from such cells with generation of OAM of different orders were designed. Simulation of scattering of CP-waves by the finite element method confirmed that models with hexagonal cells reduce the backscattering field more effectively (over 10 dB) compared to square cells (only by 8 dB) in an ultra-wide frequency range from 8.5 to 20.8 GHz. Backscattering is reduced due to the generation of funnel-shaped vortex waves with OAM modes of minus the first or plus the third order and a phase singularity of the field on the vortex axis. The obtained results can be useful in choosing the shape of unit cells of metasurfaces intended for broadband scattering reduction.

Pancharatnam-Berry metasurface; hexagonal cell; vortex wave; orbital angular momentum; scattering reduction.

Введение. Наиболее известными механизмами широкополосного фазового гашения эффективной площади рассеяния блестящих участков металлических тел с помощью непоглощающих метаповерхностей (МП) являются интерференционное гашение (деструктивная интерференция) [1, 2], твист-эффект (поляризационная конверсия) [3, 4], аномальное отражение и диффузное рассеяние [5–8]. Для этого непоглощающие МП проектируют в виде решеток конструктивных элементов (модулей, субрешеток), которые состоят из мета-частиц с кодированными фазами локальных коэффициентов отражения. Интерференционное гашение рассеяния реализуется за счет противофазности соседних шахматно-подобных модулей [1]. Твист-эффект обеспечивает перевод энергии поля на кросс-поляризацию за счет поляризационной конверсии падающих волн линейной поляризации в ортогонально поляризованные волны линейной поляризации. В метаповерхностях с аномальным отражением и диффузным рассеянием применяются более сложные (чаще всего, синтезированные) фазовые профили локальных коэффициентов отражения, улучшающие широкоугольность гашения бистатического рассеяния.

В последние годы в различных частотных диапазонах предложены новые фазовые механизмы управления рассеянием электромагнитных волн и сверхширокополосного гашения рассеяния, основанные на применении метаповерхностей, формирующих бездисперсную фазу Панчаратнама-Берри (ПБ-фазу) для волн круговых поляризаций (КП-волн) [9–14]. Метаповерхности Панчаратнама-Берри (ПБ-метаповерхности) состоят из мета-частиц с поляризационной конверсией другого типа, когда падающая КП-волна преобразуется при отражении без деполяризации в согласно поляризованную КП-волну.

Интенсивно исследуются непоглощающие ПБ-метаповерхности с фазовым механизмом гашения рассеяния за счет генерации вихревых волн (фазовых вихрей) с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ), фазовой сингулярностью и обнулением поля на оси вихрей [12–16]. В работе [14] для генерации ОУМ предложены тонкие ПБ-метаповерхности (толщиной порядка $0,1\lambda_n$ относительно длины волны λ_n в подложке на нижней рабочей частоте), состоящие из мета-частиц в виде полосков с вырезами. Гашение кросс-поляризованного поля вихревого рассеяния от МП в широкой полосе 8,5–20,5 ГГц составило лишь 8 дБ.

Традиционно ПБ-метаповерхности проектируются на основе единичных ячеек четырехгранной квадратной формы [12–14]. Однако, известно [17], что периодические решетки, образованные многогранными прямоугольными ячейками, особенно, гексагональные решетки, демонстрируют в ряде приложений лучшие свойства, чем решетки квадратных ячеек. Единичная ячейка в виде правильного шестигранника (типа пчелиная сота) имеет меньшую площадь и шесть осей симметрии вместо четырех у квадратной ячейки. Эти особенности широко используются при проектировании линз, частотно-селективных структур, антенных решеток и метаматериалов, особенно в терагерцовом диапазоне [17–19]. В частности, известно, что использование правильных шестиугольных ячеек повышает плотность упаковки элементов в антеннах на основе МП и позволяет более точно кодировать фазу электромагнитных волн [20] и реализовать более широкую полосу пропускания [21, 22]. Тем не менее, публикаций по метаповерхностям (МП) с ячейками гексагональной формы гораздо меньше.

В настоящей работе с целью улучшения эффективности гашения обратного рассеяния (не менее чем на 10 дБ) рассматриваются ПБ-метаповерхности с широкополосной генерацией ОУМ, состоящие из ячеек гексагональной формы (вместо традиционных квадратных ячеек). Проектируются и сравниваются характеристики рассеяния конструктивных элементов МП (ОУМ-модулей) из гексагональных и квадратных ячеек. Симуляция характеристик рассеяния ко-поляризованных и кросс-поляризованных волн круговой поляризации выполнена в HFSS в случае нормального падения плоских КП-волн.

1. Коэффициенты отражения волн линейных и круговых поляризаций в каналах Флоке квадратной и гексагональной ПБ-ячеек. Геометрия ПБ-ячеек показана на рис. 1. Ячейки содержат экранированную подложку F4b2 ($\epsilon = 2,65$; $\text{tg}\delta = 0,001$) толщиной 3 мм и идентичные мета-частицы толщиной 0,035 мм в виде перфорированных полосков с тремя вырезами, размеры которых для двух видов ячеек приведены на рис. 1. Сторона квадратной ячейки равна 10 мм [14]; диаметр описанной окружности гексагональной – 12,8 мм. Угол поворота β мета-частиц отсчитывается от оси x (рис. 1).

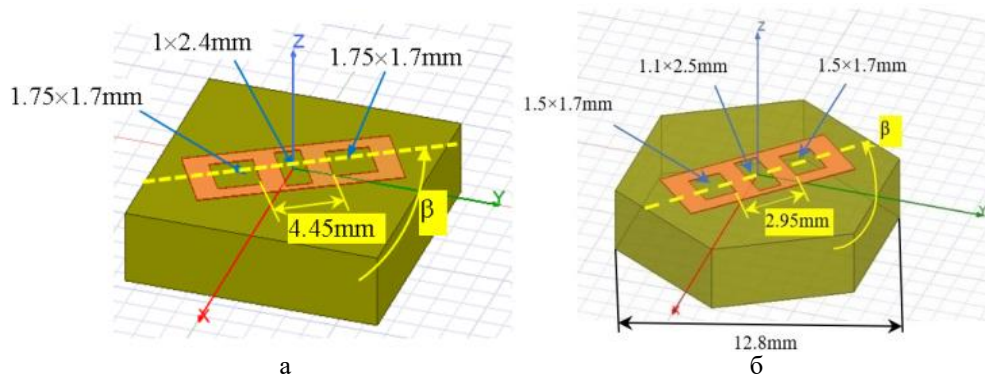


Рис. 1. Единичные ячейки квадратной (а) и гексагональной (б) формы

Для проектирования МП с гексагональными ячейками и симуляции S-параметров МП используем канал Флоке (рис. 2 а,г). В канале Флоке осуществляется анализ бесконечной МП путем наложения периодических граничных условий, как показано на рис. 2,а. Для возбуждения гексагональной единичной ячейки, в канале задан порт Флоке с модами TE_{00} , TM_{00} (рис. 2,б-г). Векторы \vec{a} и \vec{b} порта Флоке (рис. 2,д) с углом 60° между ними являются векторами трансляции узлов двумерной гексагональной решетки. Рис. 2,д поясняет принцип построения бесконечной МП с гексагональной решеткой ячеек с помощью операций трансляции.

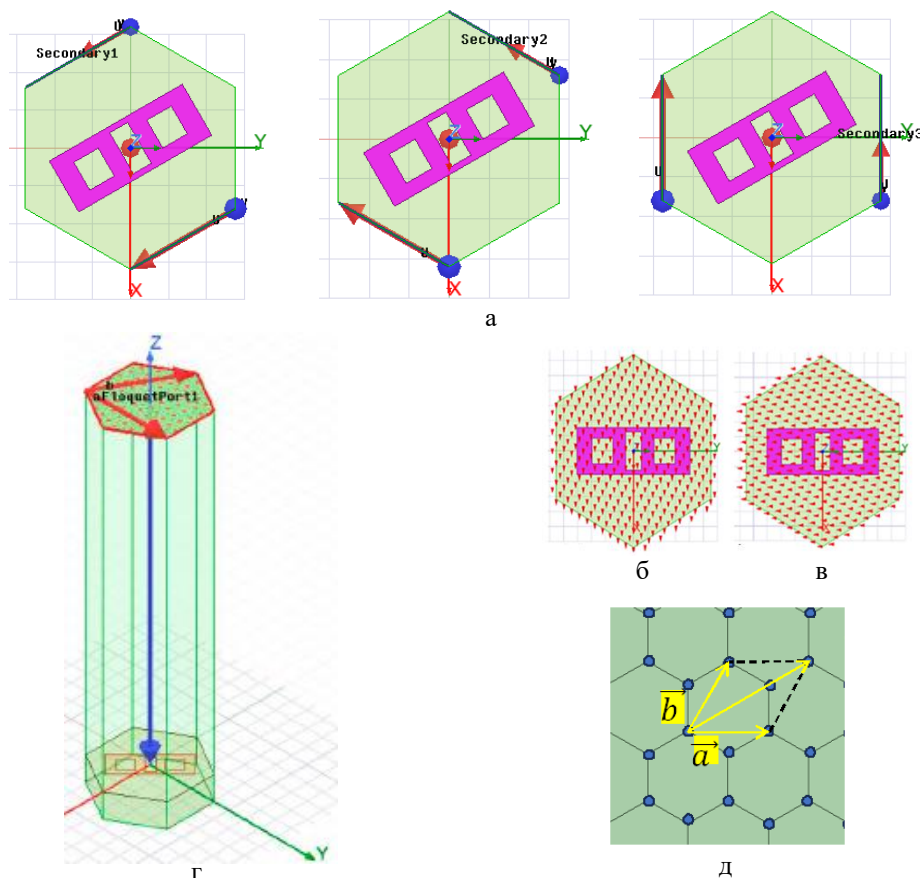


Рис. 2. Постановка периодических граничных условий (а) и порта Флоке (б-д)

В соответствии с теорией бездисперсной ПБ-фазы [23, 24] мета-частицы должны создавать в канале Флоке противофазное отражение собственных мод линейных поляризацій независимо от угла поворота β [11]. Это условие гарантирует линейный закон изменения ПБ-фазы $\psi_{PB} = \pm 2\beta$ для право- и лево-поляризованных волн, соответственно.

Сравним угло-частотные характеристики отражения КП-волн в каналах Флоке ПБ-ячеек гексагональной и квадратной формы. Симуляция показала, что переход от квадратной к более изотропной гексагональной ячейке улучшает угло-частотные зависимости ПБ-фазы от угла поворота β (рис. 3, 4). Собственные моды Флоке противофазны в широкой полосе частот (рис. 3).

Из рис. 4 видно, что вращение мета-частицы в «соте» реализует линейный закон изменения ПБ-фазы от угла β в полосе частот от 9 до 19,5 ГГц. Для квадратной ячейки этот закон отличается от линейного на нижних частотах (9 ГГц, 10 ГГц) и ухудшает поляризационную конверсию КП-волн.

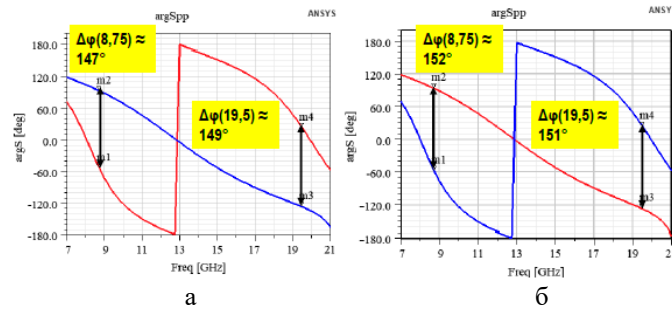


Рис. 3. Фазы отражения собственных мод Флоке линейных X- и Y-поляризаций в полосе от 7 до 21 ГГц при ориентации мета-частиц вдоль осей симметрии ячеек X (а) и Y (б)

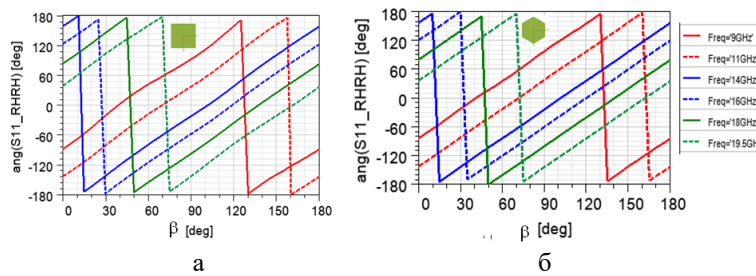


Рис. 4. Зависимости фазы отражения ко-поляризованной правой КП-волны от угла поворота β мета-частиц в ячейках квадратной (а) и гексагональной (б) формы

Частотные характеристики (ЧХ) поляризационной конверсии КП-волн иллюстрирует рис. 5 для разных углов поворота мета-частиц $\beta=0^\circ; 30^\circ; 45^\circ$ вдоль характерных осей симметрии ячеек. «Сота» эффективно отражает ко-поляризованные КП-волны (с потерями менее 0,35 дБ) независимо от угла β в полосе от 8,5 до 19,7 ГГц (рис. 5,б,в). Для квадратной ячейки поляризационная конверсия зависит от β на нижних частотах (рис. 5,а) [14].

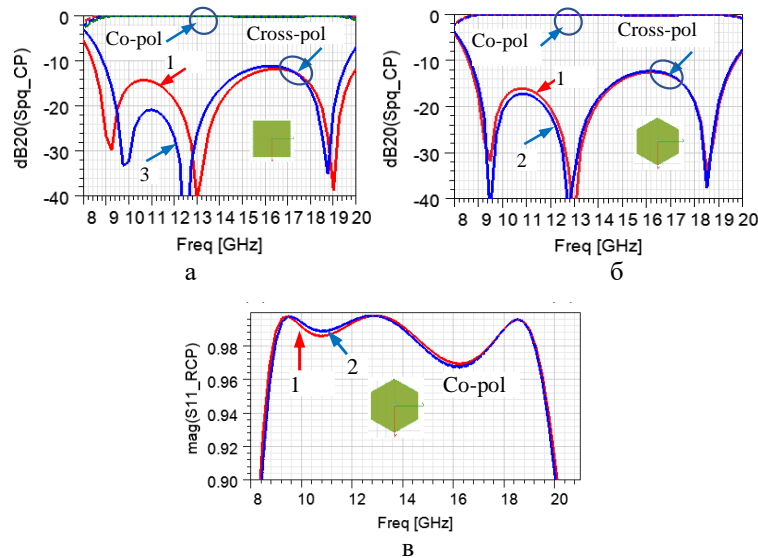


Рис. 5. ЧХ амплитуд коэффициентов отражения КП-волн при углах поворота $\beta=0^\circ$ (линия 1); 30° (линия 2) и 45° (линия 3) в ячейках квадратной (а) и гексагональной (б, в) формы

2. Топология и характеристики рассеяния модулей МП с генерацией ОУМ.

Сравним эффективность фазового гашения обратного рассеяния от ОУМ-модулей из ячеек разной формы за счет генерации вихревых волн. Такие модули из квадратных ячеек имели размер 120×120 мм и описаны нами в [22]. Разработанные ОУМ-модули из «сот» обозначены ниже Mh0p, Mh90p, Mh0n, Mh90n и имели размер 108,8×110,85 мм. Их топология изображена на рис. 6 (границы «сот» показаны лишь на рис. 6,а).

Углы поворота β мета-частиц в ячейках вычислялись по формуле [22]:

$$\beta(x, y) = 0.5 q \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \beta_0,$$

где q – параметр, определяющий топологический заряд вихря; x, y – координаты центров ячеек в системе координат, связанной с МП, β_0 – начальный угол наклона мета-частиц.

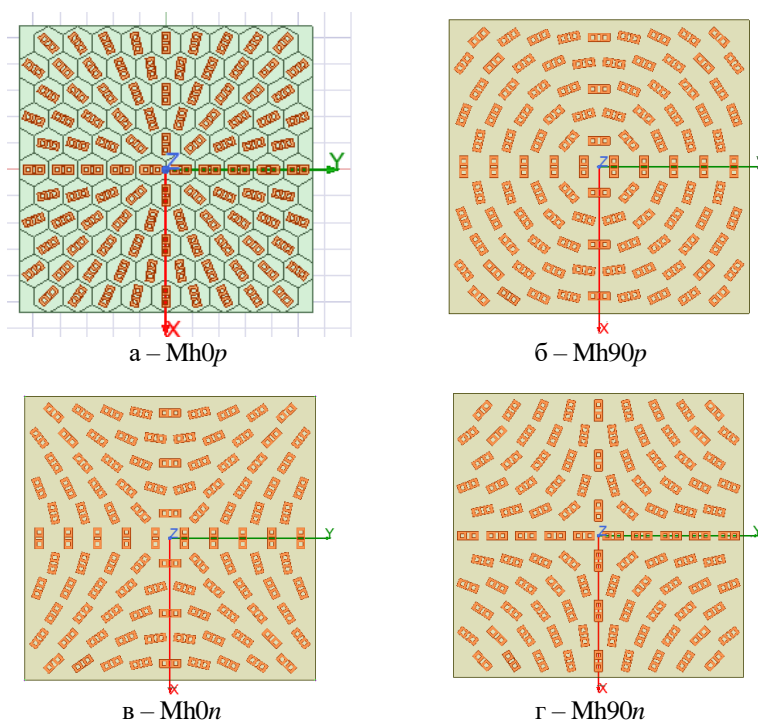


Рис. 6. Топология модулей из гексагональных ячеек с разными фазовыми ОУМ-профилями

Модули Mh0p, Mh90p, Mh0n, Mh90n характеризовались разными параметрами ОУМ $\beta_0 = 0^\circ; 90^\circ, q = \pm 2$, которые включены в обозначения модулей (p – positive для $q > 0$ и n – negative для $q < 0$). Модули с квадратными ячейками Ms0p, Ms90p, Ms0n, Ms90n имели аналогичные параметры ОУМ [14].

Симуляция подтвердила, что гексагональные ОУМ-модули эффективнее. Они снижают обратное рассеяние в полосе от 8,5 до 20,8 ГГц более чем на 10 дБ (рис. 7,а,в), а аналогичные модули из квадратных ячеек – лишь на 8 дБ (рис. 7,б,г).

Физическими механизмами фазового гашения поля рассеяния метаповерхностей являются две конверсии. Во-первых, это поляризационная конверсия КП-волн, которая преобразует падающую КП-волну в интенсивную ко-поляризованную и ослабленную кросс-поляризованную компоненты отраженной КП-волны. Эта конверсия определяется, в основном, свойствами спроектированной единичной ячейки с мета-частицей. Во-вторых, это спин-орбитальная конверсия КП-волн при рассеянии от ОУМ-модулей, когда спиновый угловой момент падающей волны круговой поляризации преобразуется в орбитальный угловой момент ко-поляризованного дальнего поля и в спиновый угловой момент кросс-поляризованного дальнего поля [17]. Обратное рассеяние снижается за

счет генерации воронкообразных вихревых волн (рис. 8,а,в) с интенсивной модой ОУМ $k = -1$ (для $Mh0p$; рис. 8,б) или $k = +3$ (для $Mh0n$; рис. 8,г). Аналогичные вихри генерируют модули $Mh90p$ и $Mh90n$. Порядок мод ОУМ совпадает для сравниваемых модулей из гексагональных и квадратных ячеек [14]. При этом вихревое рассеяние сохраняется в сверхширокой полосе частот от 8,5 до 21 ГГц (рис. 9).

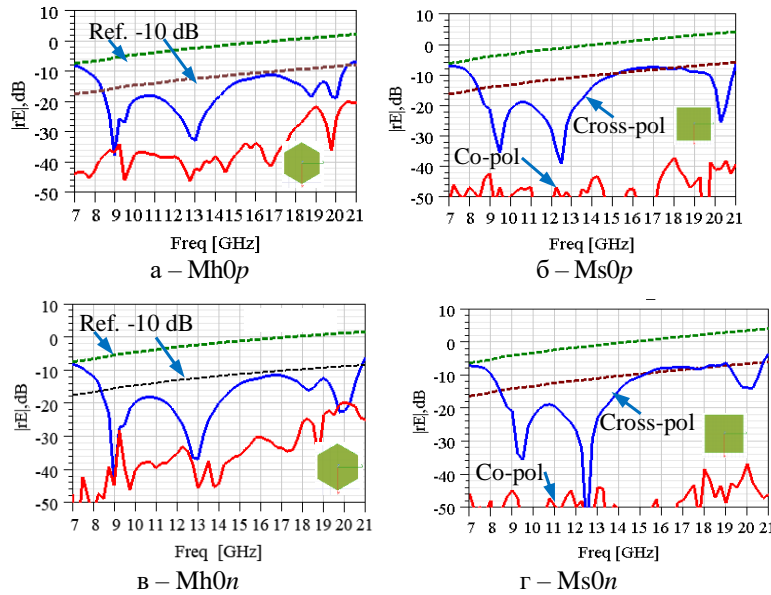


Рис. 7. Гашение обратного рассеяния КП-волн от модулей с гексагональными (а, в) и квадратными (б, г) ячейками; зеленые линии – кросс-поля эталонов, коричневые – уровень минус 10 дБ от полей эталонов

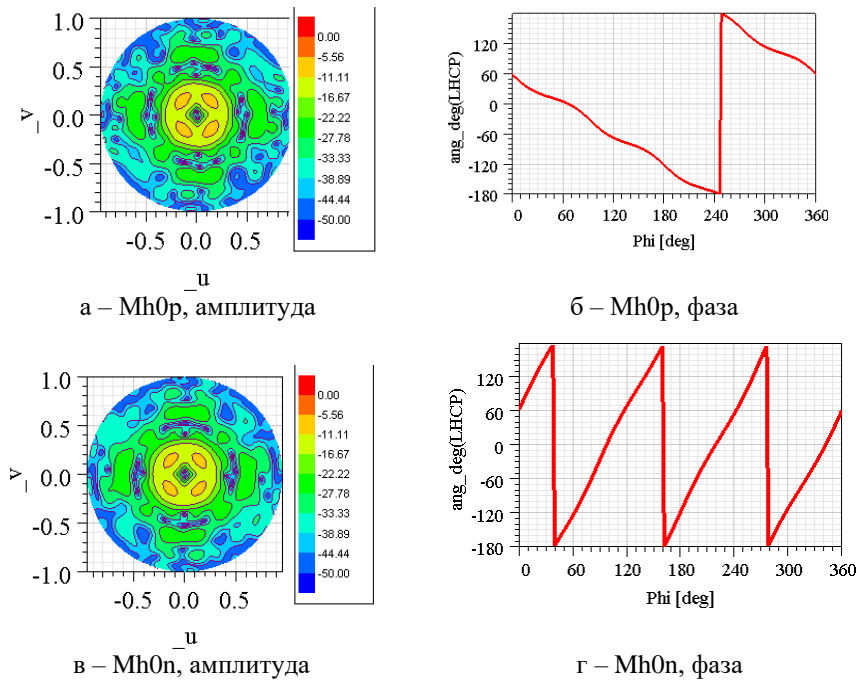


Рис. 8. Амплитудные 2D-диаграммы рассеяния ко-поля модулей (а, в) и распределение фазы рассеянного поля вдоль азимутального угла (б, г) на частоте 14 ГГц

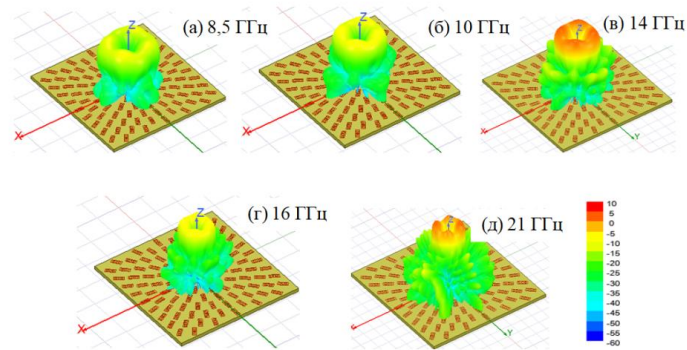


Рис. 9. 3D-диаграммы рассеяния (в дБ) ко-поля модуля $Mh0r$ в верхней полусфере

Заключение. В статье рассмотрена возможность улучшения фазового гашения рассеяния с помощью метаповерхностей Панчратнама-Берри с генерацией вихревых волн с орбитальным угловым моментом и спиралевидным фазовым фронтом. Метаповерхности выполнены из ячеек гексагональной формы (вместо традиционных квадратных ячеек). Симуляция рассеяния КП-волн подтвердила, что ОУМ-модули МП с гексагональными ячейками эффективнее снижают кросс-поляризованное поле обратного рассеяния (свыше 10 дБ) по сравнению с МП из квадратных ячеек (лишь на 8 дБ) в полосе от 8,5 до 20,8 ГГц. Полученные результаты могут быть полезны при выборе формы единичных ячеек метаповерхностей, предназначенных для широкополосного гашения рассеяния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00537-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dai H., Zhao Y., Yu C. A multi-elements chessboard random coded metasurface structure for ultra-wideband radar cross section reduction // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 56462-56468. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977630>.
2. Al-Nuaimi M.K.T., Hong W., He Y. Design of diffusive modified chessboard metasurface // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18, No. 8. – P. 1621-1625. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2925378>.
3. Климов А.В., Семенухин А.И. Модели широкополосных отражательных поляризаторов с использованием метаматериалов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 151-156.
4. Chen W. et al. Broadband polarization conversion metasurface for radar cross section reduction // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2018. – P. 1-3. – <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563649>.
5. Dong G. et al. Wideband polarization-independent anomalous reflection mediated by metasurface // 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – IEEE, 2016. – P. 753-755. – <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2016.7834068>.
6. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V. Wideband phase gradient metasurfaces with anomalous diffuse scattering to reduce RCS for linear and circular polarizations // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2021. – P. 261-264. – <https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494040>.
7. Chen K. et al. Geometric phase coded metasurface: from polarization dependent directive electromagnetic wave scattering to diffusion-like scattering // Scientific reports. – 2016. – Vol. 6, No. 1. – P. 35968. – <https://doi.org/10.1038/srep35968>.
8. Семенухин А.И., Климов А.В., Савицкий А.Н. Анизотропная импедансная цилиндрическая метаповерхность для самоадаптивного гашения рассеянных волн любых поляризацій // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 6. – С. 258-267. – <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-6-258-267>.
9. Chen H.T., Taylor A.J., Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications // Reports on progress in physics. – 2016. – Vol. 79, No. 7. – P. 076401. – <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/79/7/076401>.

10. Tian Y. *et al.* Manipulation of the arbitrary scattering angle based on all-dielectric transmissive Pancharatnam Berry phase coding metasurfaces in the visible range // *Optics Express*. – 2020. – Vol. 28, No. 21. – P. 32107-32123. – <https://doi.org/10.1364/OE.409509>.
11. Wu X. *et al.* Ultra-broadband Pancharatnam-Berry phase metasurface for arbitrary rotation of linear polarization and beam splitter // *Optics express*. – 2022. – Vol. 30, No. 9. – P. 15158-15171. – <https://doi.org/10.1364/OE.456393>.
12. Li B. Q. *et al.* Electromagnetic Scattering Suppression Based on Multi-beam OAM Metasurface // 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2022. – P. 1-3. – <https://doi.org/10.1109/ICMMT55580.2022.10023076>.
13. Liu Q. *et al.* RCS reduction metasurface based on orbital angular momentum // *Results in Physics*. – 2023. – Vol. 53. – P. 107008. – <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107008>.
14. Semenikhin A.I. *et al.* Wide-Angle Broadband Cancellation of Scattering from Metasurfaces with OAM and Combined Phase Profiles // 2024 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). – IEEE, 2024. – P. 077-080. – <https://doi.org/10.1109/ICEAA61917.2024.10701700>.
15. Семенихин А.И., Семенихина Д.В. Метаповерхности Патчаратнама-Берри с генерацией углового орбитального момента и комбинированным фазовым кодированием для широкополосного широкоугольного снижения ЭПР // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 5. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.9>.
16. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V. Digital Pancharatnam-Berry metasurfaces with 1-bit OAM-modules for broadband RCS reduction // 2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). – IEEE, 2023. – P. 019-023. – <https://doi.org/10.1109/ICEAA57318.2023.10297857>.
17. Yu H., Su J., Li Z. High-gain lens antenna using transmissive phase gradient metasurface // 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). – IEEE, 2018. – P. 1032-1036. – <https://doi.org/10.1109/CompComm.2018.8780901>.
18. Sun G. C. *et al.* Exciting Extended Bound States in the Continuum in Symmetry-Broken Scalable All Dielectric THz Metasurface // 2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). – IEEE, 2023. – P. 1-2. – <https://doi.org/10.1109/CSRSWTC60855.2023.10426942>.
19. Yang Y., Zhang W. Low Sidelobe Level Transmitarray Antenna Using Hexagonal Unit Cell // 2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). – IEEE, 2023. – P. 1-3. – <https://doi.org/10.23919/ACES-China60289.2023.10250043>.
20. Zou Q. *et al.* An Orthogonal Circular Polarization Converting Transmitarray Using Hexagonal Arrangement // 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2024. – Vol. 1. – P. 1-3. – <https://doi.org/10.1109/ICMMT61774.2024.10671830>.
21. Zhang W. *et al.* Broadband metasurface antenna using hexagonal loop-shaped unit cells // *IEEE access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 223797-223805. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043656>.
22. Du J. *et al.* Optical vortex array: generation and applications // *Chinese Optics Letters*. – 2024. – Vol. 22, No. 2. – P. 020011. – <https://opg.optica.org/col/abstract.cfm?URI=col-22-2-020011>.
23. Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications // *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-section A*. – New Delhi: Springer India, 1956. – Vol. 44, No. 6. – P. 398-417. – <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03046095>.
24. Berry M.V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1984. – Vol. 392, No. 1802. – P. 45-57. – <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1984.0023>.

REFERENCES

1. Dai H., Zhao Y., Yu C. A multi-elements chessboard random coded metasurface structure for ultra-wideband radar cross section reduction, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 56462-56468. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977630>.
2. Al-Nuaimi M.K.T., Hong W., He Y. Design of diffusive modified chessboard metasurface, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, Vol. 18, No. 8, pp. 1621-1625. Available at: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2925378>.
3. Klimov A.V., Semenikhin A.I. Modeli širokopolosnykh otrazhatel'nykh polarizatorov s ispol'zovaniem metamaterialov [Models of broadband reflective polarizers using metamaterials], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 151-156.
4. Chen W. *et al.* Broadband polarization conversion metasurface for radar cross section reduction, 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2018, pp. 1-3. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563649>.

5. Dong G. et al. Wideband polarization-independent anomalous reflection mediated by metasurface, *2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*. IEEE, 2016, pp. 753-755. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2016.7834068>.
6. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V. Wideband phase gradient metasurfaces with anomalous diffuse scattering to reduce RCS for linear and circular polarizations, *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. IEEE, 2021, pp. 261-264. Available at: <https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494040>.
7. Chen K. et al. Geometric phase coded metasurface: from polarization dependent directive electromagnetic wave scattering to diffusion-like scattering, *Scientific reports*, 2016, Vol. 6, No. 1, pp. 35968. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep35968>.
8. Semenikhin A.I., Klimov A.V., Savitskiy A.N. Anizotropnaya impedansnaya tsilindricheskaya metapoverkhnost' dlya samoadaptivnogo gasheniya rasseyannykh voln lyubykh polarizatsiy [Anisotropic impedance cylindrical meta-surface for self-adaptive suppression of scattered waves of any polarizations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 6, pp. 258-267. Available at: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-6-258-267>.
9. Chen H.T., Taylor A.J., Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications, *Reports on progress in physics*, 2016, Vol. 79, No. 7, pp. 076401. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/79/7/076401>.
10. Tian Y. et al. Manipulation of the arbitrary scattering angle based on all-dielectric transmissive Pancharatnam Berry phase coding metasurfaces in the visible range, *Optics Express*, 2020, Vol. 28, No. 21, pp. 32107-32123. – <https://doi.org/10.1364/OE.409509>.
11. Wu X. et al. Ultra-broadband Pancharatnam-Berry phase metasurface for arbitrary rotation of linear polarization and beam splitter, *Optics express*, 2022, Vol. 30, No. 9, pp. 15158-15171. Available at: <https://doi.org/10.1364/OE.456393>.
12. Li B. Q. et al. Electromagnetic Scattering Suppression Based on Multi-beam OAM Metasurface, *2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. IEEE, 2022, pp. 1-3. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICMMT55580.2022.10023076>.
13. Liu Q. et al. RCS reduction metasurface based on orbital angular momentum, *Results in Physics*, 2023, Vol. 53, pp. 107008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107008>.
14. Semenikhin A.I. et al. Wide-Angle Broadband Cancellation of Scattering from Metasurfaces with OAM and Combined Phase Profiles, *2024 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. IEEE, 2024, pp. 077-080. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICEAA61917.2024.10701700>.
15. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V. Metapoverkhnosti Patcharatnama-Berri s generatsiey uglovogo orbital'nogo momenta i kombinirovannykh fazovym kodirovaniem dlya shirokopolosnogo shirokougol'nogo snizheniya EPR [Patcharatnam-Berry metasurfaces with angular orbital momentum generation and combined phase encoding for broadband wide-angle RCS reduction], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2024, No. 5. Available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.9>.
16. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V. Digital Pancharatnam-Berry metasurfaces with 1-bit OAM-modules for broadband RCS reduction, *2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. IEEE, 2023, pp. 019-023. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICEAA57318.2023.10297857>.
17. Yu H., Su J., Li Z. High-gain lens antenna using transmissive phase gradient metasurface, *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, 2018, pp. 1032-1036. Available at: <https://doi.org/10.1109/CompComm.2018.8780901>.
18. Sun G. C. et al. Exciting Extended Bound States in the Continuum in Symmetry-Broken Scalable All Dielectric THz Metasurface, *2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*. IEEE, 2023, pp. 1-2. Available at: <https://doi.org/10.1109/CSRSWTC60855.2023.10426942>.
19. Yang Y., Zhang W. Low Sidelobe Level Transmitarray Antenna Using Hexagonal Unit Cell, *2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China)*. IEEE, 2023, pp. 1-3. Available at: <https://doi.org/10.23919/ACES-China60289.2023.10250043>.
20. Zou Q. et al. An Orthogonal Circular Polarization Converting Transmitarray Using Hexagonal Arrangement, *2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. IEEE, 2024, Vol. 1, pp. 1-3. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICMMT61774.2024.10671830>.
21. Zhang W. et al. Broadband metasurface antenna using hexagonal loop-shaped unit cells, *IEEE access*, 2020, Vol. 8, pp. 223797-223805. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043656>.
22. Du J. et al. Optical vortex array: generation and applications, *Chinese Optics Letters*, 2024, Vol. 22, No. 2, pp. 020011. Available at: <https://opg.optica.org/col/abstract.cfm?URI=col-22-2-020011>.

23. Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications, *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-section A*. New Delhi: Springer India, 1956, Vol. 44, No. 6, pp. 398-417. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03046095>.
24. Berry M.V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1984, Vol. 392, No. 1802, pp. 45-57. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1984.0023>.

Семенihin Андрей Илларионович – Южный федеральный университет; e-mail: anilsem@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89061831649; кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент; SPIN: 5609-3793.

Семенихина Диана Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: d_semenikhina@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89094412058; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; SPIN: 8694-5179.

Зыкина Анна Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: a.zikina@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89615866362; магистрант.

Semenikhin Andrey Illarionovich – Southern Federal University; e-mail: anilsem@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79061831649; the department of A&RTD; associate professor; SPIN: 5609-3793.

Semenikhina Diana Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: d_semenikhina@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79094412058; the department of A&RTD; professor; SPIN: 8694-5179.

Zikina Anna Mihailovna – Southern Federal University; e-mail: a.zikina@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79615866362; magister.

УДК 621.396.677.3

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-218-224

В.О. Игнатович, Н.Н. Кисель

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ МИМО-АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

Представлены результаты комплексного исследования характеристик микрополосковой МИМО-антенной системы, предназначенной для использования в телекоммуникационных средствах пятого поколения в диапазоне частот $n79$ (4,4–5,0 ГГц). Целью исследования являлась разработка компактной антенной решётки конфигурации 1×2 на единой диэлектрической подложке и оценка её электродинамических свойств с учётом факторов, способных оказывать влияние на параметры согласования и излучения в реальных условиях эксплуатации. Конструкция антенны включает два излучателя, четыре порта возбуждения и модифицированный слой заземления, обеспечивающий расширенную функциональность и устойчивость рабочих характеристик. В ходе численного моделирования установлено, что предложенная антенная система обеспечивает стабильные значения коэффициента стоячей волны, высокий коэффициент усиления и согласованные диаграммы направленности во всём рабочем диапазоне частот. Особое внимание уделено анализу влияния внешних воздействий, в частности попадания тонкой водяной плёнки на поверхность излучателя. Показано, что присутствие влаги приводит к росту КСВ более чем на 0,5, снижению КПД и ухудшению направленных свойств антенны на верхней границе диапазона, что подчёркивает необходимость использования защитных конструктивных решений при эксплуатации изделия. Дополнительно исследована корректность замены меди идеальным проводником при моделировании. Разница в значениях КСВ не превышает 0,006, что подтверждает возможность применения такого упрощения на этапах предварительного проектирования без существенной потери точности. Экспериментальный образец антенны был изготовлен и испытан в лабораторных условиях. Полученные экспериментальные данные продемонстрировали высокую степень совпадения с результатами численного моделирования, что подтверждает валидность предложенной математической модели и практическую применимость разработанной МИМО-антенной системы в инфраструктуре сетей связи нового поколения.

МИМО антенны; микрополосковые антенны; мобильная связь; 5G; антенные решетки; телекоммуникационные системы.