

Численное исследование метаповерхностей Панчаратнама–Берри с круглой апертурой с ячейками типа пчелиная сота и генерацией ОАМ

А. И. Семенихин¹, Д. В. Семенихина², А. М. Зыкина³

*Институт радиотехнических систем и управления
Южный федеральный университет*

¹anilsem@mail.ru, ²d_semenikhina@mail.ru, ³a.zikina@yandex.ru

Аннотация. Численно исследованы возможности управления характеристиками рассеяния, орбитальным угловым моментом метаповерхностей Панчаратнама–Берри с круглой апертурой с ячейками типа пчелиная сота. Спроектированы четыре модели метаповерхностей с метачастицами в виде перфорированных полосков с генерацией мод орбитального углового момента минус первого и плюс третьего порядков. Симуляция рассеяния волн при нормальном падении показала, что модели метаповерхностей эффективно снижают поле обратного рассеяния в полосе 8,4–20,4 ГГц. В рассеянном поле наблюдается эффект генерации двух соосных вихревых волн с модами орбитального углового момента одного порядка.

Ключевые слова: метаповерхность Панчаратнама–Берри, ячейка пчелиная сота, орбитальный угловой момент (ОАМ), круглая апертура, ОАМ-антенна

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все больше исследуется применение фазовых метаповерхностей (МП) Панчаратнама–Берри (ПБ) для снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) и управления поляризационными и фазовыми характеристиками рассеяния [1]–[6]. Снижение ЭПР достигается за счет генерации в рассеянном поле фазового вихря [1]–[3] или решетки фазовых вихрей [4]–[6] с угловым орбитальным моментом (*orbital angular momentum*, ОАМ) и обнулением поля на оси вихрей. Как правило, ПБ-метаповерхности проектируются на основе единичных ячеек квадратной формы, например, [1]–[3]. Однако давно известно [6], что периодические структуры, образованные многогранными непрямоугольными элементарными ячейками, особенно, гексагональные периодические структуры, демонстрируют в ряде приложений лучшие свойства, чем структуры с квадратными ячейками. Тем не менее, МП с гексагональными ячейками проектируются гораздо реже, чем с квадратными. В частности, известно, что МП на основе ячеек типа пчелиная сота [7] обеспечивают широкую рабочую полосу и стабильные частотные характеристики для различных пространственных углов и поляризаций падающей электромагнитной волны. Авторы [8] предложили МП с гексагональными ячейками и комбинированным фазовым профилем для генерации ОАМ-моды $k = 4$ с уменьшенным уровнем обратно рассеянного поля на оси вихря.

Апертуры МП круглой формы исследуются реже. Авторы [9] считают, что такая форма метаповерхности вдохновляется самой природой и имеет ряд преимуществ перед традиционной прямоугольной формой, повышает диффузию рассеяния и чистоту генерируемых вихревых лучей. Действительно, круглые аperiодические 1-битные и 2-битные ПБ-метаповерхности из квадратных ячеек, размещенных вдоль спиралей, как в семенах подсолнечника [10], [11], продемонстрировали хорошую диффузию рассеяния, которая сохраняется при угле наклона падения до 60°. В [12] рассмотрен проект ОАМ-антенны на основе МП с круглой апертурой, которая генерирует конусообразный вихревой луч с высокой азимутальной симметрией и чистотой ОАМ.

В настоящей работе мы численно исследовали возможности непоглощающих ПБ-метаповерхностей с гексагональными единичными ячейками типа пчелиная сота вместо традиционных квадратных ячеек. Мы проектируем МП с круглой апертурой и генерацией ОАМ. Симуляция характеристик рассеяния кополяризованных и кросс-поляризованных волн круговой поляризации (circular polarized, CP-волн) выполнена в HFSS в случае нормального падения плоских CP-волн.

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ПБ-ЯЧЕЙКИ

Геометрия единичной ПБ-ячейки показана на рис. 1. Она содержит экранированную подложку F4b2 ($\epsilon = 2,65$; $\tan \delta = 0,001$) толщиной 3 мм и метачастицу толщиной 0,035 мм в виде перфорированного полоска с тремя вырезами. Диаметр описанной окружности гексагональной ячейки равен $D = 12,8$ мм. Угол поворота β метачастицы отсчитывается от оси x .

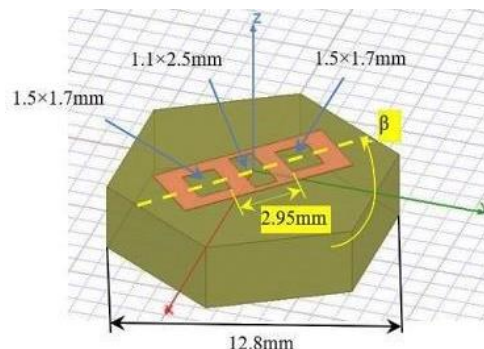


Рис. 1. Единичная ячейка типа пчелиная сота

В соответствии с теорией геометрической ПБ-фазы метачастицы должны создавать в канале Флоке противозазное отражение собственных волн линейных поляризаций независимо от угла поворота β . Это

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.

условие гарантирует отражение СР-волн без деполаризации и линейный закон изменения ПБ-фазы

$$\psi_{ПБ} = \pm 2\beta \quad (1)$$

право- (RCP) и лево- (LCP) поляризованных волн, соответственно.

Симуляция показала, что переход от квадратной ячейки МП [13] к гексагональной (более изотропной) улучшает требуемую поляризационную конверсию СР-волн при отражении и угло-частотные зависимости ПБ-фазы. «Сота» отражает ко-поляризованные RHCP-волны практически без деполаризации (поляризационные потери менее 0,35 дБ в полосе от 8,5 до 19,7 ГГц) независимо от угла поворота метачастиц (рис. 2а). Вращение мета-частицы реализует линейный закон изменения ПБ-фазы от угла β в полосе от 8 до 20 ГГц (рис. 2б). В квадратной ячейке этот закон может отличаться от линейного [13].

III. МОДЕЛИ КРУГЛЫХ МП С ГЕНЕРАЦИЕЙ ОАМ

Модели МП содержат по 82 ячейки типа пчелиная сота в апертуре диаметром 120 мм (рис. 3). Белым цветом на рис. 3 обозначены ячейки, не входящие в апертуру и не учитываемые при ее проектировании. Фазовые профили моделей проектировались для генерации в рассеянном поле вихревых волн с разным порядком ОАМ-мод.

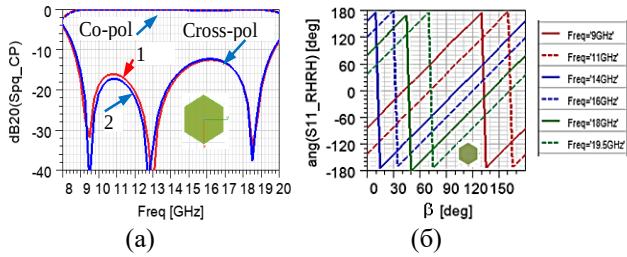


Рис. 2. Частотные зависимости амплитуд отражения СР-волн в «соте» при углах $\beta=0^\circ$ (линия 1); 30° (линия 2) вдоль характерных осей симметрии ячейки (а) и линейный закон ПБ-фазы ко-поляризованного поля (б)

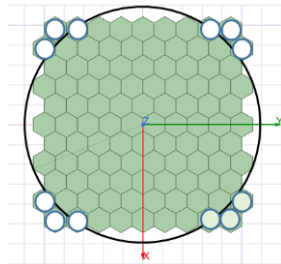


Рис. 3. Схема размещения 82-х ячеек типа пчелиная сота в круглой апертуре МП

Углы поворота метачастиц β в ячейках вычислялись по формуле [13]:

$$\beta(x_{mn}, y_{mn}) = 0.5 q \cdot \arctan\left(\frac{y_{mn}}{x_{mn}}\right) + \beta_0, \quad (2)$$

где x_{mn}, y_{mn} – координаты центра mn -й ячейки в системе координат, связанной с метаповерхностью; q – параметр, определяющий топологический заряд вихря; β_0 – начальный угол наклона метачастиц.

Здесь координаты центров ячеек равны:

$$x_{mn} = \frac{3}{4} D(m-5);$$

$$y_{mn} = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} D(n-4) & \text{для нечетных } m, \\ \frac{\sqrt{3}}{2} D(n-4,5) & \text{для четных } m. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 4 показана топология четырех спроектированных нами моделей $M0p$, $M90p$, $M0n$, $M90n$. Они отличаются параметрами $\beta_0 = 0^\circ; 90^\circ$ и $q = \pm 2$. Обозначение p (positive) соответствует $q > 0$, а n (negative) $q < 0$.

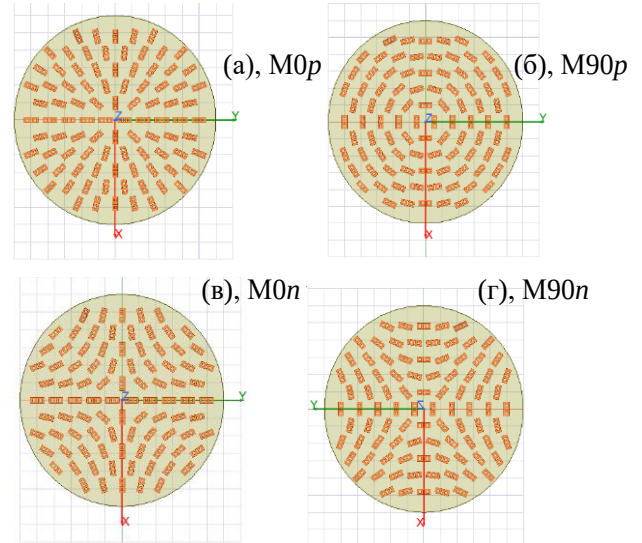


Рис. 4. Топология метачастиц моделей круглых апертур МП

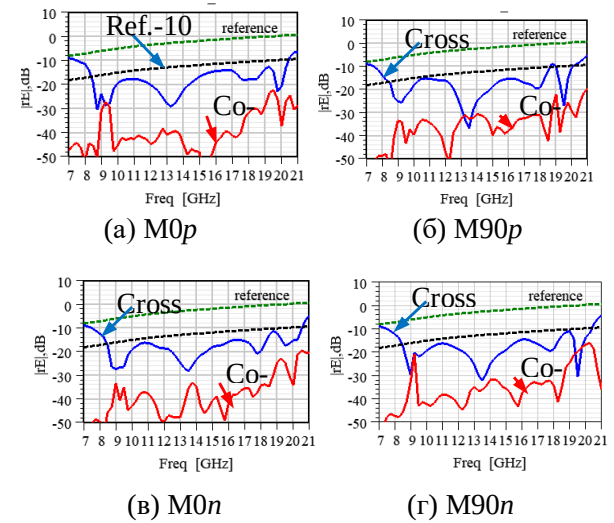


Рис. 5. Гашение обратного рассеяния СР-волн от МП

IV. ГАШЕНИЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ И ЭФФЕКТ ГЕНЕРАЦИИ ДВУХ СООСНЫХ ВИХРЕЙ С ОДИНАКОВЫМИ ОАМ-МОДАМИ

Результаты симуляции характеристик рассеяния МП приведены на рис. 5–8 в случае нормального падения волны левой круговой поляризации. Симуляция показала, что апертуры $M0p$, $M0n$ и $M90n$ гасят обратно рассеянное кросс-поляризованное поле на 10 дБ и более (относительно эталона) в полосе частот 8,4 – 20,4 ГГц, а метаповерхность $M90p$ на 8,5 дБ и более в полосе 8,5–20 ГГц (рис. 5; зеленые линии – кросс-поляризованное поле эталона).

На рис. 6 представлены характерные диаграммы рассеяния ко-поляризованных полей вихревых волн двух апертур $M0p$ и $M0n$. Амплитудные диаграммы рассеяния

апертур $M90p,n$ и $M0p,n$ примерно совпадают и имеют нуль поля на оси вихрей. Фазовые диаграммы рассеяния МП с $\beta_0 = 90^\circ$ и $\beta_0 = 0^\circ$ отличаются поворотом вокруг оси на азимутальный угол 180° и характеризуют противофазные вихри. Они могут быть использованы при проектировании гибридных ПБ-метаповерхностей с малой ЭПР [4], [5].

В рассеянном поле апертур мы обнаружили эффект генерации двух соосных конусообразных вихрей с одинаковыми ОАМ-модами $k = -1$ для апертур $M0p$, $M90p$ и $k = +3$ для $M0n$, $M90n$ (рис. 6–8). Центральный вихрь генерируется в сверхширокой полосе частот;

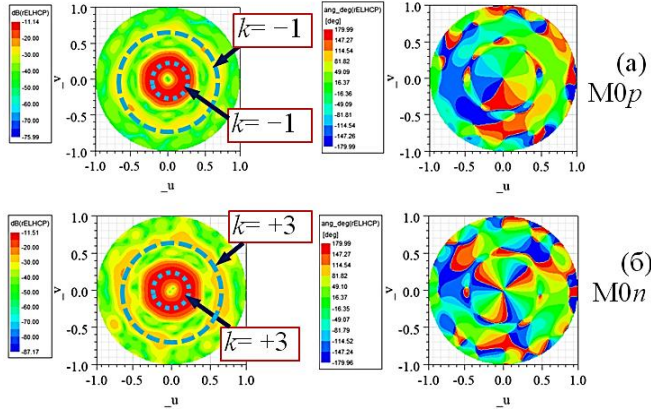


Рис. 6. 2D амплитудные (слева) и фазовые (справа) диаграммы рассеяния моделей $M0p$, $M0n$ (на частоте 14 ГГц)

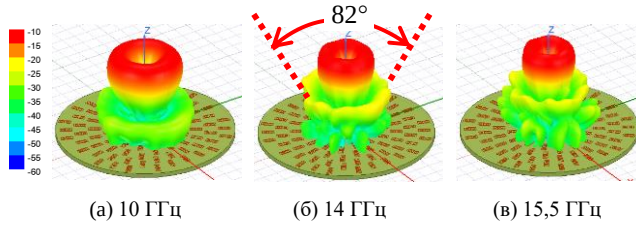


Рис. 7. Диаграммы рассеяния модели $M0p$ с двумя соосными вихрями с ОАМ-модами минус 1-го порядка на частотах 10, 14 и 15,5 ГГц

второй менее интенсивный боковой вихрь появляется на частотах 9,75 – 15,5 ГГц (рис. 7). Для всех моделей угол раствора конуса центрального вихря на средней частоте 14 ГГц составляет около 28° , для второго вихря он примерно равен 82° (рис. 7б).

На рис. 8 приведены результаты исследования чистоты ОАМ-мод, создаваемых апертурами $M0p$ и $M0n$. Моды ОАМ рассчитывались в дальней зоне для двух окружностей вокруг оси z (с углами $\theta = 14^\circ$ и $\theta = 41^\circ$), показанных на рис. 6 пунктирными линиями.

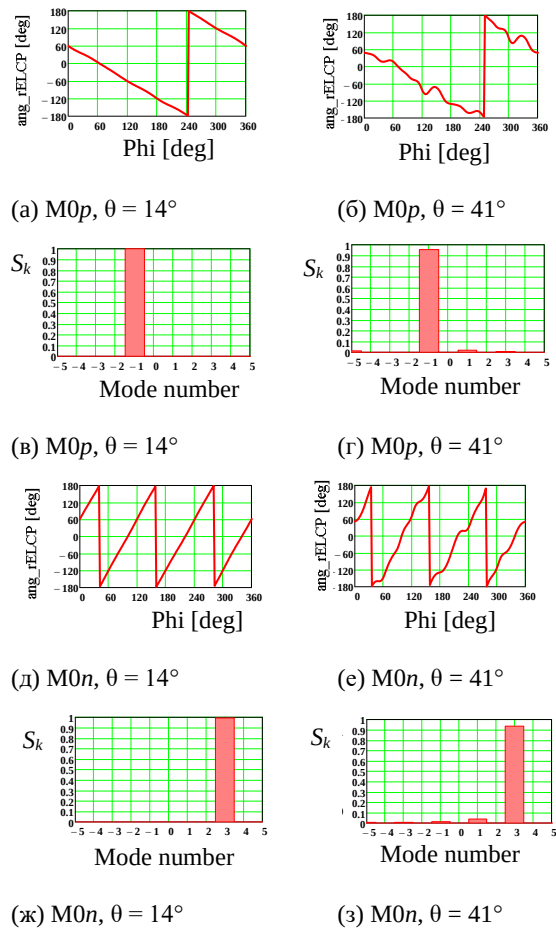


Рис. 8. Азимутальные зависимости фаз ко-поля моделей $M0p$ (а, б) и $M0n$ (д, е) в двух вихрях $\theta = 14^\circ$ и $\theta = 41^\circ$ и спектры S_k ОАМ-мод (в, г, ж, з) на частоте 14 ГГц

Энергетический вес S_k ОАМ-мод определяется преобразованием Фурье [14] азимутального распределения ко-поляризованного поля при углах θ , равных углам раствора вихрей (рис. 8). Видно, что соосные вихри имеют одинаковый порядок основной моды, но разную чистоту. Чистота моды центрального вихря составляет около 100%. Эффект генерации соосных вихрей с ОАМ-модами одного порядка может быть особенностью круглых апертур.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье мы численно исследовали возможности ПБ-метаповерхностей с круглой апертурой, состоящей из ячеек гексагональной формы с метачастицами в виде перфорированных полосков. Были спроектированы четыре метаповерхности, отличающиеся генерацией ОАМ-мод разного порядка. Симуляция характеристик рассеяния показала, что МП эффективно снижают кросс-поляризованное поле обратного рассеяния (на 10 дБ и более) в полосе 8,4–20,4 ГГц. Обнаружен эффект генерации двух соосных вихревых волн с ОАМ-модами одного порядка. Полученные результаты будут полезны при проектировании широкополосных метаповерхностей с генерацией ОАМ, предназначенных для снижения ЭПР, создания ОАМ-антенн и ОАМ-отражателей в различных микроволновых и беспроводных приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Li B.-Q., Hu L.-L., Meng S.-S., Yue Q.-M., Zhu C. Electromagnetic Scattering Suppression Based on Multi-beam OAM Metasurface // 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2022. C. 1-3, doi: 10.1109/ICMMT55580.2022.10023076.
- [2] Liu Q., Chen H., Yan Y., Yao X., Liang D., Xie J., Deng L. RCS reduction metasurface based on orbital angular momentum // Results in Physics. 2023. T. 53. C. 107008. doi: 10.1016/j.rinp.2023.107008.
- [3] Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Y. V., Zikina A. M. 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. C. 077-080, doi: 10.1109/ICEAA61917.2024.10701700.
- [4] Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Pancharatnam-Berry Metasurfaces Based on In-Phase and Anti-phase OAM-Modules for Broadband RCS Reduction // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) IEEE, 2023. C. 296-299, doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10201940.
- [5] Semenikhin A. I. Semenikhina D. V., Yukhanov Y. V. Digital PB-metasurfaces Based on 2-bit OAM Modules for Wide-angle RCS Reduction // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). IEEE, 2024. C. 1-7, doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618495.
- [6] Zhuo W., Sun S., He Q., Zhou L. A review of high-efficiency Pancharatnam-Berry metasurfaces // Terahertz Science and Technology. 2020. T. 13. №. 3. C. 73-89., doi:10.1051/tst/2020133073.
- [7] Zou Q., Xiao P., Chu H., Ning Y., Lin Y., Li G. An Orthogonal Circular Polarization Converting Transmitarray Using Hexagonal Arrangement // 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2024. T. 1. C. 1-3, doi: 10.1109/ICMMT61774.2024.10671830.
- [8] Yang D., Yang G., Zhang K., Yuan Y., Wu Q. A Low Sidelobe Level Along Direction of Propagation 4-Order OAM Beam Generated by Hexagonal Reflective Metasurface // 2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). IEEE, 2023. C. 1-4, doi: 10.23919/ACES-China60289.2023.10250149.
- [9] Al-Nuaimi M.K.T., Huang G.L. Nature Inspired Deterministic Aperiodic Metasurface for EM-Wave Focusing, Diffusion, and OAM Generation at Microwave Regime // 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2022. C. 1-2, doi: 10.1109/ICMMT55580.2022.10022588.
- [10] Al-Nuaimi M.K.T., Hong W., Whittow W. G. Wideband radar-cross-section reduction using parabolic phased metasurfaces // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2023. T. 22. №. 7. C. 1547-1551, doi: 10.1109/LAWP.2020.2980906/
- [11] Al-Nuaimi M.K.T., Li X. -D., Liu H. -L., Chen R. -S., Huang G. -L. 1-bit and 2-bit Aperiodic Metasurfaces for RCS Reduction and EM Wave Diffusion // 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2022. C. 1-3, doi: 10.1109/ICMMT55580.2022.10023255.
- [12] Veysi M., Guclu C., Capolino F., Rahmat-Samii Y. Revisiting orbital angular momentum beams: Fundamentals, reflectarray generation, and novel antenna applications // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2018. T. 60. №. 2. C. 68-81, doi:10.1109/MAP.2018.2796439.
- [13] 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. C. 019-023, doi: 10.1109/ICEAA57318.2023.10297857.
- [14] Jack B., Padgett M. J., Franke-Arnold S. Angular diffraction // New Journal of Physics. 2008. T. 10. №. 10. C. 103013, doi:10.1088/1367-2630/10/10/103013.