

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.10>

УДК: 621.371: 538.574

2-БИТНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ ПАТЧАРАТНАМА-БЕРРИ С ГЕНЕРАЦИЕЙ, ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ И ГАШЕНИЕМ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СНИЖЕНИЯ ЭПР

А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина

Южный Федеральный Университет,
Институт радиотехнических систем и управления,
347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Статья поступила в редакцию 1 января 2024 г.

Аннотация. Рассмотрено снижение эффективной площади рассеяния (ЭПР) с помощью непоглощающих цифровых метаповерхностей (МП) Патчаратнама-Берри (*Pancharatnam-Berry* –PB), состоящих из 2-битных модулей с генерацией, интерференцией и гашением вихревых электромагнитных волн с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Каждый модуль имеет спиральный профиль PB-фазы и обладает вихревым рассеянием. Единичные ячейки модулей содержат экранированную диэлектрическую подложку и мета-частицы в виде тройных связанных сплит-ринг резонаторов. Цифровые модули отличаются 2-битным кодированием начального угла наклона мета-частиц 0° , 45° , 90° и 135° . Целью работы является численный анализ генерации противофазных вихревых лучей (*vortex beams* – VBs) ОУМ-модулями и оценка влияния интерференции и гашения противофазных вихрей на структуру и порядок ОУМ результирующего поля и снижение ЭПР трех цифровых МП в виде 2×2 решеток 2-битных ОУМ-модулей разных размеров с разным топологическим зарядом. Характеристики рассеяния

исследуются в HFSS методом конечных элементов для нормально падающих волн круговой поляризации. Симуляция показала, что наложение фазовых вихрей модулей формирует в диаграммах рассеяния ко-поляризованного поля МП главный осевой вихрь и N дополнительных интерференционных боковых ближних и дальних вихрей. Число таких вихрей больше для МП большего размера ($N = 24$ на частоте 14 ГГц). Интерференционные вихревые лучи создают фазовые сингулярности и обнуляют результирующее поле в N боковых направлениях, распределенных по всей передней полусфере. Интенсивные моды ОУМ главных вихревых лучей МП имеют четвертый или восьмой порядок. Моды ОУМ соседних интерференционных VBs, как правило, отличаются знаком. Предложенные 2-битные МП обеспечивают более широкоугольное фазовое гашение вихрей (по сравнению с 1-битными МП) и, как следствие, более лучшее диффузное рассеяние результирующего поля МП, что важно для снижения ЭПР.

Ключевые слова: метаповерхность, фаза Панчаратнам-Бэрри, орбитальный угловой момент (ОУМ), вихревой луч, интерференция и гашение ОУМ, снижение ЭПР.

Финансирование: Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, Таганрог, по гранту Российского научного фонда (Проект №22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>).

Автор для переписки: Семенихина Диана Викторовна, d_semenikhina@mail.ru

Введение

Для снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) блестящих участков объектов применяют непоглощающие изотропные и анизотропные метаповерхности (МП), реализующие различные механизмы снижения ЭПР, например, диффузное и аномальное рассеяние [1]-[2], деструктивную интерференцию и поляризационные преобразования [3]-[8]. Среди МП, реализующих сверхширокополосное снижения ЭПР, можно выделить

цифровые МП, которые строят из модулей (элементов), имеющих размеры, сравнимые со средней рабочей длиной волны в свободном пространстве.

Цифровые МП также применяются для генерации вихревых лучей (VB) с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [9]-[10]. Такие МП содержат кодированные 1-битные или 3-битные мета-частицы. Способ кодирования и резонансные свойства мета-частиц определяют полосу частот, в которой генерируется отраженная ОУМ-волна [11].

Метаповерхности с широкополосной генерацией ОУМ проектируются на основе бездисперсионной фазы Панчаратнама-Берри (*Pancharatnam-Berry* – PB) для волн круговых поляризаций (*circularly polarized waves* – CP-волн) [12]-[14]. В [12] предложена метаповерхность на основе двухслойных мета-частиц (в виде мульти-диполей), имеющая несовпадающие фазы отражения для двух ортогональных поляризаций облучения. МП генерирует вихревой луч в полосе от 6,95 до 18 ГГц (82 %) для любой поляризации падающей волны в секторе углов падения до 60° . В [13] проектируется МП из мета-частиц в виде прямоугольных рамок для генерации ОУМ целочисленного ($l = -3$), дробного ($l = -1,5$) и высокого ($l = -10$) порядков в полосе частот от 6,75 до 21,85 ГГц (105%). Суперпозиция в апертуре МП различных фазовых профилей (например, спиральных и 1-битных профилей), может обеспечить генерацию нескольких ОУМ мод разного порядка в разных заданных направлениях [14].

Метаповерхности, рассеивающие вихревые волны со спиральным фазовым фронтом и ОУМ, начали применять для снижения ЭПР только в последние годы [15]-[17]. Механизм снижения ЭПР в этом случае заключается в обнулении дальнего поля на оси вихря за счет фазовой сингулярности поля.

Наши исследования ОУМ-метаповерхностей для снижения ЭПР [18]-[19] были направлены на проектирование ОУМ-модулей МП и исследование метаповерхностей, состоящих из решеток одинаковых или 1-битных модулей, которые генерировали ОУМ-волны с синфазными или противофазными вихрями. Симуляция характеристик рассеяния МП с такими цифровыми

модулями выявила сложные механизмы интерференции синфазных и противофазных вихрей и их влияние на порядок генерируемого ОУМ, а также на характеристики гашения рассеянного поля.

В этой статье мы продолжаем рассматривать новые фазовые механизмы широкополосного снижения ЭПР на основе генерации ОУМ, интерференции и гашения противофазных вихревых электромагнитных волн, отраженных от 2-битных метаповерхностей. Метаповерхности состоят из цифровых ОУМ-модулей со спиральным профилем РВ-фазы, вихревым рассеянием и генерацией интенсивных ОУМ мод первого и третьего порядка с фазовой сингулярностью и нулем поля в направлении обратного рассеяния. Модули отличаются размером, топологическим зарядом ОУМ и 2-битным кодированием начального угла наклона мета-частиц 0° , 45° , 90° и 135° . Целью работы является численный анализ генерации противофазных вихревых лучей ОУМ-модулями и оценка влияния интерференции и гашения противофазных вихрей на структуру и порядок ОУМ результирующего поля и снижение ЭПР трех цифровых МП в виде 2×2 решеток 2-битных модулей. Симуляция выполнена в HFSS.

1. Топология ОУМ-модулей

Структура РВ-ячейки (рис. 1) и ее характеристики рассмотрены в [20]. Ячейка имеет размер $p_1 = 5$ мм, содержит экранированную подложку ($\epsilon = 2,6$, $\text{tg}\delta = 0,0013$, $h = 3,175$ мм) и мета-частицу в виде тройных связанных сплит-ринг резонаторов с углом поворота β ($r_1 = 2,3$, $r_2 = 1,4$, $r_3 = 0,75$, $r_4 = 0,25$, $w_1 = 0,2$, $w_2 = 0,225$, $w_3 = 0,2$, $w_5 = 0,12$, $g_1 = 3,05$, $g_2 = 1,3$, $g_3 = 0,5$; все размеры в мм). Как показано в [18], мета-частица эффективно отражает ко-поляризованную (co-pol) компоненту правой (RCP) или левой (LCP) поляризаций для различных углов поворота β при нормальном падении СР-волн в канале Флоке в широкой полосе 8,5-19,2 ГГц, а фаза отражения co-pol компоненты при этом пропорциональна удвоенному углу β .

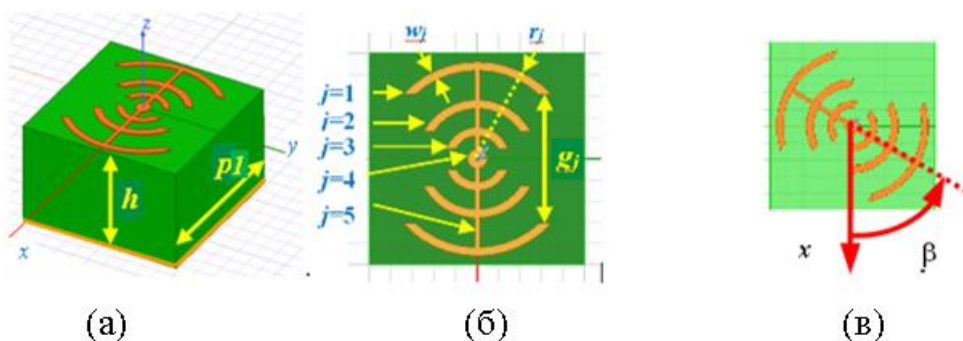


Рис. 1. РВ-ячейка (а), параметры (б) и угол поворота β (в).

На основе этих мета-частиц спроектировано 12 ОУМ-модулей (рис. 2). Модули, обозначенные как М1 и М2, имеют, соответственно, размер 40×40 мм и 50×50 мм и содержат 64 и 100 мета-частиц (внутренние и внешние пунктирные линии на рис. 2д-з).

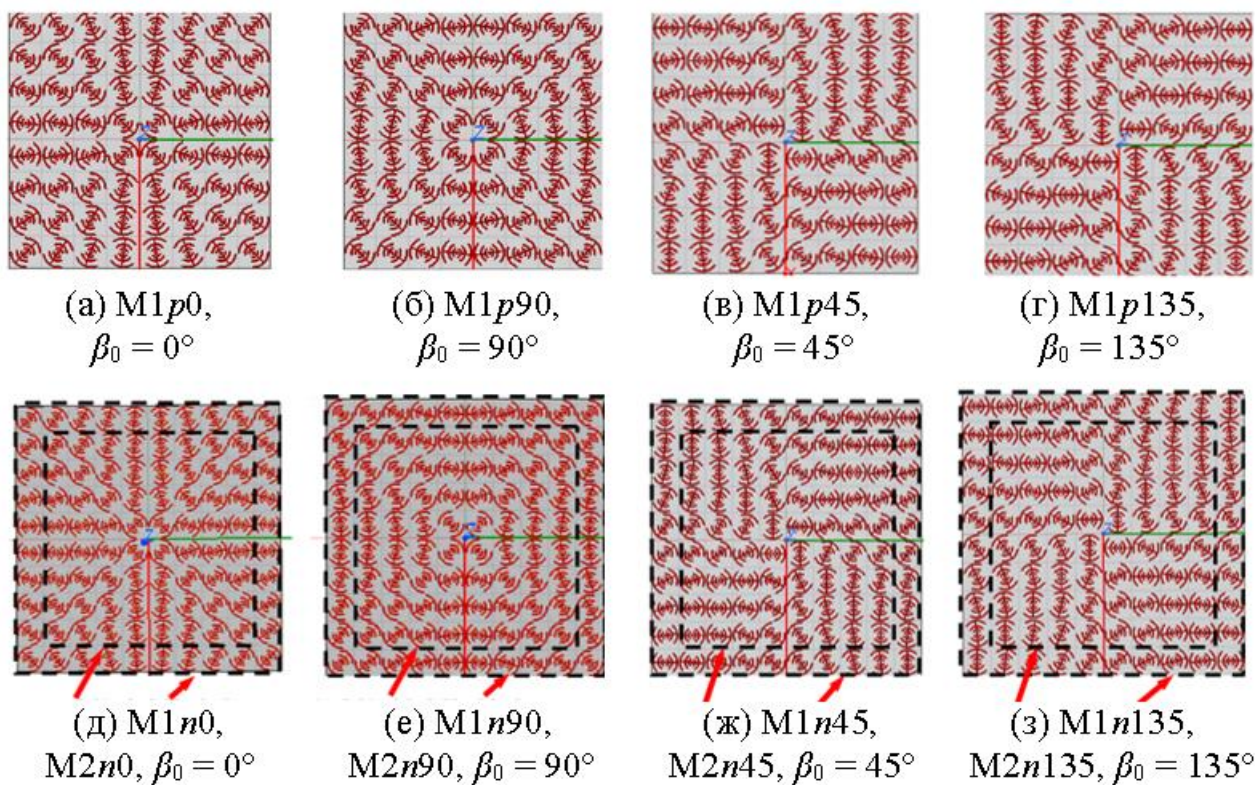


Рис. 2. Топология двенадцати ОУМ-модулей.

Углы поворота метачастиц в ячейках модуля рассчитывались по формуле:

$$\beta(x, y) = 0,5q \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \beta_0, \quad (1)$$

где x, y – координаты центра ячейки в локальной системе координат модуля; q – параметр, определяющий расчетный топологический заряд модуля [21]. Модули отличаются начальным углом наклона мета-частиц β_0 и параметром $q = +2$ или $q = -2$ (соответственно, обозначения p или n в названии модулей). Для реализации 2-битных модулей с четырьмя отличающимися профилями РВ-фазы мы кодировали начальный угол $\beta_0 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ (рис. 2).

Численно оценивалось влияние параметров q, β_0 и размеров модулей на характеристики рассеяния модулей М1 с параметром $q = +2$ (рис. 2а-г) и модулей М1 и М2 с параметром $q = -2$ (рис. 2д-з).

2. Характеристики рассеяния 2-битных ОУМ-модулей

Диаграммы рассеяния модулей представлены на рис. 3, 4 в случае нормального падения LCP-волны. Симуляция показала, что все 12 модулей генерируют вихревые ко-поляризованные волны с обнулением поля на оси вихрей в полосе частот от 8 до 21 ГГц. Размер модулей влияет на структуру амплитудных диаграмм рассеяния; угол раствора вихрей больше у модулей М1 меньшего размера. Фазовые диаграммы рассеяния принципиально отличаются для модулей с параметром $q = +2$ (типа p) или $q = -2$ (типа n). Типичные фазовые 2D-диаграммы рассеяния ко-поляризованного (ко-поля) таких модулей приведены на рис. 3. Модули типа p формируют фазовый вихрь с интенсивной модой ОУМ минус первого порядка $l = -1$ (рис. 3а, 4). Модули типа n генерируют интенсивную моду ОУМ третьего порядка $l = +3$ (рис. 3б). Симуляция учитывает электромагнитное взаимодействие между соседними повернутыми мета-частицами модуля.

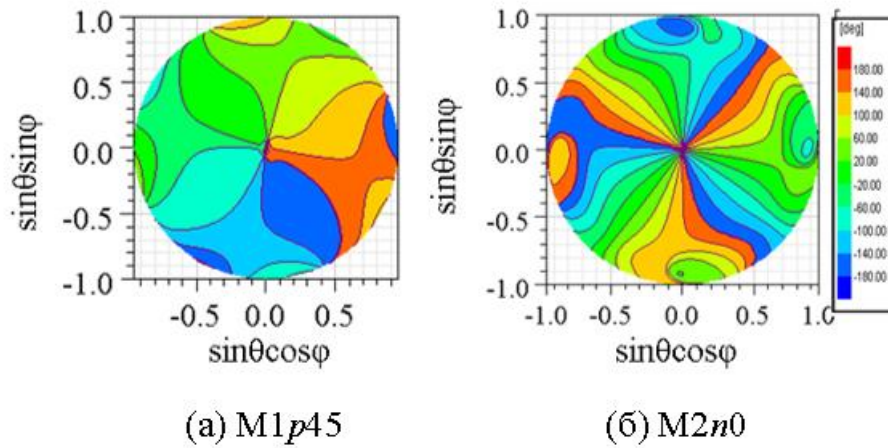


Рис. 3. Фазовые 2D-диаграммы ко-полей для M1p45 (а) и M2n0 (б) (14 ГГц).

Расчеты подтвердили, что 2-битное кодирование начального угла наклона β_0 мета-частиц в модулях обеспечивает противофазность генерируемых вихрей для любых азимутальных углов φ наблюдения дальнего поля модулей с $\beta_0 = 0^\circ$ и $\beta_0 = 90^\circ$ [17] и модулей с $\beta_0 = 45^\circ$ и $\beta_0 = 135^\circ$ (рис. 4).

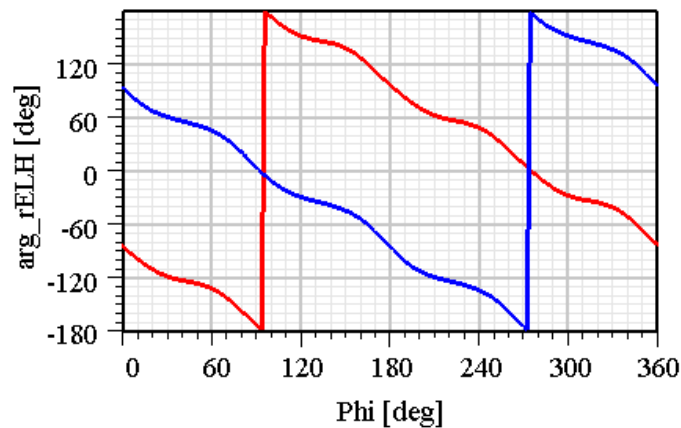


Рис. 4. Противофазные вихревые поля модулей M1p45 и M1p135 (16 ГГц).

3. Интерференционные вихревые лучи и гашение ОУМ в решетках 2-битных модулей

В этом разделе приведены результаты исследования трех 2-битных метаповерхностей MS1, MS2 и MS3 в виде 2×2 решеток, состоящих, соответственно, из ОУМ-модулей $M1p$, $M1n$ и $M2n$, (рис. 5). Характеристики рассеяния МП представлены на рис. 6-9 в случае нормального падения LCP-волны.

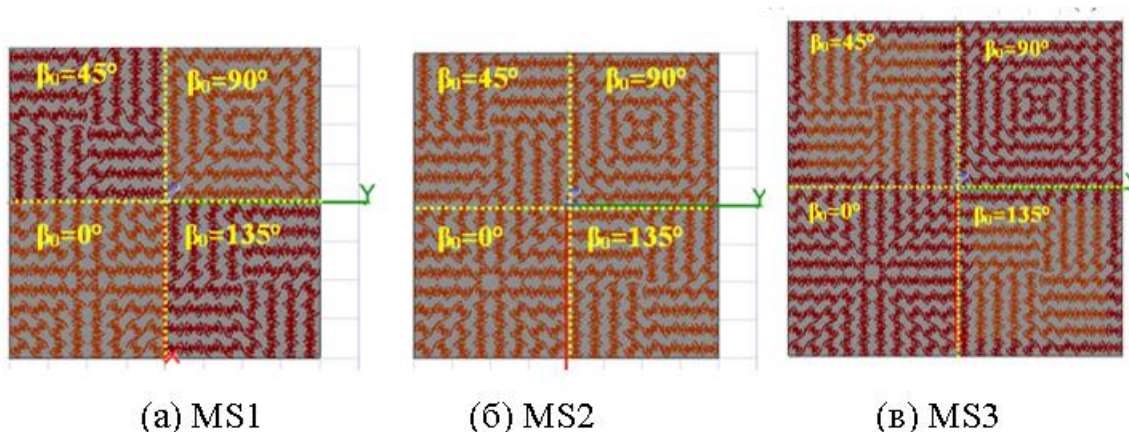


Рис. 5. Метаповерхности MS1, MS2, MS3 в виде 2×2 решеток 2-битных ОУМ-модулей $M1p$ (а), $M1n$ (б) и $M2n$ (в).

Симуляция показала, что наложение фазовых вихрей четырех ОУМ-модулей формирует в диаграммах рассеяния ко-поляризованного поля МП главный осевой вихрь (область белого кольца с обнулением поля на оси z на рис. 6а), а также N дополнительных интерференционных боковых ближних и дальних вихрей (соответственно, области квадратных и круглых колец на рис. 6а). Интерференционные вихревые лучи создают фазовые сингулярности и обнуляют результирующее поле в N боковых направлениях, распределенных по всей передней полусфере (рис. 6).

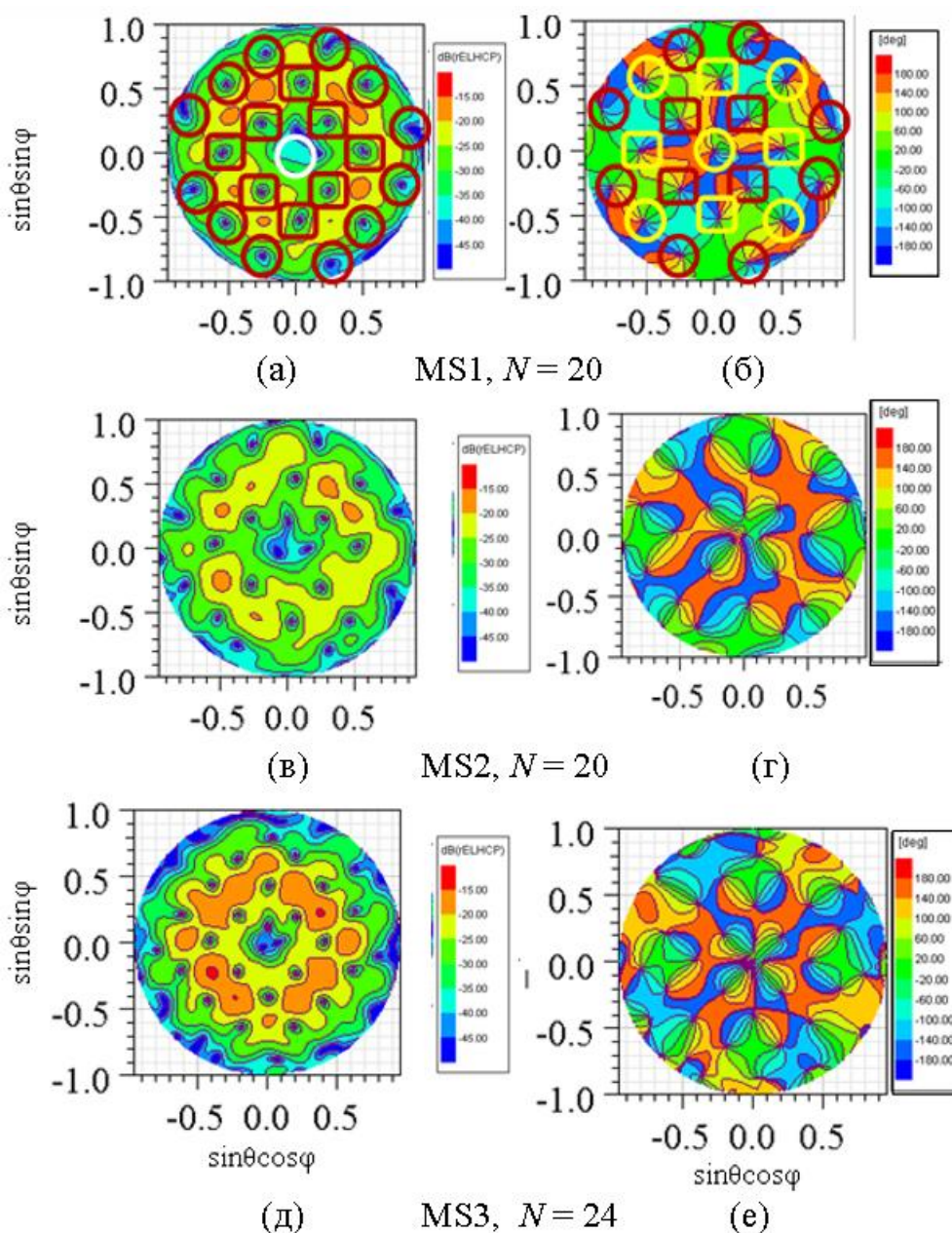


Рис. 6. Амплитудные (слева) и фазовые (справа) 2D-диаграммы рассеяния ко-поля MS1, MS2 и MS3 на частоте 14 ГГц.

Метаповерхности MS1 и MS2 из модулей с топологическим зарядом ОУМ разного знака имеют одинаковое число боковых вихрей $N = 20$ (рис. ба-г). Число таких вихрей больше для МП большего размера ($N = 24$ для MS3; рис. бд, е). Моды ОУМ соседних интерференционных VBs, как правило, отличаются знаком $l = -1$ и $l = +1$ (области красных и желтых колец на рис. бб, соответственно).

Азимутальные распределения фазы дальнего поля на конических поверхностях наблюдения с разным углом раствора θ на разных частотах

иллюстрируют сложную спектральную структуру мод ОУМ результирующего поля, рассеянного всей МП (рис. 7).

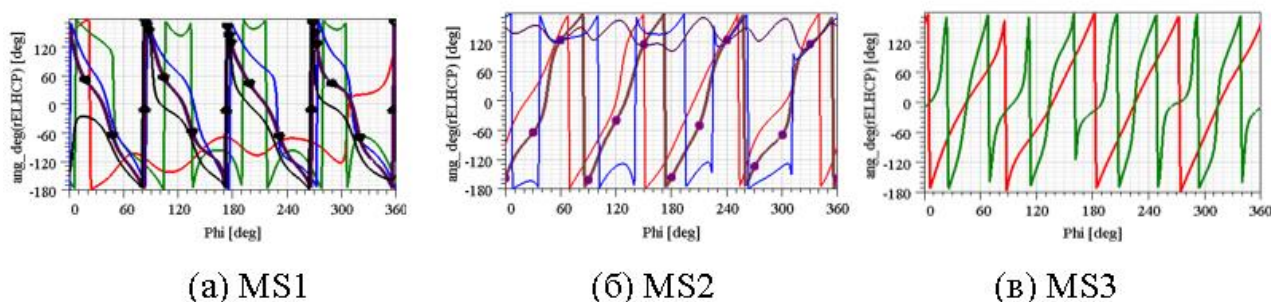


Рис. 7. Азимутальные распределения фазы дальнего поля МП на различных частотах f и конических поверхностях наблюдения с углом раствора θ :

(а) $\theta = 24^\circ$, — 10 ГГц, — 12 ГГц, — 14 ГГц, — 16 ГГц, — 18 ГГц;

(б) $\theta = 24^\circ$, — 10 ГГц, — 14 ГГц, — 16 ГГц;

(в) $f = 14$ ГГц, — $\theta = 10^\circ$, — $\theta = 40^\circ$.

Как видно, интенсивные моды ОУМ главных вихревых лучей MS1 и MS2 (рис. 7а, б) имеют четвертый порядок при $\theta = 24^\circ$ (для MS1 $l = -4$ на частотах $f > 14$ ГГц, для MS2 $l = +4$ на частотах $f < 14$ ГГц). Порядок мод зависит от угла раствора θ и для MS3 он может быть равен $l = +8$ при $\theta = 40^\circ$ (рис. 7в).

На рис. 8 приведены 3D-диаграммы рассеяния МП на частотах от 8 до 20 ГГц для MS1 (для MS2 и MS3 характер диаграмм принципиально не меняется). Противофазная природа вихревых лучей двух модулей с $\beta_0 = 0^\circ$ и 90° и двух модулей с $\beta_0 = 45^\circ$ и 135° обеспечивает более широкоугольное гашение вихрей (по сравнению с 1-битными МП [17]) и, как следствие, более лучшее диффузное рассеяние результирующего поля МП, что важно для снижения ЭПР.

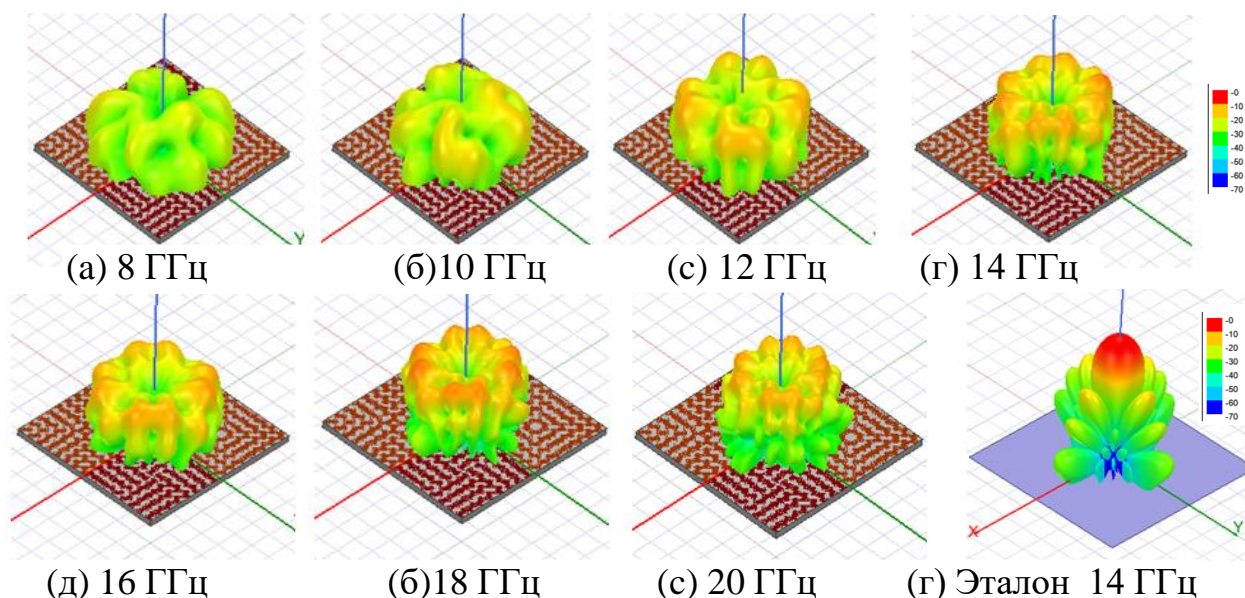


Рис. 8. 3D-диаграммы рассеяния (в дБ) ко-поля MS1.

Снижение моностатических ЭПР 2-битных метаповерхностей на ко-поляризации (ко-ЭПР) и кросс-поляризации (кросс-ЭПР) иллюстрирует рис. 9. Видно, что эффекты генерации, интерференции и гашения вихревых ОУМ-лучей уменьшают обратное рассеяние от МП на кросс-поляризации в широкой полосе частот, существенно подавляя ко-ЭПР (красные линии на рис. 9). Моностатическая кросс-ЭПР для СР-волн снижается на 9 дБ в полосе от 8 до 19,5 ГГц для MS3 и примерно в полосе от 10 до 19,5 ГГц для MS1 и MS2.

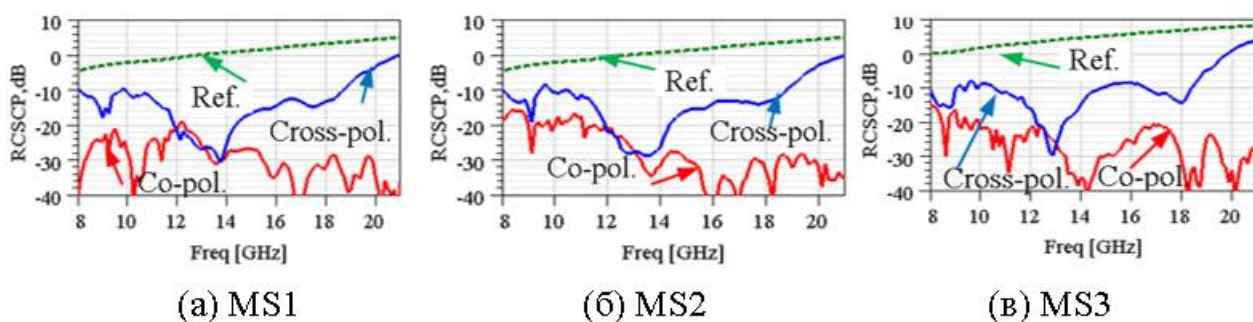


Рис. 9. Моностатические ко-ЭПР и кросс-ЭПР; зеленые пунктирные линии – кросс-ЭПР эталона (reference – Ref.).

Заключение

В статье проанализированы возможности широкополосного снижения ЭПР с помощью цифровых метаповерхностей Патчаратнама-Берри, состоящих из 2-битных модулей с генерацией, интерференцией и гашением противофазных вихревых лучей с орбитальным угловым моментом. С этой целью спроектированы 2-битные модули МП, отличающиеся размером, генерацией интенсивных мод ОУМ первого и третьего порядка и кодированием начального угла наклона мета-частиц 0° , 45° , 90° и 135° . Модули сохраняют вихревой характер рассеянного поля в сверхширокой полосе частот. Выполнена симуляция характеристик рассеяния (и ОУМ результирующего поля) трех МП в виде 2×2 решеток 2-битных модулей. Показано, что в рассеянном поле 2-битных МП формируется множество дополнительных интерференционных вихревых лучей, которые создают фазовые сингулярности и обнуляют результирующее поле в боковых направлениях, распределенных по всей передней полусфере. Генерация вихревых лучей, их интерференция и гашение обеспечивают широкополосное снижение обратно рассеянного поля и более лучшее диффузное рассеяние (по сравнению с 1-битными МП). Результаты выполненных исследований показывают перспективы широкополосного снижения ЭПР с помощью цифровых 2-битных МП с генерацией и гашением ОУМ.

Финансирование: Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, Таганрог, по гранту Российского научного фонда (Проект №22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>).

Литература

1. Zhuang Y. et al. Random combinatorial gradient metasurface for broadband, wide-angle and polarization-independent diffusion scattering //Scientific Reports. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 16560. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16910-4>

2. Lu Y. et al. Ultrawideband monostatic and bistatic RCS reductions for both copolarization and cross polarization based on polarization conversion and destructive interference //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Т. 67. – №. 7. – С. 4936-4941. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2911185>
3. Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Юханов Ю.В., Климов А.В. Снижение ЭПР с помощью непоглощающих бинарных покрытий с анизотропной импедансной метаповерхностью //Антенны. – 2019. – №1. – С. 65-72. <https://doi.org/10.18127/j03209601-201901-09>
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. – С. 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563649>
5. Благовисный П.В., Семенихин А.И. Полноволновые и импедансные модели сверхширокополосных тонких твист-метаполяризаторов для радиомаскирующих покрытий //Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2020. – №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.12>
6. Lin B. Q. et al. Ultra-wideband and polarization-independent RCS reduction based on polarization conversion metasurface //Radio Science. – 2022. – Т. 57. – №. 2. – С. 1-9. <https://doi.org/10.1029/2021RS007383>
7. Chatterjee J., Mohan A., Dixit V. Ultrawideband RCS Reduction of Planar and Conformal Surfaces Using Ultrathin Polarization Conversion Metasurface //IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 36563-36575. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3163850>
8. 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. – С. 261-264. <https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494040>

9. Zhang K. et al. A review of orbital angular momentum vortex beams generation: from traditional methods to metasurfaces //Applied sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 1015. <https://doi.org/10.3390/app10031015>
10. Wang Z. et al. Multiple OAM beams design using the pattern product method //2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). – IEEE, 2020. – С. 1-2. <https://doi.org/10.23919/ACES49320.2020.9196117>
11. Zhang L. et al. Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces //Advanced Optical Materials. – 2016. – Т. 4. – №. 6. – С. 818-833. <https://doi.org/10.1002/adom.201500690>
12. Xu H. X. et al. Broadband vortex beam generation using multimode Pancharatnam–Berry metasurface //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Т. 65. – №. 12. – С. 7378-7382. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2761548>
13. Yang L. J., Sun S., Wei E. I. Ultrawideband reflection-type metasurface for generating integer and fractional orbital angular momentum //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Т. 68. – №. 3. – С. 2166-2175. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2948711>
14. Al-Nuaimi M. K. T., Huang G. L. Generation and Manipulation of OAM Beams Using Pancharatnam-Berry Coding Metasurface //2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium. – IEEE, 2021. – С. 1-3. <https://doi.org/10.23919/ACES-China52398.2021.9581402>
15. Zhou Z. et al. Research on Rcs Reduction and Oam Vortex Beam Generation Based on Terahertz Ring-Shaped Polarization Converter //Available at SSRN 4210221. <https://ssrn.com/abstract=4210221>
16. . 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. – С. 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT55580.2022.10023076>

17. Meng Z. K. et al. Multifunctional scattering antenna array design for orbital angular momentum vortex wave and RCS reduction //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 109289-109296. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001576>
18. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Y. V. Pancharatnam-Berry Coding Metasurfaces with OAM Vortex Wave Generation for Broadband RCS Reduction //2023 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). – IEEE, 2023. – С. 1-2. <https://doi.org/10.1109/RADIO58424.2023.10146073>
19. 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. – С. 296-299. <https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10201940>
20. Семенихин А.И., Семенихина Д.В. Цилиндрические анизотропные метаповерхности с биградиентным спиральным кодированием фазы Панчаратнам-Бэрри и аномальным рассеянием //Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2022. – №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.14>
21. Yue F. et al. Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface// ACS photonics. – 2016. – Т. 3. – №. 9. – С. 1558-1563. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.6b00392>

Для цитирования:

Семенихин А.И., Семенихина Д.В. 2-битные метаповерхности Панчаратнама-Бэрри с генерацией, интерференцией и гашением орбитального углового момента для широкополосного снижения ЭПР. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.10>