

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.9>

УДК: 621.371: 538.574

МЕТАПОВЕРХНОСТИ ПАТЧАРАТНАМА-БЕРРИ С ГЕНЕРАЦИЕЙ УГЛОВОГО ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА И КОМБИНИРОВАННЫМ ФАЗОВЫМ КОДИРОВАНИЕМ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШИРОКОУГОЛЬНОГО 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 12 февраля 2024 г.

Аннотация. Рассмотрен фазовый механизм широкополосного широкоугольного снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР), основанный на применении непоглощающих метаповерхностей (МП) Патчаратнама-Берри (*Pancharatnam-Berry* – РВ) с генерацией орбитального углового момента (ОУМ) и комбинированием различных фазовых профилей. Единичные ячейки МП содержат тонкую экранированную однослойную подложку и мета-частицы в виде перфорированных прямоугольных полосков с кодированным углом поворота. Целью работы является сравнение характеристик рассеяния и эффективности гашения рассеянного поля конструктивных элементов (модулей) МП, состоящих из одинакового числа мета-частиц, но имеющих различные профили РВ-фазы. Анализируются профиль с азимутальным градиентом, формирующий широкополосное рассеяние вихревых волн с ОУМ; профили с радиальным и линейным градиентами и аномальным рассеянием; параболические профили с широкоугольным рассеянием; различные комбинированные фазовые профили.

Характеристики рассеяния модулей МП исследуются в HFSS (методом конечных элементов) на ко- и кросс-поляризациях в случае облучения нормально падающей плоской волной круговой поляризации. Симуляция показала, что диаграммы рассеяния ко-поляризованного поля МП в этих случаях имеют воронкообразный вихревой характер с интенсивным ОУМ минус первого порядка (порядок ОУМ остается таким же, как для МП с азимутальным градиентом фазы). Генерация ОУМ существенно подавляет обратное рассеяние на ко-поляризации. Фаза дальнего поля в области вихря зависит не только от азимутального, но и от меридионального углов наблюдения. Комбинирование ОУМ и параболического профиля увеличивает диффузию широкополосного рассеяния, реализует более широкоугольное рассеяние результирующего поля с углом раствора вихря около 100° (на средней частоте 14 ГГц), что важно для снижения ЭПР.

Ключевые слова: метаповерхность, фаза Панчаратнам-Бэрри, фазо-градиентные метаповерхности, аномальное рассеяние, вихревое рассеяние, орбитальный угловой момент, 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

Цифровые кодированные непоглощающие метаповерхности (МП) для снижения ЭПР блестящих участков металлических поверхностей конструктивно представляют собой решетки модулей (участков МП с отличающимися фазовыми характеристиками отражения) [1]-[3]. Размер модулей и распределение фаз отражения по поверхности модулей (фазовые профили) являются важными параметрами МП, которые определяют широкополосность, широкоугольность и эффективность снижения ЭПР. Одним из новых фазовых методов снижения ЭПР является применение МП с генерацией вихревой рассеянной волны с азимутальным градиентом фазы и ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ) [4]-[8].

Исследования МП с генерацией ОУМ для снижения ЭПР показали [4]-[8], что такие МП при нормальном облучении обеспечивают малую диффузию рассеяния и снижают ЭПР за счет фазовой сингулярности и обнуления поля на оси вихря в обратном направлении. Так в [6] с помощью метаповерхности из мета-частиц (МЧ) в виде 6 различных квадратных рамок достигается снижение ЭПР в полосе от 6 до 9 ГГц, с углом раствора вихря около 20° для ОУМ минус 1-го порядка и около 30° для ОУМ минус 2-го порядка. Более широкополосное снижение ЭПР нами достигнуто [7]-[8] с помощью метаповерхностей Патчаратнама-Берри (*Pancharatnam-Berry* – РВ) [9] на основе тройных сплит-ринг резонаторов. Снижение ЭПР модулей размером 50×50 мм ($2,33\lambda$ на средней частоте 14 ГГц) было продемонстрировано нами в полосе 8.1-19.4 ГГц с углом раствора вихря около 52° на частоте 14 ГГц. Однако, только вихревой характер рассеяния от ОУМ-модулей не обеспечил существенную диффузию рассеяния. Более широкополосное снижения ЭПР с лучшей диффузией рассеяния получено в [10] с помощью кубического закона кодирования РВ-фазы по апертуре МП; полоса снижения ЭПР составила 88,8 % при размерах метаповерхности 170×170 мм.

Известно, что параболические (вогнуто/выпуклые) фазированные метаповерхности обладают хорошей диффузией рассеяния и применяются для снижения бистатической ЭПР [11]-[13]. Существенным недостатком метаповерхностей с параболическим профилем РВ-фазы является недостаточная широкополосность снижения ЭПР [12], [14], [15]. Этот недостаток устраняют либо, усложняя параболический закон кодирования фазы [11] (добиваясь двухкратного перекрытия по частоте), либо комбинируя параболические фазовые профили со случайным фокусным расстоянием в модулях МП с шахматным распределением [12] или линейным градиентом фазы [15].

В этой статье мы рассматриваем фазовый механизм широкополосного и широкоугольного снижения ЭПР, основанный на усложнении фазовых профилей метаповерхностей с генерацией ОУМ. Целью работы является сравнение характеристик рассеяния и эффективности гашения рассеянного поля модулей МП, состоящих из одинакового числа мета-частиц, но имеющих различные профили РВ-фазы: профиль с азимутальным градиентом фазы с ОУМ; профили с радиальным, азимутально-радиальным и азимутально-линейным фазовыми градиентами; модифицированные параболические профили и различные комбинированные профили. Мы исследуем в HFSS характеристики рассеяния МП на ко- и кросс-поляризациях в случае нормально падающей волны круговой поляризации (*circularly polarized waves* – СР-волны).

1. Проектирование единичной ячейки

Единичная ячейка метаповерхностей изображена на рис. 1а и содержит экранированную подложку F4b2 толщиной 3 мм ($\epsilon = 2,65$, $\text{tg}\delta = 0,001$), периодом 10 мм и мета-частицу в форме перфорированного прямоугольного полоска длиной 8 мм, шириной 3 мм и толщиной 0,035 мм с тремя прямоугольными вырезами. Угол поворота β мета-частицы отсчитывался от оси x против часовой стрелки. Параметры МЧ оптимизировались для

реализации сверхширокополосной противофазности двух собственных мод в канале Флоке в базисе осей анизотропии МЧ (рис. 1б).

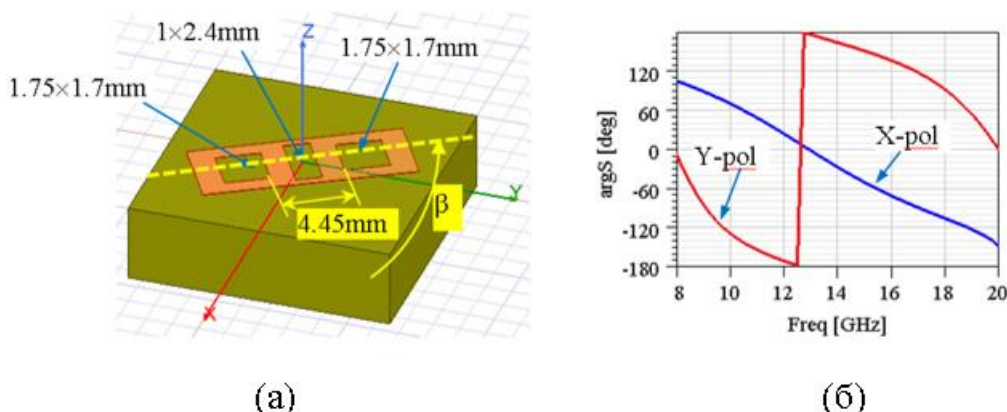


Рис. 1. Единичная ячейка (а); фазы отражения двух собственных мод X- и Y-поляризации (X-pol, Y-pol) при $\beta = 90^\circ$ (б).

Как следствие, РВ-фаза отражения ко-поляризованного поля (ко-поля) волны правой круговой поляризации (RHCP) в канале Флоке зависит от угла поворота β мета-частицы по линейному закону $\psi_{PB} = 2\beta$ в сверхширокой полосе частот от 8 до 20 ГГц (рис. 2а). Кодирование угла поворота β изменяет РВ-фазу и реализует при разном угле β высокоэффективное отражение ко-поля CP-волны (Co-pol) с малым уровнем кросс-поля (Cross-pol) (рис. 2б).

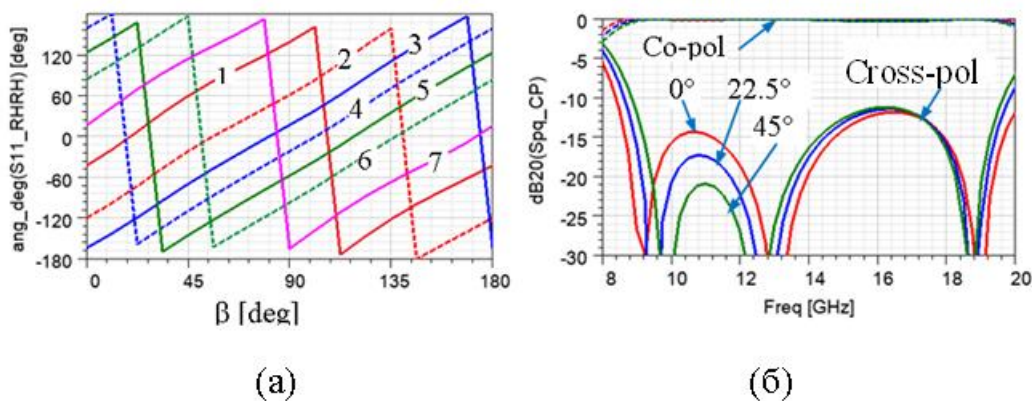


Рис. 2. Зависимость фазы отражения ко-поля правой CP-волны от угла поворота β (с дискретом 15°); цифры на линиях соответствуют частотам от 8 ГГц (линия 1) до 20 ГГц (линия 7) с шагом 2 ГГц (а); зависимость амплитуд отражения ко- и кросс-полей CP-волн от частоты при углах поворота $\beta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ$ (б).

2. Метаповерхности с генерацией ОУМ, радиальным и линейным градиентами РВ-фазы

В этом разделе мы оцениваем гашение рассеяния от метаповерхностей в виде модулей М1, М2, М3 и М4 с генерацией ОУМ и различными градиентными профилями РВ-фазы (рис. 3). Модули состоят из 36 единичных ячеек и имеют одинаковый размер 60×60 мм. Выбор такого небольшого размера ($2,8\lambda$ на частоте 14 ГГц) обеспечивает хорошую диффузию рассеяния и допускает при определенных условиях приемлемую ошибку квантования фазы.

Профили $\psi_{РВ,mn}$ РВ-фазы mn -ячеек М1-М4 рассчитывались по формулам:

- для М1 с азимутальным градиентом фазы:

$$\psi_{РВ,mn} = \psi_{ОУМ,mn} = q \cdot \arctan(y_n/x_m); \quad (1)$$

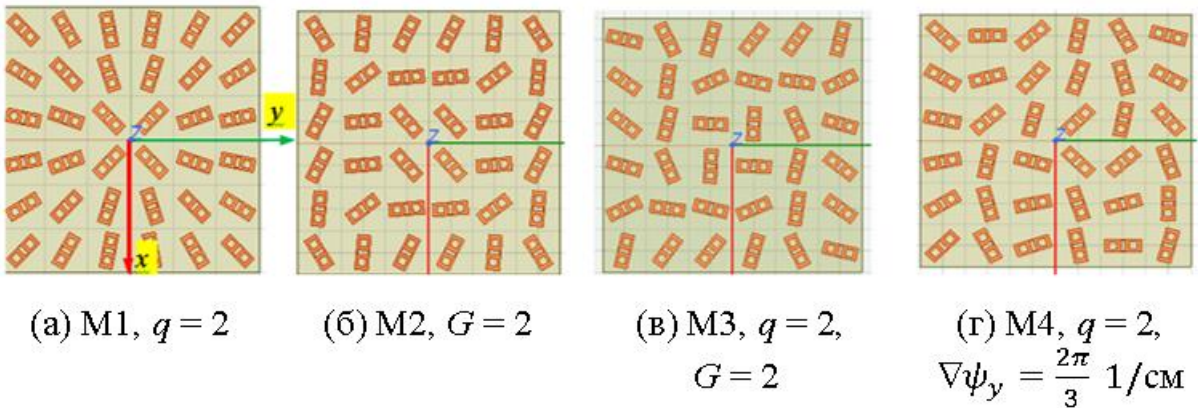


Рис. 3. Модули с азимутальным (М1) и радиальным (М2) градиентами, а также с комбинированными азимутально-радиальными (М3) и азимутально-линейными (М4) градиентами.

- для М2 с радиальным градиентом фазы:

$$\psi_{РВ,mn} = \psi_{RG,mn} = \frac{2\pi}{D} G \cdot R_{mn}, \quad R_{mn} = \sqrt{x_m^2 + y_n^2}; \quad (2)$$

- для М3 с азимутально-радиальными градиентами фазы:

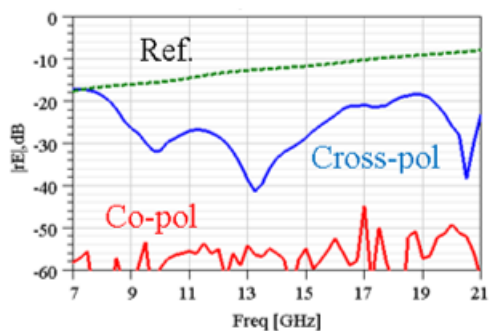
$$\psi_{РВ,mn} = \psi_{ОУМ,mn} + \psi_{RG,mn}; \quad (3)$$

- для М4 с азимутально-линейными градиентами фазы:

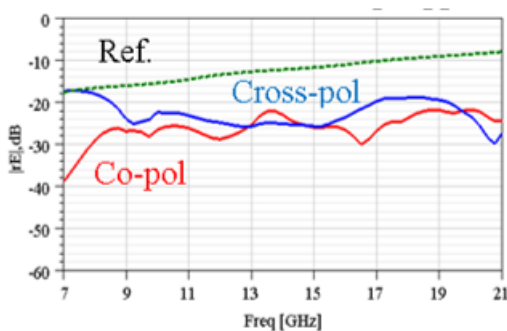
$$\psi_{PB,m,n} = \psi_{OUM,m,n} + \psi_{LG,n}, \quad \psi_{LG,n} = \nabla\psi_y \cdot y_n, \quad (4)$$

где m, n – номера единичных ячеек по осям x, y ($m = 1 \dots 6, n = 1 \dots 6$); x_m, y_n, R_{mn} – координаты mn -ячейки и расстояние от центра ячейки до центра модуля; $q = 2$ – число, определяющее расчетный топологический заряд для всех исследуемых модулей с ОУМ; D – размер модуля; G – параметр фазового профиля; $\nabla\psi_y = \frac{2\pi}{3}$ 1/см – линейный градиент фазы вдоль оси y .

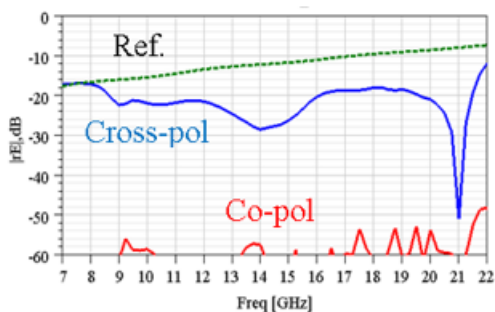
Частотные характеристики и диаграммы рассеяния модулей М1-М4 представлены на рис. 4 и 5 (на вставках изображены амплитудные и фазовые 2D-диаграммы). Здесь и ниже характеристики рассеяния приведены для случая нормального падения волны левой круговой поляризации (ЛНСП). Эталонем служила металлическая поверхность размером 60×60 мм (reference – Ref.). Зеленые пунктирные линии на рисунках относятся к кросс-полю эталона.



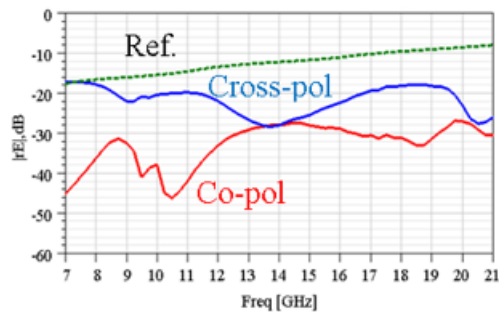
(a) М1, $q = 2$



(б) М2, $G = 2$



(в) М3, $q = 2, G = 2$



(г) М4, $q = 2, \nabla\psi_y = \frac{2\pi}{3}$ 1/см

Рис. 4. Моностатические ко-поля (красные линии) и кросс-поля (синие линии) модулей М1-М4.

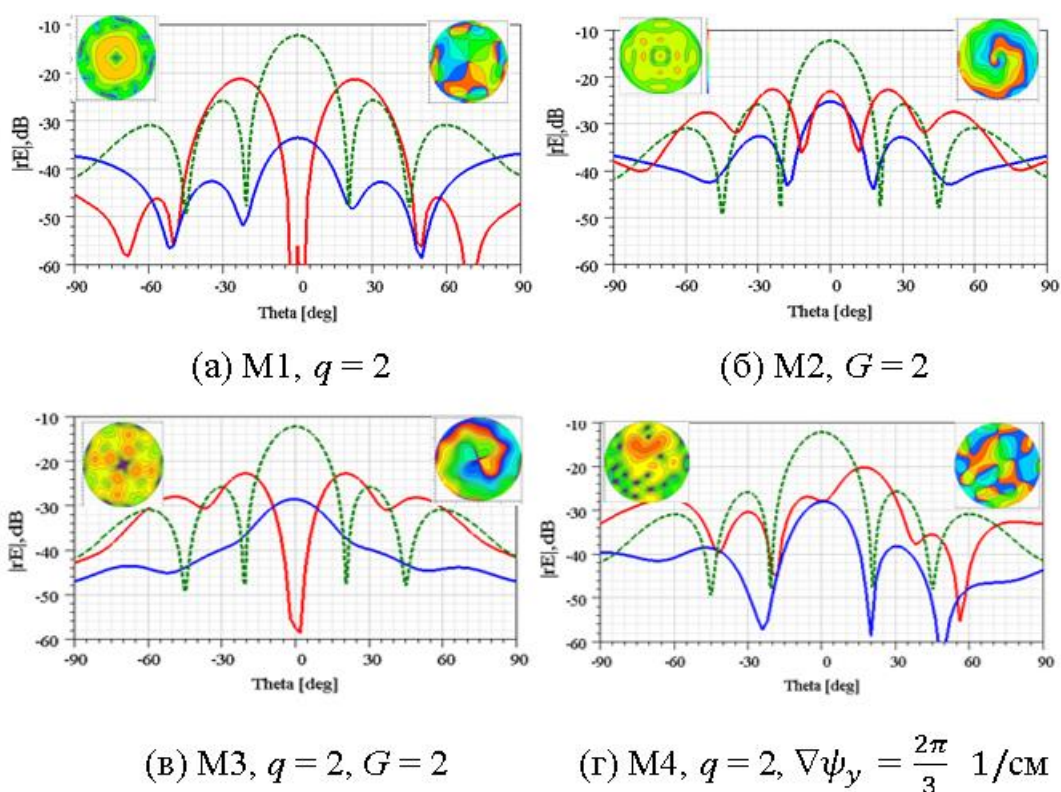


Рис. 5. Диаграммы рассеяния ко-полей (красные линии) и кросс-полей (синие линии) модулей M1-M4; вставки – амплитудные (слева) и фазовые (справа) 2D-диаграммы ко-полей.

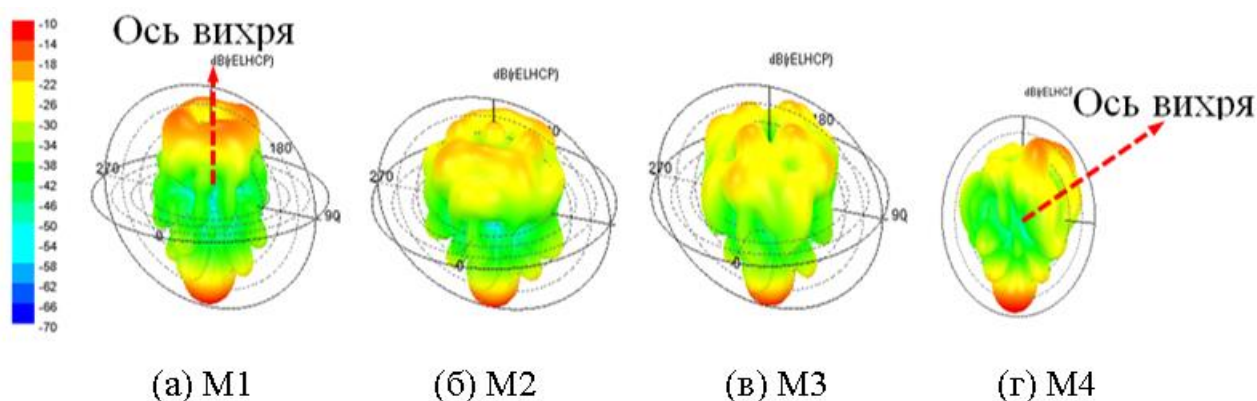


Рис. 6. Трехмерные диаграммы рассеяния (в дБ) ко-полей M1-M4.

Как можно видеть, модуль M1 генерирует вихревое рассеяние с ОУМ минус первого порядка (рис. 4а, 5а, 6а), что обеспечивает в широкой полосе от 9 до 21 ГГц снижение на 8-10 дБ обратно рассеянного кросс-поляризованного (кросс-) поля и полное подавление ко-поляризованного (ко-) поля. Воронкообразная диаграмма рассеяния ко-поля имеет глубокий провал на оси вихря (в обратном направлении; рис. 5а) с углом раствора вихря

около 46° . Однако диффузия рассеяния относительно невелика (левая вставка на рис. 5а).

Для М2 с радиальным градиентом фазы и $G = 2$ полного подавления обратно рассеянного ко-поля не происходит (рис. 5б); ко-поле сохраняется на уровне от -9 до -20 дБ (относительно эталона) в полосе от 8 до 21 ГГц (рис. 4б). Кросс-поле подавлено на 7-20 дБ в сверхширокой полосе 9-21 ГГц. Диффузия рассеяния ко-поля возрастает по сравнению с предыдущим случаем (рис. 6б).

При комбинировании ОУМ профиля и радиального градиента фазы с параметром $G = 2$ (в модуле М3) сохраняется гашение ко-поля на оси вихря в полосе от 7 до 21 ГГц, кросс-поле в этом направлении снижается всего на 6 дБ в полосе от 9 до 21 ГГц (рис. 4в). При этом порядок вихря равен минус 1 и определяется профилем ОУМ (правая вставка на рис. 5в); диффузия рассеяния для М3 еще более увеличивается, что хорошо видно на 2D- и 3D диаграммах (левые вставки на рис. 5в, 6в).

Наконец, комбинирование в модуле М4 профиля ОУМ и линейного градиента фазы $\nabla\psi_y = \frac{2\pi}{3}$ 1/см ведет к аномальному отклонению воронкообразного ко-поля и оси вихря в плоскости градиента фазы (рис. 5г, 6г). Кросс-поля М4 и М3 в обратном направлении мало отличаются (рис.4в, 4г).

3. Метаповерхности с модифицированным параболическим РВ-профилем

Теперь рассмотрим характеристики рассеяния модулей М5, М6, М7 и М8 (рис. 7) с различными модифицированными [12] параболическими фазовыми профилями $\psi_{MP,mn}$, которые рассчитывались по формуле:

$$\psi_{PB,mn} = \psi_{MP,mn} = \frac{2\pi}{D} G \cdot (\sqrt{R_{mn}^2 + F^2} - F), \quad (5)$$

где $F = \delta D$ – фокусное расстояние профиля; δ – параметр фокуса.

Отметим, что профили (5) и (2) совпадают при $F = 0$. Параметр G и фокусное расстояние определяют разность РВ-фаз $Q\pi$ между центрами центральной 1 и крайней 2 единичных ячеек в апертуре (рис. 7а), где параметр разности фаз Q определяется формулой:

$$Q(G, \delta) = 2G(\sqrt{\delta^2 + 0.181} - \sqrt{\delta^2 + 0.014}). \quad (6)$$

Модуль М5 спроектирован с параметрами $G = 1$, $\delta = 0$ и наименьшим ростом фазы по апертуре $Q = 0,615$. Профиль М6 имеет $G = 1,628$, $\delta = 0$, что обеспечивает параметр разности фаз $Q = 1$. Остальные модули отличаются ненулевым фокусным расстоянием ($\delta = 0,5$) и возросшим параметром $G = 3,51$ ($Q = 1$ для М7) и $G = 7,019$ ($Q = 2$ для М8).

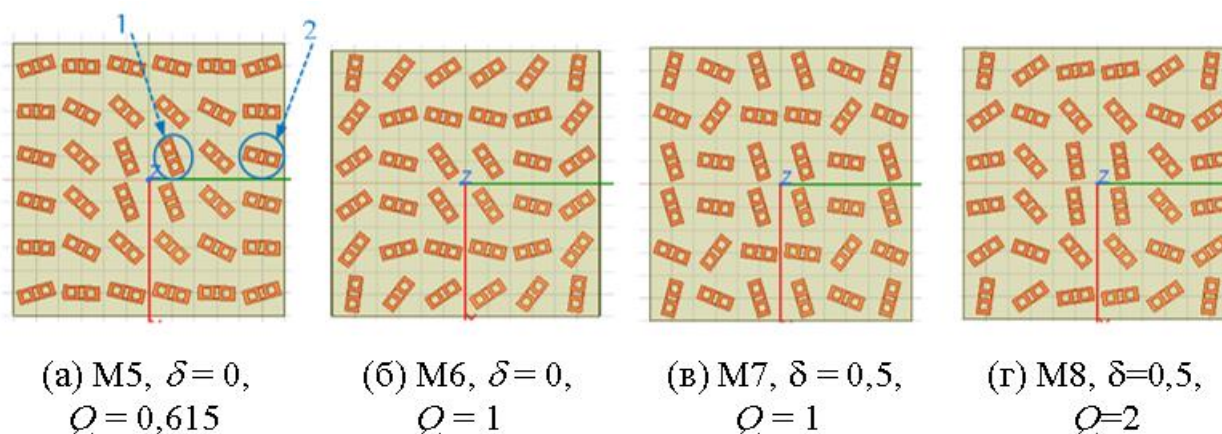


Рис. 7. Модули с модифицированными параболическими РВ-профилями.

Рис. 8 и 9 иллюстрируют характеристики рассеяния модулей М5-М8. Симуляция показала, что модуль М5 с разностью фаз в апертуре $Q = 0,615$ снижает на 10 дБ обратно рассеянное кросс-поле в сверхширокой полосе от 8,6 до 21 ГГц, но его ко-поле близко к кросс-полю эталона (рис. 8а, сплошные линии). Модуль М6 с большей разностью фаз $Q = 1$ снижает ко-поле, но повышает кросс-поле (рис. 8б, сплошные линии). Увеличение фокусного расстояния модуля М7 до $0.5D$ (при $Q = 1$, как у М6) лучше подавляет ко-поле в обратном направлении во всем рабочем диапазоне частот, но уровень кросс-поля возрастает (рис. 8б, в сплошные линии). Рост параметров δ и Q

у модуля М8 приводит к заметному уменьшению ко-поля и к возрастанию уровня кросс-поля (рис. 8б,г).

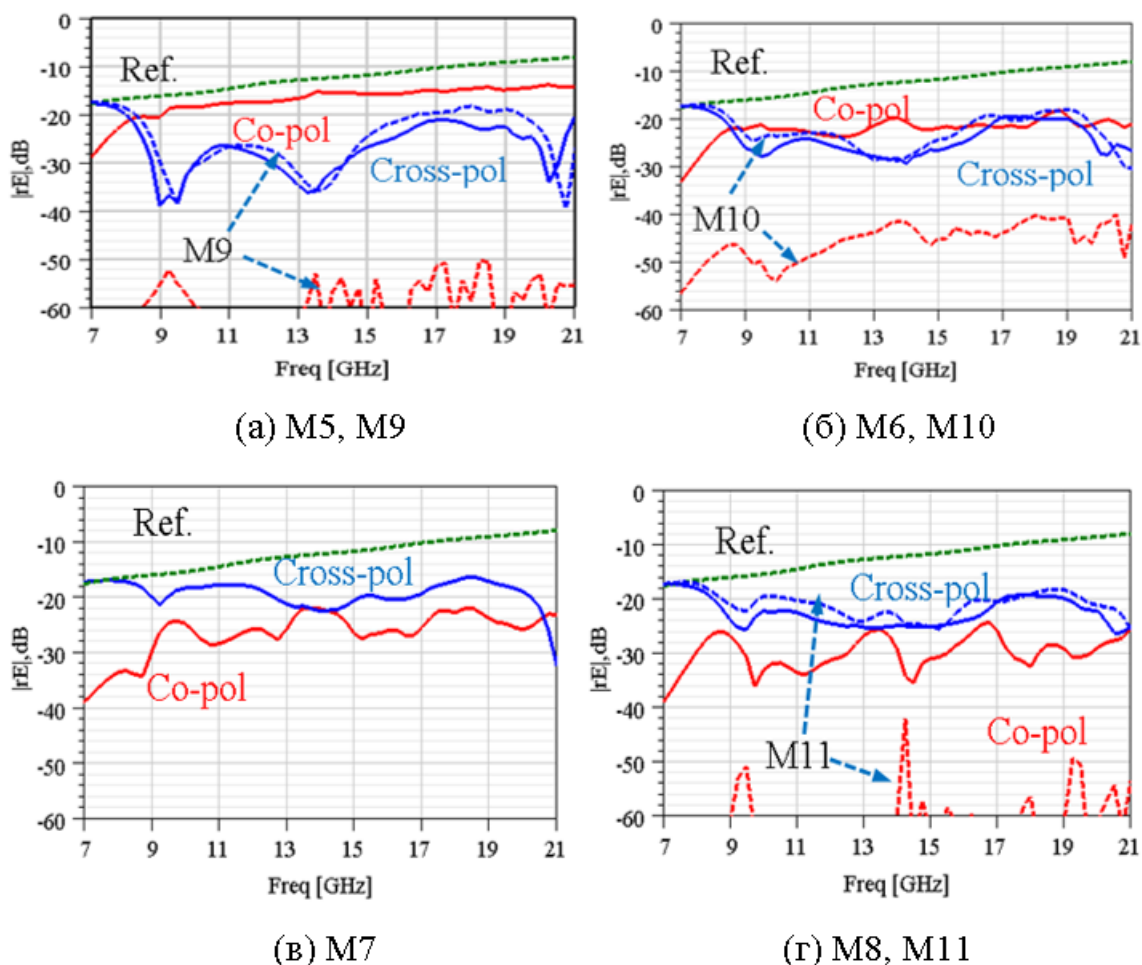
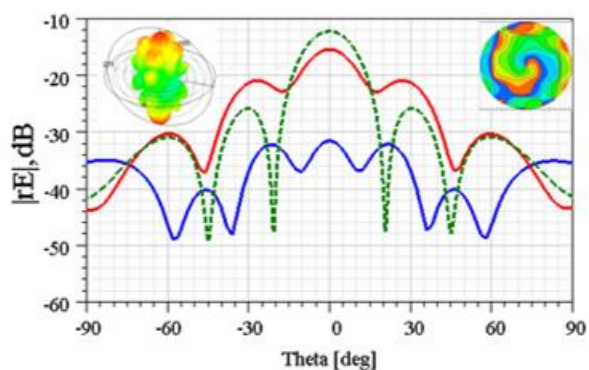
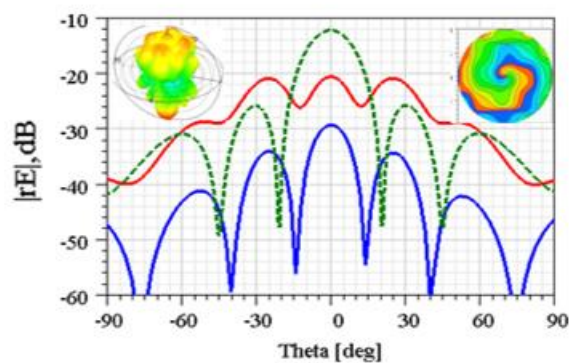


Рис. 8. Моностатические ко-поля (красные линии) и кросс-поля (синие линии) М5-М8 (сплошные линии) и М9-М11 (пунктирные линии; см. Раздел 4)

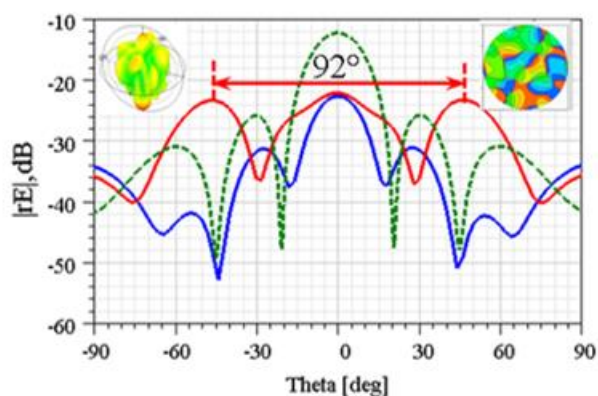
Диаграммы рассеяния модулей М5-М8 существенно зависят от параметра фокуса δ и реализованной разности фаз $Q\pi$ в апертуре; с их ростом улучшается угловая диффузия ко-поля; интенсивность центрального лепестка диаграмм падает (рис. 9).



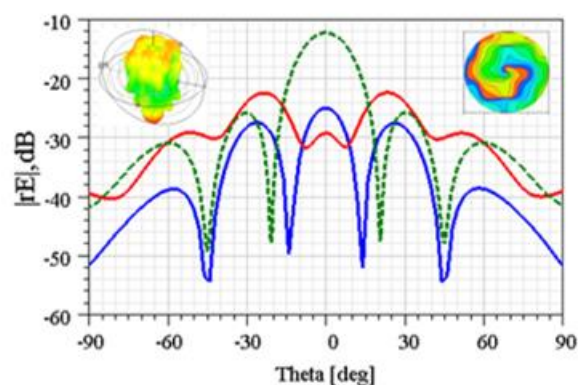
(a) M5, $\delta = 0$, $Q = 0,615$



(б) M6, $\delta = 0$, $Q = 1$



(в) M7, $\delta = 0,5$, $Q = 1$



(г) M8, $\delta = 0,5$, $Q = 2$

Рис. 9. Диаграммы рассеяния ко-полей (красные линии) и кросс-полей (синие линии) модулей М5-М8; вставки – амплитудные 3D-диаграммы (слева) и фазовые 2D-диаграммы (справа) ко-полей.

Модуль М7 с $\delta = 0,5$ и противофазными краевыми и центральными МЧ ($Q = 1$) формирует наиболее широкоугольное рассеяние ко-поля, угол раствора боковых лепестков достигает 92° (рис. 9 в, красные линии), фазовая структура дальнего поля усложняется (правая вставка на рис. 9 в). Воронкообразный вихревой характер рассеяния ко-поля (но с меньшей угловой диффузией) проявляется у профиля М8 с $\delta = 0,5$, $Q = 2$ (рис.9 г).

4. Метасповерхности с комбинированием профиля ОУМ и модифицированного параболического РВ-профиля

Наконец, рассмотрим модули М9, М10 и М11 с комбинированием профиля ОУМ и модифицированного параболического РВ-профиля (рис. 10):

$$\psi_{PB,mn} = \psi_{OUM,mn} + \psi_{MP,mn} , \quad (7)$$

где фазы $\psi_{OUM,mn}$, $\psi_{MP,mn}$ определяются формулами (1), (5) с параметрами: $q = 2$, $\delta = 0$, $G = 1$ (модуль M9), $q = 2$, $\delta = 0$, $G = 1,628$ (модуль M10) и $q = 2$, $\delta = 0,5$, $G = 3,51$ (модуль M11).

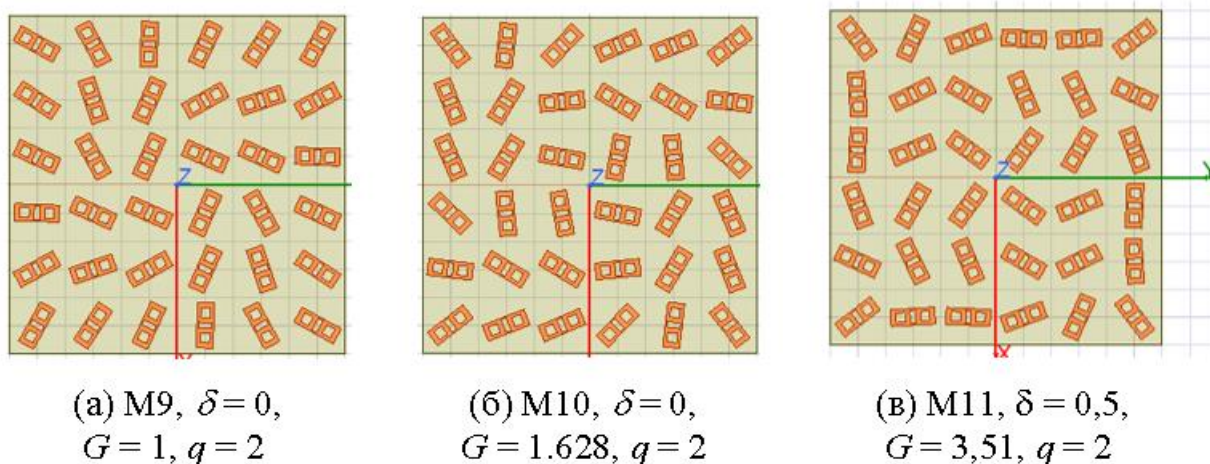


Рис. 10. Модули с комбинированием профиля ОУМ и модифицированного параболического РВ-профиля.

Оценим влияние на характеристики рассеяния и снижение ЭПР механизма комбинирования ранее рассмотренных профилей M5, M6, M7 с профилем ОУМ. Сравнение частотных характеристик (ЧХ) обратно рассеянных ко- и кросс-полей M9-M11 и модулей M5-M7 показано на рис. 8а, б и г (пунктирные красные и синие линии соответствуют M9-M11). Видим, что вклад профиля ОУМ незначительно ухудшает ЧХ кросс-полей (не более чем на 3 дБ). Генерация ОУМ существенно подавляет моностатическое ко-поле. Диаграммы рассеяния ко-поля M9-M11 соответствуют вихревой волне с интенсивным ОУМ минус первого порядка (рис. 11). Порядок ОУМ остается таким же, как для МП с азимутальным градиентом фазы (правые вставки на рис. 11). Спиралевидный фронт волны существенно усложняется; фаза дальнего поля в области вихря зависит не только от азимутального, но и от меридионального углов наблюдения.

Комбинирование ОУМ и параболического профиля увеличивает диффузию рассеяния ко-поля (2D-диаграммы на левых вставках на рис. 11 и 3D-диаграммы на рис. 12). Если профиль M9 вносит небольшой вклад

в диффузию рассеяния ко-поля, то с ростом параметров δ , G диффузия значительно увеличивается, интенсивность поля в максимумах снижается, модуль M11 обеспечивает широкоугольное рассеяние с углом раствора вихря около 100° (рис. 11в).

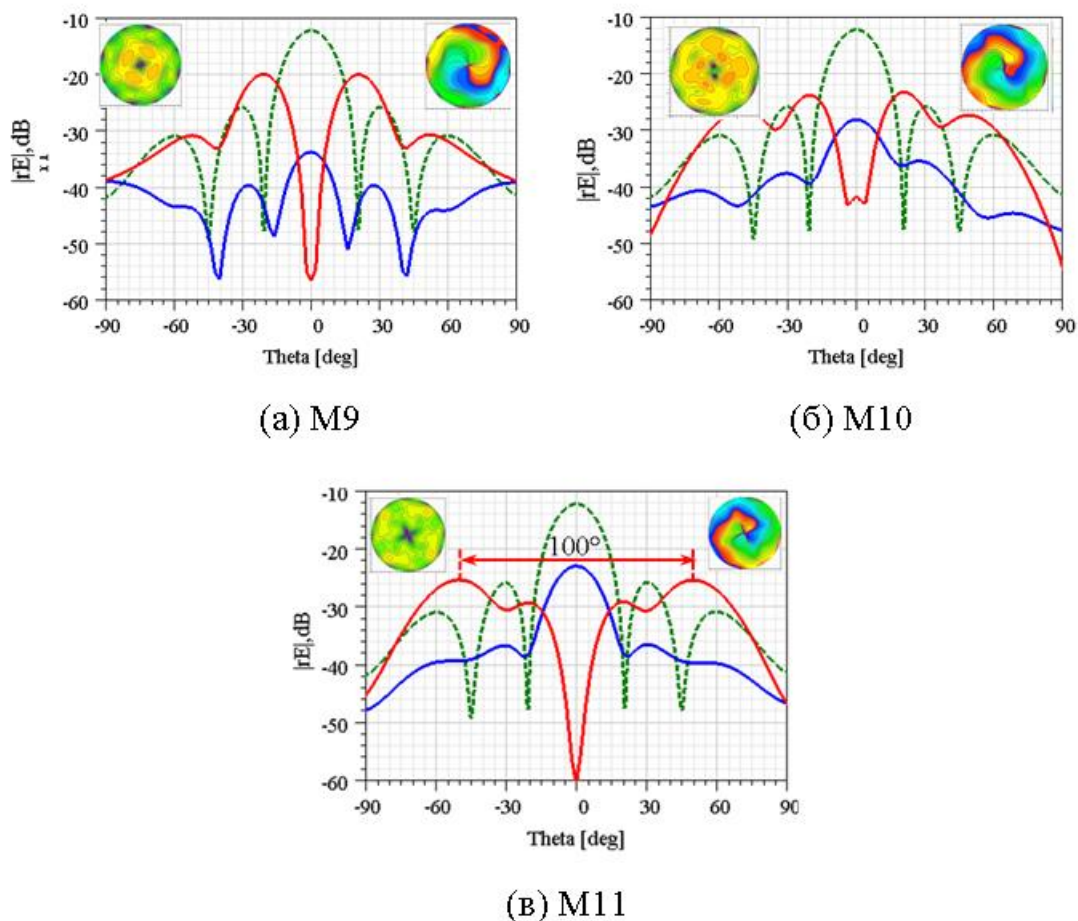


Рис. 11. Диаграммы рассеяния модулей M9-M11 для ко-полей (красные линии) и кросс-полей (синие линии); вставки – амплитудные (слева) и фазовые (справа) 2D-диаграммы ко-полей.

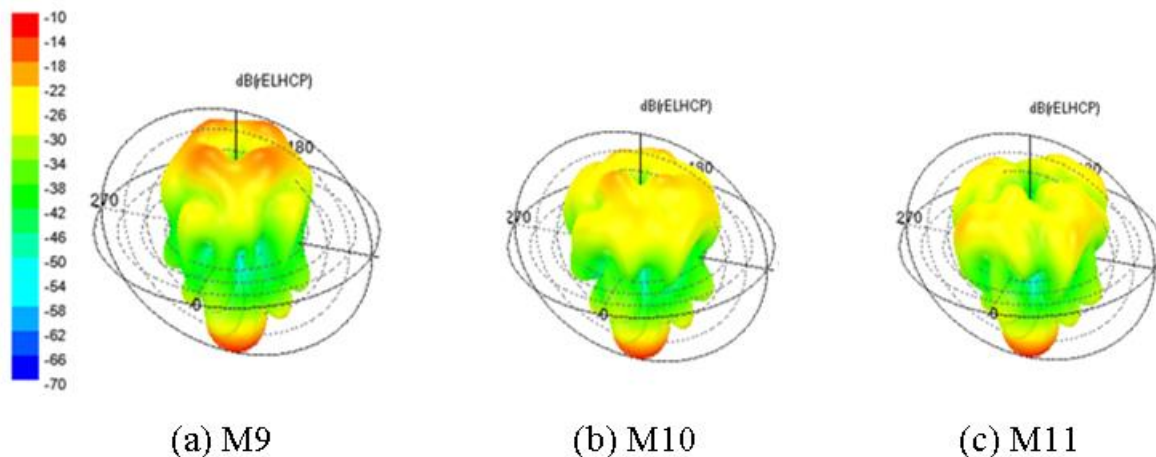


Рис. 12. Трехмерные диаграммы рассеяния (в дБ) ко-полей M9-M11.

Симуляция моностатической ЭПР показала, что наиболее широкополосное снижение ко-ЭПР (на ко-поляризации) наблюдается для модуля М11, а кросс-ЭПР (на кросс-поляризации) – для М9 (рис. 13).

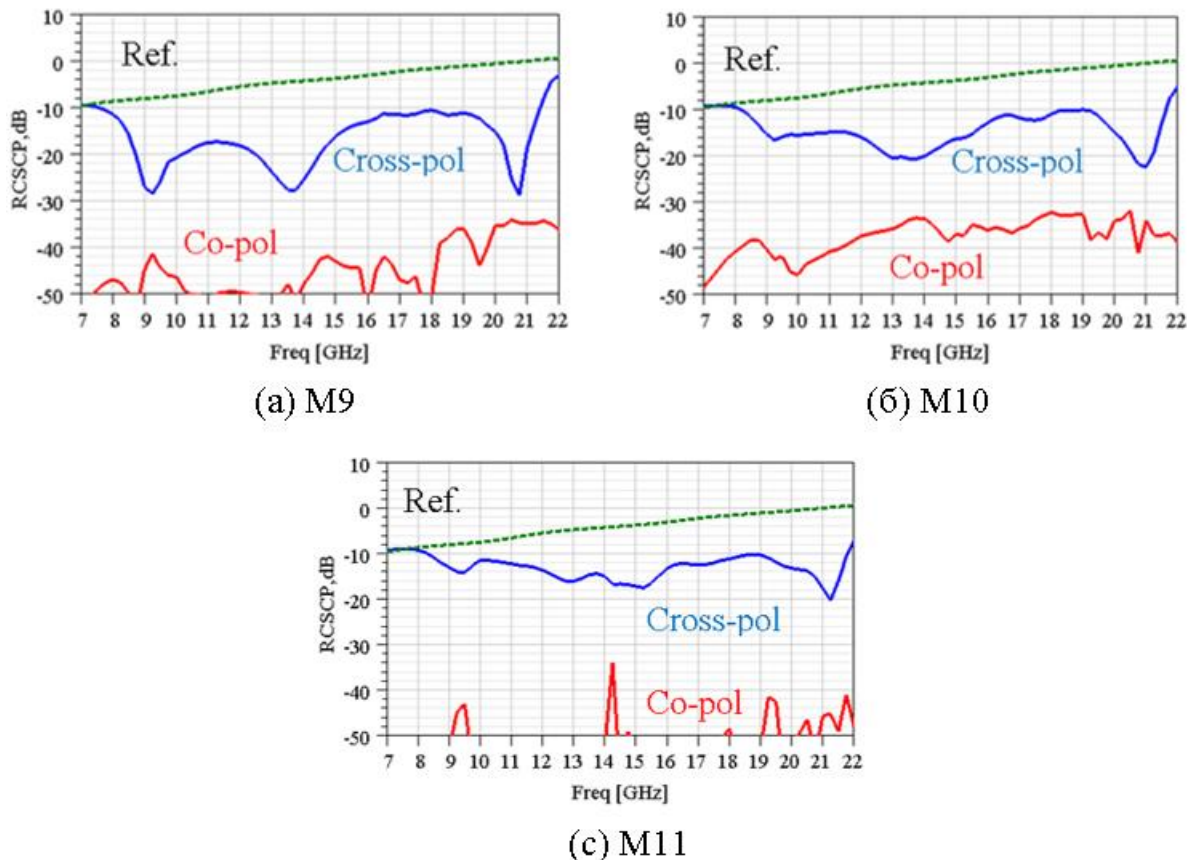


Рис. 13. Моностатические ко-ЭПР (красные линии) и кросс-ЭПР (синие линии) модулей М9-М11.

Заключение

В статье исследован фазовый механизм широкополосного и широкоугольного снижения ЭПР, основанный на комбинировании различных фазовых профилей РВ-метаповерхностей с ОУМ. Численно проанализированы характеристики рассеяния модулей МП из одинакового числа мета-частиц, имеющих различные профили РВ-фазы (с ОУМ и широкополосным вихревым рассеянием, с аномальным и широкоугольным рассеянием). Симуляция характеристик рассеяния МП показала преимущество фазовых профилей с комбинированием профиля ОУМ и модифицированных параболических РВ-профилей. Генерация ОУМ существенно подавляет моностатическое

ко-поле. Диаграммы рассеяния ко-поля имеют воронкообразный вихревой характер с интенсивным ОУМ минус первого порядка. Порядок ОУМ остается таким же, как для МП с азимутальным градиентом фазы. Фаза дальнего поля в области вихря зависит не только от азимутального, но и от меридионального углов наблюдения. Комбинирование ОУМ и параболических профилей увеличивает диффузию рассеяния ко-поля. Реализуется более широкоугольное широкополосное рассеяние результирующего поля с углом раствора вихря около 100° (на частоте 14 ГГц). Выполненные исследования расширяют перспективы применения комбинированных фазовых МП в качестве решеток конструктивных элементов (модулей) цифровых плоских и призматических метапокрытий с широкополосным и широкоугольным снижением 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/>).

Литература

1. 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>
2. 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>
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. 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>
5. Li H. et al. Research on the OAM and reduction of RCS of a dynamically tunable terahertz reconfigurable metasurface //JOSA B. – 2023. – Т. 40. – №. 8. – С. 1931-1944. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.491612>
6. Liu Q. et al. RCS reduction metasurface based on orbital angular momentum //Results in Physics. – 2023. – Т. 53. – С. 107008. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107008>
7. 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. – С. 019-023. <https://doi.org/10.1109/ICEAA57318.2023.10297857>
8. 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>
9. Aieta F. et al. Out-of-Plane Reflection and Refraction of Light by Anisotropic Optical Antenna Metasurfaces with Phase Discontinuities// Nano Lett. Feb. 2012. Vol.12. P.1702–1706. <https://doi.org/10.1021/nl300204s>
10. Al-Nuaimi M. K. T., Whittow W. G. Wideband Radar Cross Section Reduction Using Cubic Phased Metasurface at Microwave Regime //2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2023. – С. 1-5. <https://doi.org/10.23919/EuCAP57121.2023.1013365>
11. Al-Nuaimi M. K. T. et al. Wideband Radar Cross Section Reduction Using Parabolic Phased Metasurfaces //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2023. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3250453>

12. Yuan F. et al. RCS reduction based on concave/convex-chessboard random parabolic-phased metasurface //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Т. 68. – №. 3. – С. 2463-2468. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2940503>
13. Yuan F. et al. Broadband RCS reduction based on parabolic-phased diffused metasurface //2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2018. – С. 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563461>
14. Xu H. X. et al. Broadband wide-angle polarization-independent diffusion using parabolic-phase metasurface //2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). – IEEE, 2018. – С. 1114-1118. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393960>
15. Wang C. et al. Hybrid-phase approach to achieve broadband monostatic/bistatic RCS reduction based on metasurfaces //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Т. 53. – №. 36. – С. 365001. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/ab9266>

Для цитирования:

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>