

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.14>

УДК: 621.371: 538.574

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ АНИЗОТРОПНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ С БИГРАДИЕНТНЫМ СПИРАЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ ФАЗЫ ПАНЧАРАТНАМ-БЭРРИ И АНОМАЛЬНЫМ РАССЕЯНИЕМ

А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина

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

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2022 г.

Аннотация. Исследуются характеристики рассеяния анизотропных цилиндрических фазо-градиентных метаповерхностей (МП) с различным спиральным кодированием фазы Панчаратнам-Бэрри (Pancharatnam-Berry phase – PB-фазы). Сравнивается эффективность снижения поля рассеяния волн круговых поляризаций (circularly polarized waves – CP-волн) в переднем полупространстве для трех различных моделей МП с одинаковым градиентом PB-фазы в азимутальном направлении и различными градиентами фазы в осевом направлении. Метаповерхности конформно расположены на полуцилиндрических металлических многогранных призмах. Метачастицы имеют вид тройных связанных сплит-ринг резонаторов. Спиральное кодирование PB-фазы единичных ячеек МП в азимутальном и осевом направлениях осуществляется вращением метачастиц. Численно оценивается влияние постоянных фазовых градиентов на частотные характеристики обратно рассеянных полей и бистатические диаграммы рассеяния CP-волн в азимутальной и меридиональной плоскостях. Показано, что осевой градиент фазы вызывает более эффективное аномальное рассеяние ко- и кросс-поляризованных CP-волн. Он приводит к отклонению интенсивных

дифракционных лепестков от нормали в меридиональной плоскости на большой угол и к смещению лепестков в азимутальной плоскости. Биградиентные МП обеспечивают снижение поля рассеяния СР-волн не менее, чем на 10 дБ в полосе от 10-12 ГГц до 18.5 ГГц в широких секторах углов в азимутальной (до $\pm 75^\circ$) и в меридиональной (до $\pm 40^\circ$) плоскостях.

Ключевые слова: цилиндрические анизотропные метаповерхности, фазо-градиентные метаповерхности, аномальное рассеяние, фаза Панчаратнам-Бэрри, 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

В последние годы наблюдается бурное развитие в области проектирования малозаметных метапокрытий различного функционального назначения, в том числе на основе кодированных, изотропных и анизотропных метаповерхностей (МП), метаповерхностей с кодирование фазы Панчаратнам-Берри (Pancharatnam-Berry phase – РВ-фазы) для волн круговых поляризации (circularly polarized waves – СР-волн) [1-12]. Одним из известных фазовых способов снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) плоских металлических поверхностей является применение фазо-градиентных МП (ФГМП) с аномальным рассеянием [13]. Обобщенный закон отражения волн от плоских МП с постоянным градиентом фазы отражения в плоскости падения или под заданным углом к ней впервые установлен в работах [1,2]. Продемонстрированы большие углы аномального рассеяния от плоских градиентных и биградиентных метаповерхностей [13].

Если плоские метапокрытия с малой ЭПР обсуждаются научным сообществом довольно давно и физические процессы, происходящие при

рассеянии на них, во многих случаях детально исследованы, то аналогичные конформные метапокрытия, особенно анизотропные, изучены в гораздо меньшей степени и прогресс в их изучении наметился только в последние несколько лет. Цилиндрические ФГМП с малой ЭПР также менее изучены.

Одной из первых и важных публикаций по конформным метапокрытиям для снижения ЭПР является статья [3]. В ней рассмотрены цилиндрически изогнутые шахматные МП с различным радиусом кривизны на гибкой подложке, которые обеспечивают снижение моностатической ЭПР на 5 дБ в полосе частот 25%. Установлено влияние радиуса кривизны на ориентацию соседних лепестков бистатических диаграмм рассеяния МП. Единичные ячейки МП выбирались на основе плоских МП, без учета кривизны поверхности. Об аналогичных по назначению и широкополосности криволинейных МП сообщается в нескольких опубликованных почти одновременно работах [4-7]. В [4] предложена гибкая МП с диффузным рассеянием, Она содержит слой полиимидной пленки с напечатанными метачастицами (типа решетки «#») разных размеров и снижает обратную ЭПР на 10 дБ в X-диапазоне при общей толщине покрытия 0.125λ , где λ – средняя длина волны в свободном пространстве. В [5] рассмотрен метод снижения ЭПР цилиндрической МП путем изменения размеров единичных ячеек вдоль образующей цилиндра и, как следствие, манипулирования фазой отражения от ячеек в этом направлении. Получено 10дБ-уменьшение ЭПР в полосе частот 15% для обеих поляризаций падающей волны. В [6] спроектирована конформная ультратонкая МП на подложке толщиной $0,0156\lambda$, расположенная на цилиндре диаметром порядка λ . Изотропные элементы МП проектируются таким образом, чтобы падающая электромагнитная волна трансформировалась в поверхностную волну и обтекала цилиндр, что приводит к уменьшению ЭПР в обратном направлении.

Для широкополосного снижения ЭПР конформных МП применялись различные алгоритмы их оптимизации. Так, в [7] представлена бифункциональная гибкая 1-битная метаповерхность толщиной менее $0,1\lambda$, построенная с помощью генетического алгоритма, обладающая одновременно

оптической прозрачностью. В [8] различие фаз отражения элементарных ячеек конформной МП достигается путем кодирования размера ячеек с помощью алгоритмов синтеза гибридной матрицы и оптимизации роя частиц. В [9] для широкополосного и широкоугольного снижения ЭПР 2-битной искривленной МП использованы формула дальнего поля плоской антенной решетки и генетический алгоритм. В [10] добиваются широкополосного фазового гашения волн цилиндрической МП с помощью метода оптимизации роя частиц с учетом углов падения и разности хода волн, обусловленных изгибом конформной МП. В результате обеспечивается 10дБ-снижение ЭПР обратного рассеяния при нормальном падении на частотах от 5 до 6,8 ГГц и от 7,3 до 10 ГГц. В [11] получено 10дБ-снижение ЭПР призматической конформной МП на частотах от 9,6 до 10,6 ГГц и от 11,7 до 17,7 ГГц.

Дальнейшие исследования были связаны, в основном, с поисками путей расширения полосы рабочих частот конформных МП. Для этого в [12] усложняется конструкция концентрического двойного квадратного кольцевого резонатора и вводится воздушный зазор между подложкой и экраном. В [13] строится гибкая 1-битная МП на основе анизотропных супер-атомов, состоящих из 4x4 элементов, распределенных по поверхности с помощью генетического алгоритма; распределение супер-атомов оптимизируется для достижения максимально возможной полосы рабочих частот. Для эффективного управления волновым фронтом и отклонения рассеянного луча в [14] применяются расширенная теория решеток, устанавливающая взаимосвязь между волновым фронтом и искривленной поверхностью. Эта теория используется с целью фокусировки рассеянного поля (увеличения ЭПР) в заданном направлении.

Ранее нами также была рассмотрена проблема проектирования криволинейных МП для снижения ЭПР [15-17]. Показаны возможности снижения моностатических ЭПР цилиндрических азимутально-кодированных 1-битных анизотропных метапокрытий [15]. Рассмотрено снижение и гашение ЭПР таких цилиндрических МП с разным азимутальным размером модулей [16],

дана физическая интерпретация бистатических диаграмм рассеяния на ко- и кросс-поляризациях [17].

В настоящей статье мы рассматриваем характеристики рассеяния анизотропных цилиндрических фазо-градиентных метаповерхностей с различным спиральным кодированием РВ-фазы и аномальным рассеянием. Метачастицы имеют вид тройных связанных сплит-ринг резонаторов. Мы сравниваем эффективность снижения поля рассеяния СР-волн в переднем полупространстве для трех моделей ФГМП с одинаковым постоянным градиентом РВ-фазы в азимутальном направлении и различными постоянными градиентами фазы в осевом направлении.

1. Проектирование метачастиц

Единичная ячейка метаповерхности изображена на рис. 1 и содержит тройной связанный сплит-ринг резонатор на гибкой экранированной подложке AD255C толщиной $h=3.175$ мм ($\epsilon=2.6$, $\text{tg}\delta=0.0013$). Угол наклона ψ резонатора отсчитывается от оси y против часовой стрелки. Период ячеек по осям x , y одинаков $p=5$ мм. Резонатор состоит из пяти полосковых проводников толщиной 0.035 мм с номерами $j = 1 \dots 5$ (рис. 1 б). Топология проводников описывается радиусами r_j внешних кромок проводящих колец, шириной полосков w_j и зазорами g_j между полосками. Форма зазоров взята прямоугольной, ширина центрального полоска $j=5$ меньше ширины колец. Параметры ячейки оптимизировались для реализации сверхширокополосной противофазности двух собственных мод в линейном поляризационном базисе осей анизотропии.

Частотная характеристика фаз коэффициентов отражения собственных мод Флоке при нормальном падении приведена на рис. 2 а. Синяя линия соответствует $x\text{-pol}$ моде, поляризованной вдоль оси x . Мы видим, что собственные моды противофазны в сверхширокой полосе частот.

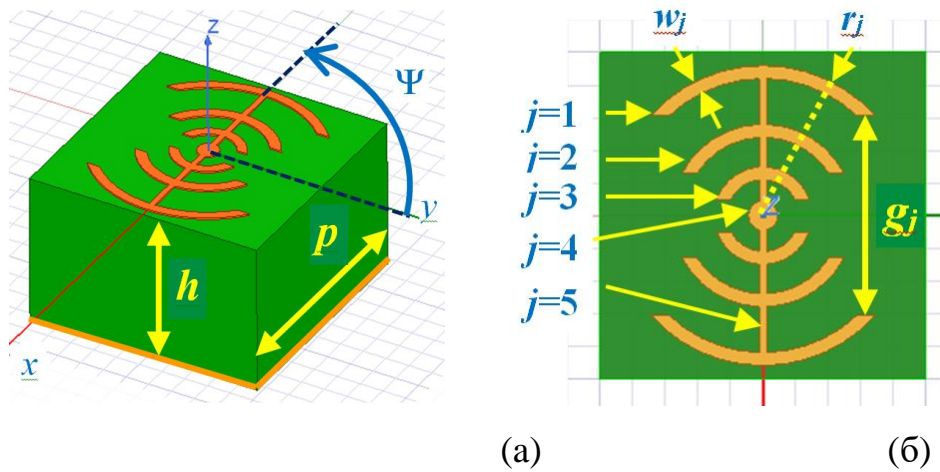


Рис. 1. Единичная ячейка с метачастицей с углом наклона ψ оси анизотропии: внешние радиусы $r_1=2.3$ мм, $r_2=1.4$ мм, $r_3=0.75$ мм, $r_4=0.25$ мм; ширина полосков $w_1=0.2$ мм, $w_2=0.225$ мм, $w_3=0.2$ мм, $w_5=0.12$ мм; зазоры $g_1=3.05$ мм, $g_2=1.3$ мм, $g_3=0.5$ мм, $p=5$ мм, $h= 3.175$ мм

Фазы коэффициентов отражения СР-волн меняются с ростом угла вращения ψ метачастиц практически по линейному закону в сверхширокой полосе частот с положительным постоянным градиентом фазы для правой СР-волны (RCP-волны; рис. 2 б). Кодирование угла поворота ψ в пределах $0-\pi$ реализует изменение РВ-фазы $0-2\pi$.

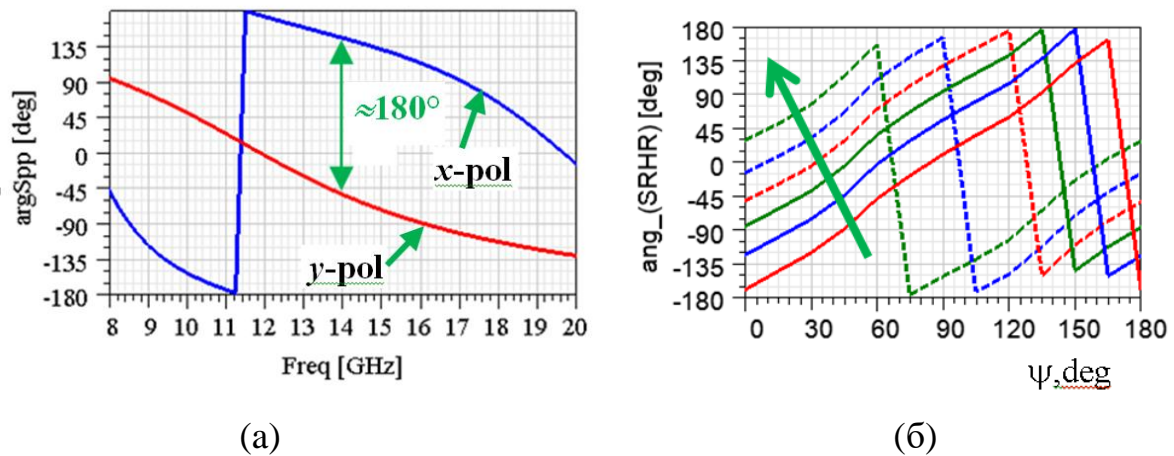


Рис. 2. Фазы коэффициентов отражения собственных линейно поляризованных x -pol и y -pol мод Флоке (а) и фаза коэффициента отражения RCP-моды Флоке в зависимости от угла вращения ψ метачастиц на разных частотах (б), стрелка показывает направление роста частоты от 10 ГГц (нижний график) до 20 ГГц (верхний график) с шагом 2 ГГц

2. Проектирование анизотропных цилиндрических фазо-градиентных метаповерхностей

Мы рассматриваем 3 модели фазо-градиентных метаповерхностей MS1, MS2 и MS3, которые конформно располагаются на идеально проводящих призматических полуцилиндрах высотой 180 мм с внешним радиусом 92.318 мм (рис. 3). Полуцилиндры состоят из 9 центральных фасок и 2-х крайних фасок (с вдвое меньшим размером). Каждая центральная фаска MS имеет размер 30×180 мм и вмещает 6 метачастиц в азимутальном направлении (по углу φ) и 36 метачастиц по оси z .

Все модели ФГМП имеют одинаковый постоянный фазовый градиент в азимутальном направлении. С ростом азимутального угла φ метачастицы вращаются по часовой стрелке, углы поворота метачастиц на каждой фаске увеличиваются с шагом минус 30° (кодируются). Азимутальный градиент РВ-фазы $\nabla\Phi_\varphi = \pm 2\pi/3$ рад/см положителен для волны левой круговой поляризации (LCP-волны) и отрицателен для RCP-волны правой круговой поляризации.

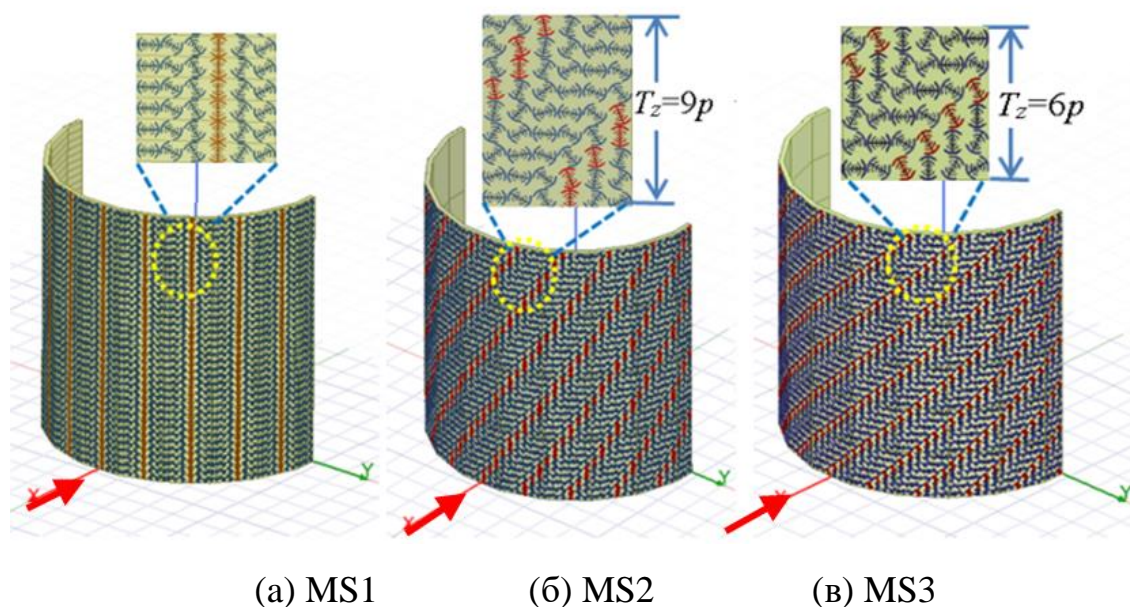


Рис. 3. Модели метаповерхностей MS1, MS2 и MS3 с одинаковым азимутальным $\nabla\Phi_\varphi = \pm 2\pi/3$ рад/см и различными осевыми фазовыми градиентами: (а) $\nabla\Phi_z = 0$; (б) $\nabla\Phi_z = \pm 4\pi/9$ рад/см; (в) $\nabla\Phi_z = \pm 2\pi/3$ рад/см

В модели MS1 метачастицы распределены однородно по оси z и градиент фазы $\nabla\Phi_z = 0$ (см. рис. 3 а). Модель MS2 биградиентной метаповерхности кроме азимутального имеет осевой градиент фазы $\nabla\Phi_z = \pm 4\pi/9$ рад/см (положительный

для RCP-волны и отрицательный для LCP-волны). С ростом координаты z метачастицы вращаются против часовой стрелки с кодированием угла поворота с шагом $+20^\circ$ (см. рис. 3 б). В модели MS3 осевой градиент фазы больше $\nabla\Phi_z = \pm 2\pi/3$ рад/см; с ростом z метачастицы вращаются с шагом $+30^\circ$ против часовой стрелки (см. рис. 3 в). Период изменения РВ-фазы на 2π по оси z равен $T_z = 9p = 45$ мм для MS2 и $T_z = 6p = 30$ мм для MS3.

3. Аномальное рассеяние СР-волн цилиндрическими биградиентными метаповерхностями

Характеристики рассеяния моделей ФГМП рассчитывались при нормальном падении левой СР-волны в полосе от 7 до 21 ГГц. На рис. 4 представлено сравнение диаграмм рассеяния ФГМП и эталона (аналогичного идеально проводящего полуцилиндра) при их облучении LCP-волной на частоте 15 ГГц.

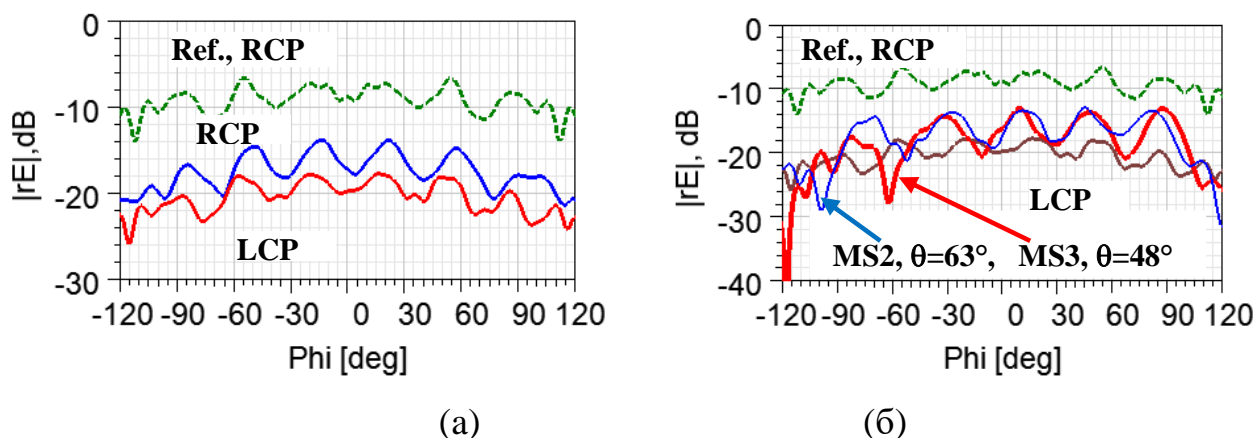


Рис. 4. Диаграммы рассеяния MS1 и эталона в азимутальной плоскости (а) и MS2, MS3 на конических поверхностях $\theta=63^\circ$ (MS2) и $\theta=48^\circ$ (MS3) (б); коричневая линия - $\theta=90^\circ$ (MS1) (б); зеленые линии – эталон

Видим, что для одноградиентной модели MS1 с $\nabla\Phi_\phi \neq 0$ в азимутальной плоскости аномальное рассеяние слабо проявляется из-за интерференции локально рассеянных СР-волн на круговой решетке фасок с небольшим азимутальным размером (рис. 4 а). Осевые градиенты фазы моделей MS2 и MS3 смещают аномальные лучи этих фасок на конические поверхности (рис. 4 б).

На рис. 5–7 представлены 3D- и 2D-диаграммы рассеяния MS2, MS3 на средней частоте 15 ГГц. В меридиональных плоскостях для MS2, MS3

наблюдается аномальное конусообразное рассеяние СР-волн (рис. 5 б). Дополнительный осевой градиент фазы $\nabla\Phi_z \neq 0$ формирует веер аномальных лучей на конических поверхностях, симметричных относительно горизонтальной плоскости для рассеянных LCP- и RCP-волн.

Интенсивные аномальные лучи распространяются под меридиональными углами $\theta^{\text{LCP}} \approx 63.5^\circ$, $\theta^{\text{RCP}} \approx 116.5^\circ$ для MS2 и $\theta^{\text{LCP}} \approx 48^\circ$, $\theta^{\text{RCP}} \approx 132^\circ$ для MS3 (рис. 6, красные метки). Метаповерхность MS3 имеет большой осевой градиент фазы $\nabla\Phi_z = \pm 2\pi/3$ рад/см. Поэтому для нее в меридиональной плоскости аномальные лучи отклоняются (от нормали) на большие углы $\theta^{\text{an,LCP}} \approx -42^\circ$ и $\theta^{\text{an,RCP}} \approx +42^\circ$. Аномальные кросс-поляризованные RCP лучи рассеиваются симметрично ко-поляризованным LCP лучам относительно горизонтальной плоскости $\theta=90^\circ$ (см. рис. 6 а,в и рис. 6 б,г).

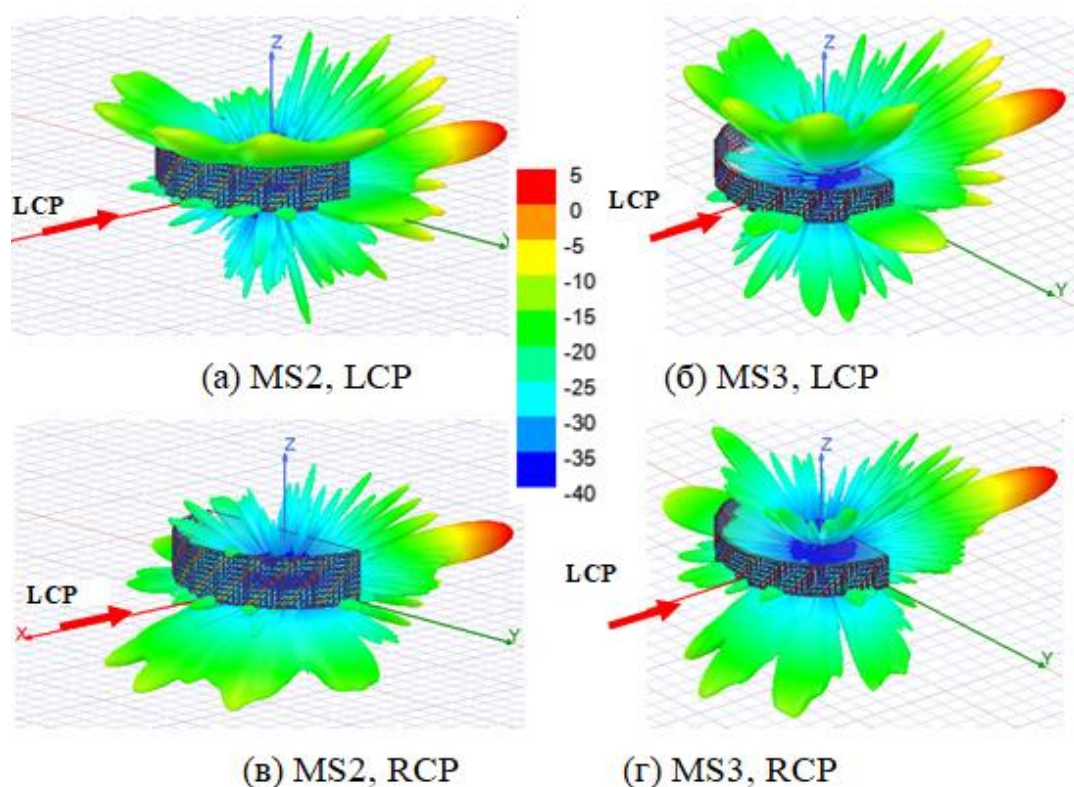


Рис. 5. 3D-диаграммы рассеяния ($|rE|$ в дБ) MS2 (а, в) и MS3 (б, г) для СР-волн

Рассмотрим механизм формирования аномальных лучей биградиентных ФГМП в меридиональной плоскости. Метаповерхности представляют собой дифракционные решетки по оси z с периодом $T_z = 45$ мм (MS2) и $T_z = 30$ мм (MS3).

Меридиональные углы распространения θ_m дифракционных мод относительно нормали к образующей МП можно оценить по формуле:

$$\sin \theta_m = \sin \theta^i + \frac{m\lambda}{T_z}, \quad (1)$$

где m – номер распространяющейся дифракционной моды, θ^i – угол падения относительно нормали к МП, T_z – период решетки.

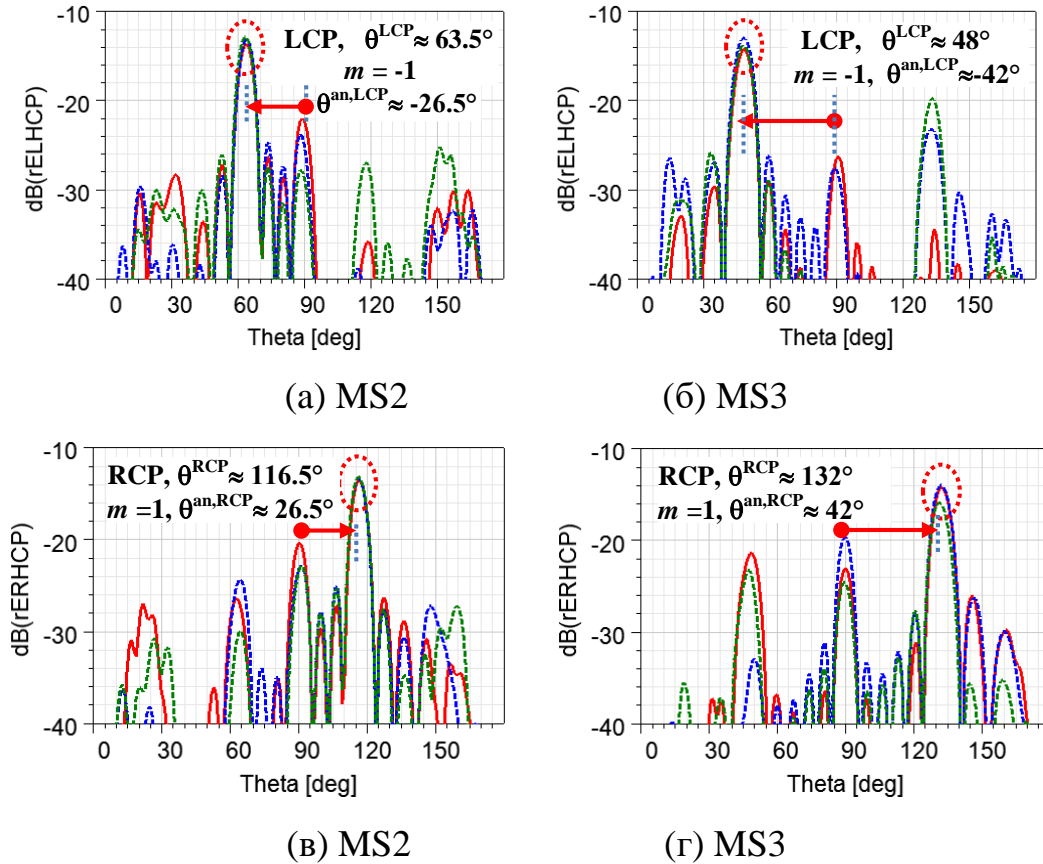


Рис. 6. Аномальное рассеяние от MS2 и MS3 в меридиональных плоскостях: (а, б) $\varphi = -30^\circ$ (красные линии), 10° (синие линии), 45° (зеленые линии); (в, г) $\varphi = -45^\circ$ (красные линии), -10° (синие линии), 30° (зеленые линии)

Из (1) следует, что моды с номерами $m = \pm 1$ будут распространяться на частоте 15 ГГц при нормальном падении $\theta^i = 0^\circ$ под углами $\theta_{\pm 1} = \pm 26.39^\circ$ для MS2 и $\theta_{\pm 1} = \pm 41.81^\circ$ для MS3 (относительно нормали). Симуляция дает практически те-же значения углов аномального отклонения этих мод от нормали: $\theta^{an,LCP} \approx -26.5^\circ$, $\theta^{an,RCP} \approx +26.5^\circ$ для MS2 и $\theta^{an,LCP} \approx -42^\circ$, $\theta^{an,RCP} \approx +42^\circ$ для MS3 (рис. 6, красные стрелки). Осевой градиент фазы селективирует углы распространения дифракционных лучей $m = \pm 1$ ко-LCP и кросс-RCP поляризаций.

В азимутальной плоскости аномальные лучи отклоняются на углы $\varphi^{\text{LCP}} \approx 95^\circ$, $\varphi^{\text{RCP}} \approx -97^\circ$ для MS2 и на меньшие углы $\varphi^{\text{LCP}} \approx 84^\circ$, $\varphi^{\text{RCP}} \approx -84^\circ$ для MS3 (рис. 7, красные стрелки).

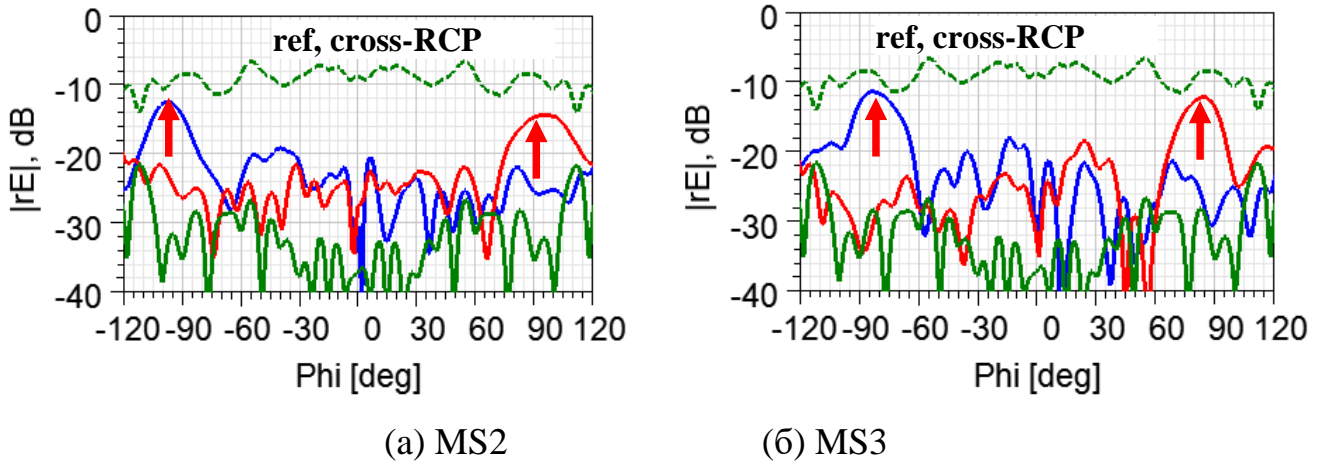


Рис. 7. Бистатические диаграммы рассеяния MS2 и MS3 в горизонтальной плоскости в сравнении с эталоном: синие линии - RCP; красные линии - LCP; эталон – зеленые линии (пунктирные - RCP), сплошные - LCP)

Симуляция показала, что биградиентные ФГМП обеспечивают снижение поля рассеяния СР-волн (относительно эталона) не менее, чем на 10 дБ в полосе от 10-12 ГГц до 18.5 ГГц в широких секторах углов в азимутальной плоскости (до $\pm 75^\circ$) и в меридиональной плоскости (до $\pm 40^\circ$). В результате, моностатические поля СР-волн снижаются на 6-8 дБ в полосе от 7 до 21 ГГц для MS1 и не менее, чем на 10 дБ в полосе 10-18.5 ГГц для MS2 и 12-18.5 ГГц для MS3 (рис. 8).

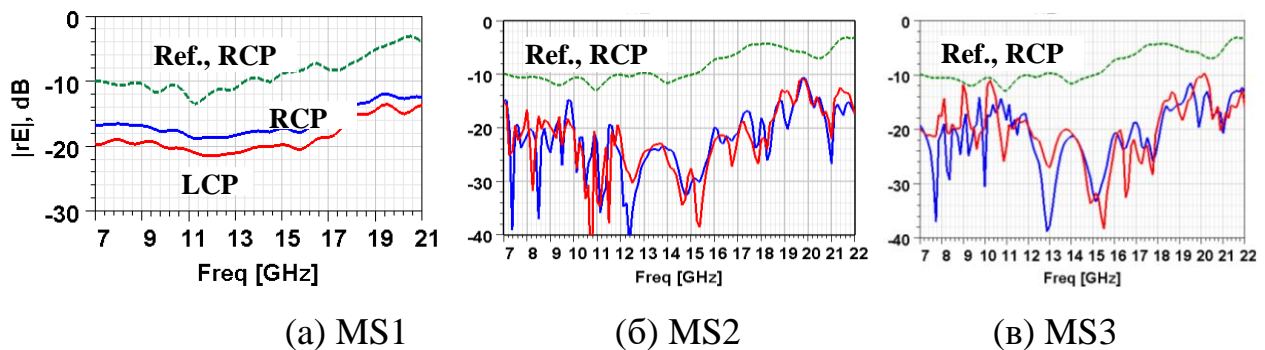


Рис. 8. Снижение моностатических полей ФГМП относительно эталона: красные линии - LCP, синие линии - RCP, зеленые линии – эталон

Заключение

Представлены характеристики рассеяния трех моделей анизотропных цилиндрических фазо-градиентных метаповерхностей (ФГМП) с различным спиральным кодированием РВ-фазы и аномальным рассеянием. Мы сравнили эффективность снижения поля рассеяния волн круговых поляризаций в переднем полупространстве для ФГМП с одинаковым градиентом РВ-фазы в азимутальном направлении и различными градиентами фазы в осевом направлении. Симуляция позволила найти биградиентные модели, которые создают наибольшее аномальное рассеяние, когда интенсивные аномальные лучи дальше отклоняются от области обратного рассеяния. Биградиентные ФГМП формируют веер аномальных лучей на конических поверхностях, симметричных относительно горизонтальной плоскости для рассеянных LCP- и RCP-волн. Это обеспечивает снижение поля рассеяния CP-волн в широкой полосе частот и в широком секторе азимутальных и меридиональных углов.

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. Yu N. et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science*. 2011. V.34. P.333-337. <https://doi.org/10.1126/science.1210713>
2. Aieta F. et al. Out-of-Plane Reflection and Refraction of Light by Anisotropic Optical Antenna Metasurfaces with Phase Discontinuities. *Nano Lett.* 2012. V.12. P.1702-1706. <https://doi.org/10.1021/nl300204s>
3. Chen W., Balanis C.A., Birtcher C.R., and Modi A.Y. Cylindrically curved checkerboard surfaces for radar cross-section reduction. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2018. V.17. №2. P.343-346. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2789906>

4. Zhao J., et al. Achieving flexible low-scattering metasurface based on randomly distribution of metaelements. *Optics Express*. 2016. V.24. №24|28. P.27850. <https://doi.org/10.1364/OE.24.027849>
5. Shahi A. and Abdolali A. Cylinder scattering pattern manipulation for dual-polarized radar cross-section reduction using inhomogeneous metasurface. *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. 2017. P.1691-1696. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2017.7985322>
6. Luo X.-Y., Chen K., Guo W.-L., and Feng Y.J. Ultra-Thin Conformal Metasurface for Backward RCS Reduction of Large Cylindrical Object. *2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. 2019. P.1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992058>
7. Chen K., et al. Coding metasurface for broadband microwave scattering reduction with optical transparence. *Optics Express*. 2017. V.25. №5|6. P.5571. <https://doi.org/10.1364/OE.25.005571>
8. Wang M., et al. The diffusion conformal metasurface for wide-band RCS reduction of cylindrical target. *2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. 2017. P.1-3. <https://doi:10.1109/APCAP.2017.8420767>
9. Li S., et al. Design of Broadband and Broad-Angle Low-Scattering Conformal Metasurface with Genetic Algorithm. *2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*. 2019. P.1-2. <https://doi.org/10.23919/ACES48530.2019.9060674>
10. Wang Y. and Su J. Conformal Metasurface for Wideband RCS Reduction. *2020 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*. 2020. P.1-3. <https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP49156.2020.9199688>
11. Wang Y. et al. A Prismatic Conformal Metasurface for Radar Cross-Sectional Reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. V.19. №4. P.631-635. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2974018>

12. Chatterjee J., Mohan, A. and Dixit V. Ultrawideband RCS Reduction of Planar and Conformal Surfaces Using Ultrathin Polarization Conversion Metasurface. *IEEE Access*. 2022. V.10. P.36563-36575. <https://doi:10.1109/ACCESS.2022.3163850>
13. Fu C. et al. Combining Pancharatnam–Berry Phase and Conformal Coding Metasurface for Dual-Band RCS Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. V.70. №3. P.2352-2357. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3112618>
14. Zhou Y. et al., Wavefront Control of 2D Curved Coding Metasurfaces Based on Extended Array Theory. *IEEE Access*. 2019. V.7. P.158427-158433. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905656>
15. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., and Blagovisnyy P.V. Synthesis of 1-bit Digital Anisotropic Impedance Cylindrical Metasurface for Monostatic RCS Reduction. *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. 2018. P.153-156. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2018.8519811>
16. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., and Blagovisnyy P.V. Reduction and Cancellation of the RCS of Cylindrical Surfaces Using Conformal Digital 1-bit Meta-covers. *2019 International Symposium ELMAR*. 2019. P.167-170. <https://doi.org/10.1109/ELMAR.2019.8918812>
17. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., and Blagovisnyy P.V. “Effect of Marguerite” in Scattering Patterns of Cylindrical Digital 1-Bit Anisotropic Metasurfaces. *2019 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC)*. 2019. P.154-157. <https://doi.org/10.1109/ADMInC47948.2019.8969144>

Для цитирования:

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>