

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.6>

УДК: 621.371: 538.574

ШИРОКОУГОЛЬНОЕ ГАШЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ОТ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ ПАНЧАРАТНАМА-БЕРРИ С ГИБРИДНЫМИ И КОМБИНИРОВАННЫМИ ГИБРИДНЫМИ ФАЗОВЫМИ ОУМ-ПРОФИЛЯМИ

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

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

Статья поступила в редакцию 21 января 2025 г.

Аннотация. В статье рассмотрен фазовый механизм широкополосного широкоугольного снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР), основанный на применении непоглощающих метаповерхностей (МП) Панчаратнама-Берри (ПБ) 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 ПБ-фазы. Характеристики рассеяния модулей МП исследуются в HFSS (методом конечных элементов) на ко- и кросс-поляризациях в случае облучения нормально падающей плоской волной левой круговой поляризации. Симуляция показала, что диаграммы рассеяния ко-поляризованного поля МП во всех этих случаях имеют воронкообразный вихревой характер с винтовым

спиралевидным фазовым фронтом и ОУМ. Генерация ОУМ существенно подавляет обратное рассеяние на ко-поляризации. Комбинирование ОУМ-профилей и параболических профилей увеличивает диффузию широкополосного рассеяния, реализует более широкоугольное рассеяние результирующего поля, что важно для снижения ЭПР. Поэтому спроектированы гибридные МП Панчаратнама-Берри и комбинированные гибридные МП и изучены их характеристики рассеяния. Гибридные МП состоят из двух субблоков различной формы, каждый из которых представляет собой фрагмент противофазных ОУМ-модулей квадратной формы. Комбинированные гибридные МП строятся наложением модифицированного параболического профиля на ОУМ-профили субблоков гибридных МП. Показана правомерность голографического подхода, заложенного в основу проектирования гибридных МП, согласно которому фрагмент (часть) метаповерхности сохраняет фазовые свойства объектной волны целой метаповерхности. Из сравнения диффузии и гашения волн гибридными и комбинированными гибридными метаповерхностями следует, что комбинированные гибридные МП реализуют более широкоугольное диффузное вихревое воронкообразное рассеяние ко-поляризованного поля с углом раствора интенсивных боковых лепестков до 88° , тогда как гибридные МП того же размера имеют угол раствора воронки около 55° .

Ключевые слова: метаповерхность, фаза Панчаратнам-Бэрри, диффузия рассеяния, 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

Применение непоглощающих метаповерхностей (МП) с генерацией в рассеянном поле фазового вихря с орбитальным угловым моментом (ОУМ) для снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) блестящих участков в обратном направлении активно исследуется в последнее десятилетие [1-5]. Механизм снижения ЭПР заключается в том, что метаповерхности с ОУМ имеют фазовую сингулярность поля и практически нулевое значение амплитуды поля на оси вихря [1-5].

Хорошие результаты широкополосного снижения ЭПР среди ОУМ-метаповерхностей демонстрируют МП с фазовым профилем Панчаратнама-Берри (ПБ) [4,5]. К недостаткам МП с генерацией ОУМ можно отнести малую диффузию рассеяния [1-3]. В работе [3] описаны МП размером 210×210 мм с генерацией ОУМ минус 1-го и минус 2-го порядков, работающие в полосе от 6 до 9 ГГц. Угол раствора вихря этих МП меньше 20° для ОУМ минус 1-го порядка и около 30° для ОУМ минус 2-го порядка на средней частоте.

Более широкополосное снижение ЭПР нами достигнуто с помощью ПБ-метаповерхностей на основе тройных сплит-ринг резонаторов [4-5]. Снижение ЭПР ОУМ-модулями с ПБ-фазовыми профилями размером 50×50 мм было продемонстрировано нами [4,5] в полосе 8,1-19,4 ГГц (82.2%) с углом раствора вихря около 52° на частоте 14 ГГц.

Проблеме увеличения диффузии рассеяния, а, следовательно, широкоугольного рассеяния, уделяется, на наш взгляд, недостаточное внимание. Диффузию рассеяния увеличивают путем случайного распределения мета-частиц с различными фазовыми свойствами отражения по метаповерхности [6,7] или путем кодирования МП случайно распределенными последовательностями [8,9]. В работе [10] предлагается метод увеличения диффузии за счет того, что МП предлагают делать шероховатой. Нами было предложено улучшать диффузию рассеяния с помощью цифровых метаповерхностей, состоящих из набора 2-битных модулей неквадратной [11] или пазловой [12] формы, которые

компоновались в сбалансированные по фазе субблоки.

Пути расширения угла раствора конусов вихревых лучей, рассеиваемых ПБ-метаповерхностями с генерацией ОУМ, только начали изучаться. Известно, что МП с параболическими фазовыми профилями обладают хорошей диффузией рассеяния [13,14], но имеют ограничения по полосе частот снижения ЭПР [14-16]. Поэтому в [17] для расширения вихревого луча нами предложено использовать комбинированные законы кодирования фазовых профилей МП, например, комбинирование ОУМ-профиля и модифицированного параболического профиля.

В настоящей работе, с целью повышения диффузии рассеяния от ПБ-метаповерхностей с генерацией ОУМ, мы изучаем характеристики рассеяния гибридных МП и комбинированных гибридных МП. Гибридные МП состоят из противофазных ОУМ-субблоков различной формы. Комбинированные гибридные МП строятся наложением модифицированного параболического профиля на ОУМ-профили субблоков гибридных МП. Характеристики рассеяния исследуются в HFSS в случае нормально падающей плоской волны левой круговой поляризации (CP).

1. Проектирование ОУМ-модулей квадратной формы

Структура ПБ-ячейки МП (рис. 1) и ее характеристики рассеяния подробно рассмотрены в [17]. Мета-частица в форме прямоугольного полоска длиной 8 мм, шириной 3 мм, толщиной 0,035 мм содержит три прямоугольных выреза размером 1,75×1,7 мм и 1,0×2,4 мм. Ячейки 10×10 мм расположены на экранированной однослойной подложке F4b2 толщиной 3 мм. ПБ-фаза ко-поляризованного поля CP-волны в канале Флоке линейно зависит от угла поворота β мета-частицы $\psi_{PB} = 2\beta$ в полосе частот от 8 до 20 ГГц [17].

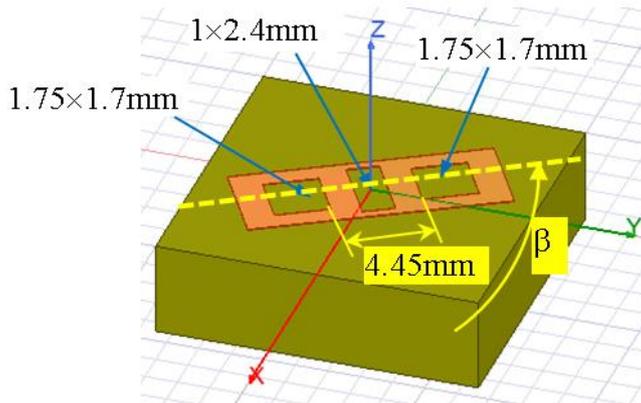


Рис. 1. Единичная ПБ-ячейка.

На основе этих мета-частиц спроектировано четыре ОУМ-модуля квадратной формы размером $D = 120$ мм из 144 мета-частиц (рис. 2). Углы поворота метачастиц β_{mn} в mn -ячейках рассчитывались по формуле:

$$\beta_{mn} = 0,5 \times \psi_{PB,mn},$$

$$\psi_{PB,mn} = \psi_{OAM,mn} = q \times \arctan(y_n / x_m) + \beta_0, \quad (1)$$

где x_m, y_n , – координаты mn -ячейки; q – параметр, определяющий расчетный топологический заряд модуля.

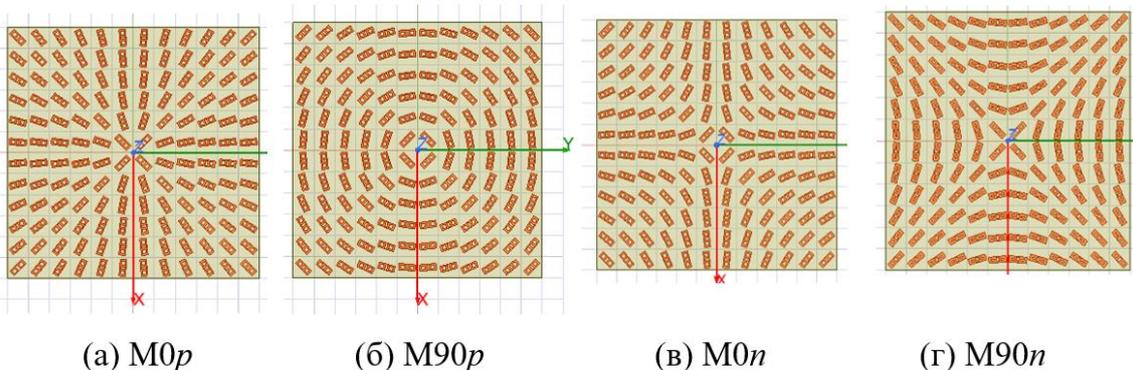


Рис. 2. Топология квадратных модулей.

Модули обозначены $M0p$, $M90p$, $M0n$ и $M90n$ и отличаются начальным углом наклона мета-частиц $\beta_0 = 0^\circ$ или $\beta_0 = 90^\circ$ и параметром $q = +2$ или $q = -2$ (соответственно, обозначения 0 или 90 и p (positive) или n (negative) в названии модулей).

Частотные характеристики моностабильных СР полей, 2D и 3D диаграммы рассеяния и спектры генерируемых ОУМ-мод для модулей $M0p$

и $M0n$ (на средней частоте 14 ГГц) представлены на рис. 3, 4. Характеристики для $M90p$ и $M90n$ принципиально не отличаются от характеристик $M0p$ и $M0n$, но имеют фазовые диаграммы, сдвинутые по фазе на 180° относительно диаграмм для модулей $M0p$ и $M0n$, как это будет показано ниже.

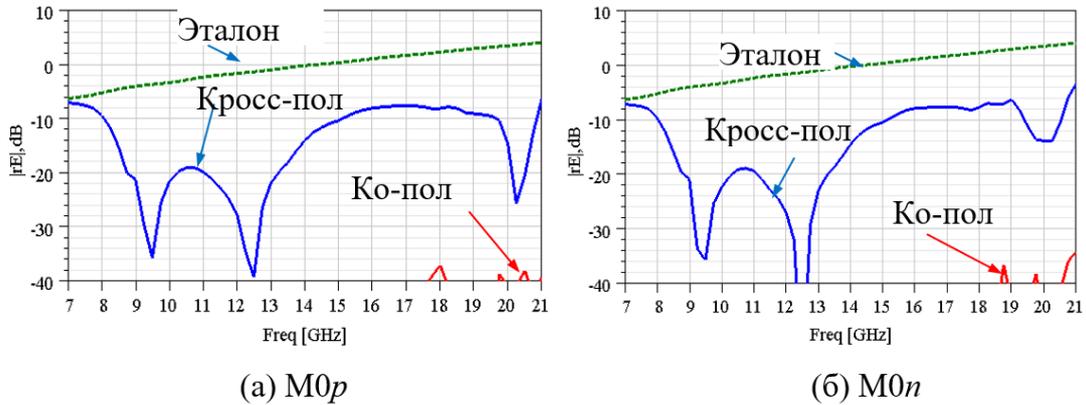


Рис. 3. Частотные характеристики моностатических ко-поляризованных (красные линии) и кросс-поляризованных (синие линии) полей $M0p$ и $M0n$; зеленые пунктирные линии – кросс-поляризованное поле эталона.

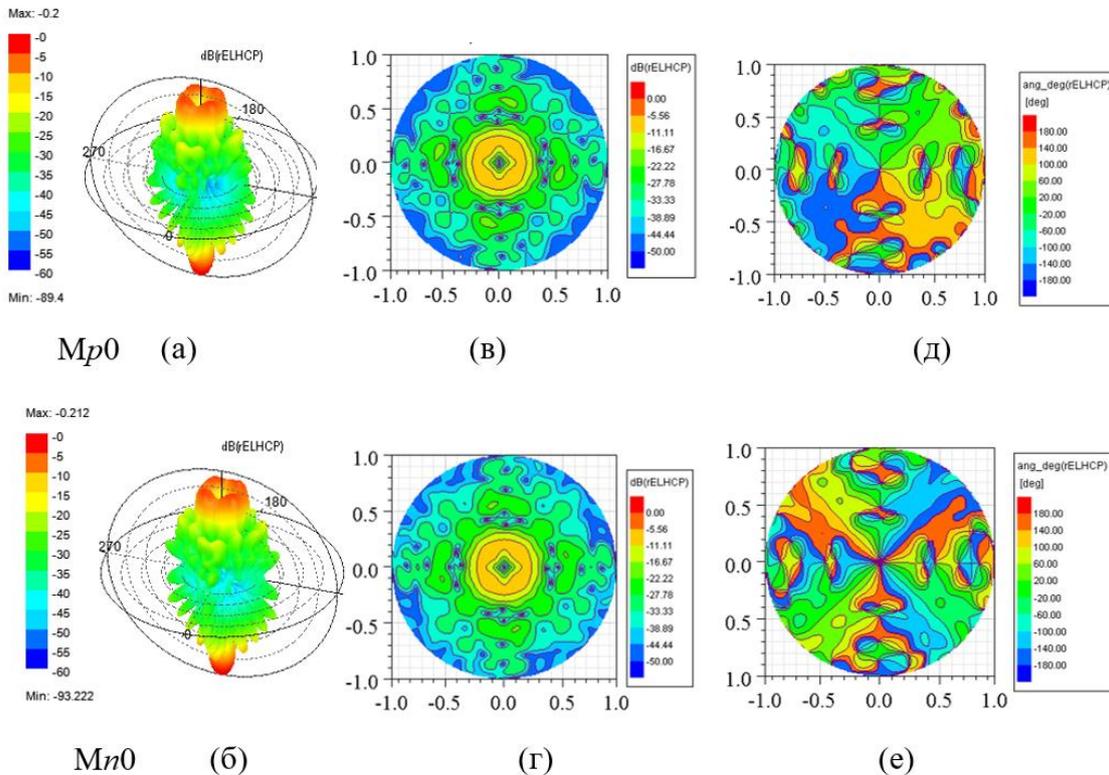


Рис. 4. 3D (а), (б) и 2D диаграммы амплитуд (в), (г) и фаз (д), (е) ко-поляризованных полей для $M0p$ и $M0n$ на частоте 14 ГГц.

Модули M_{0p} и M_{0n} одинаково хорошо гасят ко-поляризованное поле в обратном направлении (примерно на 40 дБ) во всем рассматриваемом диапазоне частот 7-21 ГГц, а кросс-поляризованное поле гасится не меньше, чем на 8 дБ в полосе 8,5-20,5 ГГц (рис. 3). Наблюдается воронкообразный вихревой характер рассеянного поля с малым углом раствора вихря около $\theta = 28^\circ$ (рис. 4).

Спектр и энергетический вес S_k ОУМ-мод k -го порядка определялись известным образом [18] с помощью преобразования Фурье для азимутального распределения электрического ко-поляризованного поля в дальней зоне при фиксированном меридиональном угле наблюдения θ , соответствующем углу раствора вихря. Модули M_{0p} и M_{0n} генерируют вихри рассеянного поля с интенсивной модой, соответственно, $k = -1$ (рис. 5а) и $k = +3$ (рис. 5б).

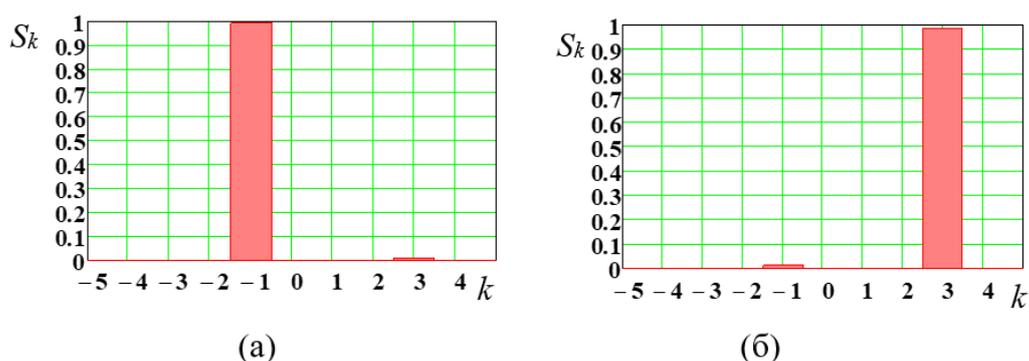


Рис. 5. Энергетический вес ОУМ-мод в дальней зоне для M_{0p} (а) и M_{0n} (б) на частоте $f = 14$ ГГц.

2. Проектирование гибридных метаповерхностей из субблоков с различными ОУМ-профилями

Были спроектированы три гибридные метаповерхности MS1, MS2 и MS3, каждая из которых состоит из двух субблоков 1 и 2 разной формы (рис. 6). Субблоки построены на основе вышеописанных модулей с различными противофазными ОУМ-профилями. Субблоки 1 (Sb1) являются фрагментами центральных частей квадратных модулей M_{90p} (для MS1), M_{0p} (для MS2) и M_{90n} (для MS3). Субблоки 2 (Sb2) представляют собой фрагменты в виде четырех краевых частей модуля M_{0n} (для MS1 и MS3) или M_{90p} (для MS2).

Спроектированные гибридные метаповерхности по-прежнему состоят из 144 единичных ячеек и имеют одинаковый размер 120×120 мм.

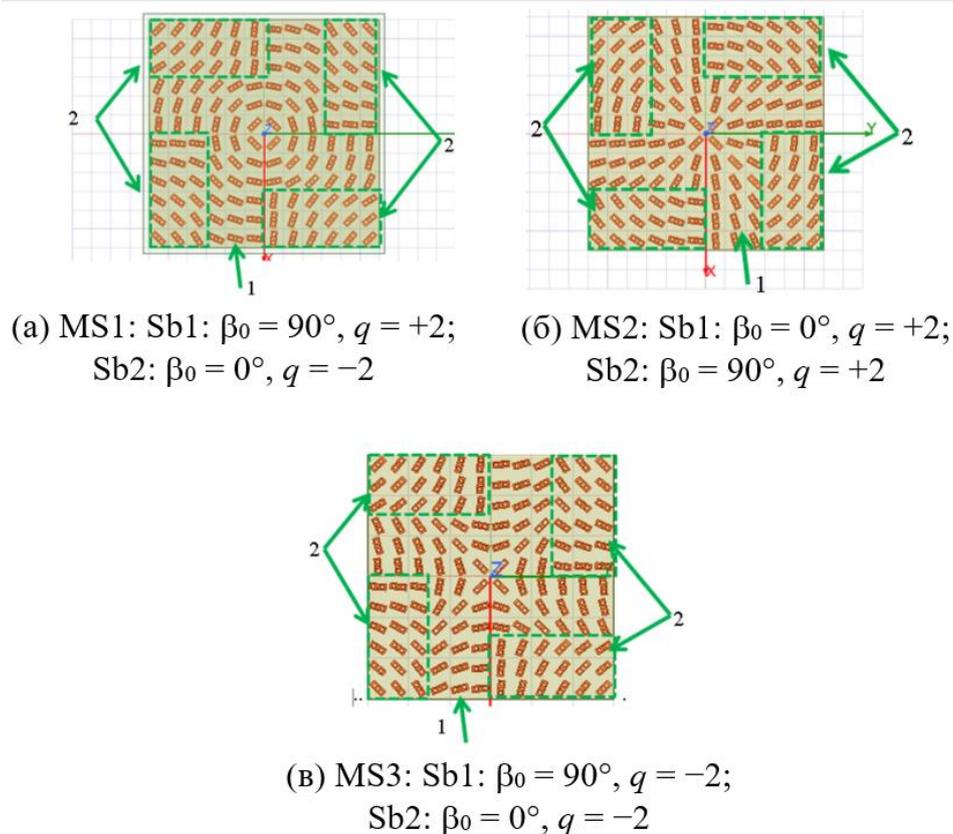


Рис. 6. Субблоки 1 и 2 гибридных метаповерхностей MS1, MS2 и MS3.

В основу проектирования описанных гибридных МП мы положили голографический подход [19], по которому фрагмент (часть) метаповерхности сохраняет фазовые свойства объектной волны целой метаповерхности. Этот подход иллюстрирует рис. 7, поясняющий проектирование гибридной метаповерхности MS2 (рис. 6б).

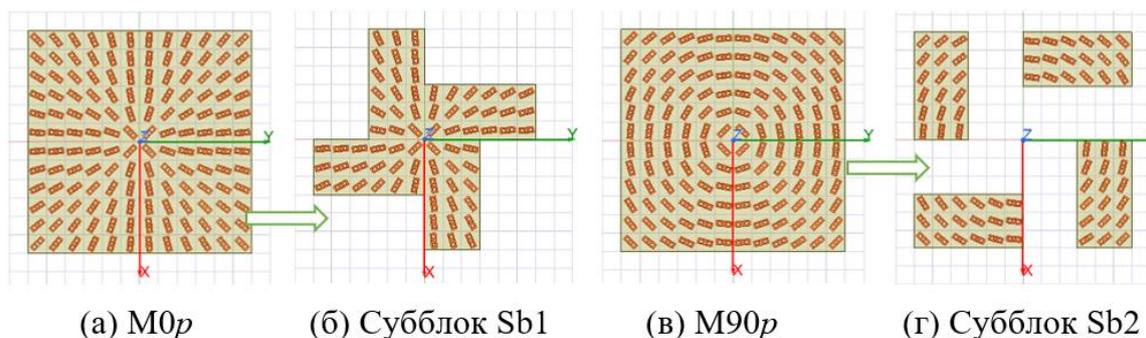


Рис. 7. Топология целых модулей M_{0p} (а), M_{90p} (в) и их фрагментов – Sb1 (б) и Sb2 (г).

Рис. 8 показывает хорошее сохранение интенсивной ОУМ-моды $k = -1$ при переходе от целых модулей к их отдельным фрагментам. Как видно, целые модули генерируют противофазные моды ОУМ. Вихри субблоков близки к противофазным.

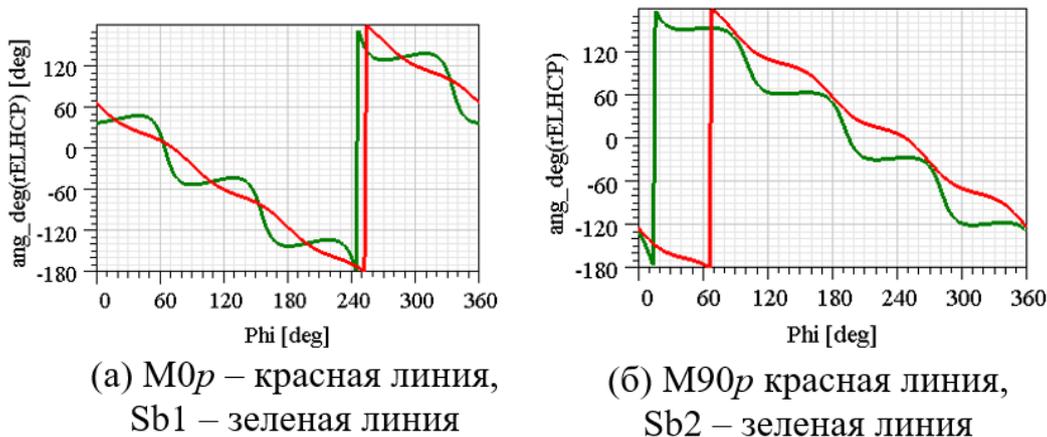


Рис. 8. Сравнение азимутальных фазовых вихрей целых модулей $M0p$, $M90p$ и их фрагментов Sb1, Sb2 в дальней зоне для $\theta = 10^\circ$ на частоте 14 ГГц.

Таким образом, мы построили метаповерхности MS1-MS3 из субблоков, которые генерируют почти противофазные ОУМ-моды одинакового или разного порядков (по величине и знаку k).

Сравним диффузию и гашение СР-волн метаповерхностями MS1, MS2 и MS3. На рис. 9-11 представлены амплитудные диаграммы рассеяния ко-поляризованного поля (левой круговой поляризации) и кросс-поляризованного поля (правой круговой поляризации), 3D и 2D диаграммы рассеяния, а также спектры генерируемых ОУМ-мод (на средней частоте 14 ГГц).

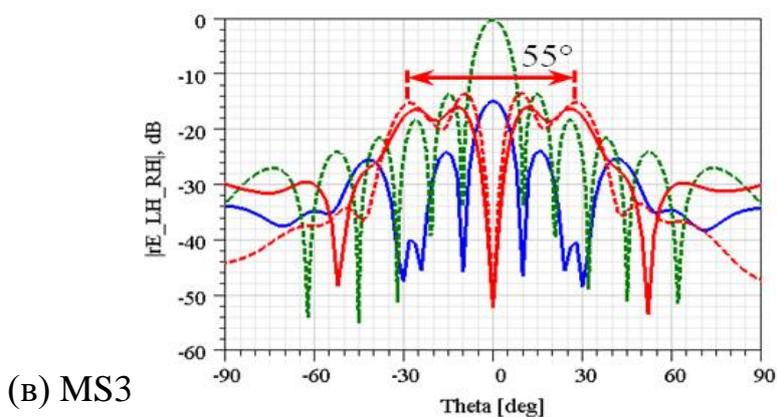
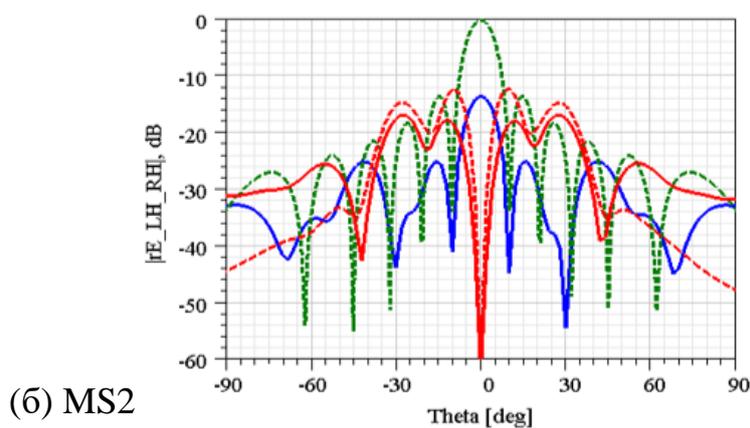
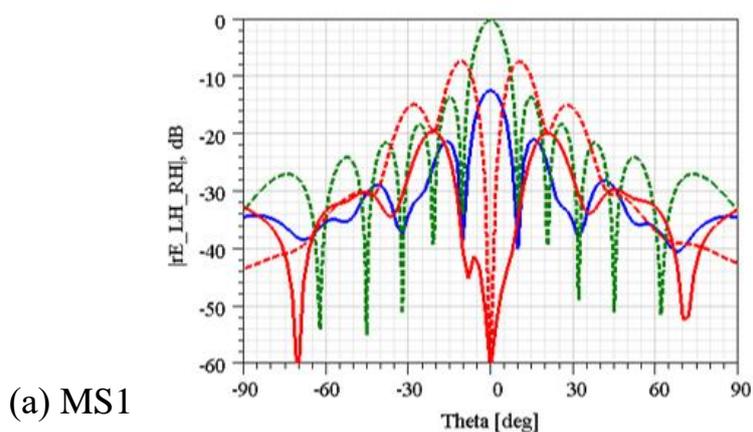


Рис. 9. Бистатические диаграммы ко-поляризованных полей (красные сплошные линии для $\varphi = 0^\circ$, красные пунктирные линии для $\varphi = 45^\circ$) и кросс-поляризованных полей (синие линии для $\varphi = 0^\circ$); зеленые пунктирные линии – кросс-поляризованное поле эталона.

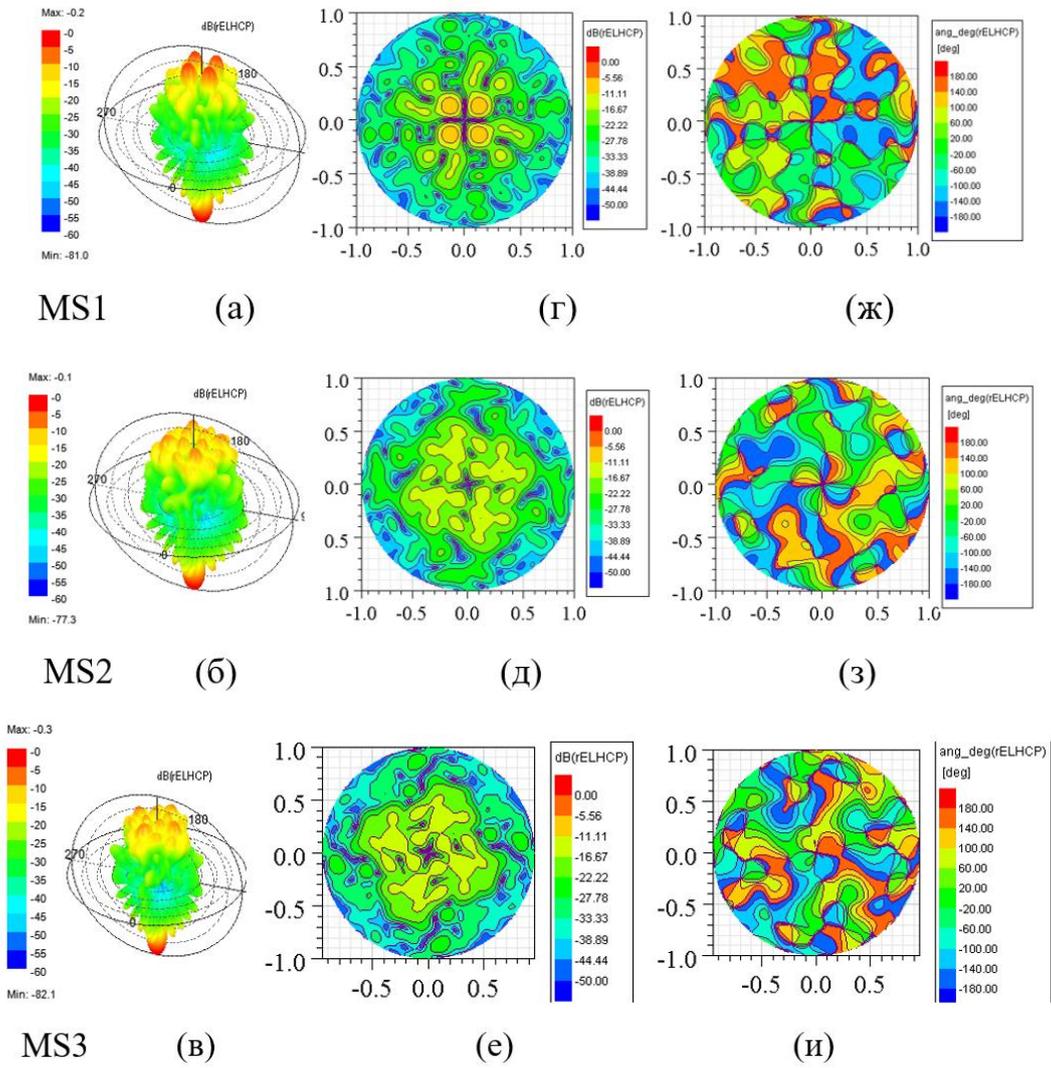


Рис.10. 3D (а-в) и 2D диаграммы амплитуд (г-е) и фаз (ж-и) ко-поляризованных полей для MS1, MS2 и MS3.

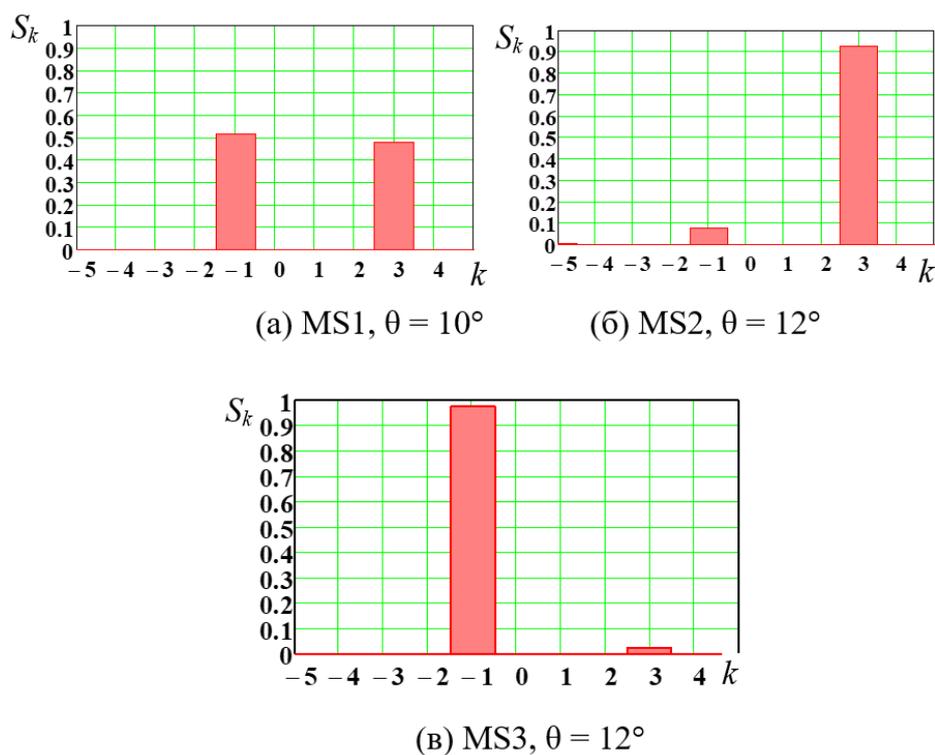


Рис. 11. Энергетический вес ОУМ-мод метаповерхностей MS1-MS3 в дальней зоне на частоте 14 ГГц.

Симуляция показала, что увеличение диффузии рассеяния наблюдается для гибридных метаповерхностей MS2 и MS3, состоящих из субблоков с генерацией ОУМ мод одного порядка k . Эти МП имеют почти одинаковое широкоугольное диффузное рассеяние ко-поляризованного поля с углом раствора интенсивных боковых лепестков 55° (в главных и диагональных плоскостях) и гашением боковых лепестков не менее, чем на 12 дБ относительно эталона (рис. 9, 10).

Центральный вихрь метаповерхности MS2, состоящей из субблоков с модой $k = -1$, имеет интенсивную моду $k = +3$, а центральный вихрь MS3, состоящей из субблоков с модой $k = +3$, – интенсивную моду $k = -1$ (рис. 11б и в).

В случае MS1, состоящей из субблоков с генерацией мод разного порядка (по величине и знаку k), интенсивность боковых лепестков ко-поляризованного поля в диагональных плоскостях наблюдения даже возрастает по сравнению с ко-полем модулей, из которых проектируются субблоки (рис. 9а). Интерференция вихрей субблоков MS1 приводит к тому, что центральный вихрь MS1 содержит две одинаковые по интенсивности моды $k = -1$ и $k = +3$ (рис. 11а).

3. Гибридные комбинированные метаповерхности

Рассмотрим гибридные комбинированные метаповерхности MS4, MS5 и MS6 (рис. 12). Они спроектированы наложением модифицированного параболического ПБ-профиля [17] на ОУМ-профили гибридных метаповерхностей MS1, MS2 и MS3:

$$\Psi_{PB, mn} = \Psi_{OAM, mn} + \Psi_{MP, mn}, \quad (2)$$

$$\Psi_{MP, mn} = \frac{2\pi}{D} G \times \left(\sqrt{R_{mn}^2 + F^2} - F \right), \quad (3)$$

где фаза $\Psi_{OAM, mn}$ каждого субблока MS4-MS6 рассчитывалась по формуле (1), фаза $\Psi_{MP, mn}$ определялась по формуле (3); $F = \delta D$ – фокусное расстояние; δ – параметр фокуса; R_{mn} – расстояние от центра МП до центра mn -ячейки; D – размер МП; G – параметр фазового профиля. Ниже использовались наилучшие [17] параметры $\delta = 0,5$, $G = 5,679$.

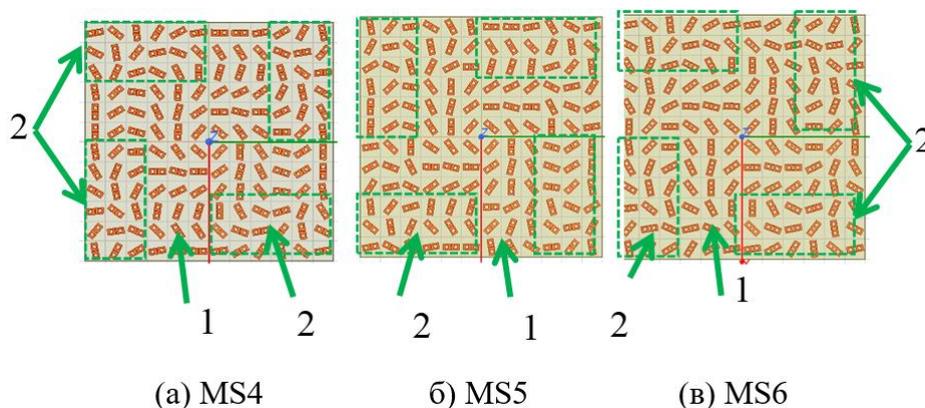


Рис.12. Топология гибридных комбинированных МП с одинаковыми параметрами $\delta = 0,5$, $G = 5,679$ для всех субблоков:

- (a) Sb1: $\beta_0 = 90^\circ$, $q = +2$; Sb2: $\beta_0 = 0^\circ$, $q = -2$;
- (б) Sb1: $\beta_0 = 90^\circ$, $q = +2$; Sb2: $\beta_0 = 0^\circ$, $q = +2$;
- (в) Sb1: $\beta_0 = 90^\circ$, $q = -2$; Sb2: $\beta_0 = 0^\circ$, $q = -2$.

Сравним диффузию и гашение волн левой круговой поляризации гибридными метаповерхностями MS1-MS3 и комбинированными гибридными метаповерхностями MS4-MS6. На рис. 13-15 представлены бистатистические диаграммы рассеяния MS4-MS6 и спектры генерируемых ОУМ-мод (на частоте 14 ГГц).

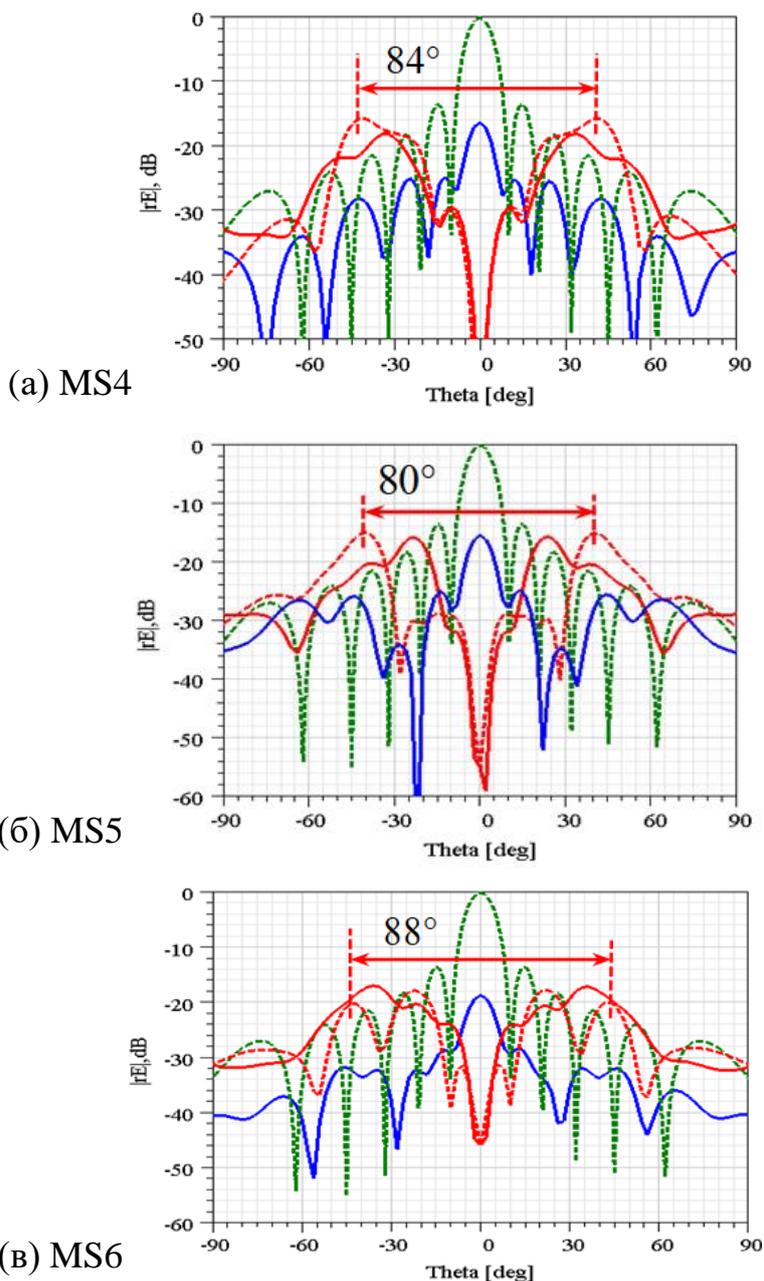


Рис. 13. Бистатистические диаграммы ко-поляризованных (красные сплошные линии – $\varphi = 0^\circ$, красные пунктирные линии – $\varphi = 45^\circ$) и кросс-поляризованных полей (голубые линии, $\varphi = 0^\circ$); зеленые пунктирные линии – кросс-поляризованное поле эталона.

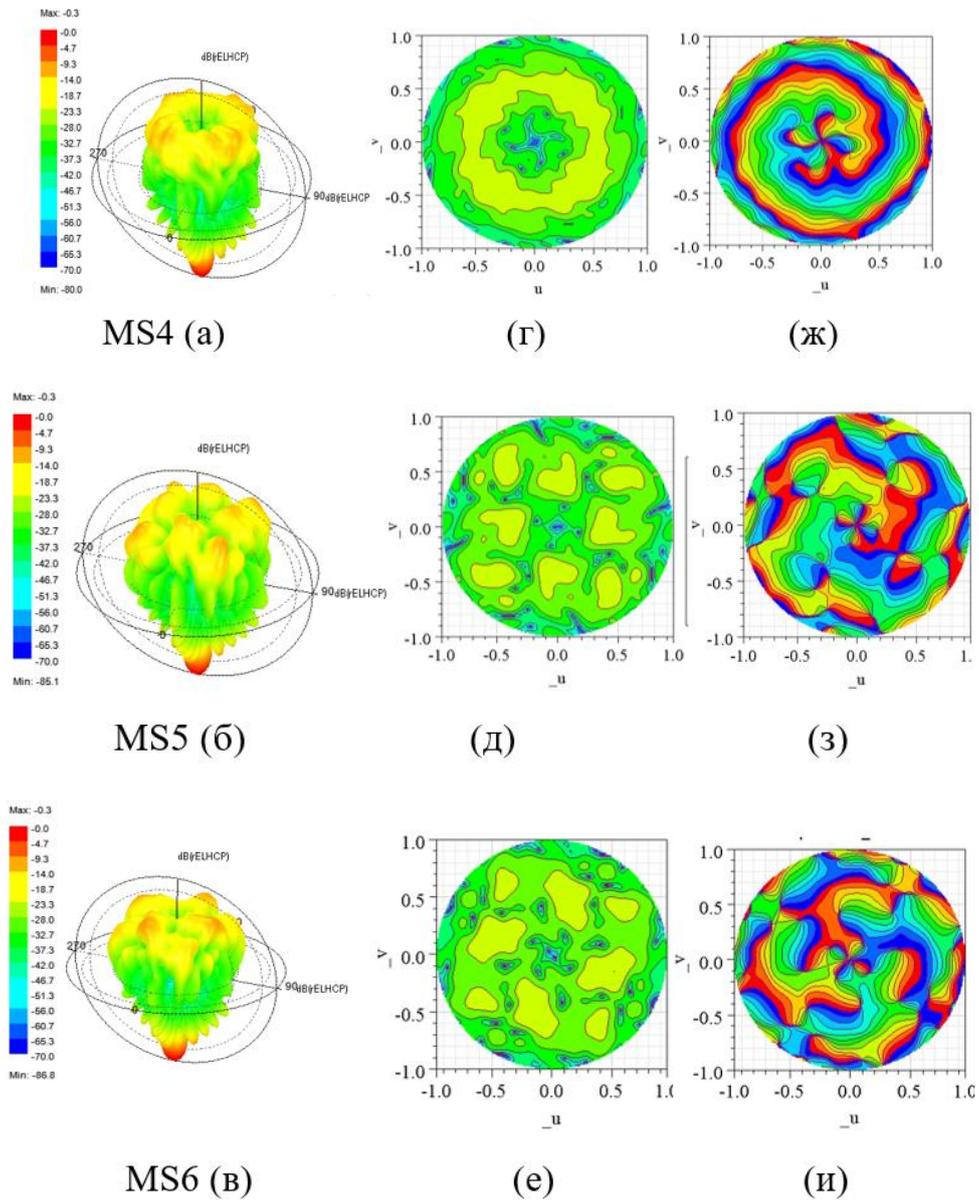


Рис.14. 3D (а-в) and 2D диаграммы амплитуд (г-е) и фаз (ж-и) ко-поляризованных полей MS4, MS5 и MS6.

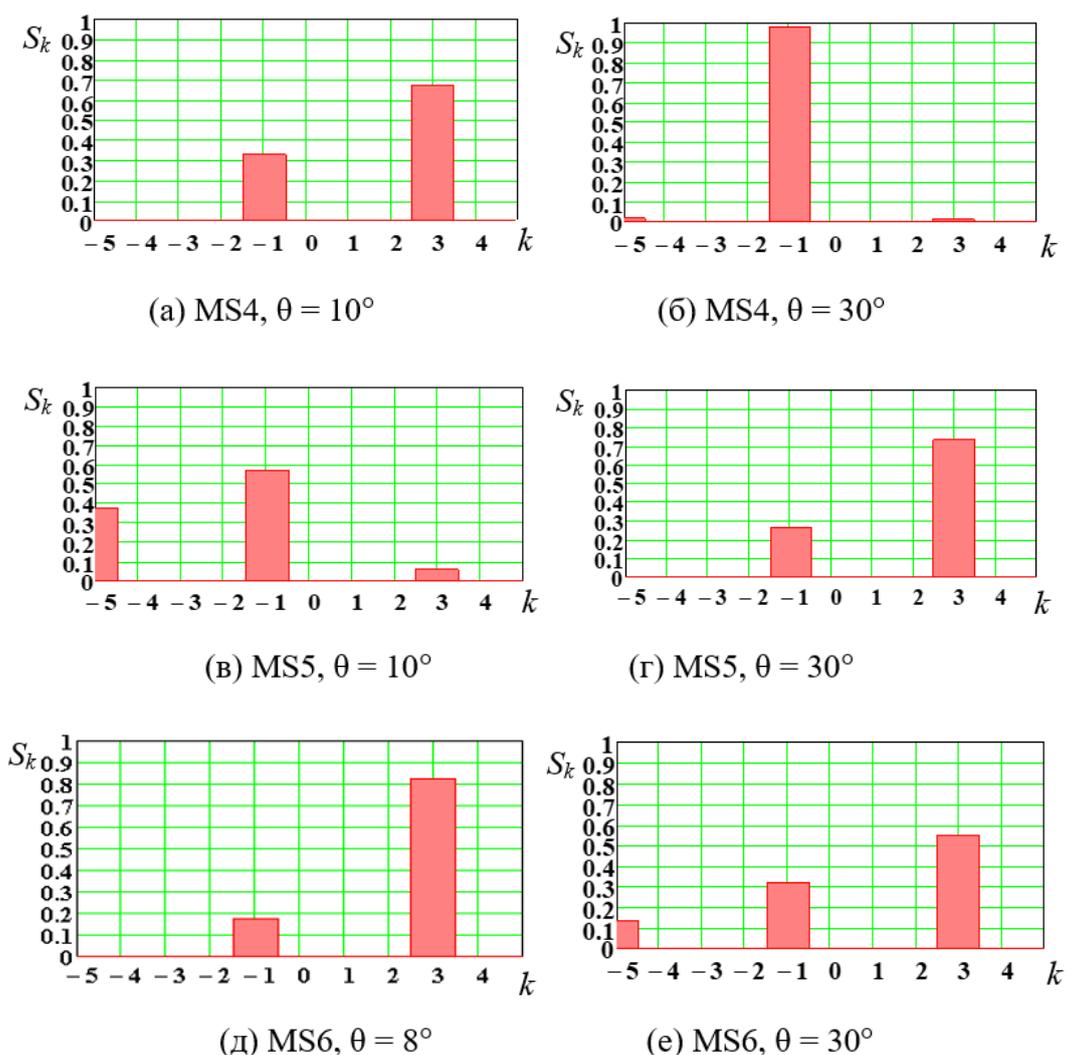


Рис.15. Спектры генерируемых ОУМ-мод в дальней зоне на частоте 14 ГГц.

Из сравнения диаграмм рассеяния MS1-MS3 и MS4-MS6, приведенных на рис. 9 и 13, видно существенное увеличение диффузии рассеяния для МП с комбинированными гибридными профилями. Метаповерхности MS4-MS6 реализуют более широкоугольное (почти одинаковое) диффузное вихревое рассеяние ко-поляризованного поля с углом раствора интенсивных боковых лепестков до 88° (рис. 13, 14). Наибольшая диффузия рассеяния наблюдается для MS6 с углами раствора боковых лепестков 72° и 88° , соответственно, в главных и диагональных плоскостях (на частоте 14 ГГц).

Основной вихрь ко-поляризованного поля MS4 (рис. 15б; $\theta = 30^\circ$) имеет ОУМ-моду $k = -1$, а в поле MS5 и MS6 присутствуют моды $k = -5$, $k = -1$ и $k = +3$ (рис. 15г, е). Все комбинированные гибридные МП имеют также

несколько центральных вихрей с интенсивными модами $k = +3$ и $k = -1$ (рис. 15а, в, д; $\theta = 8^\circ; 10^\circ$).

Симуляция показала, что метаповерхности MS4-MS6 хорошо гасят ко-поляризованное поле в обратном направлении (более, чем на 35 дБ) во всем рассматриваемом диапазоне частот 7-21 ГГц, а кросс-поляризованное поле MS6 гасится более, чем на 7 дБ в полосе 8,5-21,2 ГГц (рис. 16).

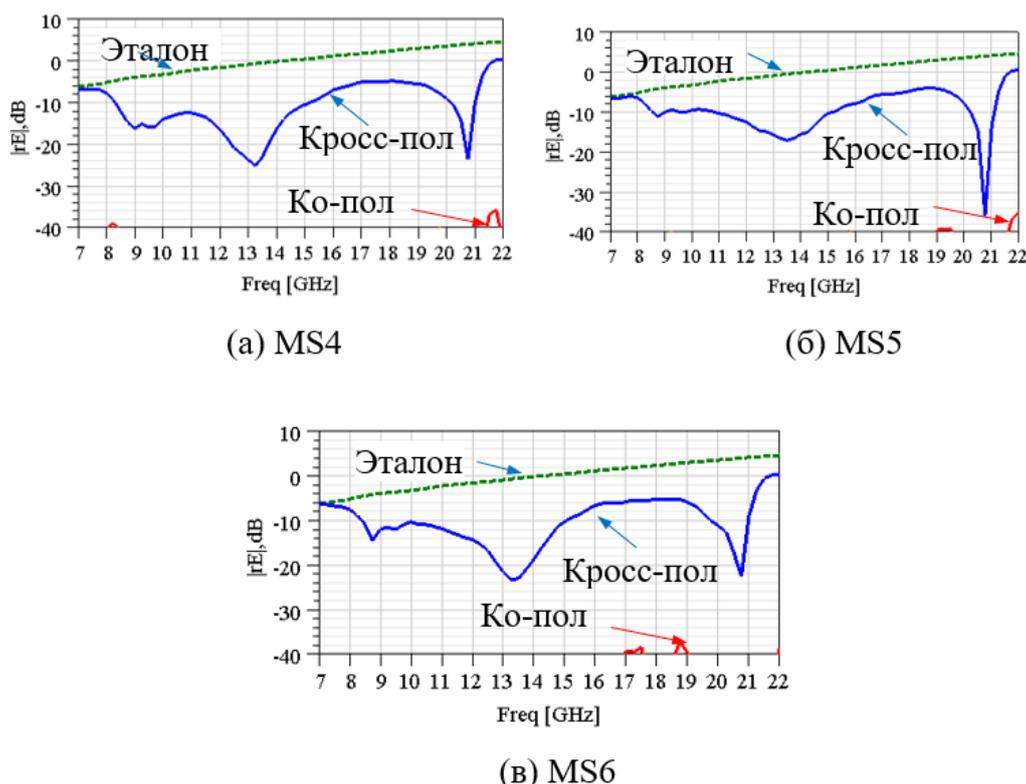


Рис.16. Моностатические диаграммы ко-поляризованных (красные линии) и кросс-поляризованных (голубые линии) полей; зеленые пунктирные линии – кросс-поляризованное поле эталона.

Заключение

В этой статье мы сравнили диффузию рассеяния и гашение СР-волн для трех гибридных МП (состоящих из противофазных ОУМ-субблоков различной формы) и трех комбинированных гибридных МП (спроектированных наложением модифицированного параболического профиля ПБ-фазы на ОУМ-профили гибридных МП). Симуляция показала, что комбинированные гибридные МП реализуют более широкоугольное диффузное вихревое воронкообразное рассеяние ко-поля с углом раствора интенсивных боковых

лепестков до 88° (вместо 55° для гибридных МП, состоящих из субблоков с генерацией ОУМ мод одинакового порядка). Полученные результаты будут полезны при проектировании ПБ-метаповерхностей, предназначенных для широкоугольного широкополосного гашения рассеяния.

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. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>

6. Zhang Y. et al. Broadband diffuse terahertz wave scattering by flexible metasurface with randomized phase distribution //Scientific Reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 26875. <https://doi.org/10.1038/srep26875>
7. Su J. et al. Ultra-wideband, wide angle and polarization-insensitive specular reflection reduction by metasurface based on parameter-adjustable meta-atoms //Scientific reports. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 42283. <https://doi.org/10.1038/srep42283>
8. Chen K. et al. Geometric phase coded metasurface: from polarization dependent directive electromagnetic wave scattering to diffusion-like scattering //Scientific reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 35968. <https://doi.org/10.1038/srep35968>
9. Sun H. et al. Broadband and broad-angle polarization-independent metasurface for radar cross section reduction //Scientific reports. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 40782. <https://doi.org/10.1038/srep40782>
10. Chen Z., Deng H., Zheng L. Phase random metasurface with diffuse scattering based on subwavelength unit's design of shunt resonance circuit //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 220017-220026. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042531>
11. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V. Anisotropic 2-bit Low-RCS Meta-coatings with Improved Diffusion Scattering //2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – IEEE, 2022. – С. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICCT56057.2022.9976846>
12. Semenikhin A., Semenikhina D. 2-bit Digital Anisotropic Low-RCS Metasurfaces with Puzzles'-type Modules with Improved Diffusion Scattering //2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2022. – С. 1-3. <https://doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9769355>
13. Al-Nuaimi M.K.T. et al. Wideband Radar Cross Section Reduction Using Parabolic Phased Metasurfaces //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2023 – Т. 22. – №. 7. – С. 1547-1551. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3250453>

14. 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>
15. 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>
16. 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. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ab9266>
17. Семенихин А.И., Семенихина Д.В. Метаповерхности Панчаратнама-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> .
18. Jack B., Padgett M.J., Franke-Arnold S. Angular diffraction //New Journal of Physics. – 2008. – Т. 10. – №. 10. – С. 103013. <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/10/10/103013>
19. Kock W.E., Kock W.E. Microwave holography //Engineering Applications of Lasers and Holography. – 1975. – С. 179-223. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2160-6_10

Для цитирования:

Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Зыкина А.М. Широкоугольное гашение рассеяния от метаповерхностей Панчаратнама-Берри с гибридными и комбинированными гибридными фазовыми ОУМ-профилями. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.6>