

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 274–285
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 274–285
https://fizika.sgu.ru https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-274-285, EDN: MDQDJO

Научная статья
УДК 537.874.6,621.396.67

Влияние геометрических параметров *L*-образной метаструктуры на картину обратного рассеяния в диапазоне 16–25 ГГц

А. С. Мазинов✉, Н. А. Болдырев, А. А. Марендич, А. В. Старосек, А. А. Нудьга

Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Россия, Республика Крым, 295007, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4

Мазинов Алим Сеит-Аметович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института, mazinovas@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0001-8015-8841, AuthorID: 754027
Болдырев Николай Алексеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института, nikolayboldyrev@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0003-1804-4784, AuthorID: 1228998
Марендич Алексей Александрович, бакалавр кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института, marendic0111@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-5416-0134, AuthorID: 1321140
Старосек Александр Викторович, старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института, starosekav@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0001-9688-7598, AuthorID: 1055717
Нудьга Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института, nudgaaa@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0001-7344-8111, AuthorID: 922935

Аннотация. В работе представлены результаты численного и экспериментального исследования рассеяния на плоской метаструктуре с *L*-образными резонаторами в диапазоне 16–25 ГГц при нормальном падении линейно поляризованной электромагнитной волны. Основное внимание уделено влиянию геометрических параметров элементарной ячейки на резонансные свойства метаповерхности и подавление обратного рассеяния. Цель исследования заключалась в определении конфигурации, обеспечивающей максимальное снижение эффективной площади рассеяния при сохранении устойчивой диаграммы рассеяния. Оптимизация проводилась путем последовательного анализа длины плеч резонаторов, величины емкостных зазоров между элементами и краевого смещения ячейки. Численное моделирование выполнялось в среде Ansys HFSS 2024 R2, после чего результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на изготовленных образцах на подложке FR-4 толщиной 1.6 мм. Измерения проводились в контролируемой конфигурации с использованием векторного анализатора цепей и рупорной антенны. Установлено, что изменение геометрии существенно влияет на положение и глубину резонансных минимумов. Наиболее выраженное подавление обратного рассеяния достигается при значениях геометрических параметров, обеспечивающих эффективное перераспределение отраженной энергии из нормального направления. Оптимальная конфигурация обеспечивает снижение относительной эффективной площади рассеяния до 23.7 дБ на частоте 23.5 ГГц. Полученные распределения полей показывают, что механизм подавления связан с локализацией электрического поля и поверхностных токов, приводящей к деструктивной интерференции отраженной волны. Сопоставление расчета и эксперимента подтвердило хорошее согласие результатов и практическую пригодность предложенного подхода для управления рассеянием в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: метаструктуры, параметрическая оптимизация, диаграммы рассеяния, СВЧ-диапазон, эффективная площадь рассеяния

© *Мазинов А. С., Болдырев Н. А., Марендич А. А., Старосек А. В., Нудьга А. А., 2026*

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00261, https://rscf.ru/project/25-22-00261/).

Для цитирования: *Мазинов А. С., Болдырев Н. А., Марендич А. А., Старосек А. В., Нудьга А. А.* Влияние геометрических параметров *L*-образной метаструктуры на картину обратного рассеяния в диапазоне 16–25 ГГц // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 274–285. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-274-285, EDN: MDQDJO

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Influence of geometric parameters of an *L*-shaped metastructure on the backscattering pattern in the 16–25 GHz range

A. S. Mazinov✉, N. A. Boldyrev, A. A. Marendich, A. V. Starosek, A. A. Nudga

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Prospekt Vernadskogo, Simferopol 295007, Russia

Alim S. Mazinov, mazinovas@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0001-8015-8841, AuthorID: 754027
Nikolay A. Boldyrev, nikolayboldyrev@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0003-1804-4784, AuthorID: 1228998
Aleksey A. Marenditch, marendic0111@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-5416-0134, AuthorID: 1321140
Aleksandr V. Starosek, starosekav@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0001-9688-7598, AuthorID: 1055717
Aleksandr A. Nudga, nudgaaa@cfuv.ru, https://orcid.org/0000-0001-7344-8111, AuthorID: 922935

Abstract. ***Background and Objectives:*** This study presents the results of numerical and experimental investigation of a planar metastructure composed of *L*-shaped resonators, aimed at controlling scattering in the 16–25 GHz range under normal incidence of a linearly polarized wave. The primary objective is to identify a unit-cell geometry that achieves the deepest resonance-induced reduction in the relative radar cross section (RCS) while maintaining a stable scattering response across the angular range of interest. The work emphasizes how geometric parameters of the unit cell influence resonant behavior and the consequent suppression of monostatic backscattering. ***Materials and Methods*:** The research was carried out through parametric optimization of the resonator geometry. In particular, the effects of the resonator arm lengths, the capacitive gaps between adjacent elements, and the edge offset of the unit cell were analyzed in detail. Numerical modeling was performed in Ansys HFSS 2024 R2, and the results were compared with experimental measurements obtained from fabricated samples based on an FR-4 substrate with a thickness of 1.6 mm. The scattering characteristics were measured in a controlled setup using a vector network analyzer and a horn antenna arrangement, which made it possible to verify the resonance positions and assess the accuracy of the simulation model. ***Results*:** The results have demonstrated that the metastructure exhibits pronounced resonant dips whose frequency position and amplitude are highly sensitive to geometric tuning. Variation of the resonator arm length shifts the resonance over the lower part of the studied spectrum and alters the depth of the minimum relative radar cross section. Changes in the capacitive gaps significantly affect the coupling between adjacent resonators and thereby modify both the resonance width and the suppression level. The edge offset also plays a substantial role in determining the scattering response, with certain values producing a stronger concentration of the reflected field suppression near the normal direction. Among the examined configurations, the optimal geometry was found to provide a reduction in the relative radar cross section of up to 23.7 dB at 23.5 GHz. Field distributions at resonant frequencies further show that the suppression mechanism is associated with the formation of localized electric-field enhancement and surface-current patterns on the metasurface, which support destructive interference in the reflected wave. ***Conclusion*:** These results have indicated the effective energy redistribution away from the monostatic backscatter direction and have confirmed the suitability of the proposed metastructure for applications requiring scattering control in the microwave range. A comparison between simulation and experiment has confirmed a good agreement in both the resonance frequencies and the overall trend of the scattering curves. Minor discrepancies can be attributed to fabrication tolerances, material parameter uncertainties, and measurement conditions. Overall, the obtained results have shown that the systematic geometric optimization of *L*-shaped resonators is an effective strategy for tailoring the scattering behavior of planar metastructures and reducing the radar visibility within the 16–25 GHz band.

Keywords: metastructure, parametric optimization, microwave range, radar cross section, scattering diagram

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-22-00261, https://rscf.ru/project/25-22-00261/).

For citation: Mazinov A. S., Boldyrev N. A., Marendich A. A., Starosek A. V., Nudga A. A. Influence of geometric parameters of an *L*-shaped metastructure on the backscattering pattern in the 16–25 GHz range. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 274–285 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-274-285, EDN: MDQDJO

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Управление характеристиками рассеяния электромагнитных волн является фундаментальной задачей в физике взаимодействия излучения с искусственными средами. Традиционные подходы, основанные на использовании объёмных поглощающих материалов или профилировании поверхности, имеют ряд ограничений. Поглощающие покрытия, как правило, обладают значительной толщиной и массой, а геометрическая модификация рассеивающих объектов не всегда позволяет достичь требуемого контроля над диаграммой рассеяния [1–3].

В последние десятилетия активно развивается направление метаматериалов и метаповерхностей – искусственных периодических структур, позволяющих гибко управлять амплитудой, фазой и поляризацией электромагнитных волн [4, 5].

Для направленного изменения картины рассеяния наиболее перспективны два подхода: создание идеальных поглотителей [6–8] и использование диффузных рассеивателей [9, 10]. Последние работают по принципу перераспределения энергии отраженной волны из зеркального направления в множество боковых лепестков, что достигается за счет псевдослучайного или шахматного распределения фазы отражения по поверхности [11, 12].

Особый интерес представляют метаповерхности с анизотропными элементами, позволяющими управлять фазой обратной волны как за счет резонансных свойств, так и за счет фазовых соотношений вторичных волн (фазы Панчаратнама – Берри) [13, 14]. Такие структуры демонстрируют высокую эффективность в задачах кросс-поляризационного преобразования и широкополосного рассеяния [15, 16]. Однако большинство исследований сосредоточено в X-диапазоне [17, 18], в то время как K-диапазон (18–27 ГГц), используемый в спутниковой связи и радиолокации высокого разрешения, требует дальнейшего изучения и оптимизации топологий метаповерхностей [19, 20].

В наших предыдущих работах по метаструктурам на полосковых резонаторах было показано, что структуры из простых однонаправленных резонаторов имеют значительную поляризационную зависимость [21]. В дальнейшем нами была предложена метаструктура с ячейками, содержащими треугольные спирали, состоящие из большого числа резонаторов различной ориентации, что позволило увеличить рабочий частотный диапазон структуры и ее поляризационные свойства [22]. Однако было обнаружено, что в случае привязки геометрических размеров резонаторов лишь к одному соотношению λ/n рабочая полоса таких метаструктур получается узкой. Это привело нас к исследованию ассиметрично сформированных единичных ячеек с различной длиной резонаторов. Исходя из вышесказанного, целью данной работы является численное моделирование и оптимизация геометрических параметров метаструктуры с L-образными элементами для обеспечения максимального подавления обратного рассеяния в диапазоне частот 16–26 ГГц.

1. Исследуемая структура и метод параметризации

Объект представлял собой планарную метаструктуру, сформированную массивом вложенных L-образных резонаторов, размещенных на диэлектрической подложке из одностороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1.6 мм и экранированных металлическим основанием той же площади что и сборная матрица элементов. Геометрия элементарной ячейки выбрана таким образом, чтобы обеспечить управляемое перераспределение поверхностных токов и формирование высоких показателей рассеяния при нормальном падении электромагнитной волны СВЧ диапазона. Линейные размеры резонаторов и зазоров между ними выбирались исходя из средней длины волны исследуемого диапазона $\lambda_{ср} = 15$ мм ($f_{ср} = 20$ ГГц). В основе построения рассматриваемой структуры лежали парные L-образные резонаторы с различной длиной плеч (рис. 1). Выбор подобного резонатора обусловлен работой представленной метаструктуры в двух линейных

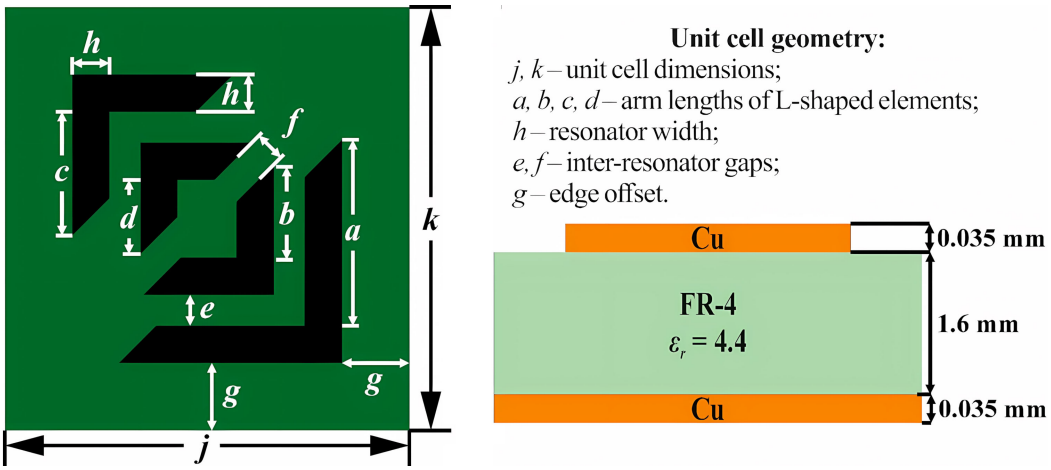


Рис. 1. Схема и геометрические параметры единичной ячейки L-образной метаструктуры (ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки) (цвет онлайн)

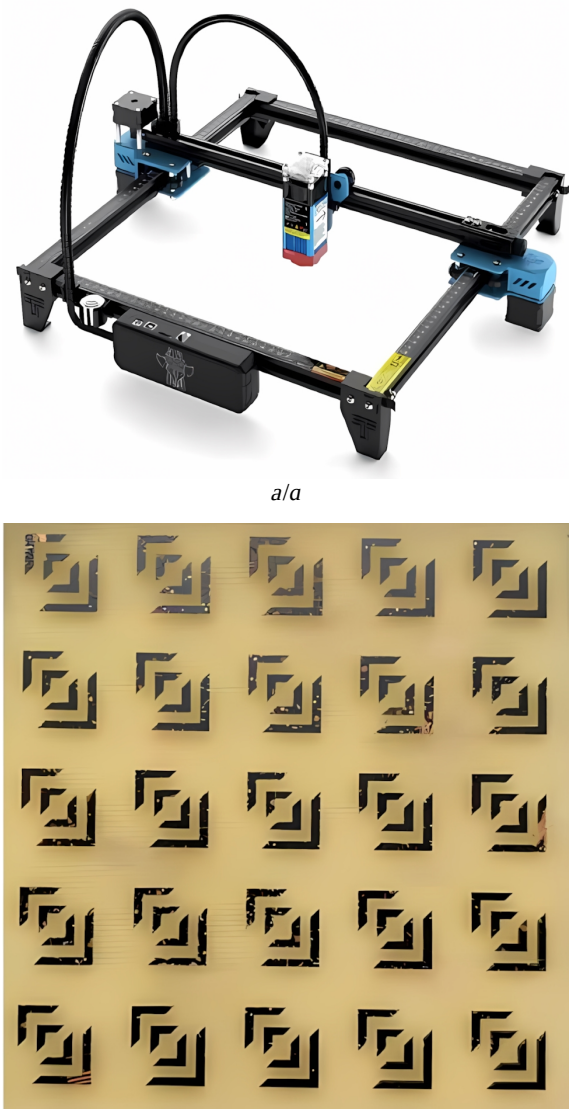
Fig. 1. Scheme and geometric parameters of the unit cell of the L-shaped metastructure (ε_r is the relative permittivity of the substrate) (color online)

поляризациях, за счет расположения проводящих элементов. Также подобный тип резонаторов легко поддается параметрическому изменению, что позволяет легко подстраивать метаповерхность под необходимый частотный диапазон. Размеры нижних резонаторов a и b были выбраны кратными $\lambda_{ср}/(2n)$, а размеры верхней пары резонаторов выбирались как $\lambda_{ср}/(2n+1)$ ($n = 1, 2, 3, \ldots$), причем внешние плечи a и c всегда были больше внутренних плеч b и d. Ширина резонаторов $h = 1.5$ мм, что составляет $\lambda_{ср}/10$; толщина резонаторов – 35 мкм. Величины e и f характеризуют внутренние зазоры; величины (j,k) определяют период решётки; g – значение краевого отступа между соседними ячейками метаповерхности.

Физически L-образный резонатор может быть рассмотрен как открытый токовый контур с индуктивной составляющей, определяемой длиной проводящих участков, и с емкостной составляющей, формируемой за счет щелевых зазоров между соседними элементами. При падении электромагнитной волны по нормали к поверхности возбуждаются поверхностные токи, которые, в зависимости от геометрических параметров, могут находиться в фазе или в противофазе с токами, индуцированными в сплошном металлическом отражателе. Именно это фазовое соотношение определяет степень подавления величины обратного отражения.

В процессе исследования были выбраны три ключевых геометрических параметра, оказывающих наибольшее влияние на электродинамический отклик структуры: длина плеч резонаторов, величина емкостного зазора между ними и период (или краевой отступ) элементарной ячейки, определяющий зазор между соседними элементами матрицы. Выбор именно этих параметров обусловлен тем, что они непосредственно определяют эквивалентные индуктивность и емкость системы, а также характер взаимного электромагнитного взаимодействия между соседними ячейками. Критерием оптимальности являлось достижение минимального отражения при нормальном падении волны в диапазоне 16–25 ГГц в зеркальном направлении.

Экспериментальные образцы метаструктуры были изготовлены методом травления из омеднённого текстолита FR-4. Для формирования метаповерхности слой меди на верхней поверхности подложки покрывался акриловой краской, часть краски удалялась с помощью лазерного ЧПУ-станка ТТ-45, медь вытравливалась раствором хлорного железа, затем остатки краски удалялись растворителем. Использование ЧПУ станка обеспечивало точность изготовления элементов метаповерхности до 0.05 мм (рис. 2).



а/*a*

б/*b*

Рис. 2. Создание экспериментальных образцов: лазерный ЧПУ-станок ТТ-45 (*а*); готовый образец метаповерхности (*б*) (цвет онлайн)

Fig. 2. Creation of experimental samples: TT-45 laser CNC machine (*a*); ready-made metasurface sample (*b*) (color online)

2. Методы компьютерного моделирования и экспериментальных измерений

Численное исследование электродинамических свойств метаструктуры проводилось методом конечных элементов в программной среде Ansys HFSS 2024 R2. Геометрическая модель включала диэлектрическую подложку FR-4 толщиной 1.6 мм с относительной диэлектрической

проницаемостью $\varepsilon_r = 4.4$ и тангенсом угла диэлектрических потерь 0.02. На верхней поверхности подложки располагался медный проводящий рисунок толщиной 35 мкм, а нижняя поверхность была полностью металлизирована и моделировалась как лист меди такой же толщины.

Расчетная область представляла собой прямоугольный бокс, вплотную примыкающий к исследуемой структуре снизу (рис. 3). Размеры бокса в плоскости *XY* соответствовали габаритам структуры, а его высота составляла 32 мм. Примыкание без зазора было обусловлено тем, что непосредственно под расчетной областью располагалась металлизированная поверхность, отражения от которой являлись бы паразитными. Такая конфигурация позволяла наблюдать диаграммы обратного рассеяния в полусфере при изменении углов θ и φ от –90° до 90° с шагом 1°. На внешних границах расчетной области задавались поглощающие граничные условия (Radiation Boundary), обеспечивающие моделирование распространения волн в свободном пространстве без паразитных отражений и позволяющие рассчитывать диаграммы обратного рассеяния в дальней зоне (Infinity Sphere).

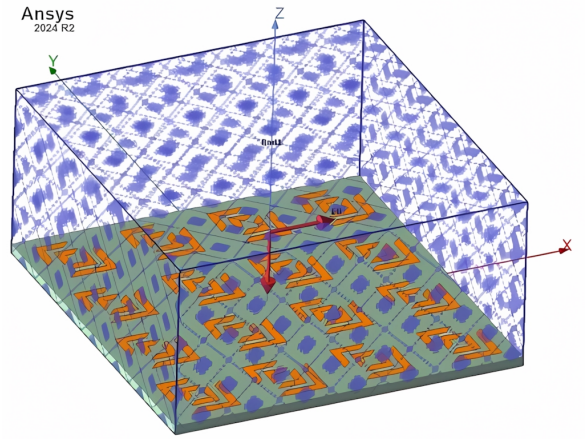


Рис. 3. Область моделирования в компьютерной модели в Ansys HFSS (цвет онлайн)

Fig. 3. Simulation domain of a computer model in Ansys HFSS (color online)

Возбуждение осуществлялось плоской электромагнитной волной с линейной поляризацией *вдоль оси X*, падающей *по нормали* (по направлению оси *Z*) к поверхности структуры (см. рис. 3). Источник излучения располагался *на высоте* 15 мм от исследуемой структуры. Выбор нормального падения обусловлен тем, что данный режим является наиболее показательным с точки зрения оценки способности структуры подавлять зеркальный лепесток диаграммы рассеяния.

В процессе расчетов определялись частотные зависимости относительной эффективной площади рассеяния (ЭПР), распределения электрического поля в ближней зоне, а также диаграммы рассеяния в дальней зоне. Особое внимание уделялось анализу распределения поверхностных токов, поскольку именно их пространственная конфигурация определяет интерференционную картину отраженного поля.

Для экспериментальной верификации результатов моделирования были проведены измерения в свободном пространстве (рис. 4). Экспериментальная установка включала передающую (Tx) и приёмную (Rx) рупорные антенны, размещенные на фиксированном расстоянии r более 10 длин волн (для нижней частоты представленного диапазона) от исследуемого образца. Антенны через фазостабильные кабеля подсоединялись к векторному анализатору цепей Микран P4226 (Микран, Россия). Перед началом измерений проводилась калибровка проводных соединений в режиме OSLT с использованием калибровочного модуля Keysight 85521A (Keysight, США).

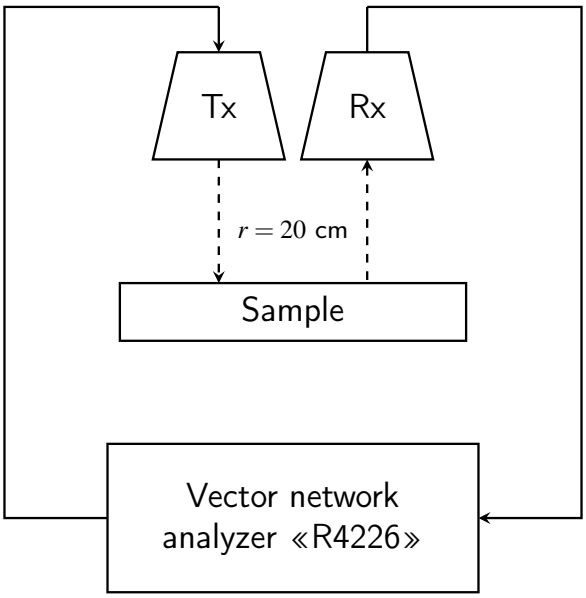
Измерения выполнялись при нормальном падении электромагнитной волны. В качестве эталона использовался сплошной металлический отражатель (медная пластина) с теми же размерами, что и исследуемая метаповерхность.

В ходе измерений регистрировались амплитуды отражённого сигнала от метаповерхности и от эталонного металлического отражателя (медной пластины) при одинаковой конфигурации установки и нормальном падении волны. Относительной эффективной площадью рассеяния $\sigma_{\text{rel}}(f)$ в данной работе мы называем нормированную величину, определяемую через отношение мощностей сигнала, отражённого от исследуемой метаструктуры, к сигналу, отражённому от эталонного отражателя, с учётом уровня внешнего шума:

$$\sigma_{\text{rel}} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{sample}}(f) - P_{\text{noise}}(f)}{P_{\text{ref}}(f) - P_{\text{noise}}(f)}\right),$$

где $P_{\text{sample}}(f)$ и $P_{\text{ref}}(f)$ – мощности отражённого сигнала от метаповерхности и эталонного металлического отражателя соответственно.

Уровень внешнего шума $P_{\text{noise}}(f)$ определяется по отдельному измерению при отсутствии исследуемых образцов в апертуре антенн: остаётся только подложкодержатель из пенопласта и фоновые паразитные отражения.



а/a



б/b

Рис. 4. Экспериментальная установка для измерения частотных свойств метаповерхности: блок-схема (*а*); образец в установке (*б*) (цвет онлайн)

Fig. 4. Experimental setup for measuring the frequency characteristics of the metasurface: block diagram (*a*); sample in the setup (*b*) (color online)

Полученный спектр отражения принимается за шумовой фон и по частоте вычитается из измерений с образцом и с эталонным отражателем. Вычитание шума выполняется точечно по частоте, что позволяет компенсировать вклад держателя и внешних отражений. Значения $\sigma_{\text{rel}}(f)$ на графиках 5–7 представлены в децибелах.

3. Полученные результаты и их обсуждение

Как отмечалось выше, основной целью представляемого исследования было увеличение эффективности рассеяния метаповерхности. В частности, анализировалось влияние геометрических параметров элементарной ячейки на частотную зависимость относительного ЭПР при нормальном падении волны и на диаграмму рассеяния в дальней зоне.

Первым этапом оптимизации стало варьирование длины плеч вложенных *L*-образных элементов. Полученные частотные зависимости относительных ЭПР (рис. 5) показали, что увеличение длины плеч приводит к смещению начала снижения уровня ослабления отраженной волны с 16 до 20 ГГц, а резонансного минимума – с 23.5 ГГц в область более низких частот (20.5 ГГц). Глубина минимума при этом изменяется незначительно: с 13.7 до 14.7 дБ. Данный результат является прямым следствием того, что увеличение длины резонаторов приводит к увеличению индуктивности контура, что в свою очередь сдвигает резонансный максимум величины ослабления по частоте.

В дальнейшем, параметр длины был фиксирован на величинах: $a = \lambda_{\text{ср}}/2$, $b = \lambda_{\text{ср}}/4$, $c = \lambda_{\text{ср}}/3$, $d = \lambda_{\text{ср}}/5$.

Следующим этапом параметризации было изменение внутренних зазоров между соседними резонаторами. В ходе работы было получено, что изменение зазора даёт значительный вклад в итоговую частотную характеристику метаповерхности. Первоначально были рассмотрены случаи выбора симметричного расстояния внутренних зазоров ($e = f$), что позволило добиться увеличения величины ослабления с 14 до 22.1 дБ (рис. 6) для значений $e = f = \lambda_{\text{ср}}/12$.

Далее были рассмотрены варианты формирования несимметричных зазоров между внутренними и внешними резонаторами, что позволило достичь еще большего подавления отраженной волны на резонансной частоте – 23.7 дБ. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии межрезонаторных емкостей на степень ослабления величины обратной волны.

Ключевыми геометрическими параметрами, определяющими фазовые соотношения между наведёнными электромагнитными полями, являются период решётки (j,k) и величина краевого

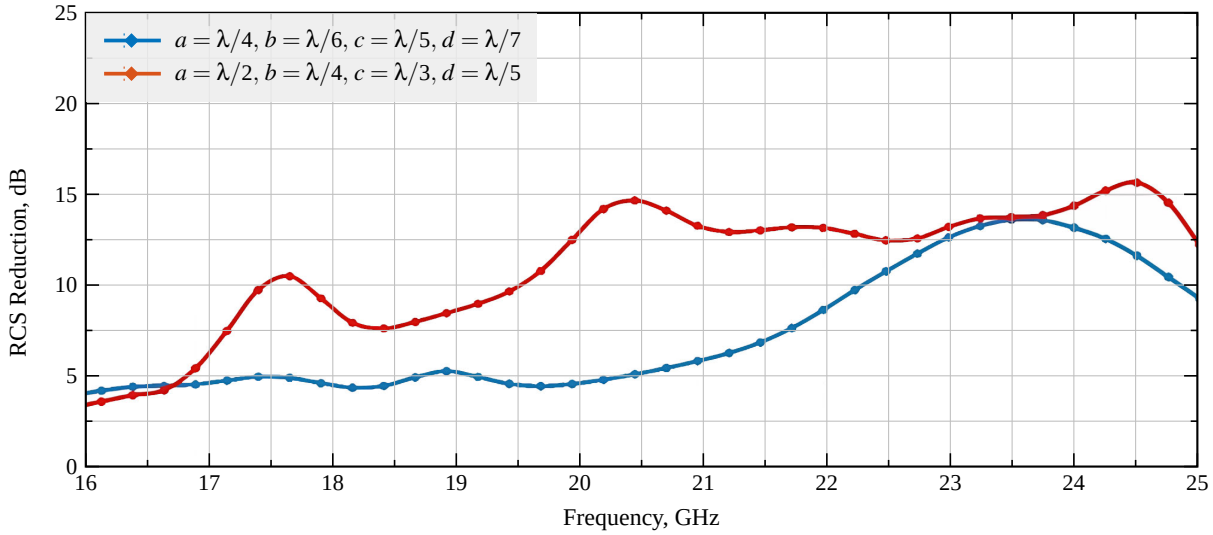


Рис. 5. Частотная зависимость относительного ЭПР для различных длин плеч вложенных L-образных элементов (цвет онлайн)

Fig. 5. Frequency dependence of the relative RCS for various arm lengths of nested L-shaped elements (color online)

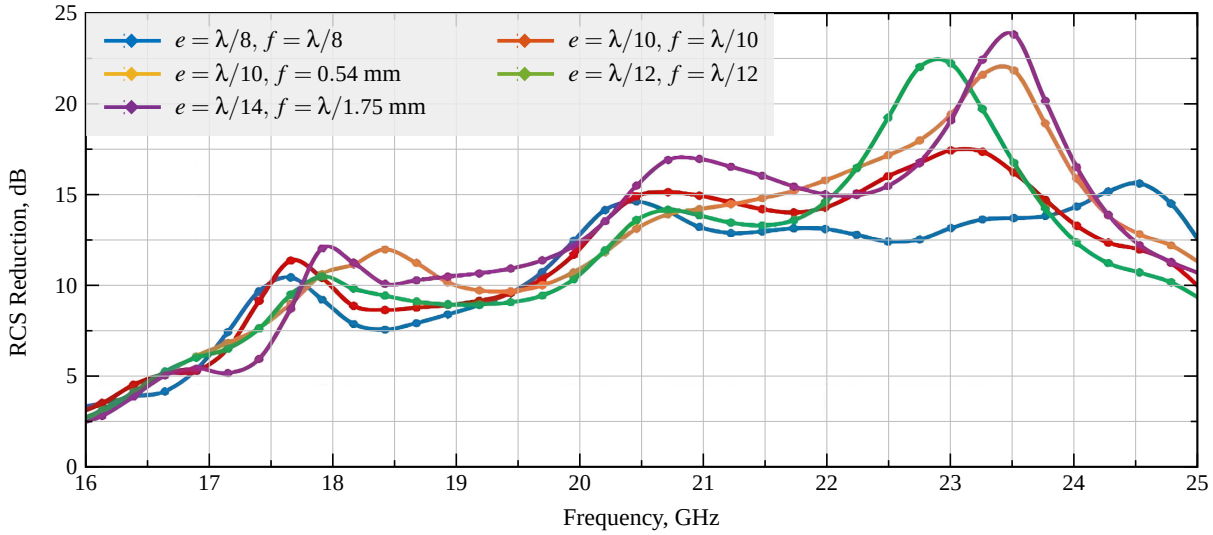


Рис. 6. Частотная зависимость относительного ЭПР для различных величин емкостных зазоров e и f (цвет онлайн)

Fig. 6. Frequency dependence of the relative RCS for various values of the capacitive gaps e and f (color online)

отступа g между соседними ячейками метаповерхности, поэтому подбору этих параметров было уделено особое внимание.

Проведённый параметрический анализ влияния краевого отступа g на относительную ЭПР метаповерхности показал, что как чрезмерно малые, так и чрезмерно большие значения данного параметра приводят к существенному ухудшению характеристик подавления. В частности, при слишком малом отступе ($g = \lambda_{ср}/12$) глубина резонансного минимума составляет лишь 14.2 дБ, что свидетельствует о недостаточной связи между резонансными элементами соседних ячеек. При чрезмерно большом отступе ($g = \lambda_{ср}/4$) глубина минимума снижается до 13.7 дБ вследствие нарушения электромагнитного взаимодействия между соседними элементами решётки. Оптимальные значения краевого отступа лежат в диапазоне $\lambda_{ср}/7 - \lambda_{ср}/6$, в котором достигается подавление в пределах 20–23 дБ.

Характерной особенностью полученных частотных зависимостей является то, что главные пики (максимумы относительной ЭПР) для значений отступа в диапазоне $g = \lambda_{ср}/4 - \lambda_{ср}/8$ выстраиваются в куполообразную огибающую (рис. 7). Данный эффект объясняется тем, что

при варьировании параметра g в указанном интервале происходит плавное изменение согласования импеданса ячейки с импедансом свободного пространства. При промежуточных значениях отступа ($g = \lambda_{ср}/6$) достигается наиболее полное согласование, при котором резонансный элемент наиболее эффективно взаимодействует с падающей волной, что приводит к максимальному значению подавления. По мере отклонения g от этого значения в обе стороны нарастает рассогласование импедансов, и амплитуда главного пика монотонно убывает, формируя характерную куполообразную зависимость. Наибольшее значение подавления составляет 23.2 дБ и наблюдается при $g = \lambda_{ср}/6$ на частоте 23.5 ГГц (см. рис. 7), что подтверждает оптимальность данного соотношения между размером зазора и рабочей длиной волны.

Для проверки результатов расчетов в рамках компьютерной модели были проведены экспериментальные исследования частотных свойств рассматриваемых метаструктур. На рис. 8 представлены частотные зависимости сравнения экспериментально полученных результатов измерения относительной ЭПР с численными расчетами для двух версий с различными значениями краевого отступа g. Для конфигурации с $g = \lambda_{ср}/5.5$ (рис. 8, *а*) полученный график демонстрирует, что главный пик подавления 21 дБ наблюдается на частоте 22.5 ГГц, в то время как экспериментальная зависимость показывает максимум подавления 22 дБ на частоте 23 ГГц, что соответствует частотному сдвигу порядка 0.5 ГГц,. Схожее отклонение наблюдается и для конфигурации с $g = \lambda_{ср}/6$ (рис. 8, *б*). Экспериментальные данные демонстрируют пик ослабления на частоте 23.5 ГГц (23 дБ), в то время как численные расчеты указывают на пик на частоте 22.9 ГГц (23.6 дБ). Наблюдаемые расхождения между расчётными и экспериментальными кривыми обусловлены технологическими допусками при изготовлении образцов. Сравнение экспериментальных данных с модельными указывает на адекватность построенной модели и достоверность полученных в ней результатов.

Для детального анализа физических механизмов подавления отражения были рассмотрены изменения распределения электромагнитных полей на поверхности метаструктуры при различных параметрах краевого отступа $g = \lambda_{ср}/n$, где $n = 4, 5, 6, 7$.

Визуализация распределения модуля напряжённости электрического поля на поверхности метаструктуры на резонансных частотах при различных значениях краевого зазора g показала, что при вертикальной поляризации падающей волны наиболее интенсивное возбуждение возникает на вертикальных участках L-образных резонаторов, а также в угловых и щелевых областях, где вследствие разрыва токовых путей происходит накопление зарядов и усиление локального поля (рис. 9, *а*). Для случая $g = \lambda_{ср}/4$ распределение поля носит более локализованный характер и сосредоточено в ограниченном числе участков, тогда как при уменьшении зазора до $g = \lambda_{ср}/6$ и $g = \lambda_{ср}/7$ наблюдается вовлечение большего числа резонаторных плеч и усиление

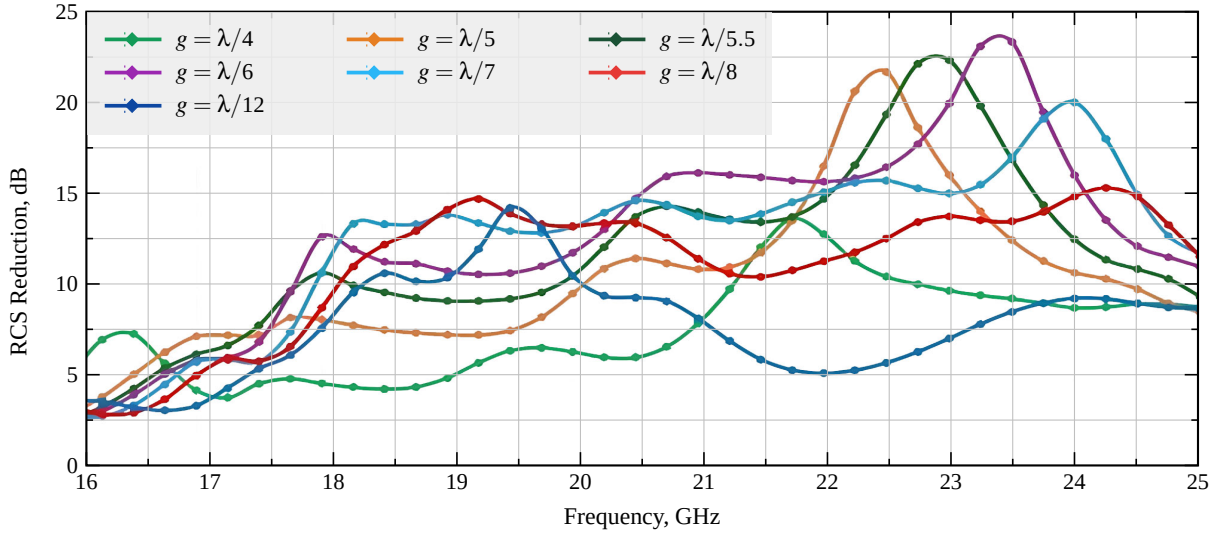
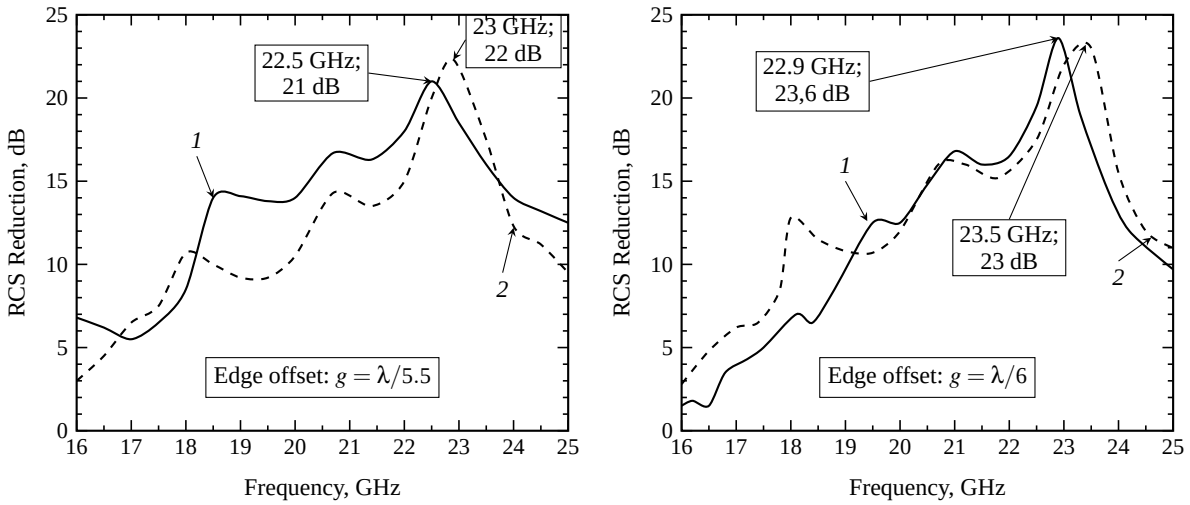


Рис. 7. Частотная зависимость относительной ЭПР для различных значений краевого отступа g (цвет онлайн)
Fig. 7. Frequency dependence of the relative RCS for various values of the edge offset g (color online)



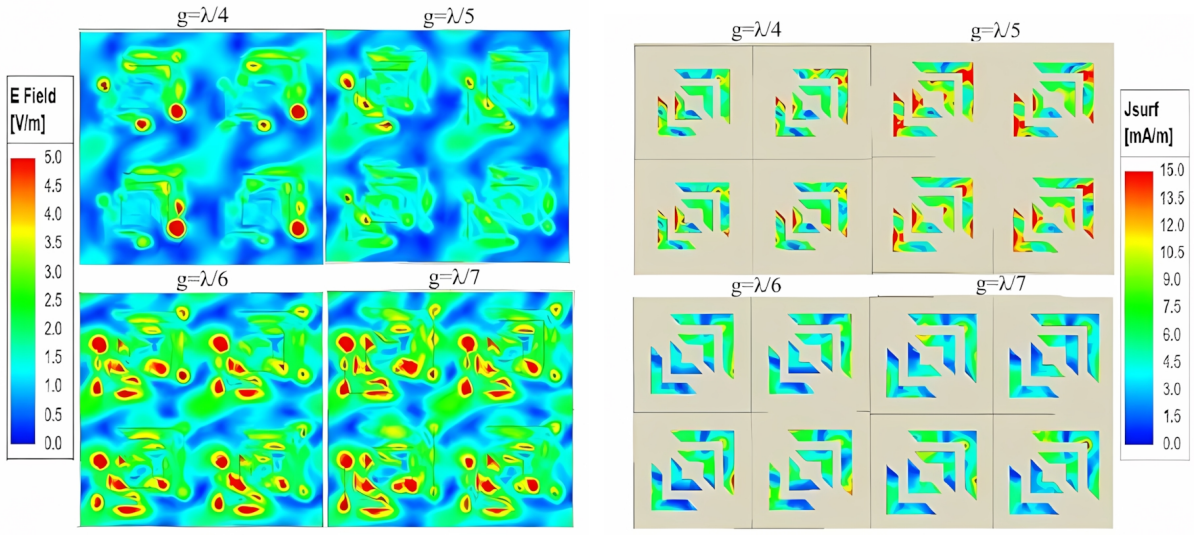
а/a *б/b*

Рис. 8. Частотная зависимость относительной ЭПР метаповерхности на зеркале для различных значений краевого отступа, $g = \lambda_{ср}/5.5$ (*а*); $g = \lambda_{ср}/6$ (*б*): *1* – результат численного моделирования; *2* – экспериментальный результат

Fig. 8. Frequency dependence of the relative RCS of the metasurface on a mirror for various values of the edge offset, $g = \lambda_{avg}/5.5$ (*a*); $g = \lambda_{avg}/6$ (*b*): *1* – result of numerical simulation, *2* – experimental result

поля как на внешних, так и на внутренних элементах. Это указывает на возрастание электромагнитной связи между соседними элементами и на более выраженное коллективное возбуждение периодической структуры. Более развитая пространственная картина поля формируется при $g = \lambda_{ср}/6$, где области повышенной напряжённости распределены по резонаторам максимально согласованно, что соответствует наиболее эффективному перераспределению электромагнитной энергии по поверхности метаструктуры.

Распределение плотности поверхностного тока на резонансных частотах при тех же значениях краевого зазора g, позволило объяснить



а/a *б/b*

Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля и токов на поверхности метаструктуры на резонансных частотах при различных краевых зазорах: *а* – электрическая компонента поля, В/м ($g = \lambda_{ср}/4$, частота 21.75 ГГц; $g = \lambda_{ср}/5$, частота 22.5 ГГц; $g = \lambda_{ср}/6$, частота 23.5 ГГц; $g = \lambda_{ср}/7$, частота 24 ГГц); *б* – поверхностные токи, мА/м (цвет онлайн)

Fig. 9. Distribution of the electric field strength and currents on the surface of the metastructure at resonant frequencies for various edge offset: *a* – electric field component ($g = \lambda_{avg}/4$, frequency 21.75 GHz; $g = \lambda_{avg}/5$, frequency 22.5 GHz; $g = \lambda_{avg}/6$, frequency 23.5 GHz; $g = \lambda_{avg}/7$, frequency 24 GHz); *b* – surface currents (color online)

генерацию обратного фронта рассеяемой электромагнитной волны (рис. 9, *б*). Поскольку электрическое поле падающей волны ориентировано вертикально, максимальные токи индуцируются прежде всего на вертикальных проводящих участках и далее перераспределяются по сопряжённым горизонтальным плечам, формируя замкнутую по фазе токовую конфигурацию в пределах каждого *L*-элемента. При $g = \lambda_{ср}/4$ и $g = \lambda_{ср}/5$ токи распределены менее равномерно и характеризуются выраженной локализацией на отдельных внешних участках, что указывает на неполное вовлечение вложенной структуры в резонансное взаимодействие. При уменьшении зазора до $g = \lambda_{ср}/6$ возникает более непрерывная и согласованная токовая картина, охватывающая как внешние, так и внутренние резонаторы, что свидетельствует об усилении взаимного электродинамического воздействие между элементами. Для $g = \lambda_{ср}/7$ токи также остаются интенсивными, однако их распределение становится несколько более перегруженным локальными максимумами, что может отражать рост неоднородности фазового отклика. В целом именно конфигурация $g = \lambda_{ср}/6$ демонстрирует наиболее упорядоченное распределение поверхностных токов, благоприятное для подавления обратного рассеяния.

На диаграммах рассеяния (рис. 10) во всех четырёх конфигурациях наблюдается значительное снижение амплитуды поля в направлении нормали ($\theta = 0°$) по сравнению со сплошным металлическим отражателем, при этом подавленная энергия перераспределяется в боковые лепестки, что соответствует механизму диффузного рассеяния. Минимальное значение величины отраженного поля в нормальном направлении достигается при $g = \lambda_{ср}/6$ (рис. 10, *г*), что согласуется с максимальной концентрацией электрического поля в ёмкостных зазорах (см. рис. 8, *б*) и наибольшей амплитудой противофазных поверхностных токов (см. рис. 9, *б*), обеспечивающих наиболее полную деструктивную интерференцию переизлучённого и зеркально отражённого полей.

Боковые лепестки диаграммы рассеяния имеют выраженную асимметрию, обусловленную двумя факторами: во-первых, различная дли-

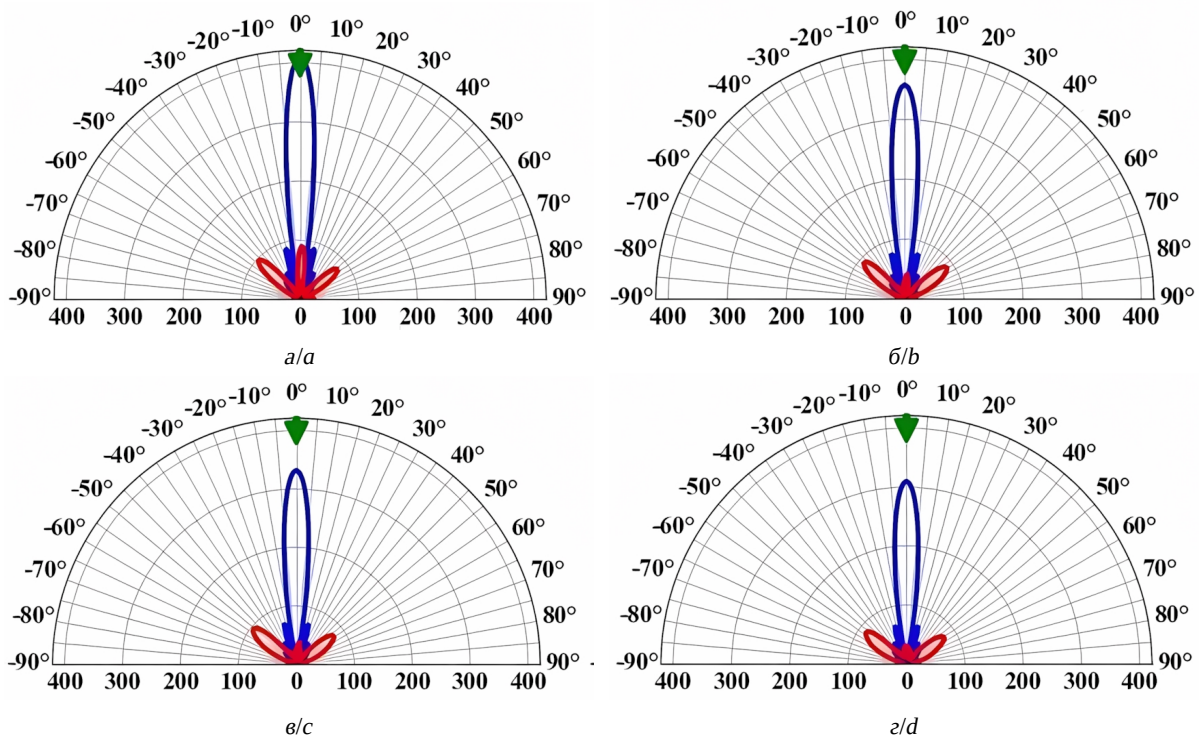


Рис. 10. Угловая зависимость амплитуды рассеянного поля $E(\theta)$ метаповерхности в сравнении с эталонным отражателем при нормальном падении волны ($\theta = 0°$, $\varphi = 0°$) на резонансных частотах при различных краевых зазорах: $g = \lambda_{ср}/4$, частота 21.75 ГГц (*а*); g=$\lambda_{ср}/5$, частота 22.5 ГГц (*б*); $g = \lambda_{ср}/6$, частота 23.5 ГГц (*в*); $g = \lambda_{ср}/7$, частота 24 ГГц (*г*) (цвет онлайн)

Fig. 10. Angular dependence of the scattered field amplitude $E(\theta)$ of the metasurface compared to the reference reflector at normal wave incidence ($\theta = 0°$, $\varphi = 0°$) at resonant frequencies for various edge offset: $g = \lambda_{avg}/4$, frequency 21.75 GHz (*a*); $g = \lambda_{avg}/5$, frequency 22.5 GHz (*b*); $g = \lambda_{avg}/6$, frequency 23.5 GHz (*c*); $g = \lambda_{avg}/7$, frequency 24 GHz (*d*) (color online)

на плеч L-образных резонаторов ($a \neq b$, $c \neq d$) приводит к неодинаковым эквивалентным дипольным моментам вдоль двух ортогональных направлений, вследствие чего амплитуды и фазы переизлучённых полей в противоположных полупространствах различаются; во-вторых, поскольку периоды решётки сравнимы с длиной волны, в структуре возбуждаются пространственные гармоники первого порядка, направления и амплитуды которых определяются анизотропным распределением индуцированных токов, неравномерно локализованных на плечах резонаторов различной длины (см. рис. 9). Неравномерное распределение энергии между боковыми лепестками является следствием отсутствия симметрии элементарной ячейки и подтверждает эффективность предложенной конфигурации метаповерхности в обеспечении эффективного рассеяния поля в широком диапазоне углов.

Заключительным этапом исследования было построение трёхмерных диаграмм амплитуды отражённого поля метаповерхности на резонансных частотах при различных значениях краевого зазора g (рис. 11). Полученные пространственные распределения подтверждают выводы, сделанные на основе угловых зависимостей $E(\theta)$ (см. рис. 10): во всех рассмотренных случаях отражённая энергия перераспределяется из основного лепестка в боковые. Формирование такой диаграммы обусловлено анизотропным распределением индуцированных токов и соответствующим ему неоднородным фазовым распределением переизлучения по поверхности структуры, что согласуется с данными на рис. 8 и 9.

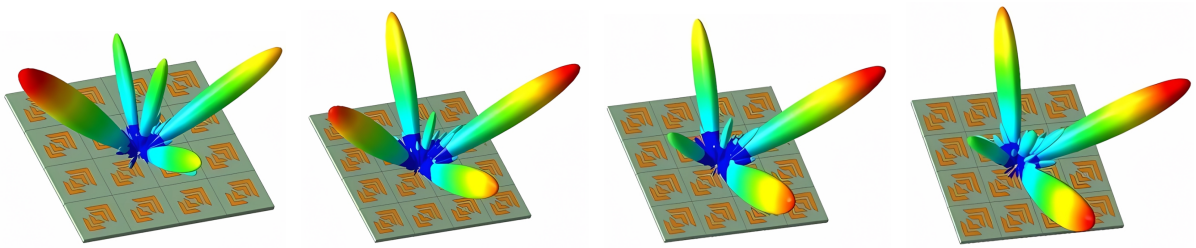
Более глубокое подавление отражения по нормали и явно выраженное пространственное разделение боковых лепестков наблюдаются при $g = \lambda_{ср}/6$, где ранее была установлена наиболее согласованная картина локализации электрического поля и поверхностных токов. При иных значениях g наблюдается ухудшение ослабляющих свойств обратного рассеяния в строго нормальном направлении.

Заключение

В рамках данной работы проведено численное моделирование частотных свойств и диаграмм обратного рассеяния L-образных планарных метаструктур в диапазоне частот 16–25 ГГц. Была проведена параметрическая оптимизация структуры для снижения относительного значения ЭПР. Получено, что наибольшее влияние на величину ослабления оказывает использование ассиметричных значений межрезонаторных зазоров, что позволило увеличить глубину подавления относительной ЭПР до 23.7 дБ на резонансной частоте по сравнению с 14.7 дБ для исходной конфигурации. Изменение краевого отступа, в свою очередь, позволяет производить более тонкую подстройку резонансной частоты. Анализ распределения электрических полей, токов и трехмерных диаграмм рассеяния показал, что достигнутое ослабление обратного рассеяния обусловлено пространственным перераспределением электромагнитной энергии. Используемая в работе методика проектирования метаповерхностей может быть использована для проектирования иных топологий для конкретных частотных диапазонов и задач.

Список литературы / References

1. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. *Radar Cross Section*. Raleigh, NC, SciTech Publishing, 2004. 611 p.
2. Engheta N., Ziolkowski R. W., eds. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc., 2006. 440 p.



а/*a* *б*/*b* *в*/*c* *г*/*d*

Рис. 11. 3D-распределение амплитуды отраженного поля от метаповерхности на резонансных частотах при различных краевых зазорах:$g = \lambda_{ср}/4$, частота 21.75 ГГц (*а*); $g = \lambda_{ср}/5$, частота 22,5 ГГц (*б*); $g = \lambda_{ср}/6$, частота 23.5 ГГц (*в*); $g = \lambda_{ср}/7$, частота 24 ГГц (*г*) (цвет онлайн)

Fig. 11. 3D distribution of the reflected field amplitude from the metasurface at resonant frequencies for various edge offset: $g = \lambda_{avg}/4$, frequency 21.75 GHz (*a*); $g = \lambda_{avg}/5$, frequency 22.5 GHz (*b*); $g = \lambda_{avg}/6$, frequency 23.5 GHz (*c*); $g = \lambda_{avg}/7$, frequency 24 GHz (*d*) (color online)

3. Ashfaq A., Dong-You C. Design, optimization, and comparative analysis of wide-band polarization conversion along with dual coding sequences for RCS reduction. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 8262. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59054-y
4. Zahra S., Ma L., Wang W., Ji J., Chen D., Liu Y., Zhou Y., Li N., Huang Y., Wen G. Electromagnetic metasurfaces and reconfigurable metasurfaces: A review. *Frontiers in Physics*, 2021, vol. 8, art. 593411. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.593411
5. Klyuev D. S., Neshcheret A. M., Pestovskiy I. N., Pestovskiy K. I., Potapov A. A., Sokolova Y. V. Antenna systems based on chiral metamaterials with fractal radiator geometry for radio communication systems. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2026, vol. 29, no. 1, pp. 125–141. (in Russian). https://doi.org/10.18469/1810-3189.2026.29.1.125-141
6. Abdulkarim Y. I., Mohanty A., Acharya O. P., Appasani B., Khan M. S., Mohapatra S. K., Muhammadsharif F. F., Dong J. A review on metamaterial absorbers: Microwave to Optical. *Frontiers of Physics*, 2022, vol. 10, art. 893791. https://doi.org/10.3389/fphy.2022.893791
7. Wang B.-X., Xu C., Duan G., Xu W., Pi F. Review of broadband metamaterial absorbers: From principles, design strategies, and tunable properties to functional applications. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, vol. 33, iss. 14, art. 2213818. https://doi.org/10.1002/adfm.202213818
8. Al-Badri K. S. L. Design of perfect metamaetiral absorber for microwave applications. *Wireless Pers. Commun.*, 2021, vol. 121, pp. 879–886. https://doi.org/10.1007/s11277-021-08663-1
9. Li S. J., Cao X. Y., Xu H. X., Zhang Z., Zhou Y. L., Valtr J. F. H., Zhang C. Ultra-wideband RCS reduction of metasurface antenna based on spoof surface plasmon polariton and ttransmission. *Radioengineering*, 2018, vol. 27, no. 2, pp. 386–393. https://doi.org/10.13164/re.2018.0386
10. Ramachandran T., Faruque M. R. I., Islam M. T., Khandaker M. U., Al-Mugren K. S. Development of diverse coding metamaterial structure for radar cross section reduction applications. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. 10958. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14911-6
11. El-Sewedy M., Abdalla M. A review for antenna performance enhancement using metasurface structures. *Journal of Engineering Science and Military Technologies*, 2021, vol. 5, iss. 1, pp. 1–13. https://doi.org/10.21608/ejmtc.2022.111372.1208
12. Wang J., Zhao Q., Fu F., Wang K., Ye Z., Yin S., Wang H., Wang L. Optimization of wideband RCS reduction via controlled phase and amplitude in metasurface design. *Applied Physics A*, 2024, vol. 130, art. 220. https://doi.org/10.1007/s00339-024-07298-w
13. Fu C., Han L., Liu C., Lu X., Sun Z. Combining Pancharatnam–Berry phase and conformal coding metasurface for dual–band RCS reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, vol. 10, iss. 3, pp. 2352–2357. https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3112618
14. Lin B., Huang W., Yang Y., Lv L., Guo J., Wang Y. A 2-bit Pancharatnam-Berry coding metasurface for ultra-wideband and polarization-insensitive RCS reduction. *Plasmonics*, 2022, Vol. 17, pp. 893–900. https://doi.org/10.1007/s11468-021-01586-4
15. Wang J., Yang H., Yi Z., Wang J., Cheng S., Li B., Wu P. High absorption Broadband ultra-long infrared absorption device based on nanoring-nanowire metasurface structure. *Photonics*, 2025, vol. 12, iss. 5, art. 451. https://doi.org/10.3390/photonics12050451
16. *Kuznetsov A. P., Sedova Y. V.* Ensembles of four discrete phase oscillators. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 134–146 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-2-134-146
17. Hossain Md B., Faruque M. R. I. ., Sabirin A., Islam M. T. Optimization-driven design of a 2-bit coding based metasurface absorber for enhanced EMI shielding and RCS reduction. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, vol. 15, iss. 4, art. 102674. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102674
18. Lin B., Huang W., Guo J., Wang Z., Si K., Ye H. An absorptive coding metasurface for ultra-wideband radar cross-section reduction. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 12397. https://doi.org/10.1038/s41598-024-63260-z
19. Hafeez S., Yu J., Umrani F. A., Huang Y., Yun W., Ishfaq M. Dual-polarization conversion and coding metasurface for wideband radar cross-section reduction. *Photonics*, 2024, vol. 11, iss. 5, art. 454. https://doi.org/10.3390/photonics11050454
20. Zhang S., Cao W., Zhao E., Li D., Shen X. Wideband monostatic and bistatic radar cross-section reductions using polarization conversion metasurface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2024, vol. 66, iss. 7, art. e34231. https://doi.org/10.1002/mop.34231
21. Mazinov A. S., Padalinsky M. M., Boldyrev N. A., Starosek A. V. Simulation of scattering properties of modular metasurfaces in the 16–25 GHz range and comparison with experimental results. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 102–111. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111
22. Mazinov A. S., Boldyrev N. A., Padalinsky M. M., Juras' I. V., Fitaev I. Sh. Scattering and frequency properties of a metasurface with triangular spiral resonators combined with thin conducting films. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2026, no. 1, art. 1 (in Russian). https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.1

Поступила в редакцию 09.04.2026; одобрена после рецензирования 05.06.2026;
принята к публикации 17.06.2026; опубликована 30.09.2026

The article was submitted 09.04.2026; approved after reviewing 05.06.2026;
accepted for publication 17.06.2026; published 30.09.2026