



РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 102–111
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 102–111
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111>, EDN: SXWPVG

Научная статья
УДК 537.874

Моделирование рассеивающих свойств блочных метаповерхностей в диапазоне 16–25 ГГц и сравнение с экспериментальными результатами

А. С. Мазинов[✉], М. М. Падалинский, Н. А. Болдырев, А. В. Старосек

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

Мазинов Алим Сеит-Аметович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики и электроники, mazinovas@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8015-8841>, Author ID: 754027

Падалинский Михаил Михайлович, специалист кафедры радиофизики и электроники, padalinskii@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-9691-4066>, Author ID: 1174357

Болдырев Николай Алексеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники, kolyaboldyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1804-4784>

Старосек Александр Викторович, старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники, starosekav@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9688-7598>, Author ID: 1055717

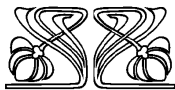
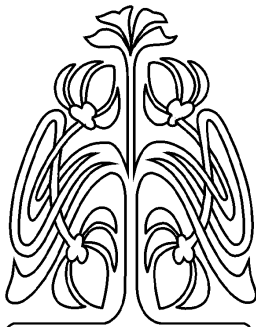
Аннотация. Метаповерхности – это поверхности, состоящие из элементарных резонаторов, переизлучающих падающие волны СВЧ-диапазона. Изменяя параметры и размещение этих резонаторов, можно настраивать электрические свойства метаповерхностей в целом. Это позволяет получить ряд практически важных характеристик, труднодостижимых при использовании обычных ослабляющих покрытий, и потому перспективных в задачах экранирования электронных устройств и ослабления отражённого сигнала. Поскольку возможных конфигураций резонаторов много, для эффективного сравнительного анализа необходимы численные эксперименты. Объектом данного исследования являются метаповерхности, состоящие из полосковых прямоугольных резонаторов, расположенных на диэлектрической подложке в шахматном порядке в двух конфигурациях. Задачей исследования было получение диаграмм рассеяния в численных экспериментах и сравнение их с реальными структурами.

В работе проводится компьютерное моделирование взаимодействия метаповерхностей с СВЧ полем, с последующим сравнением с результатами эксперимента с реальными структурами. Для моделирования использовался пакет CST Studio с использованием *time domain solver*. Расчёты проводились для нескольких частот в диапазоне 16–25 ГГц.

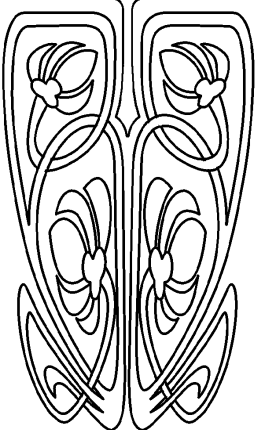
Полученные результаты показывают, что величина нормальной составляющей отраженной электромагнитной волны падает при приближении частоты падающего излучения к резонансной. Также наблюдаются боковые лепестки, величина которых зависит от частоты. Диаграммы рассеяния, полученные на реальных образцах, показывают те же характерные особенности, а имеющиеся различия объясняются физическими особенностями приемной антенны, а также наличием дифракционных явлений.

Обе рассмотренные структуры продемонстрировали высокие показатели рассеяния падающей волны, что наглядно демонстрирует перераспределение центрального лепестка на диаграммах. Сравнение показало, что промоделированные метаструктуры имеют схожие тенденции с экспериментальными диаграммами.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, пакет CST, диаграмма рассеяния, электромагнитное поле, СВЧ, метаповерхность, электромагнитные волны



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-20126) и региона Крым.

Для цитирования: Мазинов А. С., Падалинский М. М., Болдырев Н. А., Старосек А. В. Моделирование рассеивающих свойств блочных метаповерхностей в диапазоне 16–25 ГГц и сравнение с экспериментальными результатами // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 102–111. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111>, EDN: SXWPVG

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

Article

Simulation of scattering properties of modular metasurfaces in the 16–25 GHz range and comparison with experimental results

A. S. Mazinov[✉], M. M. Padalinsky, N. A. Boldyrev, A. V. Starosek

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Physical-Technical Institute, 4 Prospekt Vernadskogo, Simferopol 295007, Republic of Crimea, Russia

Alim S. Mazinov, mazinovas@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8015-8841>, Author ID: 754027

Mikhail M. Padalinsky, padalinskii@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-9691-4066>, Author ID: 1174357

Nikolay A. Boldyrev, kolyaboldyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1804-4784>

Aleksandr V. Starosek, starosekav@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9688-7598>, Author ID: 1055717

Abstract. Background and Objectives: Metasurfaces are coatings consisting of elementary resonators that reemit incident UHF electromagnetic waves. By varying the parameters and arrangement of these resonators, it is possible to tune the electrical properties of the metasurface as a whole. This produces a number of practically important characteristics that are difficult to achieve with conventional attenuation coatings, and therefore prospective in the tasks of shielding of electronic devices and attenuation of the reflected signal. As there are many possible configurations of resonators, numerical experiments are needed for an effective comparative analysis. We investigate metasurfaces consisting of rectangular stripline resonators arranged on a dielectric substrate in a checkerboard pattern in two configurations. The aim of the study is to obtain scattering diagrams in numerical experiments and compare them with real structures. **Materials and Methods:** In this paper a computer simulation of the interaction of metasurfaces with the microwave radiation in open space is carried out using the CST Studio package with a time domain solver. Calculations were performed for several frequencies in the range of 16 to 25 GHz. Experiments were then carried out with real structures at the same frequencies, using a bistatic method of measurements. The structures, with single resonators measuring 2×4.2 mm matching the frequency range, consisted of etched copper-plated FR4 sheets overlaid on a metal plate. **Results:** The results show that the value of the normal component of the reflected electromagnetic wave decreases as the incident frequency approaches the resonance frequency. Also, side lobes, with a frequency-dependent magnitude, are observed. The scattering diagrams obtained with real samples show the same characteristic features with differences caused by physical particularities of the receiving antenna as well as the presence of diffraction effects. Both structures examined have shown high incident wave scattering, which is clearly indicated by the redistribution of the central lobe in diagrams. Comparison has shown that the simulated metasurfaces have similar patterns to the experimental diagrams. **Conclusion:** The comparative analysis has demonstrated a satisfactory fit of the simulation to the experiment. Further studies with structures of this type are planned in the future. It may be noted that the CST Studio package has worked well and will be used in future studies.

Keywords: computer simulation, packet CST, scatter diagrams, electromagnetic waves, microwaves, metasurfaces

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-20126) and Crimea region grant.

For citation: 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 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111>, EDN: SXWPVG

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

Введение

Метаповерхности (МП) – особые структуры, представляющие собой поверхности, состоящие из элементарных резонаторов различного типа, которые при взаимодействии с СВЧ диапазоном переизлучают падающие волны определенным образом [1–3]. Изменяя относительную ориентацию зазоров или смещения соседних центров многослойных анизотропных структур, можно настроить взаимодействия ближнего поля между ними, что будет влиять на конечные свойства метаповерхности в целом [4–6]. Использование данных структур позволяет получить ряд практически важных характеристик, которые в некоторых случаях труднодостижимы при

использовании обычных ослабляющих покрытий, например, способность данных структур к формированию отрицательных электрических и магнитных проницаемостей, которые возникают вследствие эффекта деструктивной интерференции [7, 8].

Кроме того, МП обладают компактностью, высокой вариативностью их комбинаций, а также низкой стоимостью и простотой изготовления, что обуславливает их большую популярность в последнее время [2, 9].

Объектом нашего исследования стали метаповерхности, состоящие из полосковых резонаторов, расположенных на диэлектрической подложке. В качестве метода исследования было



выбрано компьютерное моделирование с дальнейшим проведением эксперимента и сопоставлением полученных результатов. Цель нашей работы – получение диаграмм рассеяния для представленных метаструктур.

1. Принцип построения анизотропных метаповерхностей

При создании топологии метаповерхности был использован блочный принцип формирования матрицы МП, частным случаем которого и являются МП с различными ориентациями элементарных проводящих резонаторов. Элементы матрицы располагаются поочередно в шахматном порядке. Тем самым наборы из четырех располагающихся рядом элементов формируют между собой «противофазные» блоки. Такая схема расположения ячеек матрицы обеспечивает работу деструктивной интерференции, что ведет к заметному снижению отраженной от структуры ЭМ волны [10, 11].

Для эксперимента были выбраны два типа модельных структур (МС): 1) вертикально и горизонтально ориентированные диполи (МС-1) (рис. 1, а); 2) вертикально и диагонально (45° влево) ориентированные диполи (МС-2) (рис. 1, б).

Вышеописанные МС выполнены на подложке FR-4 толщиной 1.5 мм, которая, в свою очередь, расположена на металлической пластине толщиной 1 мм. Толщина прямоугольных резонаторов из меди составляла 16 мкм. Матрица метаповерхности состоит из 16 одинарных ячеек, каждая из которых имеет размер 18×18 мм. Количество вертикальных резонаторов на одинарной ячейке равняется 9 шт., а на наклонных – 7 шт. Наклонные элементы повернуты

на 45° . Геометрические параметры резонаторов 2.0×4.2 мм были выбраны исходя из четвертьволновых размеров для частоты 20.5 ГГц, средней для рассматриваемого диапазона, и представлены на рис. 2.

Моделирование метаповерхностей проводилось в пакете CST Studio. Для расчета использовался «Вычислитель во временной области (Time domain solver)» [12], который моделирует распространение электромагнитного поля во времени и пространстве. С его помощью рассчитывается передача энергии между портами или другими источниками возбуждения или свободным пространством. Данный вычислитель подходит для моделирования большинства ВЧ задач: коннекторов, полосковых линий, антенн и прочего, позволяя получить результаты во всем частотном диапазоне за один вычислительный цикл с помощью преобразования Фурье [13]. Также нам необходимо было учитывать ограниченные вычислительные ресурсы, пропорционально зависящие от размеров структуры.

Вычислитель во временной области основан на технике конечного интегрирования (Finite Integration Technique, FIT), которая представляет собой схему дискретизации уравнений Максвелла и алгоритма их решения [14–16]. Данный подход является более общим случаем метода конечных разностей во временной области и эффективен в моделировании электромагнитных явлений [17]. Моделирование электромагнитного поля производится с применением пошаговой схемы с перешагиванием, так как данный метод моделирования остается устойчивым в том случае, когда используемый временной шаг не превышает предела, который напрямую свя-

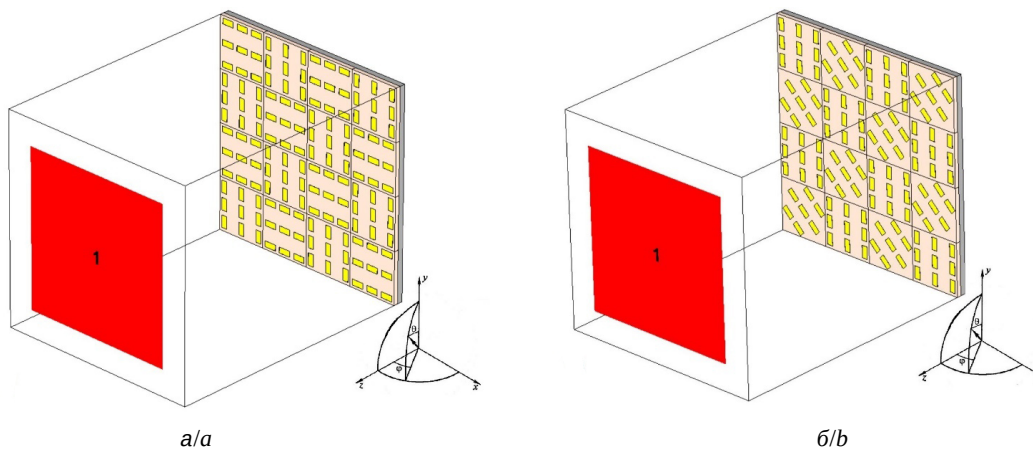


Рис. 1. Промоделированные структуры: а – МС-1; б – МС-2 (цвет онлайн)
Fig. 1. Modeled structures (MS): a – MS-1; b – MS-2 (color online)

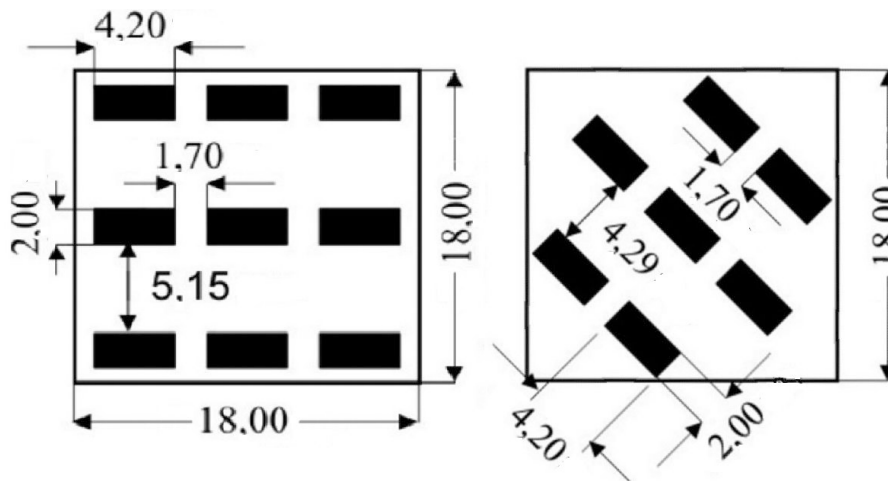


Рис. 2. Размеры структур, мм
Fig. 2. Structures' dimensions, mm

зан с минимальным шагом сетки, используемой для дискретизации пространства. Поэтому чем плотнее сеточное разбиение, тем меньше используемый временной шаг.

Моделирование процесса взаимодействия осуществлялось последовательно: сначала модель возбуждается широкополосным сигналом во временной области (гауссовский импульс), затем рассчитывается отклик структуры во временной области (выходной сигнал во временной области) и в конце для получения более точных результатов в заданном диапазоне частот выполняется дискретное преобразование Фурье для временных сигналов.

Для повышения эффективности и точности вычислителя были задействованы следующие методы аппроксимации модели: технология Perfect Boundary Approximation (PBA) [18], применимая в случае дискретизации любых криволинейных поверхностей, а также Thin Sheet Technique (TST) [19], используемая при моделировании тонких структур либо же напыленных или осажденных пленок. Указанные техники позволяют избежать высокой детализации сеточного разбиения и, следовательно, обеспечивают сокращение времени моделирования, а также более эффективное использование памяти.

Для моделирования были заданы следующие параметры. Частотный диапазон составлял от 16 до 25 ГГц. Показания снимались в разных точках: для первой структуры на 21.3, 22.5 и 24.4 ГГц; для второй – 17.3, 20.6 и 22.2 ГГц. Такой выбор частот объясняется тем, что в предыдущих наших работах на эту тему было выявлено, что различные МП обладают своей уникальной ча-

стотной характеристикой, зависящей напрямую от типа структуры и геометрических размеров резонаторов [20]. Поэтому для более тщательного наблюдения изменения их диаграмм в динамике, мы выбрали три характерные точки: максимум прохождения, минимум прохождения и усредненное значение, что соответствует вышеуказанным частотам.

В качестве источника излучения выбран в качестве волноводный порт, предназначенный для моделирования ввода и вывода энергии. Этот вид порта имитирует бесконечно длинный волновод, соединенный со структурой, являясь одновременно и источником волны, и приемником. Его размеры 54×54 мм, расстояние до структуры 90 мм (рис. 3). Нестандартные размеры порта были выбраны исходя из максимального соответствия нормировочных экспериментов: отражения на зеркале и прохождения свободного пространства.

Далее определялся тип волны. Падающая волна была задана плоской (рис. 4, снизу), имеющей линейную поляризацию (рис. 4, сверху) (вектор напряженности электрического поля E параллелен оси X (рис. 1), угол падения волны – 90° , т. е. параллельно оси Z (см. рис. 1).

После выставления основных параметров, задаем граничные условия для бокса, внутри которого находится порт, исследуемая структура и распространяется волна (рис. 5). В качестве граничных условий было выставлено открытое пространство (*open*) во всех проекциях, так как ранее была задана плоская падающая волна, и сам эксперимент проводился также в открытом пространстве.

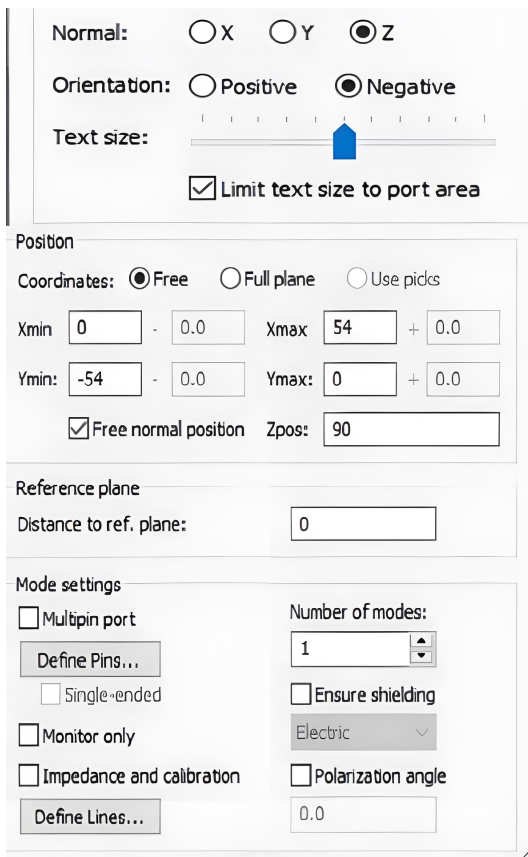
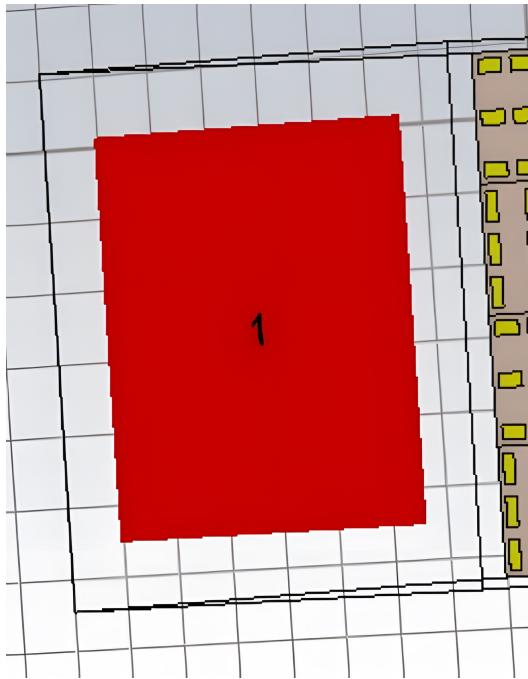


Рис. 3. Волноводный порт (слева) и его параметры (справа) (цвет онлайн)

Fig. 3. Waveguide port (on the left) and it's parameters (on the right) (color online)

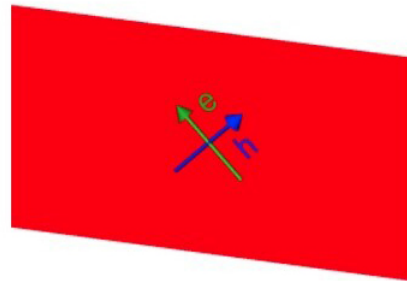
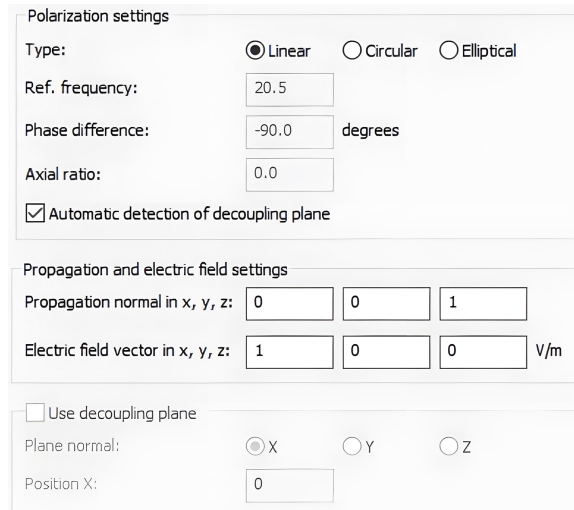


Рис. 4. Параметры падающей волны (сверху), плоская волна с вектором электрического и магнитного поля (снизу) (цвет онлайн)

Fig. 4. Parameters of the incident wave (on the top), the plane wave with electric and magnetic field vectors (on the bottom) (color online)

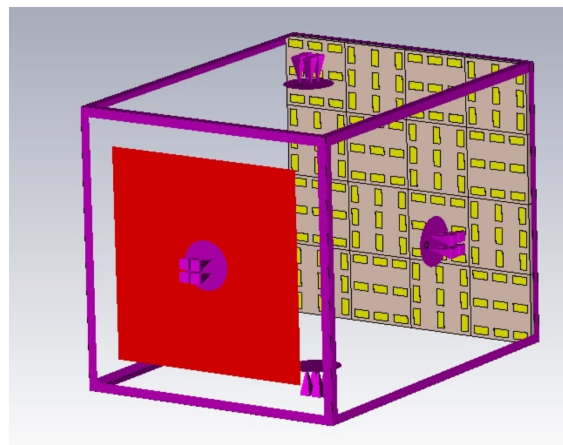


Рис. 5. Бокс с заданными граничными условиями (цвет онлайн)

Fig. 5. Box with specified boundary conditions (color online)

2. Полученные результаты

Для подтверждения модельного представления МП с шахматным чередованием задействованы экспериментальные зависимости,



полученные в ходе эксперимента с реальными структурами в таких же условиях. Первоначально вся экспериментальная установка нормировалась на прохождение свободного пространства и отражение от ВЧ-зеркала. Обе метаструктуры в сравнении с нормальным отражением от зеркала показали ослабление центрального лепестка не менее 50% (см. врезки на рис. 6, а, б). Для первой модели МС-1 получены результаты, представленные на рис. 6, а.

Из полученных диаграмм видно, что величина нормальной составляющей отраженной элек-

тромагнитной волны падает при приближении частоты падающего излучения к резонансной. Для данной структуры резонансной частотой является 22.5 ГГц [20]. При увеличении частоты степень ослабления падает, тем самым увеличивая отраженную от структуры волну. Также можно увидеть, что диаграмма рассеяния для этой структуры имеет явные боковые лепестки, ширина которых варьируется в зависимости от частоты. В частности, для резонансной частоты ширина бокового лепестка составляет 24°. Теперь сравним данные с реальным экспериментом

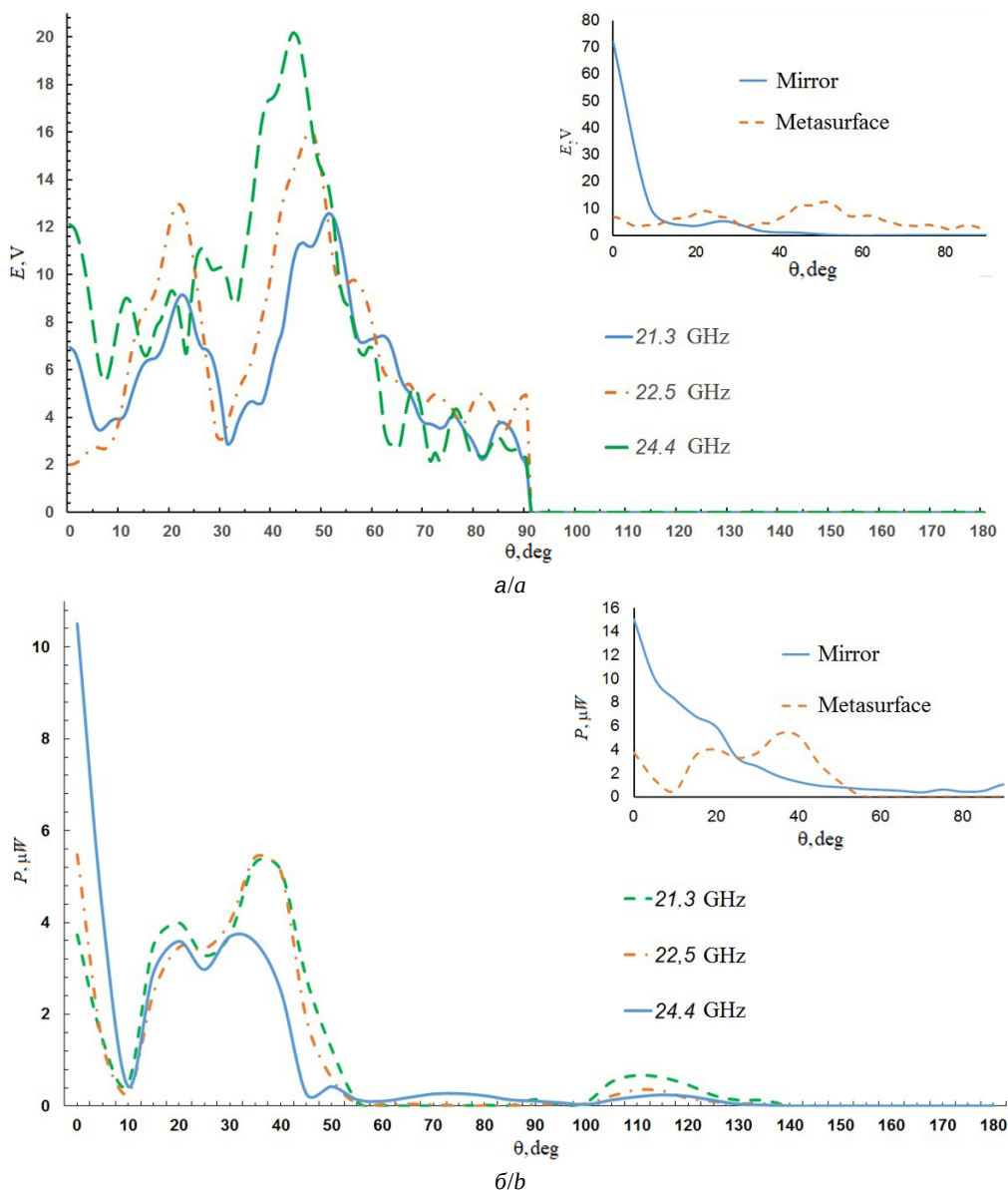


Рис. 6. Диаграмма рассеяния МС-1: а – моделирование, б – эксперимент. На врезке: сравнение с зеркалом на частоте 21.3 ГГц (цвет онлайн)

Fig. 6. Scattering diagram for MS-1: a – simulation, b – experiment. Inset: comparison with a mirror at the frequency of 21.3 GHz (color online)



(рис. 6, б). Для получения экспериментальных кривых был использован метод бистатического измерения зависимости уровня отраженного излучения от угла приемной антенны.

Можно видеть, что модель имеет те же характерные особенности, что и реальные образцы, а именно боковые лепестки с формой, схожей с теми, что были получены при моделировании, и характер спада кривой. Начальная высокая мощность, а также наличие излучения в области

от 90° до 140° в экспериментальной модели объясняются физическими особенностями приемной антенны, а также наличием дифракционных явлений, что приводит к накоплению различного рода погрешностей.

Рассмотрим теперь полученные диаграммы рассеяния для МС-2 (рис. 7, а).

Как видно из полученных результатов, нормальная составляющая отраженной волны также падает при приближении к резонансной частоте

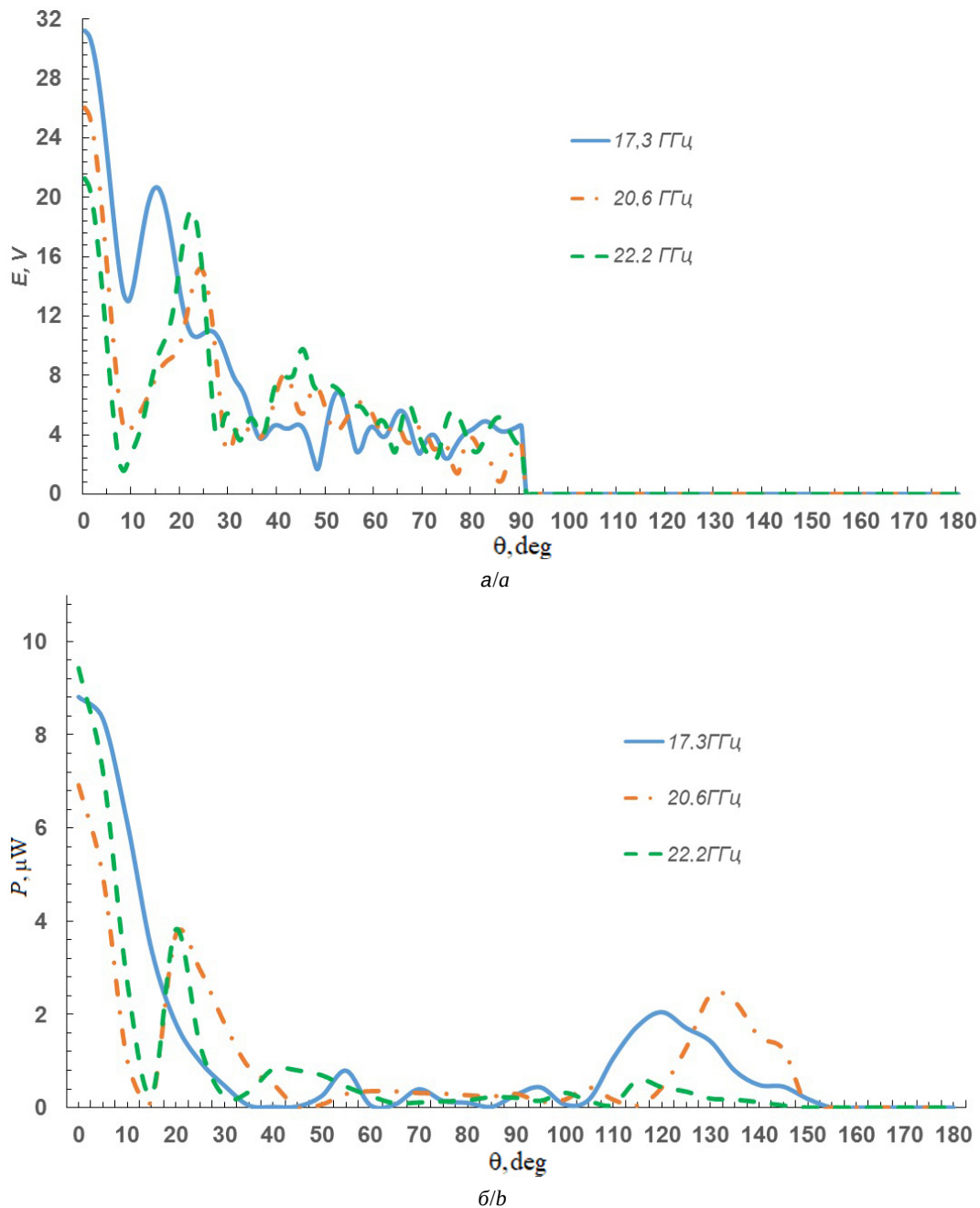


Рис. 7. Диаграмма рассеяния МС-2: а – моделирование, б – эксперимент (цвет онлайн)

Fig. 7. Scattering diagram for MS-2: a – simulation, b – experiment (color online)



те, что говорит нам о наилучших показателях ослабления на данной частоте. Величина общего ослабления уступает образцу МС-1, также амплитуда и ширина боковых лепестков для данной структуры меньше относительно МС-1.

В практическом эксперименте на МС-2 были получены следующие данные (рис. 7, б). Видны схожие с моделью зависимости. Структура также обладает боковыми лепестками, а величина отраженной в направлении нормали мощности изменяется в зависимости от частоты падающего излучения. Стоит отметить, что величина основного лепестка на резонансной частоте в 0° обладает наибольшей мощностью, что не следует общей тенденции, описанной ранее. Это может объясняться частотной зависимостью излучающей и приемной антенны, а также дифракционными эффектами в открытом пространстве, связанными с конечными размерами структуры и несовершенством экспериментальной установки. При сравнении модели с экспериментальными диаграммами становится ясно, что наибольшим ослаблением рассмотренная структура обладает на той же резонансной частоте и согласуется с полученными моделью данными.

Заключение

В ходе работы было произведено моделирование структур с шахматным чередованием в двух конфигурациях в пакете CST Studio и сравнение их с экспериментально полученными зависимостями.

Обе структуры продемонстрировали рассеяние падающей волны, что наглядно демонстрирует перераспределение центрального лепестка на диаграммах рассеяния. Сравнение показало, что промоделированные металлоповерхности имеют схожие тенденции с экспериментальными диаграммами. Особенно это видно по характерным пикам и характеру спада кривых (расхождение положения пиков и наклона кривых не более $5\text{--}10^\circ$). Отличия же объясняются физическими особенностями проведения эксперимента – погрешностями, возникающими вследствие вторичного переизлучения от приемной антенны, большим шагом изменения угла приемной антенны при снятии мощности, а также наличием дифракционных явлений в открытом пространстве на самих образцах, что также приводит к накоплению различного рода погрешностей. Можно отметить, что при моделировании представленных метаповерхностей пакет CST Studio

показал результаты, близкие к полученным в ходе эксперимента с реальными образцами, и будет использоваться нами в дальнейших исследованиях в этой области.

В дальнейшем планируются дополнительные исследования, направленные на модификацию рассмотренных структур в целях улучшения их характеристик. В перспективе они могут найти применение во многих системах и технологиях, таких как стелс-технологии, экранирование электронных устройств и т. д.

Список литературы

1. Chen H.-T., Padilla W. J., Zide J. M. O., Gossard A. C., Taylor A. J., Averitt R. D. Active terahertz metamaterial devices // *Nature*. 2006. Vol. 444, № 7119. P. 597–600. <https://doi.org/10.1038/nature05343>
2. Della Giovampaola C., Engheta N. Digital metamaterials // *Nature Materials*. 2014. Vol. 13, № 12. P. 1115–1121. <https://doi.org/10.1038/nmat4082>
3. Zaki B., Firouzeh Z.-H., Zeidaabadi-Nezhad A., Maddahali M. Wideband RCS reduction using three different implementations of AMC structures // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2019. Vol. 13, № 5. P. 533–540. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5024>
4. Yan X., Liang L., Yang J., Liu W., Ding X., Xu D., Zhang Y., Cui T., Yao J. Broadband, wide-angle, low-scattering terahertz wave by a flexible 2-bit coding metasurface // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, № 22. P. 29128–29137. <https://doi.org/10.1364/OE.23.029128>
5. Khan T. A., Li J., Chen J., Raza M. U., Zhang A. Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications // *Materials*. 2019. Vol. 12, № 18. Article number 3031. <https://doi.org/10.3390/ma12183031>
6. Shao L., Premaratne M., Zhu W. Dual-Functional Coding Metasurfaces Made of Anisotropic All-Dielectric Resonators // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 45716–45722. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908830>
7. Zhao Y., Cao X., Gao J., Liu X., Li S. Jigsaw puzzle metasurface for multiple functions: polarization conversion, anomalous reflection and diffusion // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, № 10. P. 11208–11217. <https://doi.org/10.1364/OE.24.011208>
8. Zhuang Y., Wang G., Zhang Q., Zhou C. Low-Scattering Tri-Band Metasurface Using Combination of Diffusion, Absorption and Cancellation // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 17306–17312. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2810262>
9. Cui T. J., Qi M. Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials // *Light: Science & Applications*. 2014. Vol. 3, № 10. P. e218. <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99>
10. Семенихин А. И., Семенихина Д. В., Юханов Ю. В., Благовисный П. В. блочный принцип построения и оценки снижения эпр непоглощающих широкополосных 2-битных анизотропных цифровых метапо-



- крытый // Журнал радиоэлектроники. 2020, № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.4>
11. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М. : Издательство МЭИ, 2011. 155 с.
 12. Благовисный П. В., Семенихин А. И. Полноволновые и импедансные модели сверхширокополосных тонких твистметаполяризаторов для радиомаскирующих покрытий // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.12>
 13. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ. М. : Солон-Пресс, 2017. 316 с.
 14. Курушин А. А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : One-Book, 2014. 433 с.
 15. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1966. Vol. 14, № 3. P. 302–307. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693>
 16. Krietenstein B., Schuhmann R., Weiland T., Thoma P. The Perfect Boundary Approximation Technique Facing the Big Challenge of High Precision Field Computation // Proceedings of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98). Chicago, 1998. P. 860–862.
 17. Weiland T. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik. 1977. Bd. 31. S. 116–120.
 18. Горбачев А. П., Ермаков Е. А. Проектирование печатных фазированных антенных решеток в САПР «CST Microwave Studio». Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. 88 с.
 19. Demming-Janssen F., Krüger H., Thoma P., Löcker C., Bertuch T., Eibert T. Time domain simulation of conformal antennas using the finite integration technique (FIT) with PBA geometry discretisation and local time step adaptive sub-gridding // 3rd European Workshop on Conformal Antennas. Bonn, 2003. P. 45–48.
 20. Мазинов А. С., Фитаев И. Ш., Болдырев Н. А. Влияние пространственной ориентации проводящих элементов составной метаповерхности на их частотные характеристики и диаграммы рассеивания в свч-диапазоне // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 4. С. 86–90.
 4. Yan X., Liang L., Yang J., Liu W., Ding X., Xu D., Zhang Y., Cui T., Yao J. Broadband, wide-angle, low-scattering terahertz wave by a flexible 2-bit coding metasurface. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 22, pp. 29128–29137. <https://doi.org/10.1364/OE.23.029128>
 5. Khan T. A., Li J., Chen J., Raza M. U., Zhang A. Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 18, article no. 3031. <https://doi.org/10.3390/ma12183031>
 6. Shao L., Premaratne M., Zhu W. Dual-Functional Coding Metasurfaces Made of Anisotropic All-Dielectric Resonators. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 45716–45722. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908830>
 7. Zhao Y., Cao X., Gao J., Liu X., Li S. Jigsaw puzzle metasurface for multiple functions: Polarization conversion, anomalous reflection and diffusion. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 10, pp. 11208–11217. <https://doi.org/10.1364/OE.24.011208>
 8. Zhuang Y., Wang G., Zhang Q., Zhou C. Low-Scattering Tri-Band Metasurface Using Combination of Diffusion, Absorption and Cancellation. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 17306–17312. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2810262>
 9. Cui T. J., Qi M. Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 2014, vol. 3, no. 10, pp. e218. <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99>
 10. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Y. V., Blagovisnyy P. V. Block principle of constructing and estimating the rcs reduction of nonabsorbing broadband 2 bit anisotropic digital meta-coatings. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2020, no. 12 (in Russian). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.4>
 11. Kurushin A. A., Plastikov A. N. *Proektirovanie SVCh ustroystv v srede CST Microwave Studio* [Designing microwave devices in CST Microwave Studio suite]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2011. 155 p. (in Russian).
 12. Blagovisnyy P. V., Semenikhin A. I. Full-wave and impedance models of ultra wideband thin twist-metapolarizers for cloaking coverings. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2020, no. 8 (in Russian). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.12>
 13. Bankov S. E., Kurushin A. A. *Elektrodinamika dlia pol'zovatelei SAPR SVCh* [Electrodynamics for microwave CAD users]. Moscow, Solon-Press, 2017. 316 p. (in Russian).
 14. Kurushin A. A. *Shkola proektirovaniia SVCh ustroystv v CST STUDIO SUITE* [School of designing microwave devices in CST Studio suite]. Moscow, One-Book, 2014. 433 p. (in Russian).
 15. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, vol. 14, no. 3, pp. 302–307. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693>
 16. Krietenstein B., Schuhmann R., Weiland T., Thoma P. The Perfect Boundary Approximation Technique Facing

References

1. Chen H.-T., Padilla W. J., Zide J. M. O., Gossard A. C., Taylor A. J., Averitt R. D. Active terahertz metamaterial devices. *Nature*, 2006, vol. 444, no. 7119, pp. 597–600. <https://doi.org/10.1038/nature05343>
2. Della Giovampaola C., Engheta N. Digital metamaterials. *Nature Materials*, 2014, vol. 13, no. 12, pp. 1115–1121. <https://doi.org/10.1038/nmat4082>
3. Zaki B., Firouzeh Z.-H., Zeidaabadi-Nezhad A., Maddahali M. Wideband RCS reduction using three different implementations of AMC structures. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, vol. 13, no. 5, pp. 533–540. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5024>



- the Big Challenge of High Precision Field Computation. *Proceedings of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98)*. Chicago, 1998, pp. 860–862.
17. Weiland T. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, 1977, Bd. 31, S. 116–120.
18. Gorbachev A. P., Ermakov E. A. *Proektirovanie pechatnykh fazirovannykh antenykh reshetok v SAPR "CST Microwave Studio"* [Designing printed phased array antennas in "CST Microwave Studio" CAD]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2008. 88 p. (in Russian).
19. Demming-Janssen F., Krüger H., Thoma P., Löcker C., Bertuch T., Eibert T. Time domain simulation of conformal antennas using the finite integration technique (FIT) with PBA geometry discretisation and local time step adaptive sub-gridding. *3rd European Workshop on Conformal Antennas*. Bonn, 2003, pp. 45–48.
20. Mazinov A. S., Fitaev I. Sh., Boldyrev N. A. Influence of spatial orientation of conducting elements of composite metasurfaces on their frequency characteristics and scattering diagrams in the microwave range. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 86–90 (in Russian).

Поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 25.02.2023
The article was submitted 10.01.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 25.02.2023