



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 12–23

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 12–23

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>, EDN: FAAPBH

Научная статья

УДК 537.874



Частотные зависимости и диаграммы рассеяния комбинированных металлодиэлектрических поверхностей в диапазоне 16–25 ГГц

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

Физико-технический институт Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, Россия, 295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика 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>, AuthorID: 754027

Падалинский Михаил Михайлович, специалист кафедры радиофизики и электроники, m.padalinskiy@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9691-4066>, AuthorID: 1174357

Болдырев Николай Алексеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники, kolyaboldyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1804-4784>, AuthorID: 1228998

Фитаев Ибраим Шекетович, преподаватель кафедры радиофизики и электроники, fitaev.i@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2426-3692>, AuthorID: 1013098

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

Аннотация. Разрабатываются компактные рассеивающие материалы, представляющие собой комбинацию из плоскостных метаструктур с тонкими наноразмерными пленками. Такие материалы предназначаются для защитных покрытий зданий и сооружений в целях снижения уровня прошедшего электромагнитного излучения, но при этом с малым коэффициентом отражения в диапазоне частот 16–25 ГГц. Низкий уровень сигнала, отраженного от подобного покрытия, будет способствовать улучшению электромагнитной обстановки и гигиенических норм вблизи передающих радиотехнических объектов. Метаструктуры представляют собой набор особым образом расположенных субволновых металлических или диэлектрических структур, которые резонансно взаимодействуют с электрическими или магнитными составляющими падающих электромагнитных волн. Электромагнитные свойства подобных структур в основном определяются характеристиками резонаторов и их взаимным расположением, что позволяет получить эффективный электромагнитный отклик, который недостижим в естественных материалах. В качестве источника омических потерь в работе были исследованы металлические пленки. Тонкопленочные материалы, применявшиеся в комбинации с метаструктурами, представляли собой подложку из стекла или ситалла с нанесенным на них функциональным слоем. Благодаря островковой структуре, формирующейся при определенной толщине проводящего материала, такие пленки позволили поглощать до 35% падающего излучения. Результаты исследований демонстрируют, что величина нормальной составляющей отраженной электромагнитной волны значительно снижается на резонансной частоте 18.8 ГГц благодаря применению комбинации данных ослабляющих покрытий. На этой частоте коэффициент ослабления достигает своего пикового значения – 97.8% от падающей волны. Ширина данного резонансного пика, при котором ослабление волны достигает не менее 70% составляет 450 МГц. Также следует отметить, что добавление резистивной пленки сдвигает резонансные пики в более высокочастотную область.

Ключевые слова: комбинированные системы рассеивания, расширение частотной полосы поглощения, уменьшения нормальной составляющей отраженной волны, паразитное переотражение

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00261).

Для цитирования: Мазинов А. С., Болдырев Н. А., Падалинский М. М., Фитаев И. Ш., Старосек А. В. Частотные зависимости и диаграммы рассеяния комбинированных металлодиэлектрических поверхностей в диапазоне 16–25 ГГц // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 12–23. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>, EDN: FAAPBH

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

Article

Frequency dependencies and scattering diagrams of combined metal-dielectric surfaces in frequency range of 16–25 GHz

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

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



Alim S. Mazinov, mazinovas@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8015-8841>, AuthorID: 754027
 Mikhail M. Padalinsky, m.padalinsky@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9691-4066>, AuthorID: 1174357
 Nikolay A. Boldyrev, kolyaboldyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1804-4784>, AuthorID: 1228998
 Ibraim Sh. Fitaev, fitaev.i@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2426-3692>, AuthorID: 1013098
 Aleksandr V. Starosek, starosekav@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9688-7598>, AuthorID: 1055717

Abstract. Background and Objectives: It is known that the design of attenuating coatings is usually based on two main physical principles: scattering and absorption. The absorbing coatings include ultrathin films, which at nanoscale thicknesses of the conductive layer absorb up to 50% of the incident electromagnetic energy, and are also capable of attenuating the signal in a wide frequency range due to frequency-independent properties. One of the ways to achieve high scattering readings is the use of metastructural coatings. This work aims to develop compact scattering materials that are a combination of planar metastructures with thin nanoscale films. Combining metastructures and thin absorbing nanofilms allows utilizing the advantages of both approaches, providing high efficiency of attenuation of electromagnetic waves in the microwave range. This opens up new opportunities for the creation of multifunctional and highly efficient attenuation coatings, which can find wide application in various industries and science. **Materials and Methods:** Metastructures are a set of specially arranged subwavelength metallic or dielectric structures that interact resonantly with the electric or magnetic components of incident electromagnetic waves. The electromagnetic properties of such structures are mainly determined by the characteristics of the resonators and their mutual arrangement. Such a construction principle allows them to exhibit an effective electromagnetic response, which is unattainable in natural materials. As a source of ohmic losses, thin films based on metallic, carbon and organic structures have been investigated in this work. Thin film materials used in combination with metastructures were a glass or sital substrate with a functional layer deposited on them via magnetron sputtering. Due to the island structure formed at a certain thickness of the conducting material, such films allowed absorbing up to 35% of the incident radiation. Glass-textolite with one-sided copper metallization was used as a material for obtaining the tested structures. The topology of the conductive structure was formed by milling. **Results:** The research results have demonstrated that the magnitude of the normal component of the reflected electromagnetic wave is significantly reduced at a resonant frequency of 18.8 GHz due to the use of combination of these attenuating coatings. At this frequency, the attenuation coefficient reaches its peak value of 97.8% of the incident wave. The width of this resonant peak, at which the attenuation of the wave reaches at least 70%, is 450 MHz. But it should also be noted that the addition of a resistive film has the property of shifting the resonant peaks to a higher frequency region. **Conclusion:** Such materials can be used as protective coatings for buildings and structures in order to reduce the level of the passed electromagnetic radiation, but with a low reflection coefficient in the frequency range of 16–25 GHz. The low level of signal reflected from such a coating will contribute to the improvement of the electromagnetic environment and hygienic standards in the vicinity of radio transmitting facilities.

Keywords: combined scattering systems, expansion of the partial absorption band, reduction of the normal component of the reflected wave, parasitic re-reflection

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-22-00261).

For citation: Mazinov A. S., Padalinsky M. M., Boldyrev N. A., Fitaev I. Sh., Starosek A. V. Frequency dependencies and scattering diagrams of combined metal-dielectric surfaces in frequency range of 16–25 GHz. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 12–23 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>, EDN: FAAPBH

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

Введение

С увеличением количества источников излучений в радиодиапазоне неуклонно растут требования к уменьшению паразитного излучения, возникающего при прямом отражении и переотражении электромагнитных (ЭМ) волн от автомобилей, крыш зданий и других объектов. Особенно это актуально с внедрением более высокочастотных каналов связи 5 и 6G, работающих на частотах до 300 ГГц [1]. В достаточно плотной городской застройке это может приводить к превышению санитарно-эпидемиологические норм [2]. Также данная проблема затрагивает предприятия, управление процессом автоматизации которых базируется на беспроводных локальных сетях [3]. Подобные предприятия используют автономные движущиеся агрегаты и платформы, которые требуют использования селективных радиоканалов, на работу которых значительное влияние оказывают переотражения

от металлических конструкций. Данная проблема актуальна и для предприятий с высоким уровнем автоматизации производства, где невозможно обойтись без использования раздельных радиоканалов для управления и связи внутри производственного помещения.

Традиционные методы снижения электромагнитного (ЭМ) фона, как правило, требуют объемных и сложных приспособлений и систем [4, 5]. Высокой компактностью выделяются планарные фазированные металлодиэлектрические покрытия, имеющие сложный геометрический рисунок слоя металлизации. Созданную специальным образом структуру из проводящих элементов можно представить как набор элементарных излучателей (с резонансом на определенной частоте), каждый из которых при взаимодействии с электромагнитными волнами различных диапазонов переизлучает определенным образом в зависимости от топологии резонаторов на поверхности [6–8]. Однако основным недостатком

подобных систем является их узкий рабочий диапазон в связи с ограничением линейных размеров планарных структур. Это и обуславливает применение объемных конструкций, размер которых сопоставим с рабочими длинами волн.

Одно из возможных решений данной проблемы заключается в использовании различных комбинаций элементарных резонаторов, образующих более сложную геометрию. Данный подход позволяет создать фазовые вихри [9], которые в свою очередь обеспечивают минимальную величину обратного рассеяния электромагнитной энергии, что позволяет добиться максимальных углов ее переизлучения [10].

Неоспоримым преимуществом двумерных фазированных систем является возможность управляемой гальванической связи отдельных резонаторов в составной матрице, что позволяет изменять их рабочие полосы частот. Следует отметить, что использование при этом в качестве управляющих элементов пленочных гетероструктур, сформированных на основе наноструктурированных углеродных или органических слоев, потенциально может снизить стоимость активных поглощающих и рассеивающих матриц [11–13].

В связи со сказанным основная цель настоящей работы состоит в выявлении спектральных и отражающих характеристик составных метаструктур выполненных в виде треугольной незамкнутой спирали, а также в оценке влияния дополнительного поглощающего слоя, созданного на основе тонкопленочных резистивных элементов поверх слоя метаматериала.

1. Постановка исследования, эксперимент

Ранее авторами были проведены исследования метаповерхностей, в которых элементарные ячейки представляют собой набор периодически расположенных диполей, обладающих строго заданными размерами [14]. В данной работе авторами описывается спроектированная ими более сложная по принципу своего построения метаструктура. Предложенная топология поверхности рассеивающей структуры позволяет добиться увеличения как количества отдельно взятых ярко выраженных пиков ослабления, так и общей ширины полосы частот, на которых бы наблюдалось ослабление отраженной от структуры электромагнитной волны. В качестве единичных резонаторов выступали двойные треугольные незамкнутые спирали. Выбор подобной симметрии обуславливается тем, что

в отличие от классических диполей данная структура обладает большим количеством различных емкостных и индуктивных связей – как внутри себя самой, так и с соседними элементами. Это позволяет увеличить как рассеивающие свойства составной метаповерхности, так и ширину ослабляемой полосы. Кроме того, наличие различной длины сторон треугольной спирали позволяет падающему ЭМ излучению различной частоты взаимодействовать с разными ее частями, что также приводит к увеличению широкополосности описанной выше структуры. В представленной работе размеры структуры рассчитывались для частоты 20.5 ГГц (длина волны $\lambda = 16.66$ мм). Выбор частоты обусловлен рабочим диапазоном оборудования, в частности, антенн П6–40, рабочий диапазон которых составляет 17.44–25.86 ГГц. Стороны фигуры кратны λ : малое основание равно $\lambda/8$, левая боковая сторона равна $\lambda/4$, правая – $\lambda/2$; толщина фигуры также составляет $\lambda/8$. Изображение изготовленной структуры, а также ее геометрические параметры представлены на рис. 1.

Для дополнительного уменьшения уровня мощности отраженной волны авторы настоящей работы использовали поглощающие элементы при построении комбинированной структуры наряду с метаповерхностью. В качестве поглощающего элемента в комбинированной поверхности использовался ряд пленочных структур, имеющих различный материал и толщину проводящего слоя. Рассматривались тонкопленочные металлизированные слои, осаждённые методом магнетронного напыления, со средними толщиными в единицы нанометров. В качестве проводящих материалов использовались алюминий и медь [15, 16].

Для получения диаграмм обратного рассеяния исследуемых структур, был собран измерительный стенд, представленный на рис. 2.

Измерительный стенд состоял из синтезатора частот Г7М-40, выступающего в роли генератора электромагнитных волн, измерителя мощности PLS26-13М, фиксированного отраженную от исследуемой структуры мощность, а также из двух рупорных антенн П6–40, к которым были подключены представленные выше приборы через фазостабильные кабеля для минимизации влияния их изгиба на измеряемые параметры. В качестве управляющего устройства выступал персональный компьютер.

Для получения экспериментальных зависимостей амплитуд отраженной волны от угла

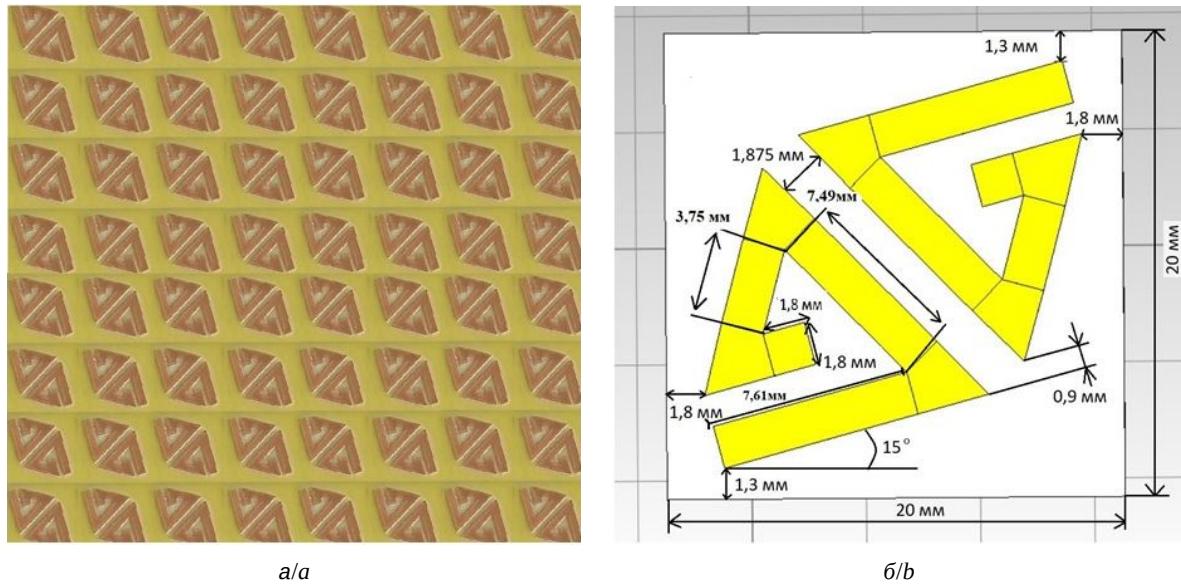


Рис. 1. Вид структуры (а) и геометрические параметры единичных резонаторов (б) (цвет онлайн)
Fig. 1. Image of the created structure (a) and geometric parameters of a single resonator (b) (color online)

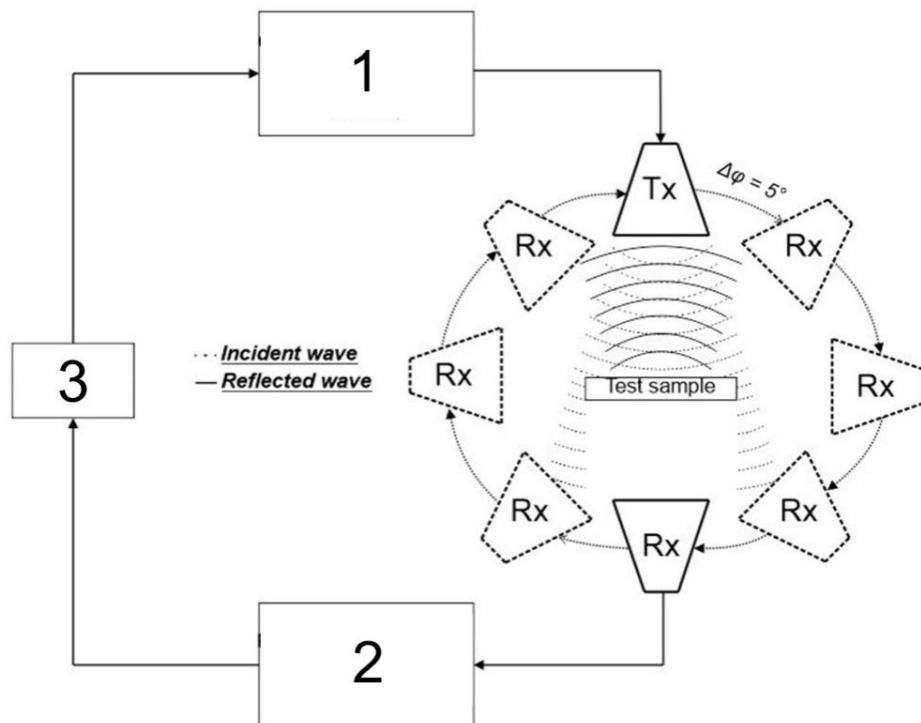


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор, 2 – измеритель мощности, 3 – компьютер, Tx – излучающая и Rx – приёмная антенны

Fig. 2. Block diagram of the experimental setup: 1 – generator, 2 – power meter, 3 – computer, Tx – transmitting and Rx – receiving antennas

отклонения приемного устройства использовался метод бистатического измерения. Излучающая антенна Tx фиксировалась в одном положении, обеспечивая падение волн по нормали относительно исследуемого образца. Линейно поляри-

зованные волны формировались рупорной антенной П6–40, апертура которой составляла 625 см^2 . Расстояние от раскрытия рупора до исследуемого образца составляла 16.8 см, что составляет более 10 длин волн нижней границы исследуемого ди-

пазона частот. Такое расстояние было выбрано исходя из задачи получения квазиплоского фронта падающей волны в дальней зоне, вследствие чего минимизируется влияние дифракционных явлений на измерения. Отраженная волна детектировалась идентичной рупорной антенной П6-40 путем проведения замеров отраженной мощности при последовательном перемещении приемной антенны Rx на 5 градусов по азимутальному углу θ при фиксированном полярном угле ϕ . Исследование представленных структур производилось в частотном диапазоне от 16 до 25 ГГц. Сама исследуемая структура располагалась на диэлектрическом держателе.

В качестве исследуемого образца выступала комбинированная поверхность, состоящая из сборной матрицы из 16 ячеек треугольной спиралевидной метаструктуры, поверх каждой из которой была расположена резистивная пленка. Далее рассматриваются результаты исследования частотных зависимостей подобных комбинированных поверхностей, показавших максимальные значения ослабления при максимальных углах рассеяния.

Показатель ослабления A являлся (в физическом смысле) упрощенным коэффициентом потерь в измеряемой плоскости и определялся из закона сохранения энергии в предположении, что сумма коэффициентов прохождения T , отражения R и ослабления A равна единице. При этом для экспериментального определения коэффициента прохождения T приемная антenna фиксировалась под углом в 180° относительно излучающей антенны. Первоначально было проведено измерение мощности для свободного пространства между антеннами, после чего на пути электромагнитной волны размещалась исследуемая метаструктура.

Поскольку металлизация на обратной стороне комбинированной структуры препятствовала прохождению волны, коэффициент прохождения T полагался равным нулю. Для определения коэффициента отражения приемная антenna фиксировалась параллельно излучающей антенны таким образом, что угол между ними составлял 0° . За эталон отражения бралось металлическое зеркало толщиной 0.6 мм, расположенное нормально к падающей волне. После чего на это же зеркало помещалась исследуемая метаструктура и фиксировалась отраженная мощность в нуле градусов между антеннами, а коэффициент отражения R рассчитывался как отношение мощ-

ностей отраженного излучения для структуры на зеркале и для зеркала: $R = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{зеркала}}}$.

2. Компьютерное моделирование исследуемого комбинированного покрытия

Для подтверждения полученных экспериментальных результатов, а также рассмотрения картины распределения токов на поверхности исследуемого образца было проведено компьютерное моделирования данной структуры. Для трехмерного моделирования вышеописанных метаповерхностей в режиме излучения и рассеяния использовался пакет CST Studio 2020 – раздел CST Microwave Studio, ориентированный на моделирование сложных объемных СВЧ-устройств (антенны, волноводы, радары и т. д.), включая средства построения прямоугольных, тетраэдralных и поверхностных сеток, которые подходят для моделирования различных высокочастотных явлений [17–20]. Для самой симуляции структуры задавался прямоугольный бокс с граничными условиями, представляющими собой открытое пространство. Порт, который является одновременно приемным и излучающим, расположен на расстоянии 150 мм от метаповерхности. Свободное пространство в самом боксе отстоит от поверхности структуры на 36 мм во всех направлениях, что соответствует нескольким длинам волн для средней частоты исследуемого диапазона, который составляет от 16 до 25 ГГц. Падающая волна распространялась по оси Z, имела линейную горизонтальную поляризацию по оси X и обеспечивала нормальное падение на исследуемый объект. Расстояние от исследуемой структуры до источника плоской волны составляло 160 мм. Для исследуемой структуры построение диаграмм обратного рассеяния рассчитывалось не на всех частотах, а лишь на характерных для нее частотах: 18.4, 19 и 19.6 ГГц. Принцип выбора характерных частот для дальнейшего рассмотрения диаграмм обратного рассеяния объясняется в наших предыдущих работах по изучению различного типа метаструктур и напрямую связан с полученными частотными характеристиками [14, 15].

Метаструктура состояла из нескольких слоев. В качестве подложки был выбран стеклотекстолит марки FR-4 толщиной 1.5 мм, с одной стороны которой располагалось металлическое зеркало толщиной не менее 1 мм, с другой стороны располагалась матрица из субволновых



резонаторов, сформированных в форме спиралевидного треугольника из меди толщиной 16 мкм. Общая матрица метаповерхности состояла из 16 подобных ячеек, каждая из которых имеет размер 20×20 мм (рис. 3, а). Поверх метаструктуры была расположена поглощающая резистивная пленка, нанесенная на стеклянную подложку, как показано на рис. 3, б.

При рассмотрении картины распределения пространственных токов по поверхности метаструктуры (на металлическом зеркале) на резонансной частоте можно увидеть, что в начальный момент времени основная часть энергии формируется на самих резонаторах параллельно вектору поляризации падающей волны, тем самым возбуждая в них токи (рис. 4, а). После чего происходит переизлучение накопленной энергии в пространство, вследствие чего начинается постепенный процесс формирования локальных максимумов и минимумов, располагающихся как в зазорах внутри самих резонаторов, так и в пространственном зазоре в области между соседними резонаторами (рис. 4, б). К следующему моменту времени формирование экстремумов пространственных токов достигает максимального значения (рис. 4, в). Из представленной картины поля явно видно, что основные ослабляющиеся процессы происходят в пространстве между четырьмя соседствующими ячейками и являются следствием наложения переизлученных волн между элементами. На финальном изображении

(рис. 4, г) можно увидеть, что величина пространственных максимумов в центральной части начинается постепенно затухать, а ток на самих проводящих резонаторах достигает минимальных значений, что говорит о том, что вся энергия электромагнитного поля, возбужденная в резонаторах падающей электромагнитной волной, была переизлучена в пространство.

3. Сравнение частотных характеристик и диаграмм рассеяния

Использование разнообразных материалов в формировании комбинированной метаструктуры было продиктовано в первую очередь задачей снижения удельной себестоимости ослабляющего покрытия при расширении рабочего частотного диапазона и увеличении ослабляющих свойств. В результате вышеуказанного перебора комбинаций из различных поглощающих материалов был установлен схожий механизм их влияния на исследуемые характеристики – способность дополнительно влиять на ослабление отраженной волны путем поглощения падающего излучения. Однако следует отметить, что добавление дополнительного тонкопленочного проводящего слоя поверх метаструктуры приводит к появлению емкостной нагрузки между пленками и металлическими резонаторами на поверхности метаструктуры, что в свою очередь заметно сдвигает всю частотную характеристи-

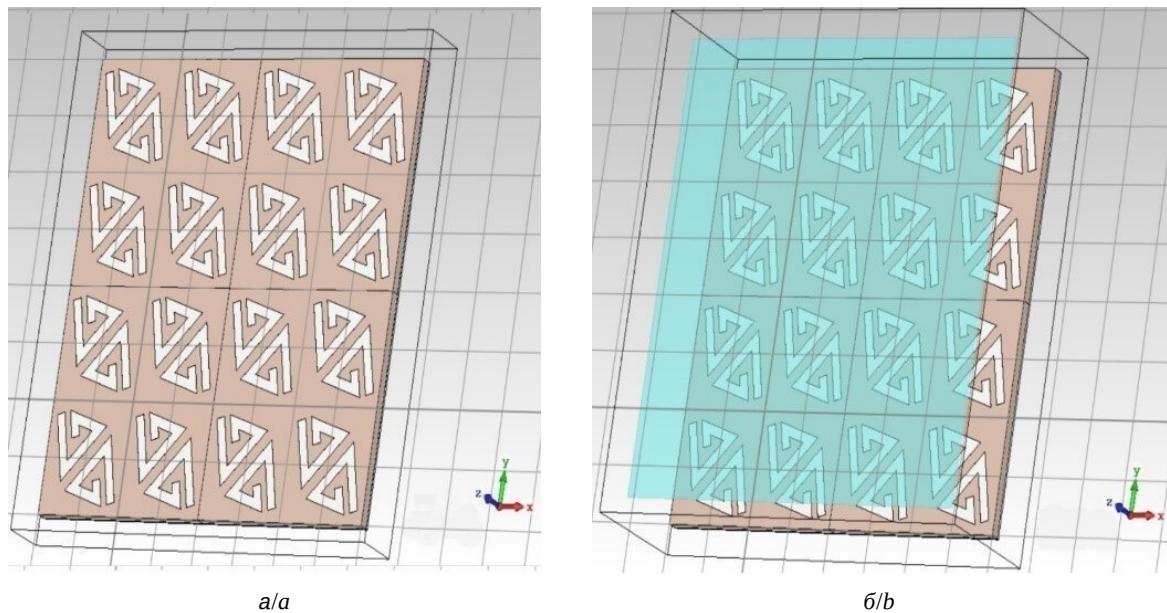


Рис. 3. Промоделированные структуры: а – треугольники без пленки; б – треугольники с пленкой (цвет онлайн)

Fig. 3. Modeled structures: a – triangles without film; b – triangles with film (color online)

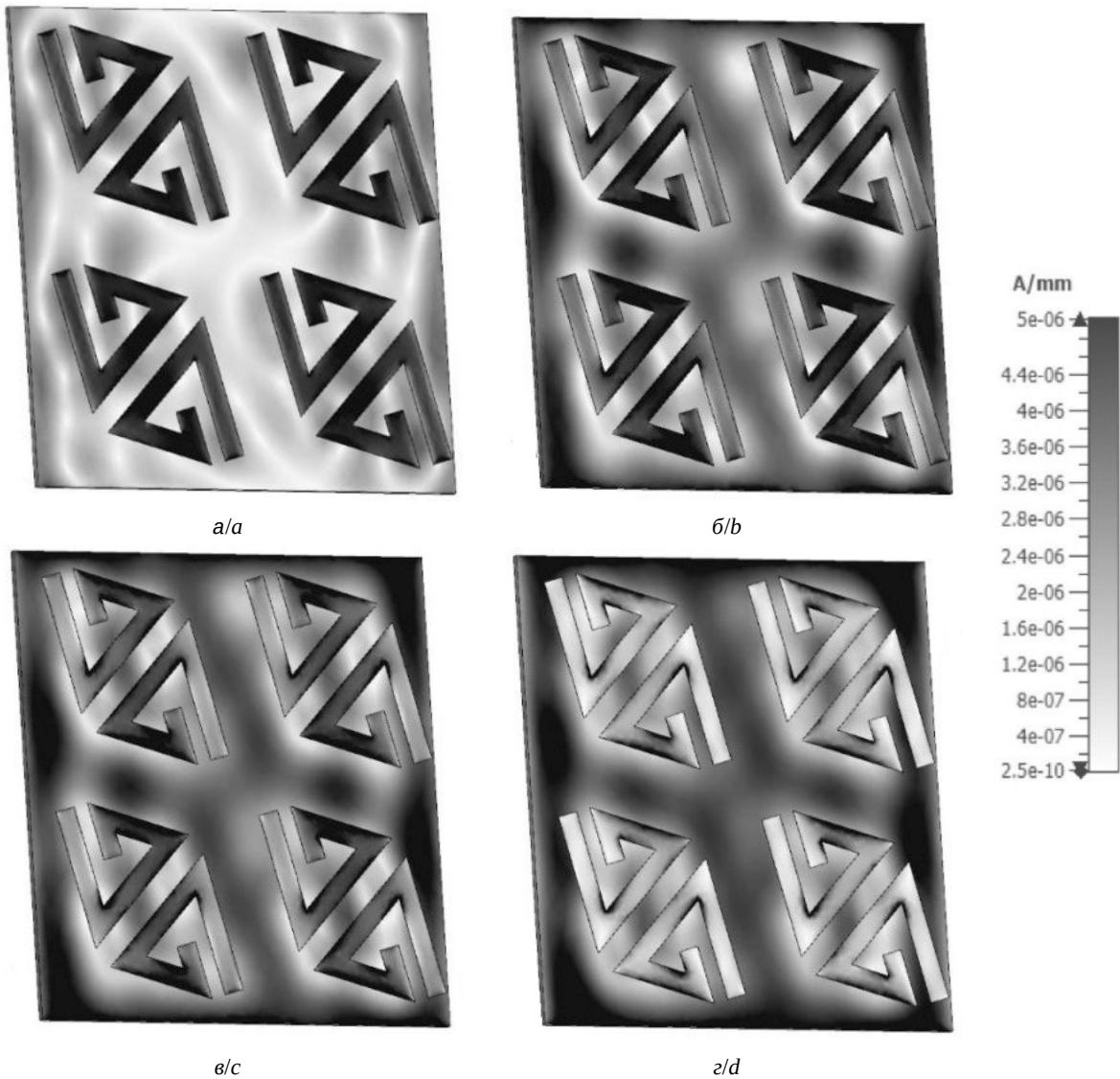


Рис. 4. Распределение пространственных токов на поверхности метаструктуры в разных фазах на частоте 19 ГГц:
 $a - 0^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ, d - 90^\circ$

Fig. 4. Distribution of spatial currents on the metastructure surface in different phases at the frequency of 19 GHz:
 $a - 0^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ, d - 90^\circ$

ку в более высокочастотную область, при этом незначительно изменяя форму пиков.

Наилучшего ослабления отраженной от структуры волны нам удалось достичь при добавлении поглощающего слоя состоящего из пленок алюминия средней толщиной 5 нм. Поскольку на таких размерах вследствие механизмов роста плёнки про толщину можно говорить лишь условно, она аппроксимируется исходя из времени напыления материала. Ниже представлено сравнение экспериментальных и модельных результатов именно для этих комбинаций. Для определения эффективности рассеяния были рассчитаны частотные

характеристики ослабления комбинированной поверхности, приведенные на рис. 5.

Полученные результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований в достаточной степени коррелируют между собой и показывают, что комбинированные поверхности подобного типа имеют достаточно большие значения по ослаблению отраженной волны. Частотная зависимость представленной структуры обладает явно выраженнымами пиками. Исходя из графика, полученного путем компьютерного моделирования, основная резонансная частота находится на частоте 18.4 ГГц. На этой частоте коэффициент ослабления достигает своего

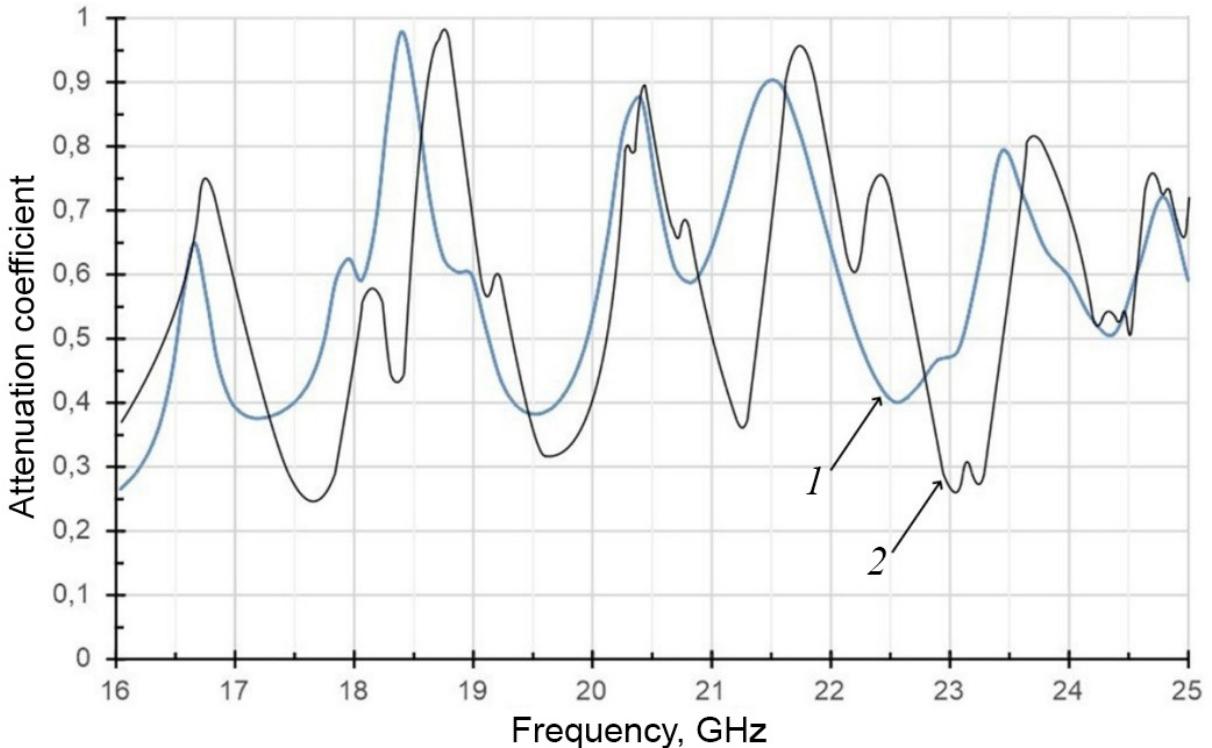


Рис. 5. Частотная характеристика коэффициента ослабления комбинированного покрытия: моделирование (1), эксперимент (2) (цвет онлайн)

Fig. 5. Frequency characteristic of the attenuation coefficient of the combined coating: model (1), experimental (2) (color online)

пикового значения – 97.8% от падающей волны, а ширина резонансного пика, на которой ослабление волны достигает не менее 70%, составляет 450 МГц. Частотная зависимость, полученная экспериментально, также имеет схожий характер, однако максимум резонанса сдвинут в более высокочастотную область. Остальные пики также демонстрируют подобную характеристику, что является следствием различных пространственных связей между метаструктурами и тонкими пленками алюминия, которые не учитываются в модели, или же не идеальностью эксперимента и полученных образцов. Однако в обоих случаях даже побочные пики обладают весьма значительными показателями ослабления.

Результат компьютерного моделирования рассеяния представлен на рис. 6. Для рассмотрения влияния частоты падающей волны на величину ослабления отраженной от структуры волны выбирались три характерные частоты на участке спада резонансного пика: 18.4 ГГц, 19 ГГц и 19.6 ГГц. Из полученных диаграмм можно сделать вывод, что при приближении частоты падающего излучения к резонансной, величина

основного лепестка отраженной волны уменьшается. Также можно увидеть, что при увеличении частоты появляются все более явно выраженные боковые лепестки, величина и ширина которых варьируется в зависимости от частоты. Так, для резонансной частоты ширина бокового лепестка составляет лишь 15°, а его величина не превышает 10% от основного лепестка (рис. 6, вставка). Однако для более высоких характерных частот (с меньшим значением коэффициента ослабления) боковые лепестки начинают возрастать, и становиться шире, достигая значения ширины лепестка равным 32° за счет формирования второго бокового лепестка, вследствие чего показатель ослабления значительно падает.

Далее рассмотрим экспериментально полученные данные диаграмм рассеяния на тех же частотах по такому же принципу, выбирая три характерные точки на прямой линии спада коэффициента ослабления (рис. 7). Экспериментальные данные получены с использованием бистатического метода измерения, описанного во первом разделе статьи.

На графике можно увидеть, что модель имеет те же характерные особенности, что и реаль-

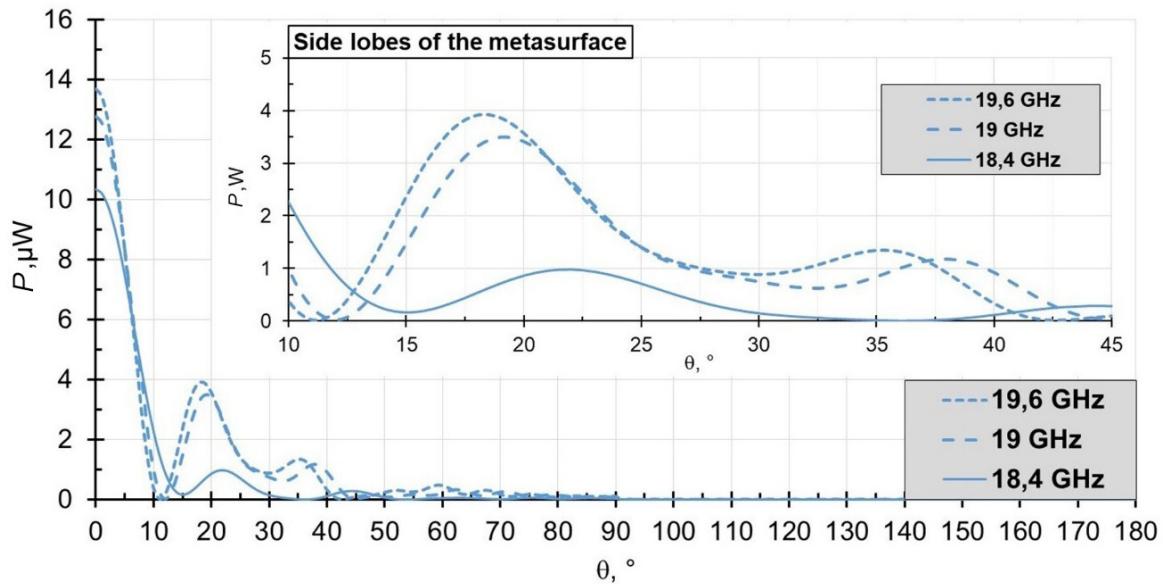


Рис. 6. Диаграммы рассеяния комбинированного покрытия на характерных частотах (на вставке – для диапазона углов 10–45°) (цвет онлайн)

Fig. 6. Scattering diagrams of the combined coating at characteristic frequencies (in the inset – for the angle range of 10–45°) (color online)

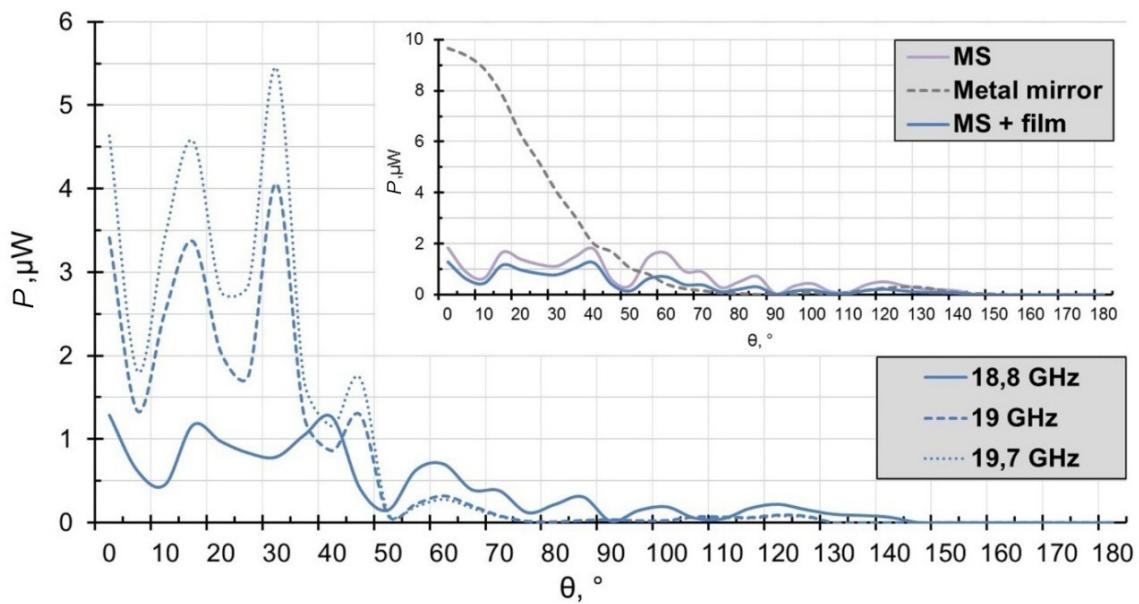


Рис. 7. Экспериментальные диаграммы рассеяния комбинированного покрытия на характерных частотах. На вставке – диаграммы рассеяния зеркала, метаструктуры (MS) и метаструктуры с поглощающим слоем (цвет онлайн)

Fig. 7. Experimental scattering diagrams of the combined coating at characteristic frequencies. The inset shows the scattering diagrams of the mirror, the metastructure (MS) and the metastructure with an absorbing layer (color online)

ные образцы, а именно: значительное ослабление основного лепестка отраженной волны; наличие меняющихся в зависимости от частоты боковых лепестков с зависимостями, полученными в ходе компьютерного моделирования, схожими с теми, что были получены при моделировании; схожий характер спада кривой. Видно, что

величина основного лепестка отраженной волны увеличивается пропорционально отдалению от резонансной частоты, вместе с величиной боковых лепестков.

Наличие излучения в промежутке от 90° до 140° в экспериментальных результатах объясняется различного рода погрешностями в ходе

эксперимента, а также наличием дифракционных явлений, что приводит к их накоплению. Это отражают диаграммы на вставке на рис. 7, где представлена сравнительная характеристика рассеивания исследуемых образцов и металлического зеркала, полученная на одной частоте.

Заключение

В работе исследованы электродинамические характеристики комбинированных металлодиэлектрических поверхностей. В процессе тестирования множества комбинаций материалов и различных симметрий расположения резонаторов на поверхности метаструктур наилучшие показатели достигнуты на метаструктурах и нанометровых алюминиевых слоях толщиной 5 нм. Именно при использовании комбинации этих материалов удалось снизить нормальную составляющую отраженной волны на 75% относительного металлического зеркала. При этом добавление резистивной наноразмерной пленки поверх спиралевидных резонаторов позволило дополнительно ослабить отраженную волну до 90%. При этом следует отметить, что добавление резистивной пленки обладает свойством сдвигать резонансные пики в более высокочастотную область, вследствие образования дополнительной емкости между резонаторами метаструктуры и нанометровым слоем проводящей пленки. Величина частотного сдвига составляла порядка 500 МГц.

Список литературы

1. *Salahdine F., Han T., Zhang N.* 5G, 6G, and Beyond: Recent advances and future challenges // *Ann. Telecommun.* 2023. Vol. 78, iss. 9–10. P. 525–549. <https://doi.org/10.1007/s12243-022-00938-3>
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: санитарные правила и нормы: утв. 28.01.2021. М. : Б. и., 2022. 469 с.
3. *Денисенко В.* Беспроводные локальные сети // Современные технологии автоматизации. 2009. № 1. С. 90–102.
4. *Chen T., Tang W., Mu J., Cui T. J.* Microwave Metamaterials // *Annalen der Physik.* 2019. Vol. 531, iss. 8. Art. 1800445. <https://doi.org/10.1002/andp.201800445>
5. *Van Schelven R. M., Bernardis A. F., Sberna P., Neto A.* Drude Dispersion in the Transmission Line Modeling of Bulk Absorbers at Sub-mm Wave Frequencies: A tool for absorber optimization // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* 2022. Vol. 64, iss. 1. P. 50–60. <https://doi.org/10.1109/MAP.2021.3073092>
6. *El Assal A., Breiss H., Benzerga R., Sharaiha A., Jrad A., Harmouch A.* Toward an Ultra-Wideband Hybrid Metamaterial Based Microwave Absorber // *Micromachines.* 2020. Vol. 11, iss. 10. Art. 930. <https://doi.org/10.3390/mi11100930>
7. *Li Z., Yang R., Wang J., Zhao Y., Tian J., Zhang W.* Multi-functional metasurface for broadband absorption, linear and circular polarization conversions // *Optical Materials Express.* 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 3507–3519. <https://doi.org/10.1364/OME.437474>
8. *Huang C., Pan W., Ma X., Luo X.* Multi-spectral Metasurface for Different Functional Control of Reflection Waves // *Scientific Reports.* 2016. Vol. 6, iss. 1. Art. 23291. <https://doi.org/10.1038/srep23291>
9. *Semenikhina D. V., Chikov N. I., Semenikhin A. I., Gorbatenko N. N.* Experimental studies of nonlinear metasurface with metamaterial substrate // 24th Telecommunications Forum (TELFOR). Belgrade, Serbia : IEEE, 2016. Art. 7818846. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2016.7818846>
10. *Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu.V., Blagovisny P. V., Ilyin I. V.* Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers // *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2021. Vol. 24, № 4. P. 57–67. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67>
11. *Gusev A. N., Mazinov A. S., Shevchenko A. I., Tuytyunik A. S., Gurchenko V. S., Braga E. V.* The Voltage-Current Characteristics and Photoelectric Effect of Fullerene C₆₀-N-Isoamylisatin 4-Methylphenylhydrazone Heterostructures // *Technical Physics Letters.* 2019. Vol. 45, iss. 10. P. 997–1000. <https://doi.org/10.1134/S1063785019100080>
12. *Sorathiya V., Lavadiya S., Parmar B., Das S., Krishna M., Faragallah O. S., Baz M., Eid M. M. A., Rashed A. N. Z.* Numerical investigation of the tunable polarizer using gold array and graphene metamaterial structure for an infrared frequency range // *Applied Physics B.* 2022. Vol. 128, iss. 1. Art. 13. <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07731-5>
13. *Yang L.-J., Li J.-S., Li X.-J.* Transmission/reflection/absorption individually control multifunctional metasurfaces // *Optical Materials Express.* 2022. Vol. 12, iss. 4. P. 1386–1396. <https://doi.org/10.1364/OME.454456>
14. *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
15. *Mazinov A., Boldyrev N., Padalinsky M., Starosek A.* Investigation of the Attenuation Properties of a Compact Absorber Based on a Metamaterial and a Nanometer Conductive Film // *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW).* Divnomorskoe, Russian Federation : IEEE, 2023. P. 304–307. <https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10202152>

16. Мазинов А. С. Физические и электродинамические свойства наноразмерных проводящих пленок на полимерных подложках // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2020. Т. 12, № 2. С. 247–252. <https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.247>
17. Юрцев О. А., Бобков Ю. Ю., Кизименко В. В., Юбко А. П., Герасимович Г. В. Моделирование антенн в режимах излучения и рассеяния в пакетах CST STUDIO, HFSS, FEKO и узкоспециализированных программах : методическое пособие по дисциплинам «Антенны и устройства СВЧ», «Методы и устройства формирования информационных электромагнитных полей», «Распространение радиоволн в антенно-фидерных устройствах», «Техника СВЧ и КВЧ в медицинских приборах». Минск : БГУИР, 2012. 62 с.
18. Алексейчик Л. В., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : Солон-Пресс, 2022. 276 с.
19. Мазинов А. С., Болдырев Н. А., Падалинский М. М. Частотные характеристики спиралевидной треугольной метаповерхности и ее влияние на ослабление падающей волны // Радиолокация, навигация, связь: сб. трудов XXX Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 16–18 апреля 2024 г.): в 5 т. Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2024. Т. 4. С. 327–330.
20. Болдырев Н. А., Фитаев И. Ш., Падалинский М. М., Полетаев Д. А., Мазинов А. С. Возможности ослабления основного лепестка отраженной волны посредством спиралевидной треугольной метаструктуры // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20, № 2. С. 116–123. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.2.018>, EDN: BKLSXZ
- for absorber optimization. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2022, vol. 64, iss. 1, pp. 50–60. <https://doi.org/10.1109/MAP.2021.3073092>
6. El Assal A., Breiss H., Benzerga R., Sharaiha A., Jrad A., Harmouch A. Toward an Ultra-Wideband Hybrid Metamaterial Based Microwave Absorber. *Micromachines*, 2020, vol. 11, iss. 10, art. 930. <https://doi.org/10.3390/mi11100930>
7. Li Z., Yang R., Wang J., Zhao Y., Tian J., Zhang W. Multifunctional metasurface for broadband absorption, linear and circular polarization conversions. *Optical Materials Express*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 3507–3519. <https://doi.org/10.1364/OME.437474>
8. Huang C., Pan W., Ma X., Luo X. Multi-spectral Metasurface for Different Functional Control of Reflection Waves. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, iss. 1, art. 23291. <https://doi.org/10.1038/srep23291>
9. Semenikhina D. V., Chikov N. I., Semenikhin A. I., Gorbatenko N. N. Experimental studies of nonlinear metasurface with metamaterial substrate. *24th Telecommunications Forum (TELFOR)*. Belgrade, Serbia, IEEE, 2016, art. 7818846. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2016.7818846>
10. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V., Ilyin I. V. Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 57–67. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67>
11. Gusev A. N., Mazinov A. S., Shevchenko A. I., Tuytyunik A. S., Gurchenko V. S., Braga E. V. The Voltage-Current Characteristics and Photoelectric Effect of Fullerene C₆₀-N-Isoamylisatin 4-Methylphenylhydrazone Heterostructures. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, iss. 10, pp. 997–1000. <https://doi.org/10.1134/S1063785019100080>
12. Sorathiya V., Lavadiya S., Parmar B., Das S., Krishna M., Faragallah O. S., Baz M., Eid M. M. A., Rashed A. N. Z. Numerical investigation of the tunable polarizer using gold array and graphene metamaterial structure for an infrared frequency range. *Applied Physics B*, 2022, vol. 128, iss. 1, art. 13. <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07731-5>
13. Yang L.-J., Li J.-S., Li X.-J. Transmission/reflection/absorption individually control multifunctional metasurfaces. *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, iss. 4, pp. 1386–1396. <https://doi.org/10.1364/OME.454456>
14. 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>
15. Mazinov A., Boldyrev N., Padalinsky M., Starosek A. Investigation of the Attenuation Properties of a Compact Absorber Based on a Metamaterial and a Nanometer Conductive Film. *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. Divnomorskoe, Russian

References

1. Salahdine F., Han T., Zhang N. 5G, 6G, and Beyond: Recent advances and future challenges. *Annals of Telecommunications*, 2023, vol. 78, iss. 9–10, pp. 525–549. <https://doi.org/10.1007/s12243-022-00938-3>
2. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya: utv. 28.01.2021* [Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: Sanitary rules and regulations: approved. 01/28/2021]. Moscow, 2022. 469 p. (in Russian).
3. Denisenko V. Wireless local networks. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modernt automation technology], 2009, iss. 1, pp. 90–102 (in Russian).
4. Chen T., Tang W., Mu J., Cui T. J. Microwave Metamaterials. *Annalen der Physik*, 2019, vol. 531, iss. 8, art. 1800445. <https://doi.org/10.1002/andp.201800445>
5. Van Schelven R. M., Bernardis A. F., Sberna P., Neto A. Drude Dispersion in the Transmission Line Modeling of Bulk Absorbers at Sub-mm Wave Frequencies: A tool



- Federation, IEEE, 2023, pp. 304–307. <https://doi.org/10.1109/RSEM58451.2023.10202152>
- 16. Mazinov A. S. Physical and electrodynamic properties of nanoscale conductive films on polymer substrates. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2020, vol. 12, iss. 2, pp. 247–252. <https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.247>
 - 17. Yurzev O. A., Bobkov Yu. Yu., Kizimento V. V., Yubko A. P., Gerasimovitch G. V. *Modelirovaniye antenn v rezhimakh izlucheniya i rassejanija v paketakh CST STUDIO, HFSS, FEKO i uzkospetsializirovannykh programmakh: metodicheskoe posobie po disciplinam "Antenny i ustroystva SVCh", "Metody i ustroystva formirovaniya informacionnykh jelektromagnitnykh polej", "Rasprostranenie radiovoln v antenno-fidernykh ustroystvakh", "Tekhnika SVCh i KVCh v meditsinskikh priborakh"* [Modelling of antennas in radiation and scattering modes in CST STUDIO, HFSS, FEKO and highly specialised software packages: Methodical manual on courses “Antennas and microwave devices”, “Methods and devices for the formation of information electromagnetic fields”, “Propagation of radio waves in antenna-feeder devices”, “Microwave and EHF techniques in medical devices”]. Minsk, BSUIR Publ., 2012. 62 p. (in Russian).
 - 18. Alekseychik L. V., Kurushin A. A. *Proektirovaniye SVCh ustroystv v CST STUDIO SUITE* [Designing microwave devices in CST STUDIO SUITE]. Moscow, Solon-Press, 2022. 276 p. (in Russian).
 - 19. Mazinov A. S., Boldyrev N. A., Padalinskiy M. M. Frequency characteristics of spiral triangular metasurface and its influence on attenuation of the incident wave. *Radar, Navigation, Communications: Collected papers of the XXX International scientific and technical conference (Voronezh, April 16–18, 2024), in 5 volumes*. Voronezh, VSU Publ., 2024, vol. 4, pp. 327–330 (in Russian).
 - 20. Boldyrev N. A., Fitaev I. Sh., Padalinsky M. M., Poleshchuk D. A., Mazinov A. S. The possibility of attenuation of the main lobe of the reflected wave by means of a spiral triangular metastructure. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 116–123. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.2.018> (in Russian).

Поступила в редакцию 27.11.2024; одобрена после рецензирования 09.01.2025;
принята к публикации 16.01.2025; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 27.11.2024; approved after reviewing 09.01.2025;
accepted for publication 16.01.2025; published 31.03.2025