



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.1>

УДК: 537.876.4

**РАССЕИВАЮЩИЕ И ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА  
МЕТАПОВЕРХНОСТИ С ТРЕУГОЛЬНЫМИ  
СПИРАЛЕВИДНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ  
В КОМБИНАЦИИ С ТОНКИМИ ПРОВОДЯЩИМИ ПЛЕНКАМИ**

**А.С. Мазинов, Н.А. Болдырев, М.М. Падалинский, И.В. Юрась, И.Ш. Фитаев**

**Крымский Федеральный университет имени В.И. Вернадского,  
295007, Россия, Симферополь, проспект Вернадского, 4**

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2025 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования комбинированного покрытия, состоящего из метаповерхности и сверхтонкой проводящей пленки, обладающей поглощающими свойствами. Получены диаграммы рассеивания падающей электромагнитной волны от исследуемой структуры квазимоностатическим методом измерения.

**Ключевые слова:** метаструктура, тонкие проводящие пленки, квазимоностатический метод.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-22-00261).

**Автор для переписки:** Мазинов Алим Сеит-Аметович [mazinovas@cfuv.ru](mailto:mazinovas@cfuv.ru)

## Введение

На сегодняшний день актуальными являются вопросы электромагнитной совместимости при увеличивающемся количестве радиопередающих устройств. В частности, одной из ключевых задач в этой области является подавление паразитного отражения электромагнитных волн от металлоконструкций, которое создает помехи работе соседних радиоэлектронных систем. Для ослабления влияния подобных отражений используют специальные покрытия, основанные на двух фундаментальных физических принципах – рассеянии и поглощении энергии падающей волны.

Рассеивающие покрытия ослабляют отраженное излучение посредством перераспределения отраженной волны в пространстве и интерференционного ослабления. Традиционные решения использовали интерференцию волн, отраженных от нескольких четвертьволновых слоев. Перспективным классом рассеивающих покрытий выступают метаматериалы, состоящие из субволновых элементов и позволяющие достичь более эффективного рассеяния при меньшей толщине функционального слоя и работающих в более широком диапазоне. В предельном случае это метаповерхности – планарные метаструктуры, способные рассеивать нормально падающую волну в иных направлениях [1, 2] и снижать величину напряженности отраженной волны [3–6].

Поглощающими покрытиями, рассмотренными в данной работе, являются сверхтонкие металлические пленки, которые состоят из проводящего материала толщиной в несколько нанометров, нанесенные на изолирующие подложки. В идеальном случае при их размещении в свободном пространстве без диэлектрической подложки подобные пленочные покрытия могут поглощать до 50 % падающей электромагнитной энергии [7, 8]. При этом высокая степень поглощения наблюдается на широком частотном диапазоне [9, 10].

В некоторых случаях может быть целесообразно использование комбинированных структур, которые сочетают в себе свойства как

рассеивающих, так и поглощающих покрытий, способных обеспечить более эффективное ослабление отраженной электромагнитной волны [11, 12].

Целью настоящей работы является изучение возможности объединения поглощающих свойств наноразмерных проводящих пленок и рассеивающих свойств метаповерхностей в Ku-диапазоне частот.

## 1. Используемые методы

В данной статье рассмотрены рассеивающие метаматериалы, состоящие из ячеек, представляющие собой проводящие структуры в виде двух зеркально расположенных треугольных спиралей (рис. 1, а). Образец метаматериала является матрицей, состоящей из таких ячеек, изготовленной из одностороннего фольгированного стеклотекстолита марки FR-4 толщиной 1,5 мм. Толщина медного покрытия составляла 16 мкм. Фольгированная часть стеклотекстолита была обработана на ЧПУ станке для формирования заданной геометрии. Размеры исследуемого образца составляли 160x160 мм. Образец метаповерхности включал в себя 64 единичных ячеек спиралевидных треугольных резонаторов. Выбор геометрических размеров проводящих элементов и расстояния между ними был произведен исходя из длин волн исследуемого частотного диапазона (18-26 ГГц): за основную была взята частота 20,5 ГГц, и размеры треугольных спиралей были пропорциональны соответствующей длине волны  $\lambda$  (рис. 2, а); размер цельной боковой стороны треугольника и его внешнего основания был кратен  $\lambda/2$  (7,31 мм); размер малой боковой стороны составлял  $\lambda/4$  (3,65 мм); размер внутреннего основания треугольника, зазора между парными резонаторами и ширина составляли  $\lambda/8$  (1,82 мм). Такой принцип построения геометрии резонаторов позволяет добиться большей широкополосности, чем у более простых форм метаструктурных покрытий.

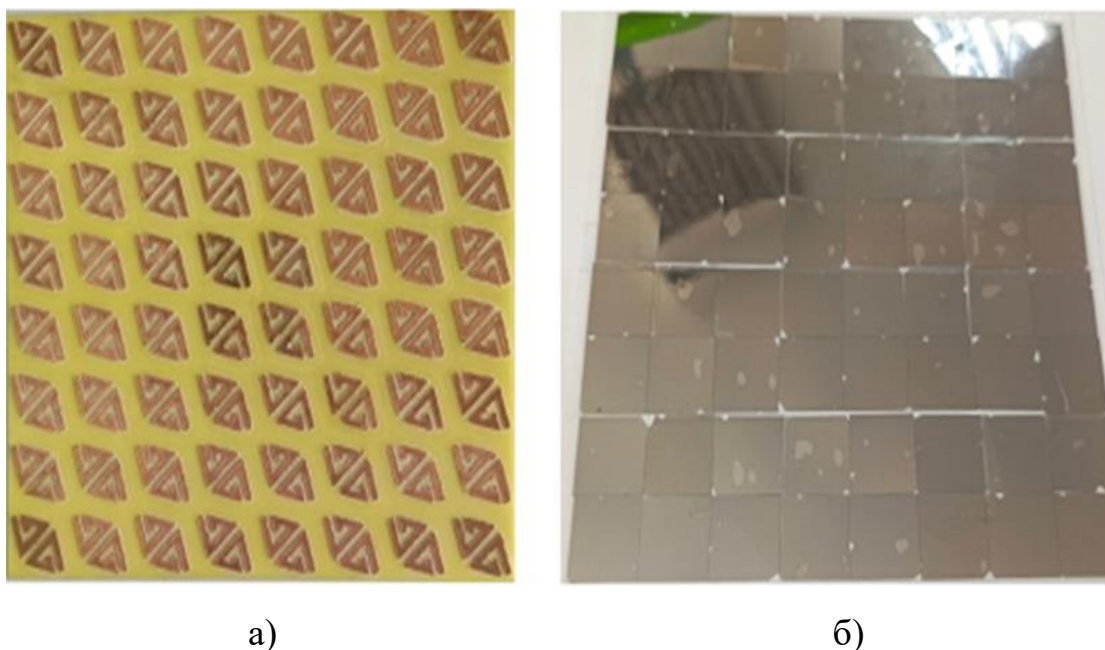


Рис. 1. Экспериментальные образцы компонентов комбинированного покрытия: а) метаповерхность, б) матрица нанометровых пленочных элементов.

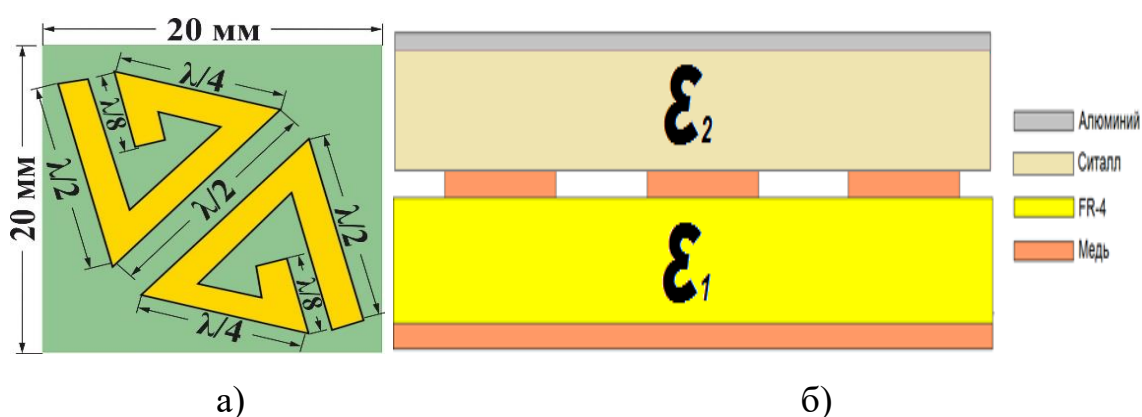


Рис. 2. Ячейка комбинированного покрытия: а) геометрические размеры единичного резонатора в длинах волн, б) послойная структура ячейки.

В качестве поглощающих элементов в работе были использованы алюминиевые нанометровые пленки, осажденные на диэлектрические подложки из ситалла методом магнетронного напыления (рис. 1, б).

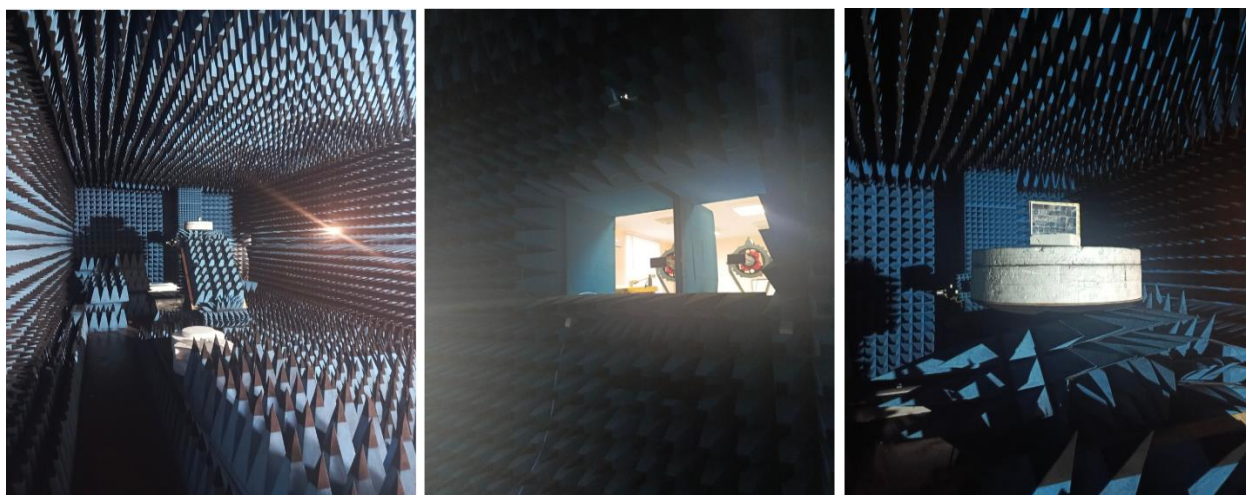
Комбинированное покрытие представляло собой чередующиеся слои описанных выше структур, расположенных на металлическом зеркале (рис. 2, б).

В предыдущих работах по исследованию поглощающих свойств проводящих пленок авторами данной работы были исследованы структуры с различной толщиной: 3, 5, 7, 10 и 120 нм [13, 14]. Данные значения толщин являются в определенной степени условными, вследствие того, что при

формировании пленок алюминия на ситалле от 1 до 7 нанометров их рост происходит по островковому механизму Вольмера – Вебера [15]. Поэтому подбор поглощающих резистивных пленок осуществлялся на основе экспериментальных исследований, основанных на проведении измерений дифракционных коэффициентов в волноводном тракте размерами 11x5,5 мм, в которых размеры исследуемого образца ситалловой подложки с нанесенным слоем алюминиевой пленки соответствовали сечению волновода. Из набора образцов были выбраны те, что показали уровень максимального поглощения порядка 35 %. Схожие результаты были получены и в диапазоне частот 2,4-4,2 ГГц, 8 – 12 ГГц, и также подтверждаются другими научными группами в работах [16].

Исходя из полученных экспериментальных данных и соответствующей им теоретической модели, было выявлено, что наиболее высоким коэффициентом поглощения обладали пленки алюминия толщиной 5 нм [16, 17] с поверхностным сопротивлением порядка 140 Ом/□, способные поглощать до 35 % энергии взаимодействующей с ними падающей волны. Поглощающий элемент комбинированного покрытия, расположенный поверх ячейки метаструктуры, имел следующие параметры: размеры 20×20 мм, толщина алюминия – 5 нм, толщина ситалловой подложки – 1,5 мм.

Для получения зависимости значения уровней мощности отраженной волны от угла падения электромагнитной волны в частотном диапазоне от 18 до 26 ГГц был проведен ряд экспериментальных измерений. В качестве метода, позволяющего реализовать подобное исследование, был выбран квазимоностатический метод. Весь комплекс измерений проводился в безэховой комнате (рис. 3, а) [18].



а)

б)

в)

Рис. 3. Экспериментальные исследования диаграмм обратного рассеивания образца комбинированного покрытия: а) безэховая камера, б) излучающая и приемная антенны, в) расположение образца на диэлектрическом поворотном устройстве.

Измерительный комплекс для проведения измерений реализован на векторном анализаторе цепей ZVA40, который является одновременно генератором падающей электромагнитной волны и измерителем мощности, отраженной от исследуемого образца. Источником падающего излучения являлась измерительная реконфигурируемая антенна Пб-140-3, позволяющая излучать линейно поляризованные волны в исследуемом диапазоне частот (рис. 3, б). В качестве детектора мощности отраженной волны выступала такая же антенна. Для развязки двух представленных антенн между ними располагался поглощающий материал, что позволяло минимизировать влияние излучающей антенны на принимающую. Для расположения образцов внутри самой измерительной камеры и возможности поворачивать исследуемый образец применялось опорно-поворотное устройство из пенопласта (рис. 3, в). Для получения нормировочных значений отраженной волны применялся односторонний фольгированный стеклотекстолит, выступающий в качестве эталонного отражателя, геометрические параметры которого были выбраны исходя из размеров измеряемых структур.

## 2. Моделирование структур

Моделирование производилось в пакете программ CST Studio, являющимся специализированным пакетом для симуляции электромагнитных явлений, функционал которого позволил провести вычисления значений прохождения и отражения электромагнитной волны через сложную многослойную среду. При моделировании многослойной среды учитывались основные свойства каждого из функциональных слоев. Параметры применяемых материалов определялись их диэлектрической проницаемостью. Магнитная проницаемость принималась за единицу.

При моделировании высокочастотных явлений для повышения точности вводятся потери, что означает применение комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости, в которых углы диэлектрических или магнитных потерь определялись посредством соответствующих значений их тангенсов, через которые рассчитывается уровень потерь.

При этом был использован метод конечных элементов, позволивший эффективно просчитать коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн на рабочих частотах 18-26 ГГц как для отдельных элементов, так и для комбинированной поверхности в целом. Таким образом, используя аппроксимацию распределения диэлектрической проницаемости ее дискретными значениями, были определены кусочно-непрерывные функции в заданных областях исследуемой структуры. Данная функциональная зависимость определялась с помощью непрерывных значений в конечном числе точек в заданной области структуры и пространства вокруг нее.

Таким образом, примененный метод [19] позволил промоделировать свойства исследуемого объекта.

Для нормировки уровня отражения электромагнитных волн использовалась металлическая пластина той же площади и формы, что и образец, которая задавалась моделью идеального проводника.

Расчет значения потерь, а также задание дисперсионной зависимости тангенса угла потерь в используемом физико-математическом подходе с

разбиением заданной области на конечное число элементов потребовали применения дисперсионной модели Дебая, чтобы получить стабильные значения коэффициентов прохождения и отражения для всех компонентов структуры [20, 21].

Соответственно, в широкополосных расчетах в пакете CST Studio была использована дисперсионная модель Дебая как 1-го, так и 2-го порядка, которая представляет собой суперпозицию двух различных моделей 1-го порядка, имеющих ту же предельную частоту. Таким образом, учет частотной дисперсии диэлектрической проницаемости используемых материалов позволил определить эффекты затухания электромагнитной волны и резонанса, как в метаповерхности, так и в поглощающем слое. При моделировании тонкой металлодиэлектрической пленки в пакете CST Studio был добавлен новый материал с заданными вручную параметрами проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости и т.д., как у экспериментального образца, так как данный САПР не позволяет корректно ввести объект нанометровой толщины. Для материалов, использованных при моделировании, были заданы следующие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь: FR-4 ( $\epsilon = 4.3$ ,  $\text{tg}\delta = 0.025$ ), ситалл ( $\epsilon = 6.5$ ,  $\text{tg}\delta = 0.002$ ).

Для моделирования применялся решатель во временной области, являющийся оптимальным для работы в сверхвысокочастотном диапазоне с трехмерными структурами, так как в нем учитываются вышеописанные модели потерь для материалов на высоких частотах [22]. При этом вычисления производились в отрезке частот 18-26 ГГц.

Чтобы соответствовать реальным условиям эксперимента, в качестве источника излучения задавалась плоская волна с линейной поляризацией вдоль оси X, падающая под углом  $90^\circ$  на исследуемую поверхность (вдоль оси Z) (рис. 4, а). Расчеты производились для полного рассеянного поля, однако, в целях сравнения с экспериментом, результаты приведены для конкретных компонент поля в плоскости YZ.

Далее были заданы граничные условия для области моделирования (рис. 4, б). В данном случае было введено дополнительное пространство для расчета поля в дальней зоне и обеспечения плоского фронта падающей волны. В граничных условиях Open (add. space) было задано расстояние порядка двух длин волн для средней частоты исследуемого диапазона, которая составляла 20 ГГц.

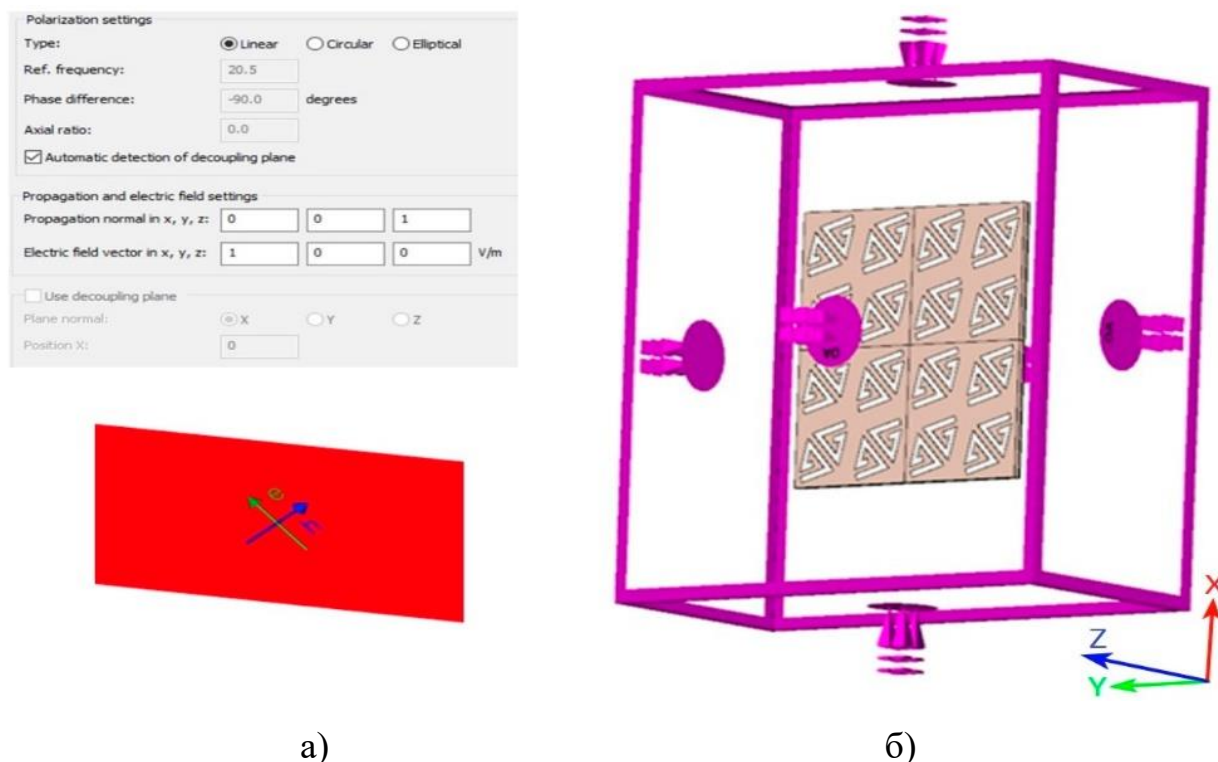


Рис. 4. Область моделирования с заданными граничными условиями.

### 3. Результаты и обсуждение

Экспериментальное исследование моностатическим методом в диапазоне частот от 18 до 26 ГГц показало, что данный тип метаструктуры позволяет уменьшить уровень отраженной электромагнитной волны при нормальном падении к поверхности структуры во всем рассматриваемом частотном диапазоне (рис. 5). Также было получено, что подобная конфигурация обладает резонансными свойствами, которые выражаются в резком спаде уровня отраженной волны в диапазоне от 18.8 до 19.6 ГГц. На частоте 19.3 ГГц наблюдается максимальное значение величины ослабления отраженной волны, которое составляет 25 дБ относительно уровня металлического зеркала.

На более высокой частоте наблюдается плавное возрастание отражения вплоть до 6-7 дБ на частоте 21.2 ГГц. Полученные частотные зависимости ослабления и отражения электромагнитных волн позволяют утверждать о возможности широкополосного воздействия данного покрытия на электромагнитные волны.

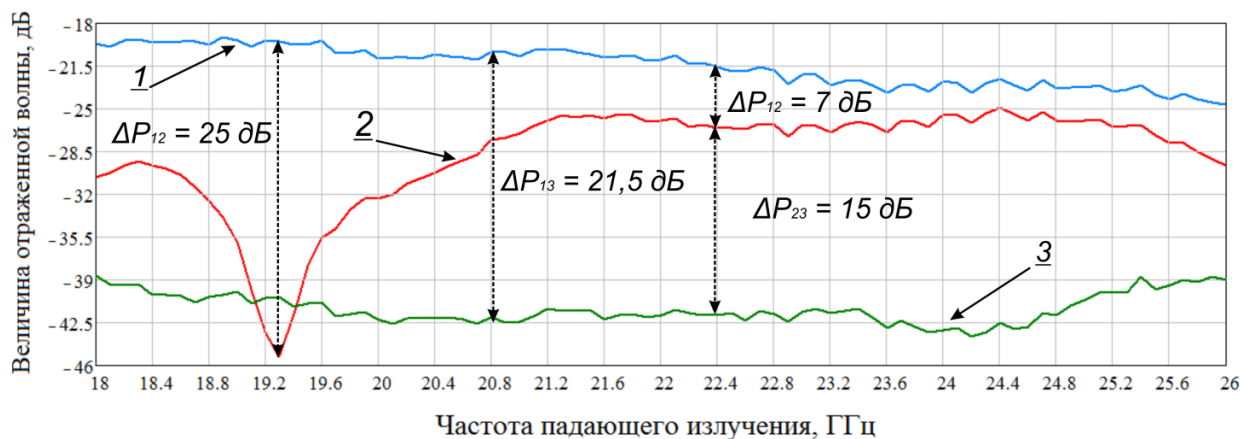


Рис. 5. Частотная зависимость ослабления уровня отраженной электромагнитной волны при нулевом угле поворота структуры для: 1) металлического зеркала, 2) метаповерхности на нормировочной пластине, 3) комбинированного покрытия.

При добавлении нанометрового поглощающего слоя поверх метаструктуры, было достигнуто дополнительное ослабление уровня отраженной волны на 20 дБ во всем исследуемом частотном диапазоне, чего не удастся достичь при использовании данных структур в отдельности.

Подобный эффект может быть обусловлен локализацией поля в областях диэлектрических слоев между проводящими элементами комбинированного покрытия и вблизи поглощающей пленки, а также большого числа вторичных переотражений от проводящих элементов внутри комбинированного покрытия. При первичном воздействии падающей волны на поверхность пленки происходит разделение волны на прошедшую, отраженную и поглощенную. Часть волны, прошедшая через слой поглощающей пленки, взаимодействует с метаструктурой и, отражаясь от нее, вызывают новые переотражения и поглощения в пленке. Этот каскадный процесс значительно увеличивает эффективную длину пути волны внутри структуры и многократно усиливает диссипативные потери в пленке и диэлектрике.

Полученный эффект подтверждается и компьютерным моделированием. Как можно увидеть из графика (рис. 6), среднее ослабление для метаповерхности во всем диапазоне частот составляет 7,43 дБ по сравнению с металлическим зеркалом. Наибольшее ослабление приходится на частоту 19,3 ГГц. Величина ослабления составляет 24,9 дБ. Ширина полосы амплитудного минимума составляет 1,8 ГГц (от 18,2 до 20 ГГц). Добавление слоя поглощающей пленки поверх метаструктуры дало ослабление около 20 дБ во всем частотном диапазоне по сравнению с зеркалом. Результаты компьютерного моделирования довольно точно коррелируют с полученными экспериментально. Небольшая погрешность объясняется идеальными условиями симуляции, а также потерями в открытом пространстве.

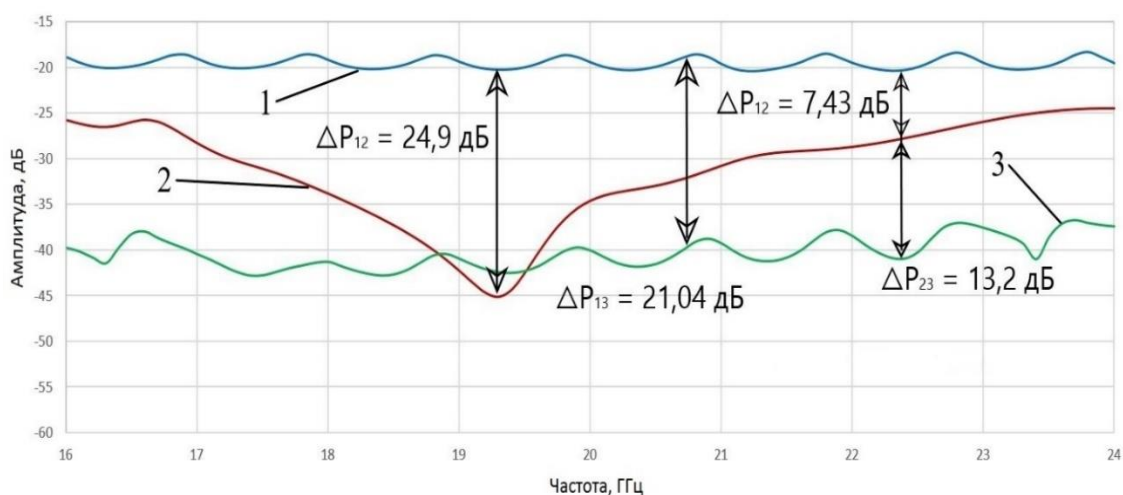


Рис. 6. Модельное представление частотной зависимости ослабления уровня отраженной электромагнитной волны при нормальном угле падения для: 1) металлического зеркала, 2) метаповерхности на металлическом зеркале, 3) комбинированного покрытия.

На рис. 7 представлены объемные диаграммы обратного рассеяния электромагнитных волн на различных частотах, начиная с резонансной, рассчитанных в программном пакете CST-studio.

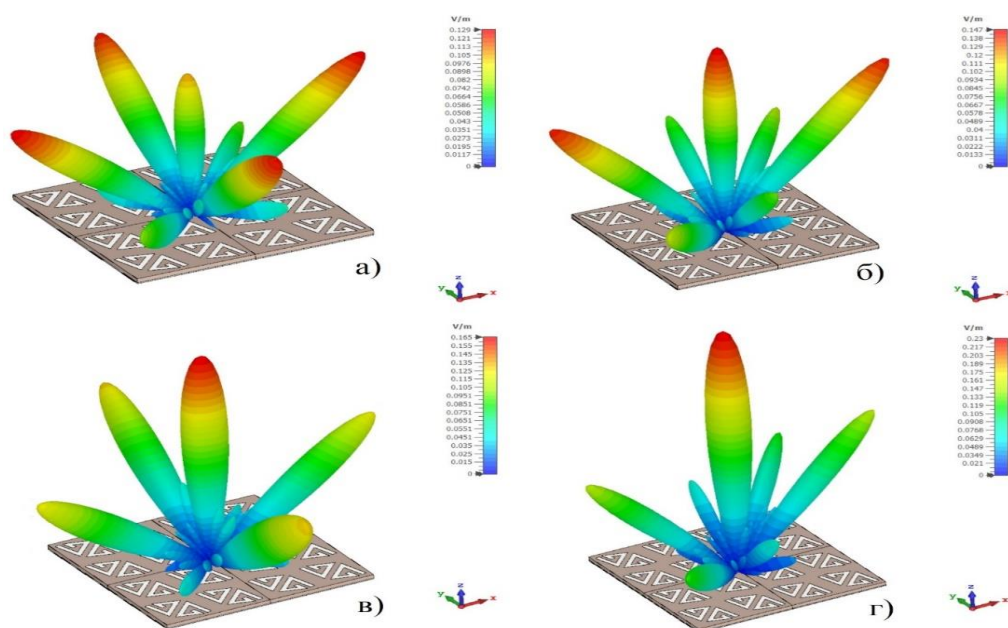


Рис. 7. Модельное представление диаграмм обратного рассеяния электромагнитных волн на метаструктуре, расположенной на металлическом зеркале на частотах: а) 19.2 ГГц, б) 19.7 ГГц, в) 20.4 ГГц, г) 21.2 ГГц.

Как видно из полученных нами диаграмм обратного рассеяния электромагнитных волн, на резонансной частоте 19,2 ГГц (рис. 7, а) происходит наибольшее ослабление падающего излучения, что соответствует приведенным выше частотным характеристикам. Соответственно, на данной диаграмме можно наблюдать наименьший центральный лепесток и большие боковые лепестки за счет перераспределения отраженной от поверхности метаструктуры падающей волны, что свидетельствует о наибольшей величине рассеивания. На более высоких частотах наблюдается кратное увеличение центрального лепестка и, соответственно, отраженной мощности. Размер боковых лепестков же, наоборот, уменьшается, что позволяет говорить об ухудшении рассеивающих свойств.

На представленных графиках и диаграммах приведены данные для ко-поляризованной компоненты рассеянного поля, так как именно она сравнивалась с экспериментальными данными.

Для оценки влияния деполяризации был проведен расчет уровня кросс-поляризованного рассеяния. В исследуемом диапазоне частот его уровень не превышал -15 дБ относительно ко-поляризованной компоненты, что позволяет

пренебречь его вкладом в общий баланс мощности при оценке поглощения для данной линейной поляризации.

Измерение диаграмм рассеивания комбинированного покрытия и его составляющих элементов на характерных частотах в зависимости от угла падения (рис. 8) показало, что при использовании метаструктуры без добавления слоя нанометровых поглощающих пленок наблюдается наличие зеркально расположенных аномальных пиков отражения волны, детектируемых при углах падения, равных 20 и 51°.

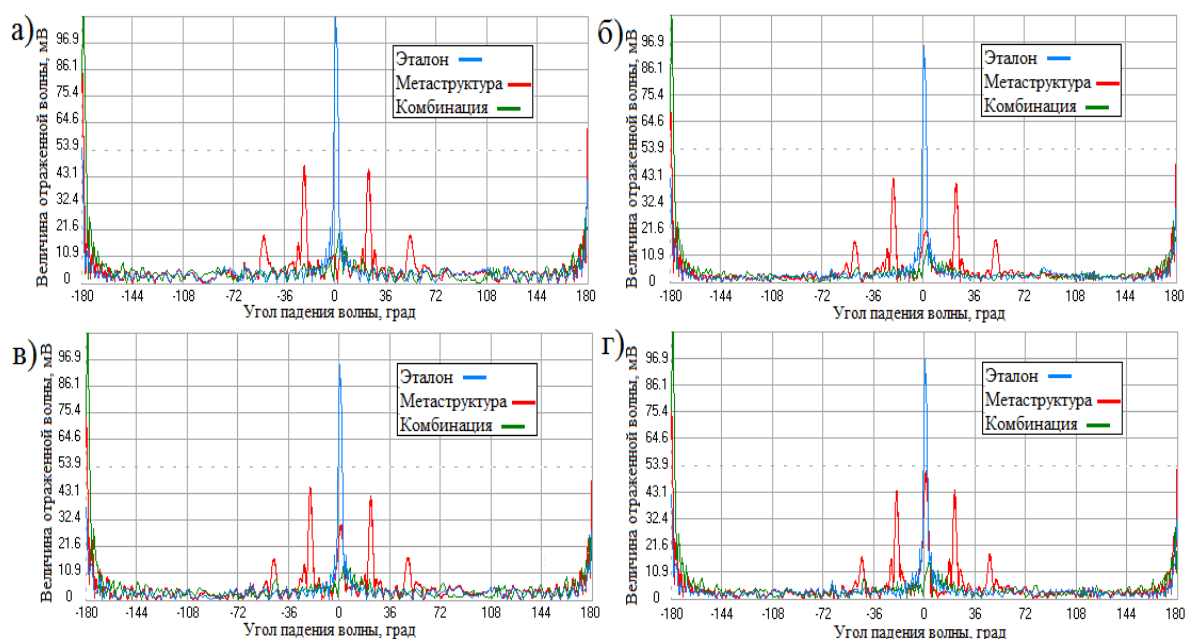


Рис. 8. Диаграммы обратного рассеяния: металлического зеркала, слоя метаструктуры на зеркале, комбинированного покрытия на зеркале на частоте: а) 19.2 ГГц, б) 19.7 ГГц, в) 20.4 ГГц, г) 21.2 ГГц.

При добавлении поглощающего слоя поверх метаструктуры уровень описанных выше боковых лепестков диаграммы падает до значений, наблюдаемых при измерении металлического зеркала. Данное явление позволяет говорить о том, что одновременное использование рассеивающих и поглощающих проводящих поверхностей дает возможность минимизировать недостатки использования метаструктур в качестве малоотражающей поверхности, а также дополнительно увеличить величину ослабления отраженной волны не только в направлении нормали, но и при отличных от нее углах.

## Заключение

В настоящей работе рассмотрено комбинирование покрытие, позволяющее снизить уровень отраженного излучения с использованием метаструктуры с двойными треугольными спиральями и дополнительным поглощающим слоем в виде нанометровой проводящей пленки. Полученные результаты доказывают способность предложенной структуры к снижению уровня отраженной волны. Уровень ослабления составляет порядка 21.5 дБ относительно металлического зеркала той же площади. При этом, в отличии от результатов одиночного слоя метаповерхности, при использовании дополнительного поглощающего слоя наблюдается достаточно стабильный уровень снижения отраженной мощности в пределах полосы шириной 8 ГГц, что позволяет утверждать о широкополосности данного покрытия.

Отдельно стоит отметить, что при использовании метаструктуры без поглощающего слоя при углах падения отличных от нормали наблюдаются значительное превышение уровня отраженной мощности по отношению к опорному уровню металлического зеркала, что является следствием эффекта аномального отражения структурой планарного метаматериала. Добавление поглощающего тонкопленочного слоя позволило минимизировать уровень отраженной волны при любом угле падения.

Получено достаточно хорошее совпадение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Разработанные комбинированные структуры могут применяться для широкополосного снижения уровня отражения от металлических поверхностей.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-22-00261).

## Литература

1. Wang J., Guan J., Wang X., Saer A., Tong X., Guo Y., Ma S. Design of composite stealth cloak based on anomalous reflections and vortex singularities // Results in Physics. – 2024. – Vol. 64. – P. 107909. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107909>
2. Huang C., Pan W., Ma X., Luo X. Multi-spectral Metasurface for Different Functional Control of Reflection Waves // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – No. 1. – P. 23291. <https://doi.org/10.1038/srep23291>
3. Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Юханов Ю.В., Благовисный П.В., Ильин И.В. Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 57-67. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67>
4. Chen K., Cui L., Feng Y., Zhao J., Jiang T., Zhu B. Coding metasurface for broadband microwave scattering reduction with optical transparency // Optics Express. – 2017. – Vol. 25. – No. 5. – P. 5571. <https://doi.org/10.1364/OE.25.005571>
5. Amin M., Fida A., Rashid A., Siddiqui O., Tahir F.A. Anti-reflecting metasurface for broadband polarization independent absorption at Ku band frequencies // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – No. 1. – P. 20073. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24691-8>
6. 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. – No. 10. – P. 3507. <https://doi.org/10.1364/OME.437474>
7. Li S., Anwar S., Lu W., Hang Z.H., Hou B., Shen M., Wang C.-H. Microwave absorptions of ultrathin conductive films and designs of frequency-independent ultrathin absorbers // AIP Advances. – 2014. – Vol. 4. – No. 1. – P. 017130. <https://doi.org/10.1063/1.4863921>

8. Mazinov A.S. Physical and electrodynamic properties of nanoscale conductive films on polymer substrates // *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies.* – 2020. – Vol. 12. – No. 2. – P. 247-252.  
<https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.247>
9. Григорьев Е.В., Арсеничев С.П., Старосек А.В., Фитаев И.Ш., Болдырев Н.А. Формирование металлodieлектрических структур с нанометровыми проводящими пленками и исследование их нагрева при воздействии СВЧ-полей // *Прикладная физика.* – 2022. – № 4. – С. 64-69.  
<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-4-64-69>
10. Nimitz G., Panten U. Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films // *Annalen der Physik.* – 2010. – Vol. 19. – No. 1-2. – P. 53-59.  
<https://doi.org/10.1002/andp.201052201-203>
11. 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. – No. 1. – P. 13.  
<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>
12. 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. – Т. 25. – № 1. – С. 12-23.
13. Starostenko V.V., Orlenson V.B., Mazinov A.S., Fitaev I.Sh. A Study of Microwave Radiation Absorption in Ultrathin Conducting Films // *Technical Physics.* – 2020. – Vol. 65. – No. 8. – P. 1296-1300.  
<https://doi.org/10.1134/s1063784220080186>
14. Арсеничев С.П., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старostenko В.В., Таран Е.П., Фитаев И.Ш. Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлodieлектрических структур в прямоугольном волноводе // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2017. – Т. 22. – № 2. – P. 48-53.

15. Старостенко В.В., Мазинов А.С., Фитаев И.Ш., Таран Е.В., Орленсон В.Б. Динамика формирования поверхности проводящих пленок алюминия на аморфных подложках // Прикладная физика. – 2019. – № 4. – С. 60-65. <https://applphys.orion-ir.ru/appl-19/19-4/PF-19-4-60.pdf>
16. Андреев В.Г., Вдовин В.А., Пронин С.М., Хорин И.А. Измерение оптических коэффициентов нанометровых металлических пленок на частоте 10 ГГц // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/17/text.pdf>
17. Пронин М.С., Вдовин В.А., Андреев В.Г. Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок меди и золота в СВЧ диапазоне // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2016. – № 5. – С. 165411. <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2016/5/165411.pdf>
18. Костылев В.И., Звягин Д.В. Типы измерительных радиотехнических систем // Вестник Воронежского института МВД России. – 2009. – № 3. – С. 88-92. – EDN KVVUQXJ.
19. Вергазова О.Б., Королев Е.А. Применение метода конечных элементов для решения технических задач // Modern European Researches. – 2021. – Т. 2. – № 1. – С. 76-88.
20. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.
21. He Z., Huang K., Guo C., Jin Z., Hou C. A Debye dispersion model of a two-layered material // AIP Advances. – 2019. – Vol. 9. – No. 4. – P. 045321. <https://doi.org/10.1063/1.5085377>
22. Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. – М.: Солон-Пресс, 2022. – 276 с.

**Для цитирования:**

Мазинов А.С., Болдырев Н.А., Падалинский М.М., Юрась И.В., Фитаев И.Ш. Рассеивающие и частотные свойства метаповерхности с треугольными спиралевидными резонаторами в комбинации с тонкими проводящими пленками // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.1>