

Электродинамика, антенны и техника СВЧ

DOI 10.24412/2221-2574-2025-1-25-30

УДК 621.391.812

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПЛЁНОК ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Самойлов Александр Георгиевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: ags@vlsu.ru

Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

Аннотация: Выполнены экспериментальные исследования по определению коэффициента отражения радиоволн СВЧ диапазона от сеточных покрытий, выполненных сплетением из плёнок, изготовленных из полиэтилентерефталата с наполнителем из частиц нержавеющей стали. В диапазоне частот от 1 до 10 ГГц, активно используемом в радиолокации, исследуемые защитные покрытия обеспечили ослабление отражённых волн от защищаемого объекта более чем на 16 дБ.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы, экраны, плёнки из полиэтилентерефталата, коэффициент отражения, рассеяние радиоволн, защитные покрытия.

Для защиты объектов и техники от обнаружения радиолокационными средствами широко используют маскирующие радиопоглощающие покрытия (МРПП). Такие покрытия предназначены защищать средства и объекты техники, как от визуального оптического обнаружения, так и от радиолокационного обнаружения различными устройствами обнаружения и поражения.

Защиту техники от визуального наблюдения и от видеокамер БПЛА можно обеспечить путём качественного подбора цвета МРПП, добиваясь максимального сходства с цветовой гаммой окружающей обстановки защищаемого объекта. Радиолокационную заметность техники снизить значительно сложнее по многим причинам. Основной из них является необходимость осуществлять защиту от электромагнитного излучения (ЭМИ) в очень широком диапазоне радиочастот. Например, радиолокаторы работают на различных частотах в широком диапазоне частот — от сотен мегагерц до более десяти гигагерц [1]. Другой причиной является отличная способность у большинства техники, изготавливаемой в основном из ме-

таллов, отражать радиоволны, что требует от МРПП ослаблять ЭМИ в широком частотном диапазоне в десятки и в сотни раз, что возможно только при использовании специальных материалов и сложных технологий их производства [2, 3].

Для защиты от электромагнитного излучения средств наведения и обнаружения МРПП используют три физических принципа:

- поглощение и преобразование ЭМИ в тепло;
- рассеяние ЭМИ по большой площади в стороны от направления на источник облучения;
- компенсация внешнего ЭМИ противофазным излучением.

При защите техники чаще используют методы, основанные на поглощении и рассеянии радиоволн, так как метод компенсации внешнего поля требует от МРПП по толщине совпадать с четвертью длины волны облучающего поля. Метод компенсации активно защищает от ЭМИ только на фиксированной частоте, поэтому для защиты техники с помощью МРПП практически не применяется, но используется

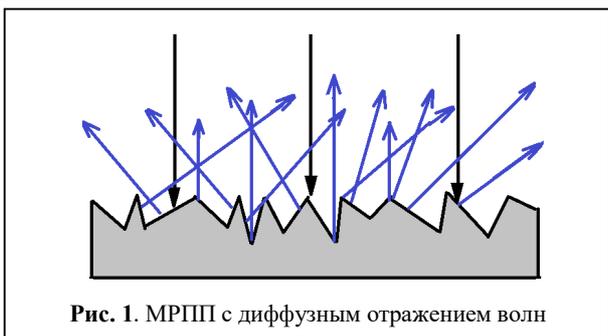


Рис. 1. МРПП с диффузным отражением волн

в промышленных мощных высокочастотных установках для защиты блоков аппаратуры и производственного персонала от нежелательного облучения.

Промышленность выпускает большой ассортимент радиопоглощающих материалов (РПМ) различного типа, основанных на принципах поглощения и рассеяния радиоволн, как на одном из этих принципов, так и на их совместном применении. Для изготовления МРПП используют различные материалы: ферромагнитные, полимерные с порошковыми наполнителями, керамические из спечённых оксидов металлов с малым омическим сопротивлением, тонкоплёночные наноструктурированные и т.д. [4, 5].

Классификацию РПМ проводят по различным параметрам, например, таким как:

- используемые физические принципы;
- ширина полосы рабочих частот;
- тип используемого материала;
- объёмные или листовые.

Для повышения эффективности стационарные объекты закрывают МРПП с диффузным отражением радиоволн при котором радиоволны отражаются от объекта под разными углами, рассеиваясь в пространстве. Для организации рассеивания радиоволн поверхность МРПП должна иметь беспорядочно размещённые неровности, как показано на рис. 1, с размерами неровностей, соизмеримыми с длиной падающей волны [6].

МРПП должно быть лёгким, гибким, прочным, стойким к изменениям температуры и климатических условий, и при этом не должно занимать много места. Таким условиям более всего удовлетворяют листовые и плёночные материалы с токопроводящими наполнителями. Основными параметрами таких радиопоглощающих материалов, определяющих эффективность поглощения радиоволн, являются:

- химический состав;
- толщина плёнки;
- концентрация наполнителя из токопроводящих частиц [7].

Примеры серийно выпускаемых РПМ показаны на рис. 2.

При падении радиоволны на материал в соответствии с законами Френеля падающая волна преломляется и делится на отражённую и проходящую, как показано на рис. 3, и комплексный коэффициент отражения $\dot{K}_{omp} = \dot{E}_{omp} / \dot{E}_{над}$ зависит от комплексного

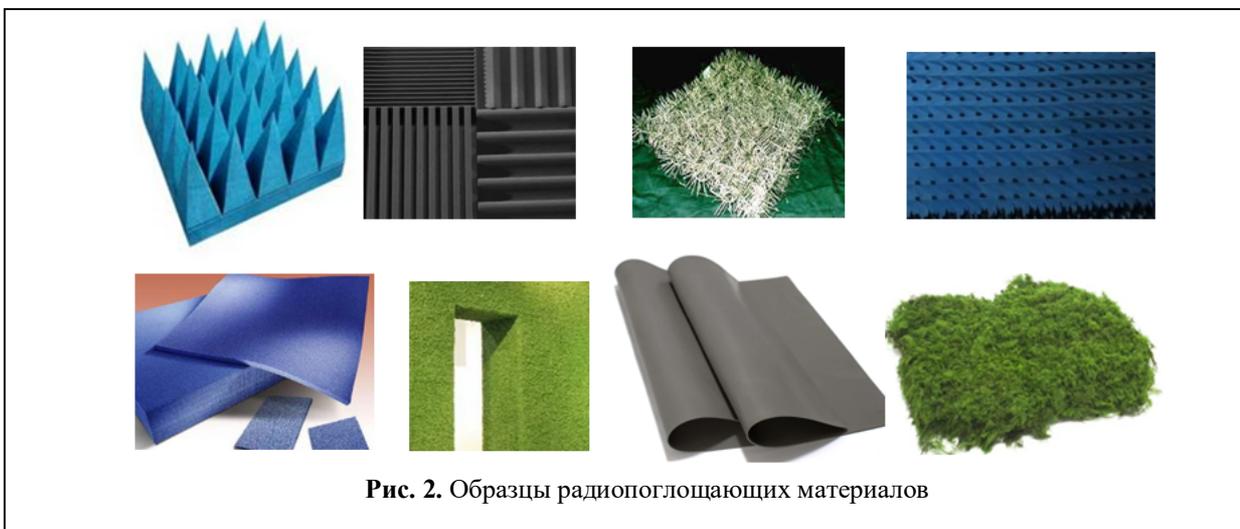


Рис. 2. Образцы радиопоглощающих материалов

показателя преломления \dot{n} , связанного с комплексной проводимостью материала $\dot{\epsilon}$ равенством $\dot{n} = \sqrt{\dot{\epsilon}}$ [8]. При этом мнимая часть показателя преломления связана с поглощением радиоволн в среде, а действительная с их отражением.

Для изготовления гибких и лёгких МРПП стали использовать плёнки из синтетических материалов, в частности — из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с токопроводящими наполнителями. Плёнки из ПЭТФ легко поддаются обработке, влагостойкие и терпят температуру до 260 °С [9, 10].

Закрывая металлический объект МРПП, на основе плёнки из полиэтилентерефталата с токопроводящим наполнителем, мы имеем падение радиоволны из воздушной среды в среду из диэлектрика с токопроводящим наполнителем, а затем на границу раздела с металлом защищаемого объекта. Электромагнитная волна в токопроводящем наполнителе наводит токи и возникает движение зарядов, что приводит к преобразованию энергии волны в тепловую энергию. Поэтому на защищаемый объект попадёт значительно меньше энергии ЭМИ и меньше энергии отразится от него.

Распределение радиоволны на две составляющих — отражённую и на рассеянную — в диэлектрике со слабопроводящим наполнителем зависит от материала наполнителя и от ряда случайных факторов, таких как случайное расположение микрочастиц наполнителя, равномерность их концентрации, форма микрочастиц. Это создаёт проблему и в аналитическом определении коэффициента отражения и уровня защиты техники МРПП, и задачу приходится решать экспериментальным путём [11].

Принятая в настоящее время парадигма по максимальному ослаблению радиолокационного сигнала для защиты своей техники нуждается в коррекции, так как отсутствие отражений на месте защищаемого объекта на фоне отражений от окружающей обстановки позволяет определить координаты объекта [8]. По-

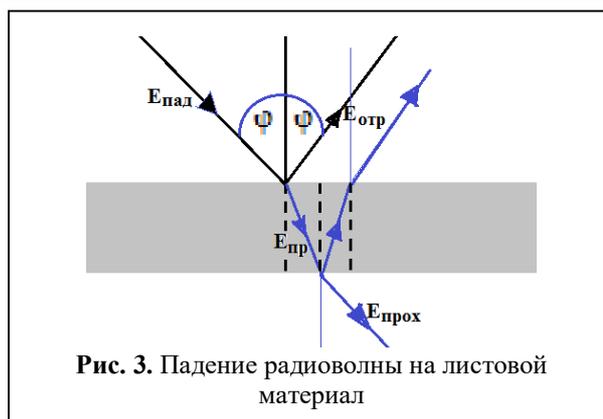


Рис. 3. Падение радиоволны на листовый материал

этому необходимо ослаблять отражение ЭМИ от защищаемого объекта до уровня отражения ЭМИ от окружающей обстановки. Поэтому целью экспериментальных исследований является определение коэффициента ослабления ЭМИ от применения МРПП для подбора МРПП с отражениями, характерными для типового окружения техники, такими как хвойный или лиственный лес, склон горы, асфальтовое покрытие, земля с травяным покровом и др.

Экспериментальные исследования проведём в экзозащищённом помещении Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), используя в качестве защищаемого объекта покрашенный лист стали, как показано на рис. 4. Для экспериментальных исследований в качестве диэлектрика выбрана матированная плёнка из ПЭТФ с наполнителями из микрочастиц нержавеющей стали. В качестве МРПП используем матированные плёнки ПЭТФ, что дополнительно уменьшит энергию отражения за счёт рассеивающей способности матовых покрытий [12].

Для экспериментальных исследований в качестве диэлектрика выбрана матированная плёнка из ПЭТФ с наполнителями из микрочастиц нержавеющей стали. В качестве МРПП используем матированные плёнки ПЭТФ, что дополнительно уменьшит энергию отражения за счёт рассеивающей способности матовых покрытий [12].



Рис. 4. Измерительная установка в безэховой комнате ВлГУ

Величина энергии отражённого сигнала в основном определяется свойствами поглотителя, но зависит не только от его состава и погонного омического сопротивления, а и от

толщины МРПП [13, 14]. Эксперименты проведём для плёнок толщиной 30 мкм и изготовленной из такой плёнки защитной сетки с ячейками сетки 50x50 мм.

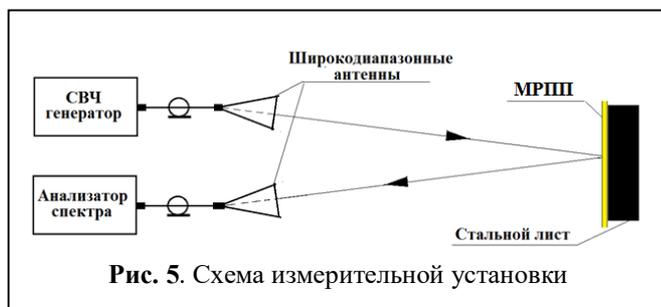


Рис. 5. Схема измерительной установки

Структурная схема проведения экспериментов показана на рис. 5. При экспериментах использовались спектроанализатор фирмы Agilent, широкодиапазонные антенны и стандартные генераторы СВЧ сигналов.

Измерения проводились в диапазоне частот от 1 до 10 гигагерц с шагом в 2 гигагерца. Измерялось отражение от крашеного стального листа и от него же, но закрытого МРПП. Разница этих измерений даёт результат ослабления ЭМИ от применения МРПП. Из-за неплотного прилегания МРПП к металлическому листу повторные серии измерений давали результаты, расходящиеся до 10% от первых измерений. На каждой частоте выполнялось по десяти серий измерений с перевешиванием сети и находились средние результаты.

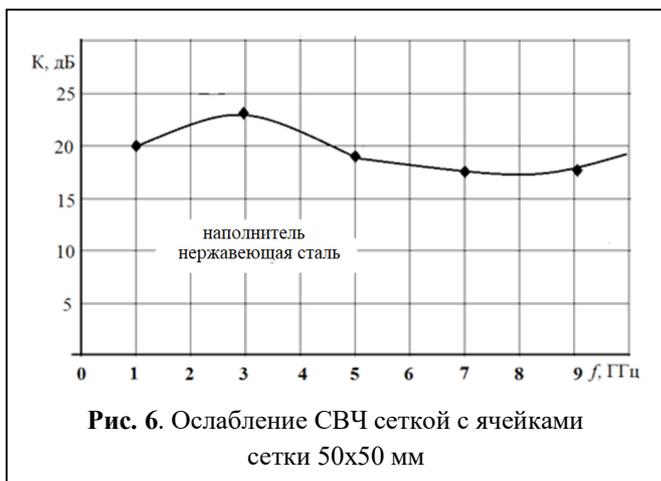


Рис. 6. Ослабление СВЧ сеткой с ячейками сетки 50x50 мм

На рис. 6 представлены полученные экспериментально результаты по определению

коэффициента отражения от объекта из стали, закрытого МРПП из сети, сплетённой лентами шириной 40 мм из плёнок толщиной 30 мкм с наполнителем микрочастицами нержавеющей стали.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Получены результаты экспериментальных исследований МРПП, выполненных на основе поглощающих СВЧ энергию лёгких и гибких матированных плёнок из полиэтилентерефталата толщиной 30 мкм с микрочастицами проводящих материалов.

2. Показано, что в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц при создании из плёнки рассеивающих СВЧ сигналы защитных поверхностей (сеть или объёмное плетение) ослабление отражённого сигнала превышает 16 дБ.

Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
2. Власенко Е.А., Бокова Е.С., Дедов А.В. Композиционный радиопоглощающий материал на основе наполненной резины и модифицированного нетканого полотна // *Материаловедение*. 2016. № 2. С. 41–43.
3. Багацкая О.В., Жук Н.П. Расчет коэффициентов отражения и прохождения плоской электромагнитной волны для неоднородного гиротропного слоя методом конечных разностей // *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45, № 6. С. 662–669.
4. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 4 (45). С. 61–67.

5. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей волн сверхвысокочастотного диапазона // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48, № 2. С. 196–209.

6. Борисов Ю.И., Авдонин Б.Н., Критенко М.И. и др. Динамика радиоэлектроники. М.: Техносфера, 2009. 400 с. ISBN 978-5-94836-142-0.

7. Лушина М.В., Паришин С.Г., Ржевский А.А. Современные экранирующие и радиопоглощающие материалы // *Системы управления и обработки информации*. 2011. № 22. С. 208–214.

8. Samoylov A.G., Samoylov S.A. Methods for measuring the reflection coefficient of radio waves // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1889. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022013.

9. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // *Вестник ВГТУ*. Воронеж, 2012. № 6. С. 70–76.

10. Краев И.Д., Сорокин А.Е., Олихова Ю.В., Туткова Ю.М. Конструкционные материалы радиотехнического назначения, модифицированные углеродными нанотрубками // *Пластические массы*. 2020. № 9–10. С. 62–66.

11. Панюшкин А.Н., Панюшкин Н.Н., Самойлов А.Г. Эффективная толщина плоского экрана // *Проектирование и технология электронных средств*. 2019. № 4. С. 38–41.

12. Вожедаев В.В. Расчет характеристик радиолокационной заметности элементов компоновки летательного аппарата // *Ученые записки ЦАГИ*. 2010. Т. XLI, № 3. С. 93–98.

13. Семенихин А.И. Снижение ЭПР с помощью непоглощающих бинарных покрытий с анизотропной импедансной метаповерхностью // *Антенны*. 2019. № 1. С. 65–72.

14. Бибииков С.Б., Смольникова О.Н., Прокофьев М.В. Диэлектрические свойства и СВЧ-проводимость пористых радиопоглощающих материалов // *Радиотехника*. 2011. № 3. С. 62–71.

Поступила 29 ноября 2024 г.

English

RESEARCH OF RADIO-ABSORBING COATINGS BASED ON POLYETHYLENE TEREPHTHALATE FILMS

Aleksandr Georgievich Samoylov — Grand Dr. in Engineering, the Professor of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: ags@vlsu.ru

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

Abstract: To protect personnel and equipment from detection by radar systems, radio-absorbing coatings are successfully used. These coatings not only mask protected objects from radar detection but also from visual observation. The reduction in the level of reflected radio waves is achieved both by their absorption within

the protective coating material and by scattering due to the uneven surface of the coating. Currently, there are no analytical methods to determine the exact amount of radio wave attenuation from an object covered with a protective coating, so the attenuation is determined experimentally. For the protection of ground-based mobile objects, mesh coatings made of lightweight and flexible dielectrics, incorporating microparticles of conductive materials, are most effectively used. This article presents the results of experimental studies on determining the reflection coefficient of microwave radio waves from protective coatings. These coatings were created by weaving a mesh from film strips, 20 microns thick and 60 mm wide, made of polyethylene terephthalate with a filler of stainless steel microparticles. In the frequency range from 1 to 10 GHz, which is actively used in radar systems, the studied protective coatings provided attenuation of reflected radio waves from a steel sheet irradiated perpendicular to its plane by more than 16 dB, depending on the irradiation frequency.

Keywords: radio-absorbing materials, screens, polyethylene terephthalate films, reflection coefficient, radio wave scattering, protective coatings.

References

1. *Bakulev P.A.* Radar Systems. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 440 p.
2. *Vlasenko E.A., Bokova E.S., Dedov A.V.* Composite radar-absorbing material based on filled rubber and modified non-woven fabric. *Materialovedenie*. 2016. No. 2. Pp. 41–43.
3. *Bagatskaya O.V., Zhuk N.P.* Calculation of reflection and transmission coefficients of a plane electromagnetic wave for an inhomogeneous gyrotropic layer using the finite difference method. *Radiotekhnika i elektronika*. 2000. Vol. 45, No. 6. Pp. 662–669.
4. *Kraev I.D., Shuldeshov E.M., Platonov M.M., Yurkov G.Yu.* Review of composite materials combining soundproofing and radioprotective properties. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2016. No. 4 (45). Pp. 61–67.
5. *Kazantseva N.E., Ryvkina N.G., Chmutin I.A.* Promising materials for absorbers of ultra-high-frequency waves. *Radiotekhnika i elektronika*. 2003. Vol. 48, No. 2. Pp. 196–209.
6. *Borisov Yu.I., Avdonin B.N., Kritenko M.I.* et al. Dynamics of Radio Electronics. Moscow: Tekhnosfera, 2009. 400 p.
7. *Lushina M.V., Parshin S.G., Rzhhevskii A.A.* Modern shielding and radar-absorbing materials. *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii*. 2011. No. 22. Pp. 208–214.
8. *Samoylov A.G., Samoylov S.A.* Methods for measuring the reflection coefficient of radio waves. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1889. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022013.
9. *Latypova A.F., Kalinin Yu.E.* Analysis of promising radar-absorbing materials. *Vestnik VGTU. Voronezh*, 2012. No. 6. Pp. 70–76.
10. *Kraev I.D., Sorokin A.E., Olikhova Yu.V., Titkova Yu.M.* Structural materials for radio engineering purposes modified with carbon nanotubes. *Plasticheskie massy*. 2020. No. 9–10. Pp. 62–66.
11. *Panyushkin A.N., Panyushkin N.N., Samoylov A.G.* Effective thickness of a flat screen. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2019. No. 4. Pp. 38–41.
12. *Vozhdaev V.V.* Calculation of radar cross-section characteristics of aircraft layout elements. *Uchenye zapiski TsAGI*. 2010. Vol. XLI, No. 3. Pp. 93–98.
13. *Semenikhin A.I.* Reduction of RCS using non-absorbing binary coatings with anisotropic impedance metasurface. *Antenny*. 2019. No. 1. Pp. 65–72.
14. *Bibikov S.B., Smolnikova O.N., Prokofiev M.V.* Dielectric properties and microwave conductivity of porous radar-absorbing materials. *Radiotekhnika*. 2011. No. 3. Pp. 62–71.