

УДК 537.874;621.396

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ ПЛОСКИХ ВОЛН ТМ-ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ПРОТЯЖЕННУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛАСТИНУ С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА

Ю. Н. Казанцев^{а,*}, Г. А. Крафтмахер^а, В. П. Мальцев^а, В. С. Солосин^{а,б}

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

^бИнститут теоретической и прикладной электродинамики РАН,
ул. Ижорская, 13, Москва, 125412 Российская Федерация

*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 16.10.2023 г.

После доработки 16.11.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

Представлены результаты численного расчета обратного рассеяния при больших углах падения плоских волн ТМ-поляризации на протяженную металлическую поверхность конечных размеров с радиопоглощающим покрытием на основе структуры искусственного магнитного проводника. Показано, что покрытие такого типа толщиной 1...2 мм позволяет понизить на 10...30 дБ первый (со стороны больших углов) максимум на угловой зависимости обратного рассеяния на сверхвысоких частотах в полосе порядка октавы.

Ключевые слова: искусственный магнитный проводник, сверхвысокие частоты, обратное рассеяние, угловая зависимость

DOI: 10.31857/S0033849424050037, EDN: ILNAAK

ВВЕДЕНИЕ

В книге [1] при рассмотрении источников обратного рассеяния электромагнитных волн реальными объектами указан такой источник, как протяженная гладкая металлическая поверхность конечных размеров при скользящем падении на нее плоских волн ТМ-поляризации. Поля, сформированные на и над протяженными поверхностями конечных размеров при скользящем падении на них плоских волн ТМ-поляризации, в научно-технической литературе носят название бегущие волны (БВ), а связанное с ними обратное рассеяние — обратная бегущая волна. Характеристики БВ были рассмотрены в ряде работ [2–10]. Так, в работе [4] описаны колебания поля на металлической поверхности конечных размеров с периодом, равным половине длины волны в свободном пространстве, которые вызваны переотражением краевых волн между передним и задним краями поверхности.

Угловые зависимости обратного рассеяния от протяженных гладких поверхностей конечных размеров при падении на них плоских ТМ-волн

описаны, например, в [1] и [9]. Эти зависимости носят интерференционный характер: чередуются максимумами и минимумами уровня обратного рассеяния. При этом первый со стороны больших углов максимум отличается от соседних большими шириной и высотой. Согласно рекомендациям [1] обратное рассеяние может быть подавлено путем нанесения на протяженную металлическую поверхность тонкого слоя материала, поглощающего поверхностные токи. Так, в работе [9] показано, что слой магнетодиэлектрика толщиной 0.5 мм со сравнительно небольшими электрическими и магнитными потерями на протяженной металлической поверхности снижает на 5 дБ уровень первого максимума на угловой зависимости обратного рассеяния. Также было показано, что основной вклад в снижение обратного рассеяния вносят потери магнитного типа.

Уменьшение поверхностного тока и, соответственно, уровня обратного рассеяния следует ожидать также при ослаблении одной из основных составляющих, формирующих поля и токи на про-

тяженной металлической поверхности, а именно отраженной плоской волны TM -поляризации. Достаточно сильное и широкополосное ослабление отраженной волны может обеспечить радиопоглощающее покрытие (РПП) на основе структуры искусственного магнитного проводника (ИМП), предложенное в [10]. Замечательной особенностью этого покрытия является эффект расширения полосы поглощения при увеличении угла падения плоской TM -волны.

Цель данной работы — путем численного расчета получить в микроволновом диапазоне угловые зависимости обратного рассеяния плоских волн TM -поляризации от протяженных металлических пластин различной длины с РПП на основе ИМП-структуры.

Численные расчеты в статье проведены методом моментов в программе FEKO.

1. ЧАСТОТНО-УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПЛОСКИХ ВОЛН TM - ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С РПП НА ОСНОВЕ ИМП-СТРУКТУРЫ

В работе [10] было предложено и изучено РПП на основе ИМП-структуры. Схема этого РПП, включающая в свой состав полосно-отражающую решетку 1, слой диэлектрика с потерями 2 и металлический экран 3, представлена на рис 1. Элементами решетки являлись квадратные металлические петли двух типоразмеров: с меньшим и большим центральным отверстием (рис. 2а, 2б). Было отмечено, что РПП

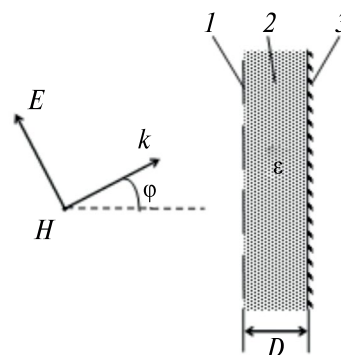


Рис. 1. Схема РПП: 1 — частотно-селективная решетка, 2 — слой диэлектрика, 3 — металлический экран.

обладает существенно большей широкополосностью в случае элементов с меньшим центральным отверстием (см. рис. 2б). Поэтому здесь и далее в схеме РПП будут использоваться полосно-отражающие решетки с периодом $P = 10.3$ мм с элементами в форме сплошного квадрата со стороной 10 мм без центрального отверстия (рис. 2в).

На рис. 3а–в приведены частотные зависимости коэффициента отражения плоских волн TM -поляризации от металлической поверхности с РПП для четырех значений угла падения: 70° , 75° , 80° и 85° . Параметры РПП для зависимостей на рис. 3а–в приведены в табл. 1.

Примечание: f_0 — резонансные частоты, на которых значения коэффициента отражения минимальны, f_1 и f_2 — крайние частоты, на которых коэффициент отражения равен -10 дБ, $\delta f = \frac{f_1 - f_2}{f_0}$.

Таблица 1. Характеристики РПП и параметры частотных зависимостей на рис. 3а–в

φ , град	f_0 , ГГц	f_1 , ГГц	f_2 , ГГц	δf , %	$\text{tg} \delta$
Толщина $D = 2$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 5$ (рис. 3а)					
70	4.41	3.84	5.10	28.5	0.428
75	4.49	3.67	5.38	37.9	0.574
80	4.35	3.36	5.99	60.6	0.905
85	4.53	2.94	9.59	146.9	1.870
Толщина $D = 2$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 10.2$ (рис. 3б)					
70	3.10	2.79	3.48	22.1	0.332
75	3.10	2.71	3.61	29.2	0.439
80	3.10	2.55	3.91	43.8	0.661
85	3.15	2.24	5.12	91.4	1.335
Толщина $D = 1$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 10.2$ (рис. 3в)					
70	3.90	3.67	4.16	12.56	0.189
75	3.91	3.61	4.26	16.22	0.247
80	3.92	3.49	4.46	24.70	0.366
85	4.05	3.22	5.33	52.68	0.724

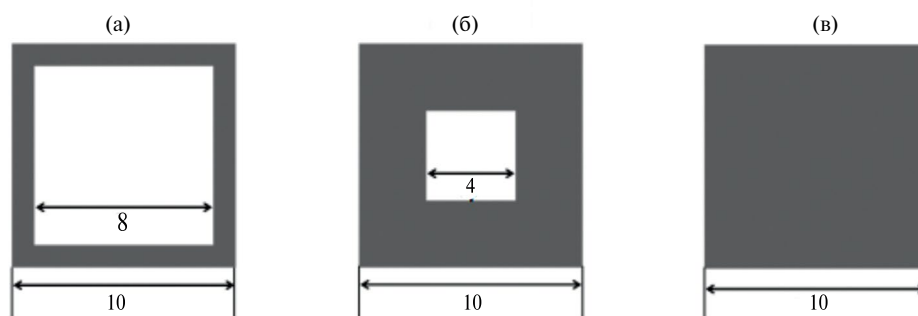


Рис. 2. Варианты элементов частотно-селективной решетки (размеры в мм).

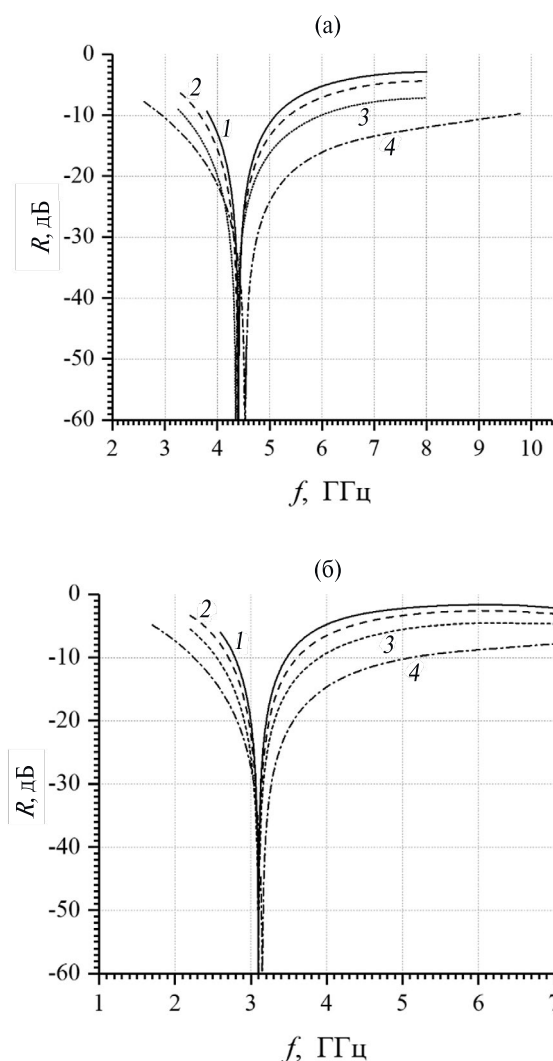
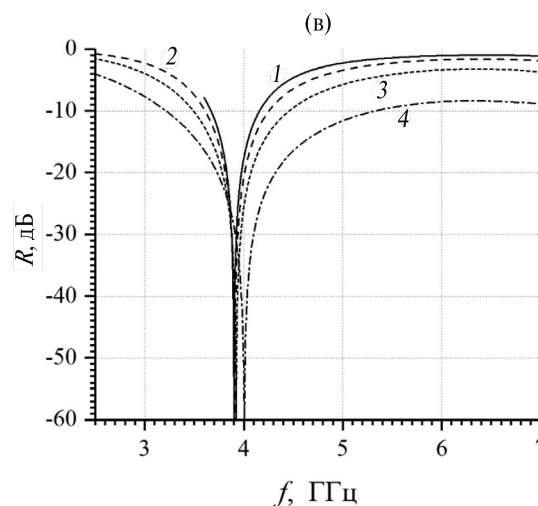


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения плоских волн TM -поляризации от металлической поверхности с РПП (параметры см. в табл. 1 для рис. (а), (б) и (в)) при $\varphi = 70$ (1), 75 (2), 80 (3) и 85 град (4).



Для каждого угла падения подбиралась величина тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, при которой уровень отражения < -50 дБ. Из рис. 3а–3в и табл. 1 следует, что с увеличением угла падения полосы поглощения быстро расширяются без заметного изменения резонансной частоты. Полосы поглощения также расширяются при увеличении толщины слоя диэлектрика с потерями. Так, полосы поглощения РПП из табл. 1 при угле падения 85° существенно превышают октаву.

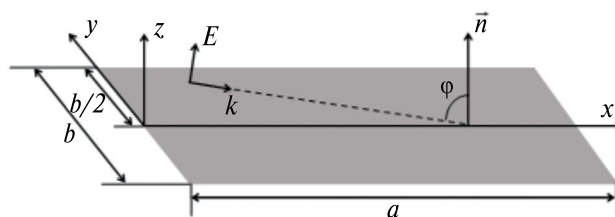


Рис. 4. Металлическая пластина с падающей на нее плоской TM -волной.

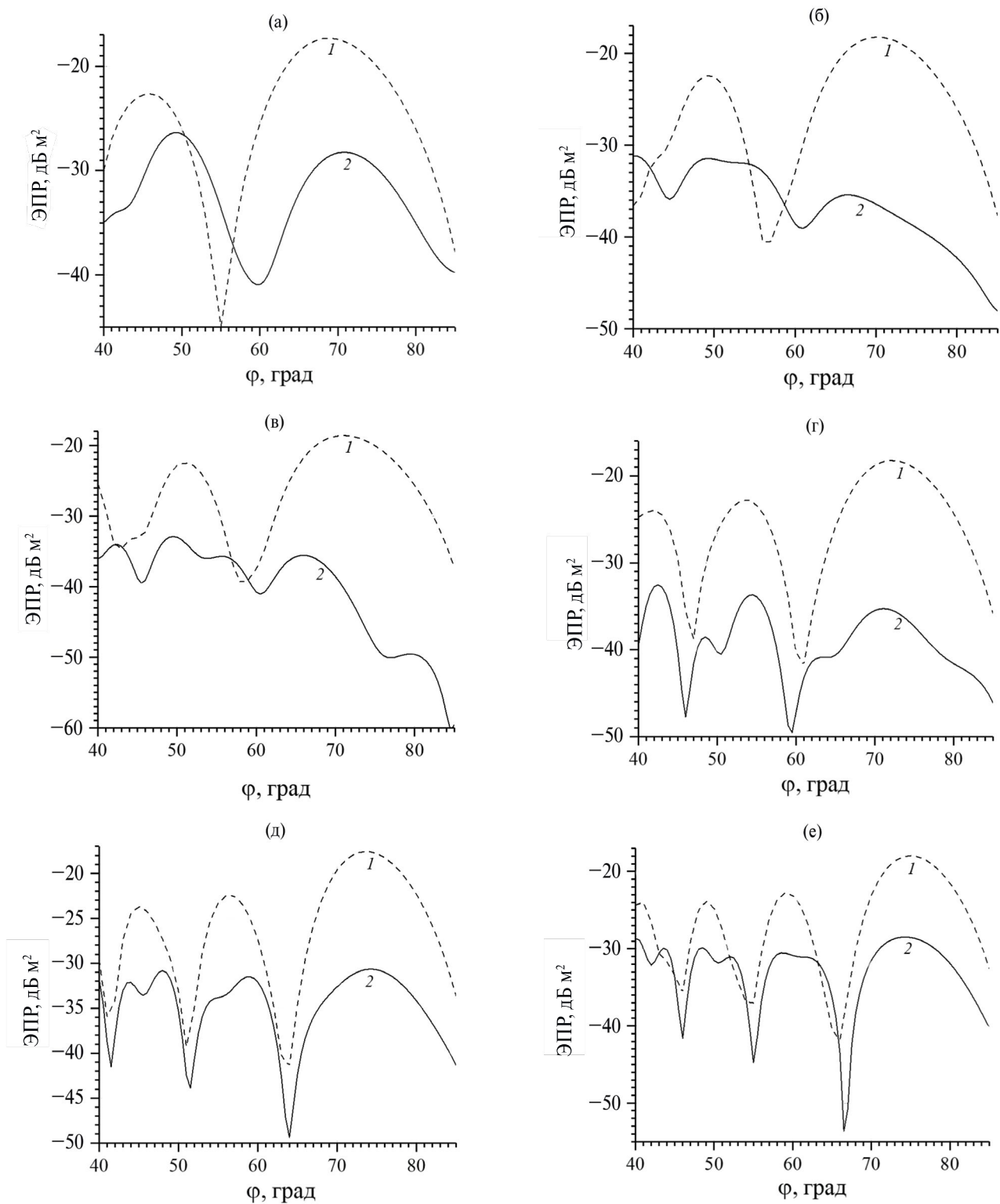


Рис. 5. Угловые характеристики обратного рассеяния от металлической пластины длиной 412 мм и шириной 51.5 мм при $f = 3.5$ (а), 4 (б), 4.407 (в), 5 (г), 6 (д) и 7 ГГц (е): кривая 1 — без РПП, кривая 2 — с РПП толщиной 2 мм и $\epsilon = 5(1-j0.428)$.

2. РАСЧЕТ ЧАСТОТНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ПРОТЯЖЕННОЙ ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ С РПП

На рис. 4 показана металлическая пластина, на которую под большим углом φ падает плоская волна TM -поляризации. Уровень обратного рассеяния от этой пластины связан с интенсивностью полей и токов на пластине. Эта интенсивность, а следовательно, и уровень обратного рассеяния могут быть снижены либо путем поглощения токов, либо путем уменьшения их возбуждения. Так, возбуждение токов на пластине может быть уменьшено путем устранения или ослабления одного из основных факторов, формирующих эти токи, — отраженной плоской TM -волны. Эффективным инструментом подавления отраженной плоской волны TM -поляризации является РПП на основе структуры ИМП, замечательной особенностью которого является расширение полосы поглощения при увеличении угла падения.

Поскольку угловая зависимость обратного рассеяния от протяженной пластины носит интерференционный характер, причем первый со стороны больших углов максимум отличается от соседних большими шириной и высотой, то его подавление является первостепенной задачей. Выражение для угла φ_1 , при котором имеет место первый (со стороны больших углов) максимум обратного рассеяния, приведено в работе [9]:

$$\varphi_1 = (90 - 49\sqrt{\lambda/a}) \text{ град},$$

где a — длина пластины, λ — длина волны в свободном пространстве.

Из выражения следует, в частности, что при фиксированном значении λ увеличение длины a ведет к смещению первого максимума в сторону больших углов. Эффект снижения уровня обратного рассеяния с помощью РПП на основе ИМП-структуры был рассчитан при трех значениях длины пластины a :

$$a = 412 \text{ мм}, D = 2 \text{ мм}, \varepsilon = 5, \text{tg}\delta = 0.428,$$

$$a = 2060 \text{ мм}, D = 2 \text{ мм}, \varepsilon = 10.2, \text{tg}\delta = 0.661,$$

$$a = 6180 \text{ мм}, D = 1 \text{ мм}, \varepsilon = 10.2, \text{tg}\delta = 0.724.$$

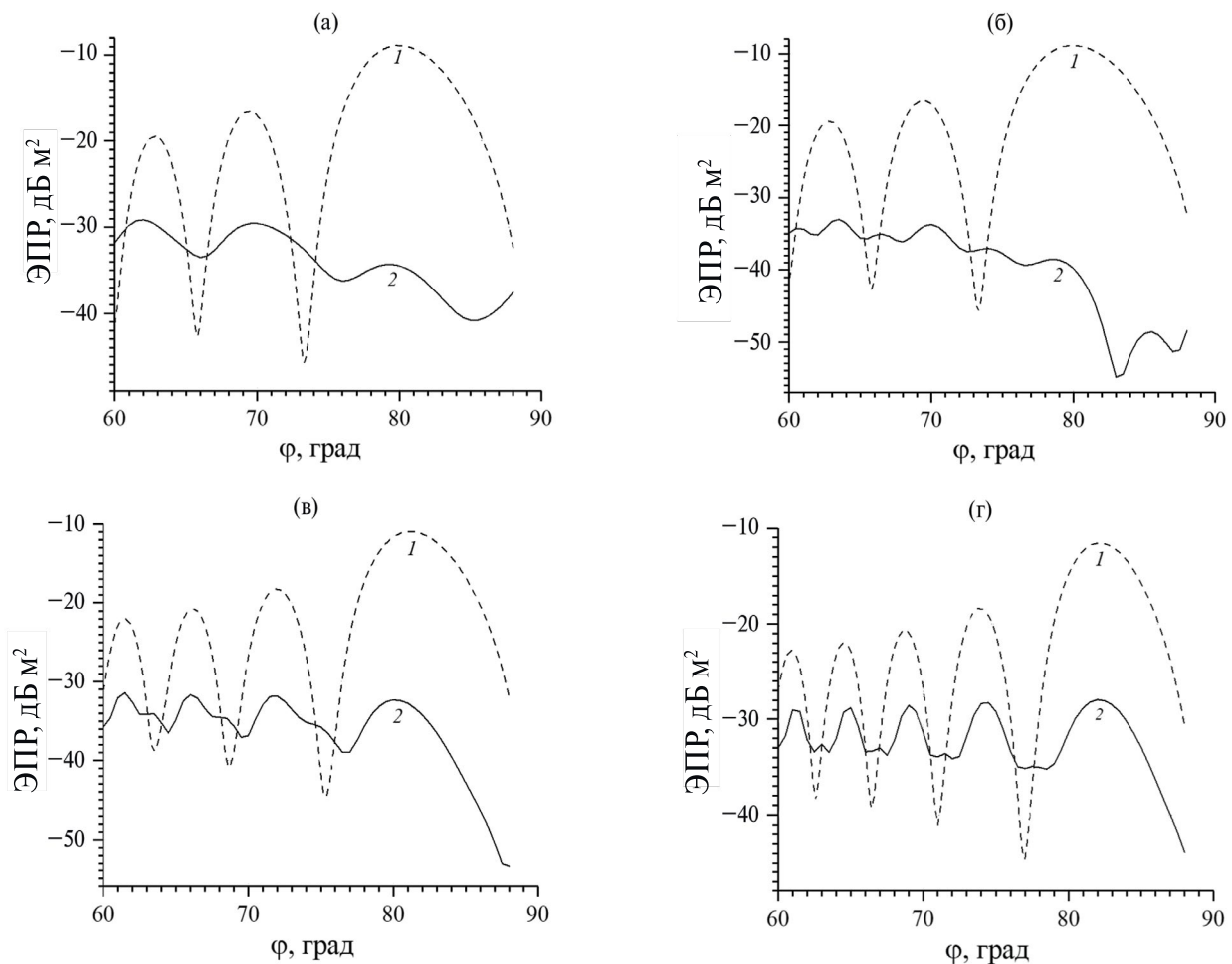


Рис. 6. Угловые характеристики обратного рассеяния от металлической пластины длиной 2060 мм и шириной 51.5 мм при $f = 2.5$ (а), 3.1 (б), 4 (в) и 5 ГГц (г): кривая 1 — без РПП, кривая 2 — с РПП толщиной 2 мм и $\varepsilon = 10.2(1-j0.661)$.

Выбор величины $\text{tg}\delta$ здесь определяется требованием максимального подавления первого максимума обратного рассеяния. Так, при $a = 412$ мм среднее значение резонансной частоты в табл. 1 равно 4.44 ГГц, а соответствующая длина волны $\lambda = 67.6$ мм. Согласно формуле при этих значениях a и λ угол первого максимума на угловой зависимости обратного рассеяния равен $\varphi_1 = 70^\circ$. Для такого угла падения оптимальным будет значение $\text{tg}\delta = 0.428$ в соответствии с табл. 1. С помощью аналогичной процедуры выбраны значения $\text{tg}\delta$ для двух других величин a .

На рис. 5–7 представлены угловые характеристики обратного рассеяния ЭПР от металлической пластины с РПП длиной 412, 2060 и 6180 мм соответственно. Ширина 51.5 мм одинакова для всех пластин.

Из рис. 5–7 следует, что РПП понизило в диапазоне порядка октавы первые максимумы угловых зависимостей обратного рассеяния от металлических пластин длиной 412, 2060 и 6180 мм на 10...20, 16...30 и 28...38 дБ соответственно. При

этом максимальное снижение обратного рассеяния имело место на резонансных частотах РПП. Из представленных здесь угловых зависимостей обратного рассеяния следует, что наряду с первым максимумом значительно снизились (до уровня 25...35 дБ(м²)) и все соседние максимумы.

Следует также обратить внимание на то, что увеличение длины пластины сопряжено с увеличением угла падения, при котором имеет место первый максимум обратного рассеяния. Поскольку полоса поглощения РПП растет с увеличением этого угла, появляется возможность одновременного уменьшения толщины покрытия при сохранении его прежней широкополосности. Так, при длине пластины 6180 мм РПП толщиной 1 мм снижает уровень первого максимума обратного рассеяния на 38...28 дБ в полосе частот 3...6 ГГц. При этом следует отметить, что в РПП используется материал с электрическим типом потерь, в отличие от работы [9], в которой показано, что для подавления поверхностных токов более эффективен материал с магнитными потерями.

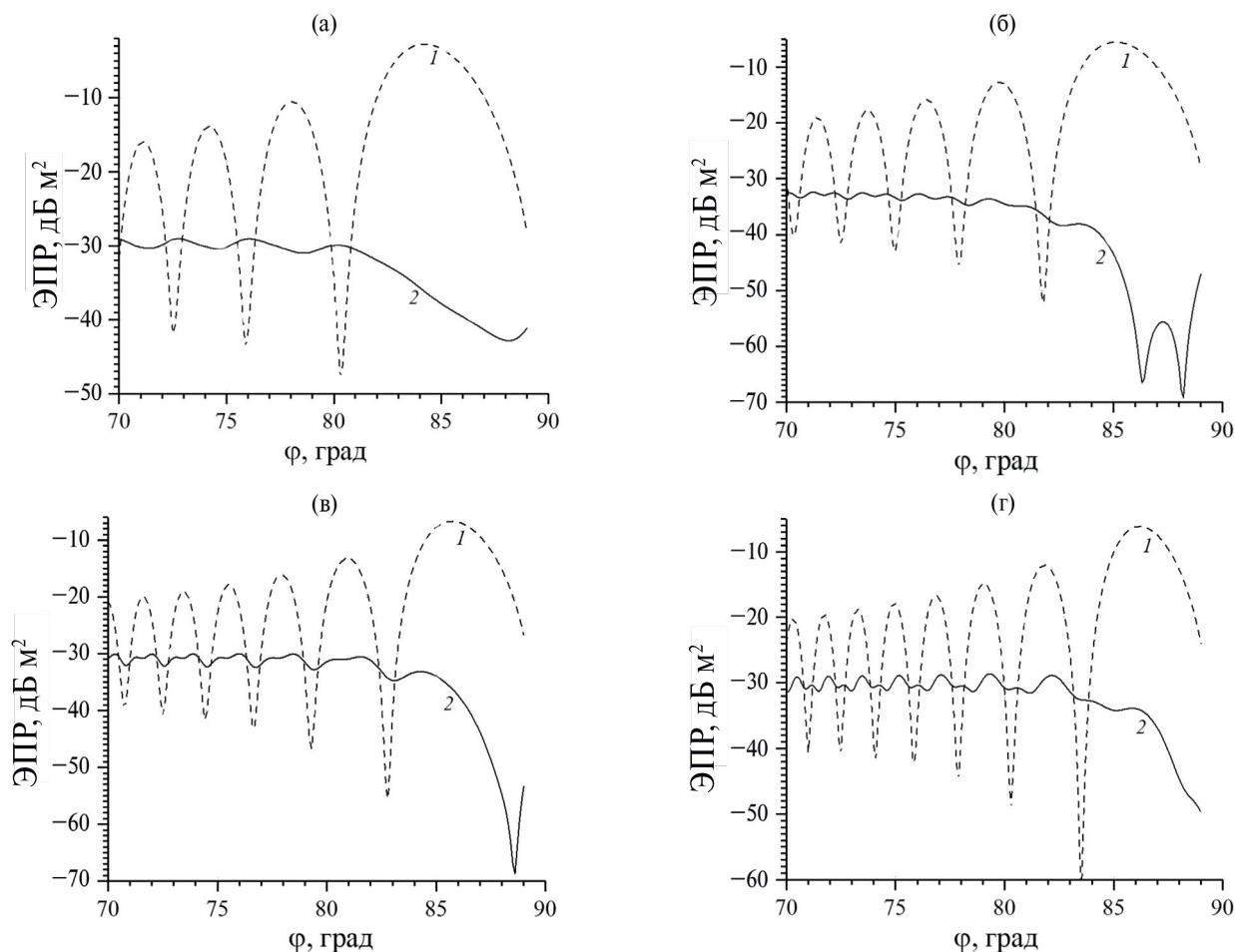


Рис. 7. Угловые характеристики обратного рассеяния от металлической пластины длиной 6180 мм и шириной 51.5 мм при $f = 3$ (а), 4 (б), 5 (в) и 6 ГГц (г): кривая 1 — без РПП, кривая 2 — с РПП толщиной 1 мм и $\epsilon = 10.2(1 - j0.724)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численных расчетов определены параметры РПП на основе ИМП-структуры, обладающие возможно более широкими полосами поглощения при больших углах падения плоских волн ТМ-поляризации. Так, при толщине РПП 2 мм и углах падения 85° эти полосы существенно превышают октаву.

Сравнение частотно-угловых характеристик обратного рассеяния от металлических пластин с РПП и без РПП длиной 412, 2060 и 6180 мм в угловых интервалах $40^\circ \dots 90^\circ$, $60^\circ \dots 90^\circ$, $70^\circ \dots 90^\circ$ соответственно и в частотных диапазонах порядка октавы показало существенное снижение обратного рассеяния от пластины с РПП в этих угловых интервалах и частотных диапазонах. Так, РПП толщиной 1 мм на металлической пластине длиной 6180 мм снижает первый максимум обратного рассеяния на частотах 3, 4, 5 и 6 ГГц с -3 дБм² до -36 дБм², с -5 дБм² до -44 дБм², с -7 дБм² до -36 дБм² и с -6 дБм² до -34 дБм² соответственно. При этом все остальные максимумы в интервале углов $70^\circ \dots 90^\circ$ снижаются приблизительно до уровня -30 дБм².

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knott E.F. Radar Cross Section. / Radar Handbook. 3rd ed. Ed. by M.I. Scolnik. N Y.: McGraw-Hill Education, 2008. P.14-1.
2. Petters L. // IRE Trans. 1958. V. AP-6. № 1. P. 133.
3. Knott E.F., Liepa V.V., Senior T.B.A. // Techn. Report AFAL-TR. 73-70. Ann Arbor: Univ. Michigan Radiation Lab, 1973. 103 p.
4. Knott E.F. // Proc. IEEE. 1985. V. 73. № 2. P. 252.
5. Paknys R., Jackson D.R. // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 3. P. 898.
6. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar Cross Section. 2nd ed. Stevenage: IET Digital Library, 2004. DOI: 10.1049/SBRA026E
7. Knott E.F. // IEEE Trans. 1990. V. AP-38. № 11. P. 1859.
8. Ross R.A. // IEEE Trans. 1966. V. AP-14. № 3. P. 329.
9. Zheng L., Yang X., Gong W., Li X. // J. Appl. Phys. 2021. V. 130. № 10. P. 105304. doi.org/10.1063/5.0061943
10. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П., Солосин В.С. // РЭ. 2024. Т. 69. № 2. С. 115.

CHARACTERISTICS OF BACKSCATTERING AT HIGH ANGLES OF INCIDENCE OF TM-POLARIZATION PLANE WAVES ON AN EXTENDED METAL PLATE WITH A RADIO-ABSORBING COATING BASED ON THE STRUCTURE OF AN ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTOR

Yu. N. Kazantsev^{a, *}, G. A. Kraftmakher^a, V. P. Mal'tsev^a, and V. S. Solosin^{a, b}

^aFryazino Branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Vvedenskii Squar., 1, Fryazino, Moscow oblast, 141190 Russian Federation

^bInstitute of Theoretical and Applied Electrodynamics, RAS, Moscow, Izhorskaya Str., 13, Moscow, 125412 Russian Federation

*E-mail: yukazantsev@mail.ru

The results of numerical calculation of backscattering at large angles of incidence of TM-polarization plane waves on an extended metal surface of finite dimensions with a radio-absorbing coating based on the structure of an artificial magnetic conductor are presented. It is shown that a coating of this type with a thickness of 1...2 mm makes it possible to lower by 10...30 dB the first (from large angles) maximum on the angular dependence of backscattering at ultrahigh frequencies in a band of the order of an octave.

Keywords: artificial magnetic conductor, ultrahigh frequencies, backscattering, angular dependence