

21. Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
22. Anders G.J. Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.
23. Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M. Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence, *Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021*, 2021, pp. 455-459.
24. Dubyago, M., Poluyanovich, N. Partial Discharge Signal Selection Method for In-terference Diagnostics of Insulating Materials, *Conference Proceedings - 2019 Ra-diation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW*, 2019, 8792693, pp. 124-127.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; ст. преподаватель.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich. – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru;; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics, senior lecturer.

УДК 621.371: 538.574

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-258-267

А.И. Семенихин, А.В. Климов, А.Н. Савицкий

АНИЗОТРОПНАЯ ИМПЕДАНСНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ МЕТАПОВЕРХНОСТЬ ДЛЯ САМОАДАПТИВНОГО ГАШЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ВОЛН ЛЮБЫХ ПОЛЯРИЗАЦИЙ

Статья посвящена актуальной проблеме – снижению эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов цилиндрической формы с помощью анизотропных метаповерхностей (МП). Целью работы является исследование анизотропных импедансных МП для самоадаптивного (к частоте облучения) гашения ЭПР цилиндрических металлических поверхностей при облучении волнами любой поляризации. Для достижения поставленной цели проанализированы известные принципы работы, конструкции и возможности МП для снижения эффективной площади рассеяния как плоских, так и цилиндрических металлических поверхностей, включая поверхности электрически малого радиуса. Рассмотрены 2D-задачи рассеяния плоской электромагнитной волны ТЕ и ТМ поляризации на модели цилиндрической метаповерхности (ЦМП) в форме кругового цилиндра с анизотропными гомогенизированными импедансными граничными условиями общего вида. Методом собственных функций получены аналитические выражения для матриц рассеяния цилиндрической метаповерхности в базисах линейных (LP) и круговых (CP) поляризаций. Матрицы рассеяния позволяют решать различные задачи синтеза тензора импеданса ЦМП по заданным характеристикам рассеяния в LP- и CP-базисах. В частности, синтезирован диагональный тензор импеданса ЦМП, обеспечивающий противофазность полей рассеяния волн ТЕ, ТМ поляризаций, а также двух согласно поляризованных рассеянных волн круговых поляризаций. Решена задача синтеза тензора импеданса ЦМП по заданному нулевому следу диагональной матрицы рассеяния с самоадаптивным (к частоте облучения) гашением волн любых поляризаций в низкочастотной области. Показано, что гашение эффективной площади рассеяния ЦМП в обратном направлении составляет от 60 до 10 дБ в сверхшироком диапазоне значений электрического радиуса ka от 0,02 до 0,4. Рассчитаны характери-

ки рассеяния двух моделей маскировочных покрытий. Показано, что реактансная ЦМП на основе метачастиц в виде прямоугольных полосков снижает ЭПР на 10 дБ в низкочастотной полосе 200–520 МГц при падении волны ТМ поляризации и на 5 дБ в полосе 480–720 МГц в случае падения волны ТЕ поляризации.

Конформная цилиндрическая метаповерхность; импедансный цилиндр; тензор поверхностного импеданса; низкочастотное рассеяние; гашение эффективной площади рассеяния.

A.I. Semenikhin, A.V. Klimov, A.N. Savitskiy

ANISOTROPIC IMPEDANCE CYLINDRICAL METASURFACE FOR SELF-ADAPTIVE CANCELLATION OF SCATTERING WAVES WITH ANY POLARIZATION

The article is devoted to the topical problem - reducing the radar cross-section (RCS) of cylindrical objects using anisotropic metasurfaces (MS). The purpose of the work is to study anisotropic impedance MSs for self-adaptive (to the irradiation frequency) RCS suppression of cylindrical metal surfaces when irradiated by linear (LP) and circular (CP) polarized waves. To achieve this goal, the known principles of operation, design and capabilities of MSs for reducing the RCS of both flat and cylindrical metal surfaces, including surfaces of electrically small radius, were analyzed. The 2D problem of scattering a plane electromagnetic wave on the model of a cylindrical metasurface (CMS) in the form of a circular cylinder with anisotropic homogenized impedance boundary conditions of a general form is considered. Using the eigenfunction method, analytical expressions are obtained for the scattering matrices of a cylindrical metasurface in linear and circular polarization bases. Scattering matrices make it possible to solve various problems of synthesizing the impedance tensor of the CMS on given scattering characteristics in the LP and CP bases. In particular, a diagonal impedance tensor of the CMS has been synthesized, which provides that the fields of scattering of TE-, TM-polarized waves as well as two circular co-polarized waves are antiphase. The problem of synthesizing the impedance tensor of the CMS from a given zero trace of a diagonal scattering matrix with self-adaptive (to the irradiation frequency) cancellation of waves with any polarization in the low-frequency region has been solved. It is shown that the radar cross-section reduction of the CMS in the reverse direction is from 60 to 10 dB in an ultra-wide range of ka values from 0.02 to 0.4. The scattering characteristics of two models of camouflage coatings are calculated. It is shown that the reactance CMS based on meta-particles in the form of rectangular strips reduces the RCS by 10 dB in the low-frequency band of 200–520 MHz with the incidence of the TM polarized wave and by 5 dB in the band of 480–720 MHz in the case of incident TE polarized wave.

Conformal cylindrical metasurface; impedance cylinder; surface impedance tensor; low frequency scattering; radar cross-section (RCS) reduction.

Введение. В настоящее время активно исследуются электродинамические структуры и антенные устройства, использующие метаматериалы и метаповерхности (МП) для управления электромагнитными волнами [1–6]. Интенсивно изучаются возможности МП для снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) плоских металлических поверхностей при облучении волнами линейной поляризации (LP) в диапазонах частот от СВЧ до терагерцового. С целью снижения ЭПР исследуются фазогradientные МП, сверхширокополосные цифровые МП типа "шахматная доска", различные диффузные МП с преобразованием LP [7–12]. В [13] для снижения ЭПР предложены плоские МП с поляризационным преобразованием круговых поляризаций (CP). Такие CP-поляризаторы реализуют сверхширокополосное отражение CP-волн лишь согласных круговых поляризаций [13], управление фазой Панчаратнам-Берри [14] и генерацию отраженных вихревых волн с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОАМ) [15–16]. В [17] рассматривается МП для самоадаптивного гашения диаграмм обратного рассеяния решетки Ван Атта с генерацией ОАМ.

Особое внимание уделяется снижению заметности цилиндрических тел электрически малого радиуса [18–22]. Так, например, в [20] с помощью однослойного двухдиапазонного конформного метапокрытия уменьшено рассеянное поле РЕС-цилиндра радиусом $0,1\lambda$ (цилиндра с идеальной электрической проводимостью) более чем на 10 и 7 дБ на частотах 2 и 3 ГГц, соответственно, при облучении волной ТМ поляризации (λ – длина волны в свободном пространстве). Снижение ЭПР на 5 дБ получено в полосах частот 5,2% и 4,2%, соответственно, с центральными частотами 2 и 3 ГГц. В [21] исследованы возможности и ограничения наиболее распространённых метачастиц для использования в маскировочных покрытиях. Обнаружено, что, используя только четыре топологии метачастиц, можно обеспечить полный спектр значений реактивного сопротивления МП, включая как положительные, так и отрицательные реактансы. Это позволяет создавать эффективные маскировочные покрытия для плоских и цилиндрических объектов.

В данной статье рассматривается 2D-задача рассеяния плоской волны на анизотропной импедансной гомогенизированной цилиндрической метаповерхности (ЦМП). Методом собственных функций находятся матрицы рассеяния ЦМП в линейном и круговом поляризационных базисах. Синтезирован диагональный тензор импеданса, обеспечивающий противофазность полей рассеяния падающих волн ТЕ и ТМ поляризаций для любого двухпозиционного угла наблюдения. В явном виде синтезированы два реактанса МП с самоадаптивным (к частоте облучения) гашением рассеянных волн в случае любых поляризаций облучения в низкочастотной области. Для однослойного реактансного метапокрытия с метачастицами в виде решетки прямоугольных полосков численно показаны возможности снижения ЭПР, как в обратном направлении, так и в некотором секторе азимутальных углов. Симуляция выполнена в HFSS.

1. Матрицы рассеяния импедансной ЦМП в линейном и круговом поляризационных базисах. Проанализируем вначале 2D-задачу рассеяния плоских волн ТЕ и ТМ поляризаций на анизотропной импедансной цилиндрической МП радиуса a (рис. 1). На поверхности МП $r=a$ зададим анизотропные импедансные граничные условия общего вида:

$$\begin{pmatrix} E_\varphi \\ E_z \end{pmatrix} = -W_0 \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_z \\ -H_\varphi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $E_{\varphi,z}$, $H_{\varphi,z}$ – тангенциальные составляющие векторов напряженностей электрического и магнитного полей; $W_0=120\pi$ Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства; Z_{pq} – элементы тензора поверхностного гомогенизированного импеданса МП. Метаповерхность возбуждается падающим полем плоских LP-волн ТЕ и ТМ поляризаций под углом φ_0 перпендикулярно оси Oz (рис. 1). Вторичное поле ЦМП должно удовлетворять уравнениям Максвелла при $r>a$, граничным условиям (1) и условиям излучения при $r\rightarrow\infty$. Решение задач получим методом собственных функций.

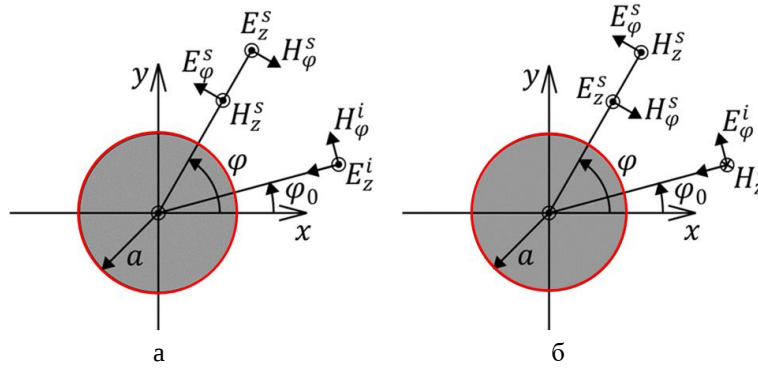


Рис. 1. Рассеяние падающих волн ТЕ (а) и ТМ (б) поляризаций

Вторичное поле представим в виде рядов Фурье по n -м азимутальным гармоникам. Парциальные коэффициенты рассеяния этих гармоник определим, используя (1). Тогда элементы матрицы рассеяния ЦМП S_{pq}^{LP} , $p=1,2$; $q=1,2$ в LP-базисе ТЕ и ТМ поляризаций в дальней зоне примут вид:

$$S_{pq}^{LP}(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n (-1)^n S_{pq,n} \cos n(\varphi - \varphi_0), \quad (2)$$

где ε_n – символ Неймана;

$$\begin{aligned} S_{11,n} &= \frac{[J'_n - iZ_{11}J_n][H_n^{(2)} + iZ_{22}H_n^{(2)'}] - Z_{12}Z_{21}J_nH_n^{(2)'}}{[H_n^{(2)'} - iZ_{11}H_n^{(2)}][H_n^{(2)} + iZ_{22}H_n^{(2)'}] - Z_{12}Z_{21}H_n^{(2)}H_n^{(2)'}}, \\ S_{12,n} &= \frac{2Z_{12}/(i\pi ka)}{[H_n^{(2)'} - iZ_{11}H_n^{(2)}][H_n^{(2)} + iZ_{22}H_n^{(2)'}] - Z_{12}Z_{21}H_n^{(2)}H_n^{(2)'}}, \\ S_{21,n} &= \frac{2Z_{21}/(i\pi ka)}{[H_n^{(2)'} - iZ_{11}H_n^{(2)}][H_n^{(2)} + iZ_{22}H_n^{(2)'}] - Z_{12}Z_{21}H_n^{(2)}H_n^{(2)'}}, \\ S_{22,n} &= \frac{[H_n^{(2)'} - iZ_{11}H_n^{(2)}][-J_n - iZ_{22}J'_n] + Z_{12}Z_{21}J'_nH_n^{(2)}}{[H_n^{(2)'} - iZ_{11}H_n^{(2)}][H_n^{(2)} + iZ_{22}H_n^{(2)'}] - Z_{12}Z_{21}H_n^{(2)}H_n^{(2)'}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где J_n , $H_n^{(2)}$, J'_n , $H_n^{(2)'}$ – обозначения цилиндрических функций Бесселя, Ганкеля второго рода и их производных от аргумента $x=ka$ (аргумент x опущен); k – коэффициент распространения в свободном пространстве; i – мнимая единица.

Для взаимных ЦМП $Z_{12}=Z_{21}$ и $S_{21}^{LP}=S_{12}^{LP}$. В СР-базисе круговых поляризаций элементы симметричной матрицы рассеяния S_{pq}^{CP} взаимных ЦМП будут определяться элементами S_{pq}^{LP} (2) в LP-базисе:

$$\begin{aligned} 2S_{11}^{CP} &= S_{11}^{LP} - S_{22}^{LP} + i2S_{12}^{LP}; & 2S_{12}^{CP} &= i(S_{11}^{LP} + S_{22}^{LP}); \\ 2S_{22}^{CP} &= S_{22}^{LP} - S_{11}^{LP} + i2S_{12}^{LP}; & S_{21}^{CP} &= S_{12}^{CP}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) следуют условия реализации взаимных ЦМП с рассеянием СР-волн лишь на согласной круговой поляризации, когда $S_{12}^{CP} = 0$. Эти условия имеют вид противофазности диагональных элементов матрицы (2) и равенства нулю ее недиагональных элементов:

$$S_{22}^{LP} = -S_{11}^{LP}; S_{12}^{LP} = 0. \quad (5)$$

Такие ЦМП реализуют противофазное рассеяние кополяризованных СР-волн:

$$S_{11}^{CP} = S_{11}^{LP}; S_{22}^{CP} = -S_{11}^{LP}; S_{12}^{CP} = 0. \quad (6)$$

Матрицы рассеяния (2), (4) позволяют решать различные задачи синтеза тензора импеданса ЦМП по заданным характеристикам рассеяния в LP- и СР-базисах.

2. Синтез тензора импеданса ЦМП по заданному нулевому следу диагональной матрицы рассеяния. Условия синтеза импедансов Z_{pq} имеют вид (5) и с учетом (3) при $Z_{12}=Z_{21}=0$ приводят к уравнению:

$$[J'_n - iZ_{11}J_n][H_n^{(2)} + iZ_{22}H_n^{(2)'}] = [J_n + iZ_{22}J'_n][H_n^{(2)'} - iZ_{11}H_n^{(2)}]. \quad (7)$$

Отсюда для любых ka получаем $Z_{22}=1/Z_{11}$. Обозначим $Z_{11}=Z=R+iX$, тогда синтезированный тензор импеданса примет вид

$$\|Z_{pq}\| = \begin{vmatrix} Z & 0 \\ 0 & 1/Z \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Импеданс (8) обеспечивает противофазность диаграмм рассеяния волн ТМ, ТЕ и круговых поляризаций для любых значений ka и угла φ . Такие метаповерхности могут генерировать вихревые СР-волны с ОАМ.

3. Синтез самоадаптивных реактансов ЦМП по заданной нулевой матрице рассеяния в низкочастотной области. Найдем реактивный импеданс $Z(ka)$ (8), при котором $R=0$ и обнуляются матрицы рассеяния (5), (6) в низкочастотной области $ka \rightarrow 0$:

$$S_{11}^{LP} = S_{11}^{CP} = 0. \quad (9)$$

При $x=ka \rightarrow 0$ в формулах (2), (3) можно ограничиться двумя первыми членами ряда и учесть асимптотики цилиндрических функций и их производных [23]:

$$S_{pp}^{LP}(\varphi) \approx (-1)^p \frac{i\pi x}{2} \left[\frac{0,5x + iZ}{1 - i\frac{\pi}{4}x^2 - iZ \left(\ln(0.8905x) + i\frac{\pi}{2} \right)} + \frac{x(1 - iZ) \cos(\varphi - \varphi_0)}{1 + i\frac{\pi}{4}x^2 + xZ(i + \frac{\pi}{4}x^2)} \right]. \quad (10)$$

Тогда (9) приводит к уравнению:

$$0.5x + iZ + x(1 - iZ) \cos(\varphi - \varphi_0) = 0, \quad (11)$$

которое дает приближенный закон самоадаптации реактанса ЦМП к частоте:

$$Z(ka) = ika[0.5 + \cos(\varphi - \varphi_0)], ka < 0.1. \quad (12)$$

Видим, что величина маскирующего реактанса должна меняться самоадаптивно к частоте облучения и двухпозиционному углу наблюдения φ . Частотная дисперсия (12) удовлетворяет теореме Фостера при $|\varphi - \varphi_0| < 120^\circ$. Для гашения обратной ЭПР ($\varphi = \varphi_0$) самоадаптивный реактанс должен иметь индуктивный характер $Z_{11} \approx i1.5ka$ в азимутальном направлении и емкостной $Z_{22} \approx -i2/(3ka)$ в осевом.

Приближение (12) при $\varphi=\varphi_0=0$ можно уточнить, численно решая уравнение (9) с двумя первыми членами ряда (2) без асимптотик цилиндрических функций:

$$Z(ka) = i1.5ka + i3(ka)^3, \quad ka < 0.4. \quad (13)$$

Эффективность законов самоадаптации реактансов (12), (13) ЦМП для гашения 2D нормированной ЭПР $\sigma_{pp}/\lambda = 2|S_{pp}^{LP}|^2/\pi$ (относительно эталонного РЕС-цилиндра) иллюстрирует рис. 2. Видим, что уровень снижения ЭПР может составлять от 60 до 10 дБ в сверхшироком диапазоне значений ka от 0.02 до 0.4.

Отметим, что обнуление (9) матриц рассеяния самоадаптивных ЦМП с реактансами (8), (13) будет обеспечивать полное гашение рассеяния в сверхширокой полосе частот в случае падающих волн любых поляризаций.

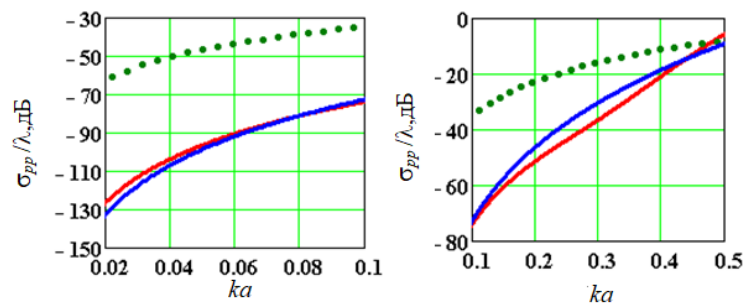


Рис. 2. Гашение обратной ЭПР самоадаптивных реактансных ЦМП: закон (13) – красная линия, закон (12) – синяя линия, эталон – зеленая линия

4. Модели маскировочного покрытия и анизотропной метаповерхности.

Численно исследуем две модели импедансных цилиндров в диапазоне 200–800 МГц. В модели М1 поверхность РЕС-цилиндра радиусом $a_1=30$ мм, высотой 643,53 мм укрыта маскировочным слоем магнетодиэлектрика толщиной $d=4,3$ мм ($\epsilon=10$, $\mu=10$) (рис. 3,а).

В модели М2 сверху слоя магнетодиэлектрика расположена метаповерхность в виде решетки прямоугольных металлических полосков толщиной 35 микрон ($w=15$ мм; $b=19,4$ мм; рис. 3 б,в). Размер квадратных ячеек $T=21,55$ мм, число ячеек вокруг цилиндра $m=10$.

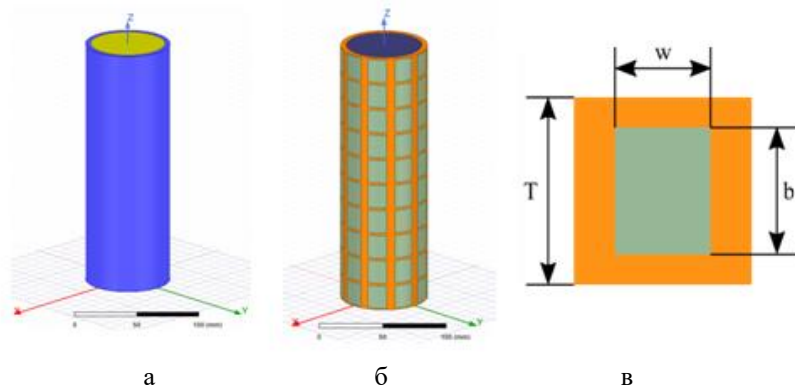


Рис. 3. Модели М1 (а), М2 (б) и вид ячейки ЦМП (в)

Параметры моделей проектировались с учетом требуемого индуктивного импеданса Z (13) в азимутальном направлении и емкостного импеданса $1/Z$ (8) в осевом направлении. Значения ka моделей менялись при симуляции в пределах от 0,144 до 0,574. Эталоном служил аналогичный РЕС-цилиндр.

5. Результаты симуляции. Проанализируем характеристики рассеяния и возможности гашения ЭПР (относительно эталона) для моделей М1, М2 в диапазоне частот 200–800 МГц. На рис. 4 представлены частотные характеристики моностатической ЭПР модели М1. Бистатические диаграммы рассеяния приведены ниже в азимутальной плоскости (рис. 5 б,д).

Расчеты показали, что при облучении модели М1 волной ТМ поляризации слой диэлектрика гасит моностатическую ЭПР на 10 дБ в диапазоне 200–300 МГц (рис. 4,а). В случае ТЕ поляризации снижение ЭПР наблюдается лишь от 1 до 3 дБ, но во всей рассмотренной полосе частот (рис. 4,б).

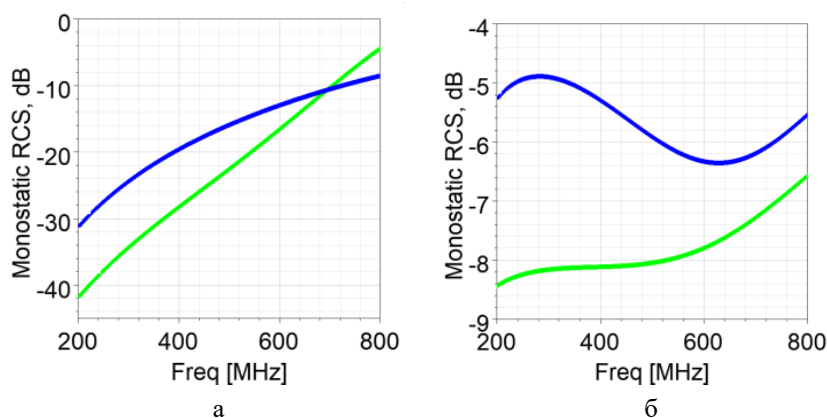


Рис. 4. Моностатические ЭПР при облучении модели М1 волной ТМ (а) и ТЕ (б) поляризаций: зелёная линия – модель М1; синяя линия – эталон

Рис. 5 иллюстрирует лучшую эффективность гашения ЭПР модели М2. ЦМП снижает обратную ЭПР на 10 дБ в полосе 200 – 520 МГц при падении волны ТМ поляризации (рис. 5,а). В этой полосе гомогенизированный индуктивный поверхностный реактанс единичной ячейки МП близок к адаптивному (рис. 6). В случае падения волны ТЕ поляризации гашение ЭПР составляет 5 дБ в полосе 480–720 МГц (рис. 5,в).

При облучении модели М2 волной ТМ поляризации максимальный уровень гашения ЭПР относительно эталона составляет 23 дБ на частоте 425 МГц. Для этой частоты построена бистатическая диаграмма рассеяния (рис. 5,б). Гашение ЭПР достигается не только в обратном направлении, но и в секторе углов -65° – 65° . В области тени ЭПР вырастает.

При облучении модели М2 волной ТЕ поляризации максимальный уровень снижения ЭПР 9 дБ реализуется на частоте 665 МГц. Здесь гомогенизированный емкостной поверхностный реактанс единичной ячейки МП близок к адаптивному (рис. 6). Гашение бистатической ЭПР наблюдается во всех азимутальных углах наблюдения (рис. 5,г).

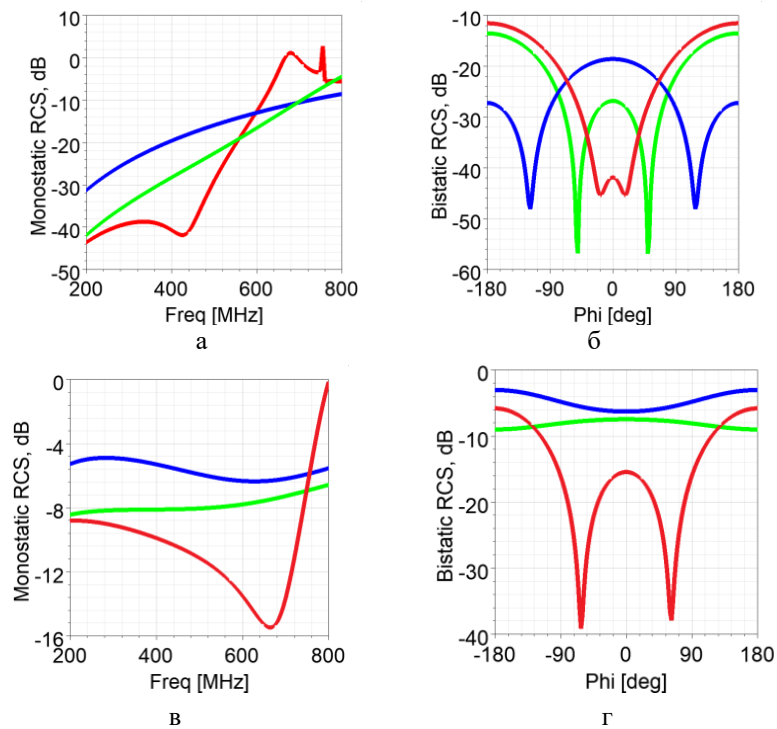


Рис. 5. Моностатические (а, в) и бистатические (б, г, 425 МГц) ЭПР моделей при падении волн ТМ (а, б) и ТЕ (в, г) поляризаций: зелёные линии – модель М1; красные линии – модель М2; синие линии – эталон

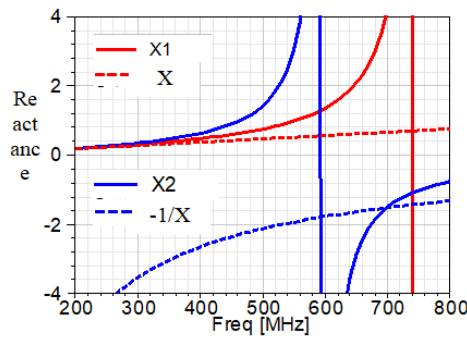


Рис. 6. Реализованные гомогенизированные поверхностные реактансы X_1 , X_2 в канале Флоке МП (сплошные линии) и синтезированные самоадаптивные реактансы X и $-1/X$ в (8), (13) (пунктирные линии); азимутальное направление (красные линии), осевое направление (синие линии)

Заключение. Проанализирована 2D-задача рассеяния плоской волны на анизотропной цилиндрической метаповерхности в форме кругового цилиндра и в явном виде получены матрицы рассеяния в линейном и круговом поляризационных базисах. Это позволило решить две обратных задачи. Во-первых, синтезирован тензор импеданса ЦМП, обеспечивающий противофазность полей рассеяния волн ТЕ, ТМ поляризаций, а также двух согласно поляризованных волн круговых поля-

ризации. Во-вторых, синтезированы два самоадаптивных (к частоте облучения) реактанса ЦМП с гашением волн любых поляризаций в низкочастотной области. Показано, что для гашения обратной ЭПР самоадаптивный реактанс должен иметь индуктивный характер $Z_{11} \approx i1.5ka$ в азимутальном направлении и емкостной $Z_{22} \approx -i2/(3ka)$ в осевом. При этом гашение ЭПР может составлять от 60 до 10 дБ в сверхшироком диапазоне значений ka от 0,02 до 0,4. Выполнена симуляция характеристик рассеяния двух моделей маскировочных покрытий. Численно показаны возможности гашения ЭПР, как в обратном направлении, так и в некотором секторе азимутальных углов.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, Таганрог, по гранту Российского научного фонда (Проект №22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li A., Singh S., and Sevenpiper D. Metasurfaces and their applications, *Nanophotonics*, 2018, Vol. 7, No. 6, pp. 989-1011.
2. Ataloglou V.G., Chen M., Kim M. and Eleftheriades G.V. Microwave Huygens' Metasurfaces: Fundamentals and Applications, in *IEEE Journal of Microwaves*, Jan. 2021, Vol. 1, No. 1, pp. 374-388.
3. Zhang X.G., Sun Y.L. and Jiang W.X. Decoupling Control of Orthogonally-Polarized Waves Via Dual-Programmable Metasurfaces, *2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*, Shenzhen, China, 2021, pp. 98-99.
4. Dugan J., Rahmeier J.G.N., Smy T.J. and Gupta S. Field Scattering Analysis of Cylindrical Spatially Dispersive Metasurfaces, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023.
5. Han S. Manipulation of Evanescent Wave Coupling in High-Q Terahertz All-Dielectric Metasurfaces, in *IEEE Photonics Journal*, Oct. 2023, Vol. 15, No. 5, pp. 1-5.
6. Klimov A.V. and Semenikhin A.I. Modeli shirokopolosnykh otragatelnykh polarizatorov s ispolzovaniem metamaterialov [Models of broadband reflective polarizers using metamaterials], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2013, No. 11, pp. 151-156.
7. Qi Y., Zhang B., Liu C. and Deng X. Ultra-broadband polarization conversion meta-surface and its application in polarization converter and RCS reduction, in *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 116675-116684.
8. Yuan F., Xu H., Jia X., Wang G. and Fu Y. RCS reduction based on concave/convex-chessboard random parabolic-phased metasurface, *IEEE Trans. on Antennas and Propagat*, March 2020, Vol. 68, No. 3, pp. 2463-2468.
9. Masaki T., Ishii Y., Michishita N., Morishita H. and Hada H. Bistatic RCS reduction characteristics of flat and curved metasurfaces, *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Phuket, Thailand, 2017, pp. 1-2.
10. Tsvetkova S.N., Martini E., Tretyakov S.A. and Maci S. Perfect conversion of a tm surface wave into a tm leaky wave by an isotropic periodic metasurface printed on a grounded dielectric slab, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Aug. 2020, Vol. 68, NO. 8, pp. 6145-6153.
11. Modi A.Y., Balanis C.A., Birtcher C.R. and Shaman H. Novel design of ultrabroadband radar cross section reduction surfaces using artificial magnetic conductors, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Oct. 2017, Vol. 65, No. 10, pp. 5406-5417.
12. Gao L.H., Xiang N., Zhao J., Dong D.S., Wang K. and Cheng Q. A low RCS metasurface for THz applications, *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Harbin, China, 2014, pp. 1279-1281.
13. Lin B.Q., Huang W.Z., Yang Y.S., Lv L.T., Guo J.X. and Wang Y.W. Ultra-wideband and polarization-independent RCS reduction based on polarization conversion metasurface, *Radio Science*, 2022, 57.

14. Semenikhin A.I. and Semenikhina D.V. Cylindrical Anisotropic Metasurfaces with Pancharatnam-Berry Phase Bigradient Helical Coding and Anomalous Scattering, *2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2022*, pp. 337-340.
15. Yang L.-J., Sun S. and Sha W.E.I. Ultrawideband reflection-type metasurface for generating integer and fractional orbital angular momentum, in *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, March 2020, Vol. 68, No. 3, pp. 2166-2175.
16. Jiang L., Yu S. and Kou N. Asymmetric Transmission of OAM Vortex Waves by Cylindrical Janus Metasurface, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023.
17. Meng Z.K. and Shi Y. Antenna array design with self-adaptive in-band radar cross section reduction and beam scanning, in *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, Feb. 2023, Vol. 71, No. 2, pp. 1820-1831.
18. Soric J.C., Alù A., Kerkhoff A. and Rainwater D. Experimental demonstration of a conformal mantle cloak for radio-waves, *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA, 2012*, pp. 1-2.
19. Tay C.Y. and Chen Z.N. Azimuthally inhomogeneous metasurface cloak for cylindrical objects, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Jan. 2021, Vol. 69, No. 1, pp. 254-262.
20. Tay C.Y., Chen Z.N. and Hee D. Single-layer dual-band microwave metasurface cloak of conducting cylinder, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, June 2019, Vol. 67, No. 6, pp. 4286-4290.
21. Monti A., Soric J.C., Alù A., Toscano A. and Bilotti F. Anisotropic mantle cloaks for tm and te scattering reduction, in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, April 2015, Vol. 63, No. 4, pp. 1775-1788.
22. Vellucci S., Monti A., Toscano A. and Bilotti F. Scattering manipulation and camouflage of electrically small objects through metasurfaces, *Phys. Rev. Appl.*, Mar. 2017, Vol. 7, No. 3, p. 034032.
23. Abramowitz M. and Stegun I.A. Handbook of mathematical functions. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1046, 1972, pp. 358-374.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Семенихин Андрей Илларионович – Южный федеральный университет; e-mail: anilsem@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: + 79061831649; кафедра АиРПУ; к.т.н.; доцент.

Климов Алексей Владимирович – e-mail: avklimov@sfnu.ru; тел.: 89198745389; кафедра АиРПУ; к.т.н.; с.н.с.

Савицкий Алексей Николаевич – e-mail: savicky@sfnu.ru; тел.: + 79287780975; кафедра АиРПУ; аспирант.

Semenikhin Andrey Illarionovich – Southern Federal University; e-mail: anilsem@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: + 79061831649; the department of A&RTD; cand. of eng. sc.; associate professor.

Klimov Alexey Vladimirovich – e-mail: avklimov@sfnu.ru; phone: + 79198745389; the department of A&RTD; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Savitskiy Alexey Nikolaevich – e-mail: savicky@sfnu.ru; phone: + 79287780975; the department of A&RTD; postgraduate student.

УДК 621.396.96

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-267-276

К.А. Синянян, Ю.В. Юханов, И.В. Ильин, И.В. Мерглов

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛОЗАМЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ В БЭЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Анализируются развитие мирового и российского рынков беспилотных летательных аппаратов, перспективы развития и роста рынка беспилотных летательных аппаратов. Подчеркивается важность достоверного измерения эффективной поверхности рассеяния малозаметных беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются методы уменьшения паразитного отражения от опорно-поворотного устройства внутри безэховой камеры –