

УДК 621.396.677

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-234-246

**Для цитирования:** Алгоритм вычисления волновых чисел в киральном метаматериале на основе составных спиральных элементов / А. Н. Дементьев, А. Н. Куркин, С. В. Смирнов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 234–246. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-234-246.

**For citation:** Dement'yev A. N., Kurkin A. N., Smirnov S. V., Arsen'yev K. V., Zhukov A. O. [Algorithm for calculation of wave numbers in a chiral metamaterial based on composite spiral elements]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 2, P. 234–246. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-234-246.

## **Алгоритм вычисления волновых чисел в киральном метаматериале на основе составных спиральных элементов**

А. Н. Дементьев<sup>1</sup>, А. Н. Куркин<sup>2</sup>, С. В. Смирнов<sup>1</sup>, К. В. Арсеньев<sup>1</sup>, А. О. Жуков<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет  
Российская Федерация, 119454, г. Москва, ул. Вернадского, 78  
<sup>2</sup>Департамента Министерства обороны РФ  
Российская Федерация, 119160, г. Москва, ул. Знаменка, 19  
<sup>3</sup>ФГБНУ «Аналитический центр»  
Российская Федерация, 109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33/4  
<sup>4</sup>Институт астрономии Российской академии наук  
Российская Федерация, 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, 48  
\*E-mail: aozhukov@mail.ru

*Материалы с различными экзотическими электромагнитными характеристиками широко изучались в последние десятилетия, чтобы удовлетворить растущий интерес в различных областях, включая визуализацию, телекоммуникации, использование энергии и т. д. В качестве особенно многообещающего кандидата электромагнитные метаматериалы проявляют электромагнитные свойства, недоступные природным материалам, в связи с тем, что киральная среда (метаматериал) представляет собой совокупность равномерно распределенных в изотропной диэлектрической среде проводящих зеркально-асимметричных (киральных) элементов. Помимо материала, из которого изготовлен киральный элемент, важнейшую роль играет и его форма. Именно поэтому так важно исследование новых видов киральных элементов, а также определение электродинамических свойств киральных метаматериалов на их основе. В работе рассматривается решение задачи определения коэффициентов отражения и прохождения при падении плоской электромагнитной волны на планарный слой кирального метаматериала на основе многозаходных проводящих элементов типа спирали с учетом структурных параметров метаматериала, который представляет собой матрицу из тонкопроволочных идеально проводящих элементов в виде  $N$  взаимно ортогональных спиралей. Для определения параметров кирального метаматериала на основе составных спиральных элементов, рассмотрено построение частной математической модели составного элемента на основе произвольного числа спиральных элементов в пространственной конфигурации, а также метаматериала на основе матрицы таких элементов. Предложен алгоритм вычисления постоянных распространения волн с круговыми поляризациями в указанном метаматериале. Из представленных расчетов можно отметить, что исследуемая метаструктура на одной частоте может выполнять роль частотно-селективного защитного экрана, не прозрачного для излучения вблизи основной резонансной частоты.*

*Ключевые слова:* киральный метаматериал, распространение радиоволн, частотная зависимость, СВЧ-диапазон, электромагнитное поле.

## Algorithm for calculation of wave numbers in a chiral metamaterial based on composite spiral elements

A. N. Dement'yev<sup>1</sup>, A. N. Kurkin<sup>2</sup>, S. V. Smirnov<sup>1</sup>, K. V. Arsen'yev<sup>1</sup>, A. O. Zhukov<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University

78, Vernadskogo Av., Moscow, 119454, Russian Federation

<sup>2</sup>Department of the Ministry of Defense of the Russian Federation

19, Znamenka St., Moscow, 119160, Russian Federation

<sup>3</sup>Analytical Center

33, Building 4, Talalikhina Str., Moscow, 109316, Russian Federation

<sup>4</sup>Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences

48, Pyatnitskaya St., Moscow, 119017, Russian Federation

\*E-mail: aozhukov@mail.ru

*Materials with various exotic electromagnetic characteristics have been extensively studied in recent decades to satisfy the growing interest in various fields, including visualization, telecommunications, energy use, and so on. As a particularly promising candidate, electromagnetic metamaterials exhibit electromagnetic properties that are inaccessible to natural materials. Due to the fact that the chiral medium (metamaterial) is a set of uniformly distributed conductive mirror-asymmetric (chiral) elements in an isotropic dielectric medium. In addition to the material from which the chiral element is made, its shape also plays an important role. That is why it is so important to study new types of chiral elements, as well as to determine the electrodynamic properties of chiral metamaterials based on them. The paper considers the solution of the problem of determining the reflection and transmission coefficients when a plane electromagnetic wave falls on a planar layer of a chiral metamaterial based on multi-pass conducting elements of the spiral type, taking into account the structural parameters of the metamaterial, which is a matrix of thin-wire ideally conducting elements in the form of  $N$  mutually orthogonal spirals. To determine the parameters of a chiral metamaterial based on composite spiral elements, the construction of a particular mathematical model of a composite element based on an arbitrary number of spiral elements in a spatial configuration, as well as a metamaterial based on a matrix of such elements, is considered. An algorithm for calculating the propagation constants of waves with circular polarizations in the specified metamaterial is proposed. From the calculations presented, it can be noted that the metastructure under study at one frequency can act as a frequency-selective protective shield that is not transparent to radiation near the main resonant frequency.*

*Keywords: chiral metamaterial, propagation of radio waves, frequency dependence, microwave range, electromagnetic field.*

### Введение

В настоящее время актуальным направлением является исследование электродинамических свойств метаматериалов СВЧ-диапазона, которые представляют собой композиционные искусственные структуры, обладающие ярко выраженными частотно-селективными свойствами [1–5].

Метаматериалы – это искусственные структуры с подобранными метаатомами в субволновых масштабах, позволяющие по желанию управлять электромагнитными волнами. Обычно метаматериалы описываются параметрами эффективной среды (например, показателем преломления, диэлектрической проницаемостью) из-за субволновой природы метаатомов. Когда метаатом сопоставим с длиной волны, описание эффективной среды иногда все еще остается в силе, но параметры эффективной среды становятся зависимыми от волнового вектора, т. е. нелокальными. Уникальные свойства метаматериалов обусловлены их пространственной структурой и свойствами компонентов (микрочастиц), из которых они состоят. Метаматериал представляет собой композицию контейнера из материала со свойствами А, в котором размещены компоненты со свойствами Б. Компоненты Б могут размещаться упорядоченно или смешиваться с несущим материалом А.

Перспективным классом метаструктур является киральный метаматериал (КММ), который создается из компонентов Б, обладающих зеркально асимметричной пространственной конфигурацией [4–9].

Киральная метаструктура включает однородный диэлектрический контейнер (несущая среда А) с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_c$  и относительной магнитной проницаемостью  $\mu_c$  (рис. 1). В несущей среде равномерно размещаются и хаотически ориентируются зеркально-асимметричные компоненты Б. Расстояние между соседними компонентами обозначим через  $l$ ; размер области, занятой одним киральным компонентом – через  $d$ . Таким образом, КММ представляет собой совокупность несущей среды, с помещенной в нее матрицей из киральных компонентов Б с периодом решетки  $l$ .

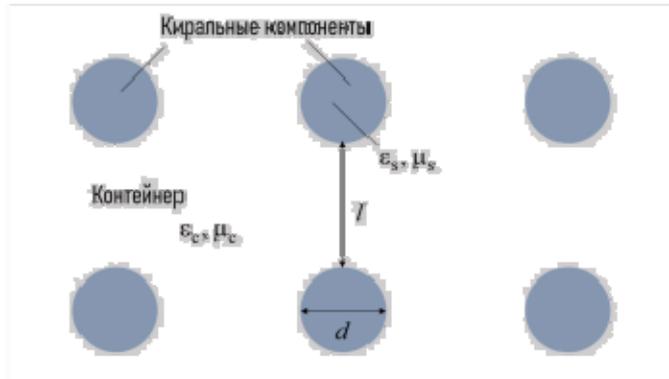


Рис. 1. Общая структура кирального метаматериала

Fig. 1. General structure of chiral metamaterial

Киральные компоненты представляют собой микроскопические электромагнитные частицы, соизмеримые с длиной волны СВЧ-поля, и являются переизлучателями электромагнитного поля (ЭМП). Зеркально-асимметричные элементы проводящие [10–15].

**Определения коэффициентов отражения и прохождения при падении плоской электромагнитной волны на планарный слой кирального метаматериала**

Для описания КММ в целом вводятся эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости, которые зависят от соответствующих проницаемостей контейнера и киральных элементов:

$$\epsilon = \epsilon(\epsilon_c, \epsilon_s); \mu = \mu(\mu_c, \mu_s). \tag{1}$$

Таким образом, любой киральный метаматериал описывается набором из трех материальных параметров (1) – эффективными диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , эффективной магнитной проницаемостью  $\mu$  и параметром киральности  $\chi$ .

Материальные уравнения для киральной среды, согласно формализму Линделла – Сиволы, имеют следующий вид:

$$\vec{D} = \mu \vec{E} \mp i \chi \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \pm i \chi \vec{E}. \tag{2}$$

В соотношениях (2) верхние знаки соответствуют КММ на основе зеркально-асимметричных компонентов с правой закруткой (правых форм компонентов), а нижние знаки – КММ на основе зеркально-асимметричных компонентов с левой закруткой (левых форм компонентов).

Рассмотрим задачу об определении коэффициентов отражения и прохождения при падении плоской электромагнитной волны на планарный слой кирального метаматериала, который является бесконечно протяженным вдоль оси Oz. Геометрия задачи приведена на рис. 2.

Рассмотрим случай падения плоской электромагнитной волны с линейной перпендикулярной поляризацией на киральный метаматериал. На рис. 2 имеется три области: диэлектрик 1,

киральным метаматериалом и диэлектриком 2. Они обладают следующими параметрами:  $\epsilon_1, \mu_1$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости первой области;  $\theta = \theta_1$  – углы падения и отражения электромагнитной волны (ЭМВ) от границы раздела «диэлектрик 1 – киральный метаматериал»;  $\epsilon_2, \mu_2, \chi_2$  – относительные диэлектрическая, магнитная проницаемость и параметр киральности области 2;  $\theta_{R2}, \theta_{L2}$  – углы преломления волн ПКП и ЛКП в область 2;  $\epsilon_3, \mu_3$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости третьей области;  $\theta_3$  – угол прохождения ЭМВ из киральной среды в область 3;  $r_{ee}, r_{eh}$  – коэффициенты отражения для основной и кроссполяризованной компоненты ЭМП в области 1;  $T_{R2}^{(-)}, T_{L2}^{(-)}$  – коэффициенты прохождения для волн ПКП и ЛКП;  $T_{R2}^{(+)}, T_{L2}^{(+)}$  – коэффициенты отражения от границы раздела «киральная среда – область 3» для волн ПКП и ЛКП;  $t_{ee}, t_{eh}$  – коэффициенты прохождения для основной и кросс-поляризованной компоненты ЭМП в области 3.

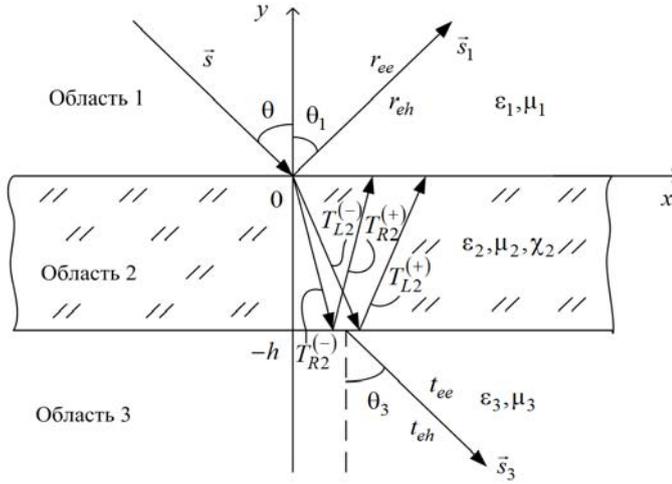


Рис. 2. Геометрия планарного кирального метаматериала

Fig. 2. Geometry of the planar chiral metamaterial

Коэффициенты отражения основной и кросс-поляризованной компоненты для случая падения волны E-поляризации определяются из решения неоднородной системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\mathbf{B}_E \vec{\mathbf{R}}_E = \vec{\mathbf{A}}_E, \quad (3)$$

Где

$$\mathbf{B}_E = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{i}{\eta_2} & \frac{i}{\eta_2} & -\frac{i}{\eta_2} & -\frac{i}{\eta_2} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -i \cos \theta_R & i \cos \theta_R & i \cos \theta_L & -i \cos \theta_L & 0 & -\eta_1 \cos \theta & 0 & 0 \\ \frac{\cos \theta_R}{\eta_2} & -\frac{\cos \theta_R}{\eta_2} & \frac{\cos \theta_L}{\eta_2} & -\frac{\cos \theta_L}{\eta_2} & \frac{\cos \theta}{\eta_1} & 0 & 0 & 0 \\ e^{-i\beta R} & e^{i\beta R} & e^{-i\beta L} & e^{i\beta L} & 0 & 0 & -e^{-ik_3 h \cos \theta_3} & 0 \\ \frac{i}{\eta_2} e^{-i\beta L} & \frac{i}{\eta_2} e^{i\beta R} & \frac{i}{\eta_2} e^{-i\beta L} & \frac{i}{\eta_2} e^{i\beta L} & 0 & 0 & 0 & -e^{-i\beta_3} \\ -i \cos \theta_R e^{i\beta R} & i \cos \theta_R e^{i\beta R} & i \cos \theta_L e^{i\beta L} & -i \cos \theta_L e^{i\beta L} & 0 & 0 & 0 & \eta_3 \cos \theta_3 e^{-i\beta_3} \\ -\frac{\cos \theta_R}{\eta_2} e^{-i\beta R} & \frac{\cos \theta_L}{\eta_2} e^{-i\beta L} & \frac{\cos \theta_L}{\eta_2} e^{-i\beta L} & -\frac{\cos \theta_L}{\eta_2} e^{i\beta L} & 0 & 0 & -\frac{\cos \theta_3}{\eta_3} e^{-i\beta_3} & 0 \end{pmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{R}}_E = [T_R^{(-)}, T_R^{(+)}, T_L^{(-)}, T_L^{(+)}, r_{ee}, r_{eh}, t_{ee}, t_{eh}]^T; \quad \bar{\mathbf{A}}_E = [1, 0, 0, \frac{\cos \theta}{\eta_1}, 0, 0]^T;$$

$$\eta_2 = \sqrt{\varepsilon_2 / \mu_2}; \quad \alpha_{R,L} = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_1 \mu_1 \sin^2 \theta}{(\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} \pm \chi_2)^2}};$$

$$k_{R,L} = k_0 (\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} \pm \chi_2); \quad \eta_1 = \sqrt{\mu^{(1)} / \varepsilon^{(1)}};$$

$$\eta_3 = \sqrt{\mu^{(3)} / \varepsilon^{(3)}}; \quad \beta_{R,L} = k_{R,L} h \cos \theta_{R,L}; \quad \beta_3 = k_3 h \cos \theta_3.$$

Для определения параметров кирального метаматериала на основе составных спиральных элементов, рассмотрим построение частной математической модели составного элемента на основе произвольного числа спиральных элементов в пространственной конфигурации, а также метаматериала на основе матрицы таких элементов. Для упрощения на рис. 3 различными типами линий показаны три спирали в структуре составного компонента.

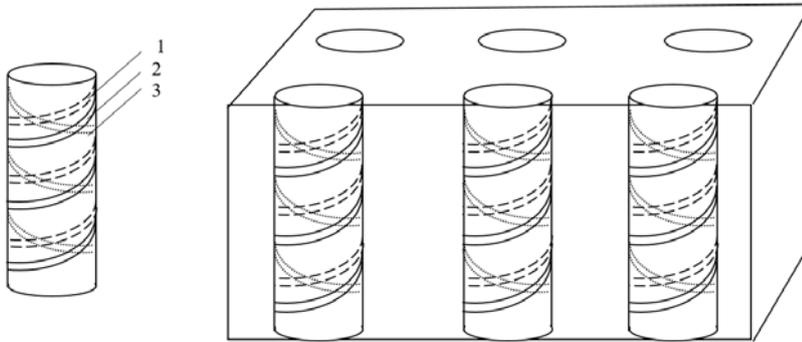


Рис. 3. Геометрия элемента и метаматериала

Fig. 3. Geometry of the element and metamaterial

Спиральные компоненты внутри пространственного составного элемента различаются между собой геометрическими размерами. При этом при создании КММ на их основе все компоненты должны быть тождественными. Геометрические размеры  $i$ -го кирального компонента в составном киральном элементе:  $N_i$  – число витков;  $R_i$  – радиус витка спирали;  $h_i$  – шаг спирали;  $p_i$  – длина спирали в расправленном состоянии;  $r_i$  – радиус проволоки;  $\alpha_i$  – угол накрутки спирали.

**Алгоритм вычисления постоянных распространения волн с круговыми поляризациями**

Алгоритм вычисления волновых чисел в киральном метаматериале на основе составных спиральных элементов волн с право- и левокруговыми поляризациями включает следующие шаги.

**Шаг. 1.** Расчет резонансной частоты для составного элемента производится на основании формулы Томсона

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \tag{4}$$

где  $L$  – общая индуктивность составного кирального компонента;  $C$  – емкость составного кирального компонента.

**Шаг. 2.** Расчет индуктивности и емкости составного кирального компонента:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i; \quad L = \prod_{i=1}^N L_i \left( \sum_{i=1}^N L_i \right)^{-1}, \tag{5}$$

где  $L_i$  – индуктивность  $i$ -го спирального компонента в пространственной структуре составного спирального элемента;  $C_i$  – емкость  $i$ -го спирального компонента в пространственной структуре составного спирального элемента ( $i = \overline{1, N}$ );  $N$  – полное количество спиралей в составном спиральном элементе.

**Шаг. 3.** Расчет емкости  $i$ -й спирали в составном элементе:

$$C_i = \varepsilon_{c2} \left[ \frac{l_i}{18 \ln \left( \frac{2l_i}{r_i} \right) - 1} \cdot 10^{-11} + \frac{\pi \left[ (R_i + 2r_i)^2 - R_i^2 \right] (N_i - 1)}{h_i} + \frac{1}{d} \frac{N_i (R_i + r_i)}{\cos \alpha_i} r_i \right]. \quad (6)$$

**Шаг. 4.** Расчет индуктивности  $i$ -й спирали в составном элементе:

$$L_i = \mu_{c2} \frac{\pi N_i^2 R_i^2}{l_i}. \quad (7)$$

**Шаг. 5.** Расчет резонансной частоты составного спирального элемента:

$$\omega_0 = \left[ \prod_{i=1}^N L_i \left( \sum_{i=1}^N L_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^N C_i \right]^{-1/2}. \quad (8)$$

**Шаг. 6.** Расчет волновых чисел волн с право и левокруговыми поляризациями в киральном метаматериале:

$$k_{R,L} = k_0 \left( \sqrt{\varepsilon_{c2} \frac{1 + 2\alpha\varepsilon_{x2}}{1 - \alpha\varepsilon_{x2}}} \pm \frac{A\beta_0^2 \omega}{c(\omega_0^2 - \omega^2)} \right). \quad (9)$$

При анализе численных характеристик основной интерес представлял расчет частотных зависимостей отраженной ( $101g|r_{ee}|^2$  и  $101g|r_{ch}|^2$ ) и прошедшей ( $101g|t_{ee}|^2$  и  $101g|t_{ch}|^2$ ) мощностей (в дБ). Контейнер моделировался на основе пенополистирола С-35 с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{c2} = 1,5$ .

На рис. 4 представлены частотные зависимости отраженной и прошедшей мощностей основной и кросс-поляризованной компоненты поля в диапазоне от 1 до 10 ГГц [16–19]. Штриховыми кривыми показаны зависимости прошедшей мощности основной компоненты ( $101g|t_{ee}|^2$ ); сплошными линиями – отраженной мощности основной компоненты ( $101g|r_{ee}|^2$ ). Падение волны на метаструктуру считалось нормальным. Расчет был выполнен при следующих значениях параметров структуры:  $R_{1,2} = 0,01$  м,  $N_{1,2} = 3$ ,  $r_{1,2} = 0,002$  м,  $H_{1,2} = 0,05$  м,  $d_{1,2} = 0,05$  м. В этом случае обе спирали, входящие в структуру объединенного элемента, являются тождественными.

Уровень отражения и прохождения кросс-поляризованных компонентов поля не превышает при нормально падении –25 дБ и на графиках не представлен.

На частоте 1,18 ГГц наблюдается резкое локальное уменьшение уровня прошедшей мощности через исследуемый метаматериал, т. е. преимущественно происходит боковое рассеяние нормально падающей электромагнитной энергии. На этой частоте метаструктура может выполнять роль частотно селективного защитного экрана. На других частотах метаструктура является полностью прозрачной и падающее излучение через неё проходит практически без ослабления (вблизи 0 дБ) [20; 21].

Рассмотрим теперь случай различных по значениям геометрических параметров спиралей в структуре объединенного элемента. На рис. 5 приведены зависимости отраженной и прошед-

шей мощностей основной и кросс-поляризованной компоненты поля от частоты ЭМП в диапазоне от 1 до 10 ГГц [22–27]. Штриховыми линиями на рис. 5 представлены частотные зависимости уровней прошедшей мощности основной компоненты ЭМП ( $10\lg|r_{ee}|^2$ ); сплошными линиями – уровни отраженной мощности основной компоненты ЭМП ( $10\lg|r_{ee}|^2$ ). Волна падала на слой КММ по нормали.

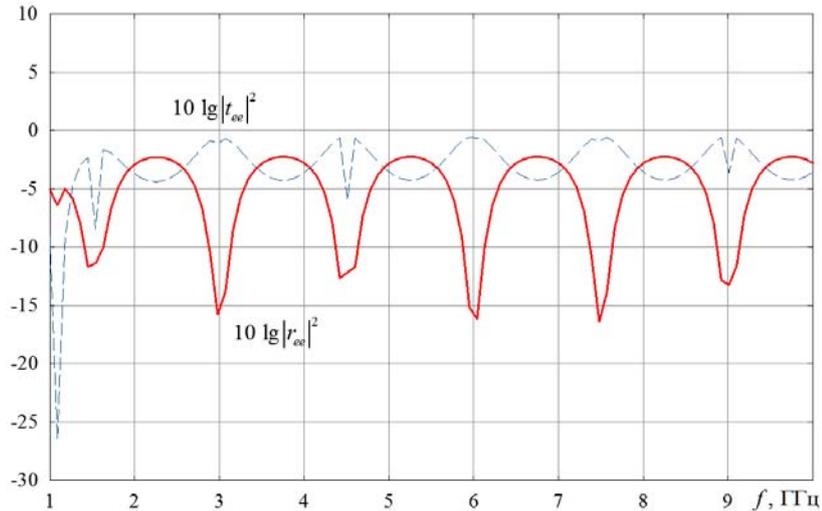


Рис. 4. Частотные зависимости прошедшей и отраженной мощностей для случая идентичных спиралей в объединенном элементе

Fig. 4. Frequency dependences of transmitted and reflected powers for the case of identical spirals in a combined element

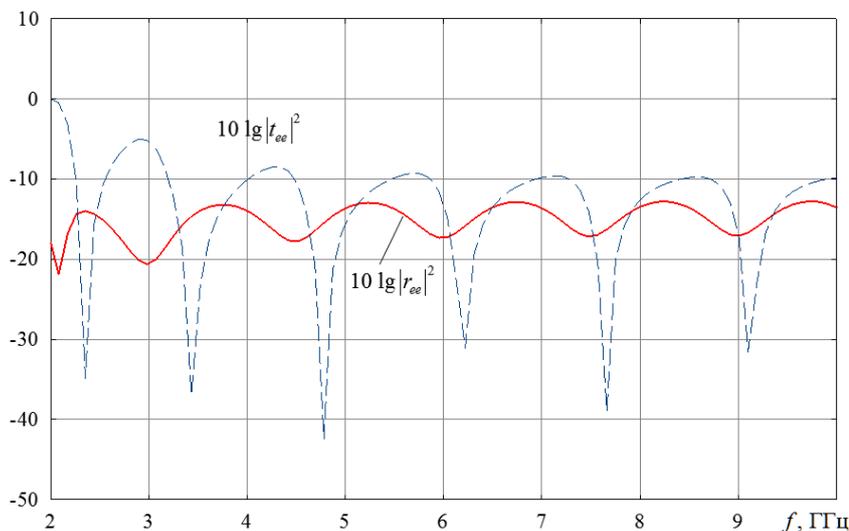


Рис. 5. Зависимости уровней прошедшей и отраженной мощностей от частоты

Fig. 5. The dependence of the levels of transmitted and reflected power on the frequency

При численном моделировании использовались следующие значения параметров:  $R_1 = 2R_2 = 0,01$  м,  $N_{1,2} = 3$ ,  $r_1 = 2r_2 = 0,002$  м,  $H_1 = 2H_2 = 0,05$  м,  $d_1 = 2d_2 = 0,05$  м.

Как видно из рис. 5, когда составной спиральный элемент состоит из двух спиралей с разными геометрическими размерами, то наблюдается ряд дискретных минимумов коэффициента прохождения. На этих частотах ЭМВ через слой КММ практически не проходит. В этом режиме большая часть энергии падающей волны преобразуется в боковое рассеяние в слое КММ.

Структура приобретает функционал частотно селективного концентратора СВЧ-энергии. Также на резонансных частотах слой КММ представляет собой частотно селективный защитный экран СВЧ.

С ростом частоты средний уровень коэффициента прохождения уменьшается, что объясняется ростом кросс-поляризационных эффектов [28–31].

Также здесь уместно отметить, что при учете гетерогенности и дисперсии КММ в модели возникает явление кросс-поляризации даже при нормальном падении, что не наблюдается при использовании классической модели КММ на основе материальных уравнений Линделла – Сиволы.

Доказано, что резонансные длины волны, соответствующие минимумам коэффициента прохождения, удовлетворяют условию Вульфа – Брэгга:

$$2d\sqrt{(\varepsilon_2\mu_2 - \chi_2^2) - \cos^2\theta} = v\lambda,$$

где  $v$  – порядок резонанса;  $\lambda$  – длина волны;  $\theta$  – угол падения волны.

Далее была рассмотрена структура на основе составного элемента, состоящего из 3-х тонкопроволочных спиралей. Толщина слоя метаматериала 0,05 м. Материал контейнера имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_{c2} = 1,5$ . Параметры двух тонкопроволочных спиралей в составном элементе были идентичными:  $R_{1,2} = 0,01$  м,  $N_{1,2} = 3$ ,  $r_{1,2} = 0,002$  м,  $H_{1,2} = 0,05$  м,  $d_{1,2} = 0,05$  м; третья спираль отличалась от первых двух числом витков:  $R_3 = 0,01$  м,  $N_3 = 2$ ,  $r_3 = 0,002$  м,  $H_3 = 0,05$  м,  $d_3 = 0,05$  м. Области 1 и 3 представляли собой вакуум с  $\varepsilon_{1,3} = \mu_{1,3} = 1$ . Падение волны на метаструктуру происходило по нормали:  $\theta = 0$ .

На рис. 6 представлены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения основной ( $|r_{ee}|$  – сплошная линия) и кросс-поляризованной компоненты ( $|r_{eh}|$  – штриховая линия), а также коэффициентов прохождения основной ( $|t_{ee}|$  – сплошная линия) и кросс-поляризованной компоненты ( $|t_{eh}|$  – штрихпунктирная линия) для метаматериала на основе составных элементов из 3-х спиралей.

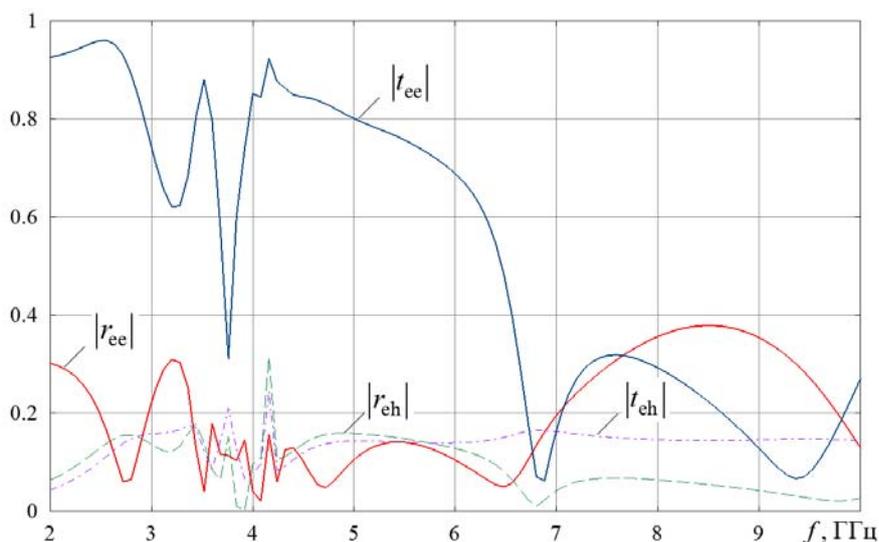


Рис. 6. Частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и прохождения для метаматериала на основе составных элементов из 3-х спиралей

Fig. 6. Frequency dependences of modules of reflection and transmission coefficients for a metamaterial based on composite elements of 3 spirals

Как видно из рис. 6, уровень прохождения основной компоненты поля уменьшается с ростом частоты; уровни отражения и прохождения кросс-поляризованной компоненты практически не изменяются во всем частотном интервале исследования. На частотах 3,8 и 6,9 ГГц имеются резкие минимумы модуля коэффициента прохождения основной компоненты.

На рис. 7 представлены частотные зависимости отраженной мощности основной ( $10\lg|r_{ee}|^2$  – сплошная линия) и кросс-поляризованной компоненты ( $10\lg|r_{eh}|^2$  – штриховая линия), а также прошедшей мощности основной ( $10\lg|t_{ee}|^2$  – сплошная линия) и кросс-поляризованной компоненты ( $10\lg|t_{eh}|^2$  – штрихпунктирная линия) для метаматериала на основе составных элементов из 3-х спиралей.

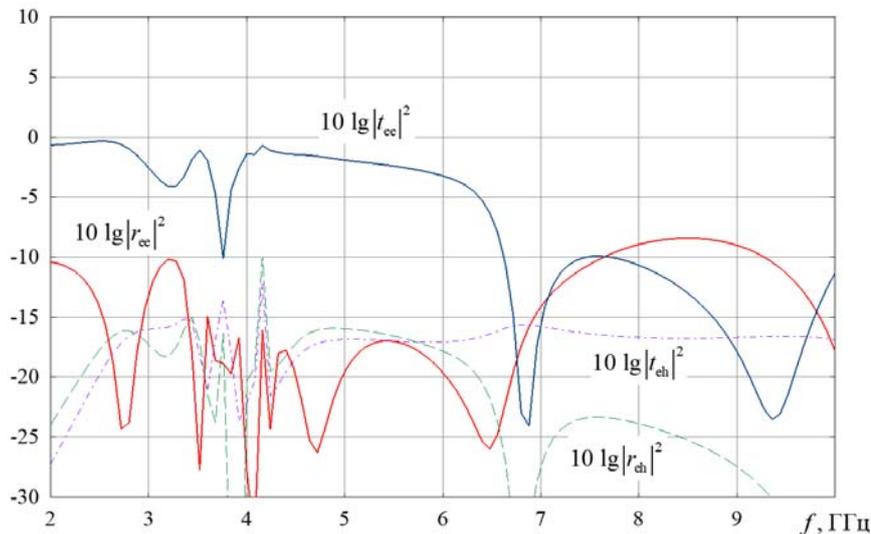


Рис. 7. Частотные зависимости прошедшей и отраженной мощностей для метаматериала на основе составных элементов из 3-х спиралей

Fig. 7. Frequency dependences of transmitted and reflected powers for a metamaterial based on composite elements from 3 spirals

Как видно из рис. 7, на частоте 6,9 ГГц структура не пропускает основную (падающую) компоненту электромагнитного поля при низких уровнях отражения основной компоненты, а также отражения и прохождения кросс-поляризованной компоненты. Такая ситуация соответствует преобразованию нормально падающего СВЧ-излучения в азимутальное рассеяние. Также можно заметить, что практически на всем частотном интервале исследования уровни отражения основной и прохождения кросс-поляризованной компоненты практически одинаковые, что связано с ярко выраженными поляризационно-селективными свойствами кирального метаматериала. На частоте 4,2 ГГц имеет место небольшой локальный максимум отражения кросс-поляризованной компоненты поля, а также ее прохождения.

**Заключение.** Таким образом, как и для случая составного элемента из двух взаимоортогональных спиралей, доказано, что существуют дискретные частоты, на которых происходит преобразование нормально падающего СВЧ-излучения линейной поляризации в азимутальное рассеяние. Как показали дополнительные исследования, для возникновения подобных эффектов необходимо, чтобы либо число спиралей в составном элементе было нечетным, либо при четном числе спиралей они отличались друг от друга геометрическими параметрами.

#### Благодарность

Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента России (проект НШ-1357.2022.6 «Модели, методы и средства получения и обработки информации о космических объектах в широком спектральном диапазоне электромагнитных волн»).

#### Acknowledgements

The work was prepared with the financial support of a grant from the President of Russia (Project NSH-1357.2022.6 “Models, methods and means of obtaining and processing information about space objects in a wide spectral range of electromagnetic waves”).

### Библиографические ссылки

1. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. CRC Press // Taylor & Francis. 2009. 992 p.
2. Tie J. C., Smith, D. R., Ruopeng Liu. Metamaterials: Theory, Design and Application. Springer, 2010. 376 p.
3. Карцан И. Н., Лохмаков П. М., Цветков Ю. Д. Интеллектуализация поиска информации в корпоративных системах // Вестник университетского комплекса. 2006. № 23. С. 141.
4. Карцан И. Н. Метод исключения ошибок определения местоположения при одновременном использовании навигационных систем // Вестник СибГАУ. 2008. № 3 (20). С. 101–103.
5. Карцан И. Н., Жукова Е. С., Карцан Р. В. Баллистическое и временное обеспечение космических аппаратов на различных орбитах // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-2 (26). С. 19–24.
6. Терсков В. А., Шеенок Д. А., Карцан И. Н. Генетический алгоритм для оптимизации архитектуры бортового программного обеспечения // Надежность. 2014. № 4 (51). С. 102–111.
7. Карцан И. Н. Трудозатраты на разработку бортового программного обеспечения // Академическая наука – проблемы и достижения. 2014. С. 137.
8. Lindell I. V., Sihvola A. H., Tretyakov S. A., Viitanen A. J. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media. London : ArtechHouse, 1994. 291 p.
9. Неганов В. А., Осипов О. В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М. : Радиоисвязь, 2006. 280 с.
10. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment / Y. L. Fateev, D. D. Dmitriev, V. N. Tyapkin et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific and Research Conference on Topical Issues in Aeronautics and Astronautics (Dedicated to the 55th Anniversary from the Foundation of SibSAU). 2015. P. 012022.
11. Adaptation algorithms for satellite communication systems equipped with hybrid reflector antennas / I. N. Kartsan, V. N. Tyapkin, D. D. Dmitriev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific and Research Conference on Topical Issues in Aeronautics and Astronautics (Dedicated to the 55th Anniversary from the Foundation of SibSAU). 2015. P. 012010.
12. Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for glonass and gps / V. N. Tyapkin, I. N. Kartsan, D. D. Dmitriev, A. E. Goncharov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. 2015. P. 7147246. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.
13. Spatial filtering algorithms in adaptive multi-beam hybrid reflector antennas / V. N. Tyapkin, I. N. Kartsan, D. D. Dmitriev, A. E. Goncharov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. 2015. P. 7147244. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.
14. Малугин К. А., Неудакин А. А., Артюх А. С. Актуальность использования конформных антенных решеток для бортовых радиотехнических систем // Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения : сб. статей. Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж : ВАИУ, 2009. Ч. 11. С. 122–126.
15. Ильин Е. М., Полубехин А. И., Черевко А. Г. Конформные антенные системы – перспективное направление развития бортовых РЛК для беспилотных летательных аппаратов // Вестн. СибГУТИ. 2015. № 2. С. 149–155.
16. Simulation modeling of functional adaptive interference nulling for multibeam hybrid reflector antenna systems / I. N. Kartsan, A. E. Goncharov, P. V. Zelenkov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012017.
17. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference / I. N. Kartsan, A. E. Goncharov, P. V. Zelenkov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012020.

18. I. N. Kartsan, A. E. Goncharov, P. V. Zelenkov et al. Synthesis of an algorithm for interference immunity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012019.
19. Simulation modeling of functional adaptive interference nulling for multibeam hybrid reflector antenna systems / I. N. Kartsan, A. E. Goncharov, P. V. Zelenkov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012017.
20. Development of methods for equivalent transformation of gert networks for application in multi-version software / M. V. Saramud, P. V. Zelenkov, I. V. Kovalev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012015.
21. Кисель Н. Н., Грищенко С. Г., Дерачиц Д. С. Исследование низкопрофильных конформных микрополосковых антенн // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3 (164). С. 240–248.
22. Сингулярные и гиперсингулярные интегральные уравнения в теории зеркальных и полосковых антенн / А. Н. Дементьев, Д. С. Ключев, В. А. Неганов, Ю. В. Соколова М. : Радиотехника, 2015. 216 с.
23. Лабунько О. С. Электродинамический анализ системы продольных электрических вибраторов в слое магнитодиэлектрика на металлическом круговом цилиндре. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т, 2004. 116 с.
24. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array / V. N. Tyapkin, I. N. Kartsan, D. D. Dmitriev, S. V. Efremova // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 2017. P. 7998452.
25. Карцан И. Н. Оценка ресурсного потенциала космических систем // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. участников ежегодной Всерос. науч.-техн. конф. молодых уч. и студ., посвященной 122-й годовщине Дня радио. Красноярск, 2017. С. 226–228.
26. Kartsan I. N. Models for estimating the reliability of the software of an onboard control system // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9, No. 5. P. 2357.
27. Дементьев А. Н., Ключев Д. С., Соколова Ю. В. Расчет входного сопротивления полоскового вибратора, конформно расположенного на диэлектрическом цилиндре // Радиотехника и электроника. 2017. № 11. С. 1061–1066.
28. Дементьев А. Н., Ключев Д. С., Шатров С. А. Интегральное уравнение для полосковой рамочной антенны, расположенной на диэлектрическом цилиндре // ДАН. 2016. Т. 466, № 3. С. 285–288.
29. Жуков А. О., Карцан И. Н. Перспективы повышения измерительной информации для определения параметров орбиты космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем ак. М. Ф. Решетнева. В 2-х ч. / Под ред Ю. Ю. Логинова. 2019. Ч. 1. С. 300–302.
30. Мухелишвили Н. И. Сингулярные интегральные уравнения. М. : Наука, 1986. 512 с.
31. Гахов Ф. Д. Краевые задачи. М. : Наука, 1977. 640 с.

## References

1. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. CRC Press. Taylor & Francis, 2009, 992 p.
2. Tie J. C., Smith D. R., Ruopeng Liu. Metamaterials: Theory, Design and Application. Springer, 2010, 376 p.
3. Kartsan I. N., Lokhnikov P. M., Tsvetkov Y. D. [Intellectualization of information search in corporate systems]. *Vestnik universitetskogo kompleksa*. 2006, No. 23, P. 141 (In Russ.).
4. Kartsan I. N. [The exceptions mistakes method of posit ion determination when navigation systems at the same time are used]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*. 2008, No. 3 (20), P. 101–103 (In Russ.).
5. Kartsan I. N., Zhukova E. S., Kartsan R. V. [Ballistic and time maintenance of space vehicles in various orbits]. *Proceedings of the tusur university*. 2012, No. 2-2 (26), P. 19–24 (In Russ.).

6. Terskov V. A., Sheyenok D. A., Kartsan I. N. [Genetic algorithm for optimizing the architecture of onboard software]. *Dependability*. 2014, No. 4 (51), P. 102–111 (In Russ.).
7. Kartsan I. N. [Labor costs for the development of on-board software]. *Academic science – problems and achievements*. 2014, P. 137.
8. Lindell I. V., Sihvola A. H., Tretyakov S. A., Viitanen A. J. *Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media*. London, Artech House, 1994, 291 p.
9. Neganov V. A., Osipov O. V. *Otrazhayushchiye, volnovodushchiye i izluchayushchiyestruktury s kiral'nymielementami* [Reflecting, waveguide and radiating structures with chiral elements]. Moscow, Radio i svyaz', 2006, 280 p.
10. Fateev Y. L., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N. et al. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, P. 012022.
11. Kartsan I. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. et al. Adaptation algorithms for satellite communication systems equipped with hybrid reflector antennas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, P. 012010.
12. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. [Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for GLONASS and GPS]. *In the collection: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings*. 2015, p. 7147246. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.
13. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. [Spatial filtering algorithms in adaptive multi-beam hybrid reflector antennas]. *In the collection: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings*. 2015, P. 7147244. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.
14. Malugin K. A., Neudakin A. A., Artyukh A. S. [Relevance of conformal antenna arrays for airborne radio systems]. *Vseros. nauch.-prakt. konf. "Innovatsii v aviatsionnykh kompleksakh sistemakh voyennogonaznacheniya"*. Sbstaty. Voronezh, 2009, P. 122–126 (In Russ.).
15. Ilyin E. M., Polubekhin A. I., Cherevko A. G. [Conformal antenna systems – a promising direction for the development of airborne radar complex UAVs]. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2015, No. 2, P. 149–155 (In Russ.).
16. Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V. et al. Simulation modeling of functional adaptive interference nulling for multibeam hybrid reflector antenna systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, P. 012017.
17. Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V. et al. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, P. 012020.
18. Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V. et al. Synthesis of an algorithm for interference immunity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, P. 012019.
19. Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V. et al. Simulation modeling of functional adaptive interference nulling for multibeam hybrid reflector antenna systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, P. 012017.
20. Saramud M. V., Zelenkov P. V., Kovalev I. V. et al. Development of methods for equivalent transformation of gert networks for application in multi-version software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, P. 012015.
21. Kisel N. N., Grishchenko S. G., Derachits D. S. [Study of Low Profile Conformal Microstrip Antennas]. *Izvestiya SFedU. ENGINEERING SCIENCES*. 2015, No. 3(164), P. 240–248 (In Russ.).
22. Dementiev A. N., Klyuev D. S., Neganov V. A., Sokolova Yu. V. *Singulyarnyye i gipersingulyarnyye integral'nyye uravneniya v teoriizerkal'nykh i poloskovykh anten* [Singular and hypersingular integral equations in the theory of mirror and strip antennas]. Moscow, Radiotekhnika, 2015, 216 p.
23. Labunko O. S. *Elektrodinamicheskiy analiz sistemy prodol'nykh elektricheskikh vibratorov v sloye magnitodielektrika na metallicheskom krugovom tsilindre. Kand. Dis.* [Electrodynamic

Analysis of a System of Longitudinal Electric Vibrators in a Magnetodielectric Layer on a Metal Circular Cylinder. Cand. Dis.]. Rostov-on-Don, 2004, 116 p.

24. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Efremova S. V. [Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array]. *Inthecollection: 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings*. 2017, P. 7998452. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.

25. Kartsan I. N. [Assessment of the resource potential of space systems]. *Sovremennyye problem radioelektroniki* [Inthecollection: Modern problems of radioelectronics]. Krasnoyarsk, 2017, P. 226–228 (In Russ.).

26. Kartsan I. N. [Models for estimating the reliability of the software of an onboard control system]. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018, Vol. 9, no. 5, P. 2357.

27. Dementiev A. N., Klyuev D. S., Sokolova Yu. V. [Calculation of the input resistance of a strip vibrator conformally located on a dielectric cylinder]. *Radiotekhnika i elektronika*. 2017, No. 11, P. 1061–1066 (In Russ.).

28. Dementiev A. N., Klyuev D. S., Shatrov S. A. [Integral equation for a strip coil antenna located on a dielectric cylinder]. *DAN*. 2016, Vol. 466, No. 3, P. 285–288 (In Russ.).

29. Zhukov A. O., Kartsan I. N. [Prospects for increasing the measurement information to determine the parameters of the spacecraft orbit]. *Materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2019, P. 300–302 (In Russ.).

30. Muskhelishvili N. I. *Singulyarnyye integral'nyye uravneniya* [Singular integral equations]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 512 p.

31. Gakhov F. D. *Krayevyye zadachi* [Boundary tasks]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 640 p.

© Дементьев А. Н., Куркин А. Н., Смирнов С. В., Арсеньев К. В., Жуков А. О., 2023

---

**Дементьев Андрей Николаевич** – доктор технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций; институт радиоэлектроники и информатики, РТУ МИРЭА. E-mail: dementev@mirea.ru.

**Куркин Александр Николаевич** – заместитель начальника отдела Департамента Министерства обороны РФ. E-mail: 02102005@mail.ru.

**Смирнов Сергей Владиславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций; институт радиоэлектроники и информатики, РТУ МИРЭА. E-mail: smirnov\_s@mirea.ru.

**Арсеньев Константин Владимирович** – специалист; Научно-исследовательский центр радиоэлектронных технологий РТУ МИРЭА. E-mail: arsenyev@mirea.ru.

**Жуков Александр Олегович** – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Аналитический центр»; ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт астрономии РАН». E-mail: aozhukov@mail.ru.

**Dementiev Andrey Nikolayevich** – Dr. Sc., Senior Researcher; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University". E-mail: dementev@mirea.ru.

**Kurkin Alexander Nikolayevich** – Department of the Ministry of Defense of the Russian Federation. E-mail: 02102005@mail.ru

**Smirnov Sergey Vladislavovich** – Cand. Sc., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University". E-mail: smirnov\_s@mirea.ru.

**Arseniev Konstantin Vladimirovich** – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University". E-mail: arsenyev@mirea.ru.

**Zhukov Aleksandr Olegovich** – Dr. Sc., Senior Researcher, professor, deputy scientific director, "Analytical Center"; leading researcher, Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. E-mail: aozhukov@mail.ru.

---