

**Исследование электромагнитных характеристик
кирального метаматериала на основе тонкопроволочных
идеально проводящих элементов в виде
взаимно ортогональных спиралей**

Д.С. Клюев, В.П. Кубанов, О.В. Осипов, А.О. Почепцов, Е.С. Резепова

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

В работе рассмотрено решение задачи об отражении плоской линейно поляризованной электромагнитной волны от планарного слоя из метаматериала, который представляет собой матрицу из тонкопроволочных идеально проводящих элементов в виде двух взаимно ортогональных спиралей. Для рассматриваемого метаматериала построена дисперсионная модель. Задача решалась методом частичных областей и ее решение было сведено к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов отражения и прохождения. В результате численного анализа были выявлены частотно селективные свойства исследуемого метаматериала. В частности, доказано, что на некоторых частотах структура является частотно селективным экраном для СВЧ-излучения.

Ключевые слова: киральная среда, метаматериал, метаструктура, защитный экран СВЧ, спиральный элемент, пространственная дисперсия, частотная селективность.

Введение

В настоящее время значительный интерес в СВЧ- и оптическом диапазонах представляет исследование различных типов метаматериалов, то есть структур, обладающих нестандартными (для естественных сред) свойствами, возникающими при их взаимодействии с падающим излучением [1]. В СВЧ-диапазоне метаматериалы представляют собой композитные структуры, состоящие из контейнера и размещенных в нем проводящих элементов. Особенный интерес представляют так называемые киральные метаматериалы, создаваемые на основе элементов зеркально асимметричной формы [2]. В роли подобных элементов могут выступать объемные и плоские спирали, S-элементы, гаммадионы, двойные разомкнутые кольца, элементы Телледжена и др. На основе киральных структур можно создавать частотно и поляризационно-селективные устройства СВЧ, преобразователи поляризации, малоотражающие покрытия, среды с отрицательным преломлением и др.

В 1948 г. Телледжен предположил, что можно создать новый вид материала, основанный на совокупности электрических и магнитных

диполей [3]. Простейшим элементом, обладающим указанным свойством, является разомкнутое кольцо с выступающими концами (элемент Телледжена, каноническая спираль). Известны результаты исследования дифракции плоских электромагнитных волн на элементах Телледжена (С.А. Третьяков, F. Mariotte) [4], цилиндрах с винтовой спиральной проводимостью (Б.З. Каценеленбаум, А.Д. Шатров и др.) [5], где показано, что в структурах в виде длинных спиралей малого по сравнению с длиной волны радиуса и решеток на их основе наблюдаются поляризационно селективные резонансные явления. В [6] подробно изучена возможность использования метаматериалов на основе тонкопроволочных идеально проводящих спиральных элементов для преобразования нормально падающего СВЧ-излучения заданной частоты в рассеяние в плоскости метаматериала.

В предлагаемой работе проведен анализ отражения плоской электромагнитной волны линейной поляризации от планарного слоя метаматериала, созданного на основе двойных взаимно-перпендикулярных тонкопроволочных спиральных элементов, а также построена дисперсионная модель такого метаматериала.

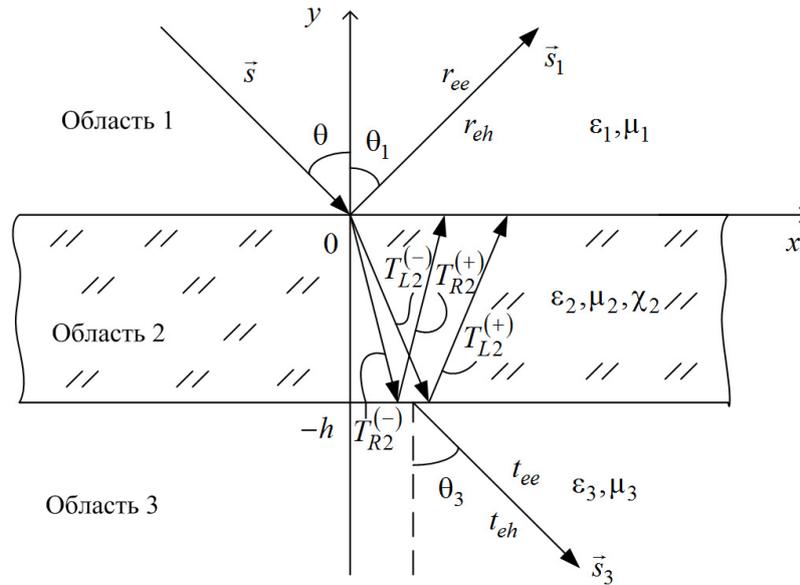


Рис. 1. Геометрия задачи

1. Задача об отражении волны от планарного метаматериала

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. 1. Пусть на киральный метаматериал из полубесконечной диэлектрической области 1 (ϵ_1 и μ_1 – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости) под углом θ падает плоская электромагнитная волна линейной перпендикулярной поляризации.

Область 2 на рис. 1 представляет собой планарный слой кирального метаматериала толщины h (ϵ_2 и μ_2 – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости; χ_2 – относительный параметр киральности). Частотные зависимости материальных параметров ϵ_2 и χ_2 определяются типом резонансных элементов и будут получены в следующем разделе данной статьи.

Киральный метаматериал состоит из двойных взаимноортогональных многовитковых тонкопроволочных спиралей, которые равномерно размещены в планарном контейнере (рис. 2). Совокупность двух взаимноортогональных спиралей будем называть объединенным спиральным элементом. Предполагается, что две спирали в объединенном могут обладать различными геометрическими параметрами и числом витков. В случае киральной среды предполагается, что элементы ориентируются произвольно в кон-

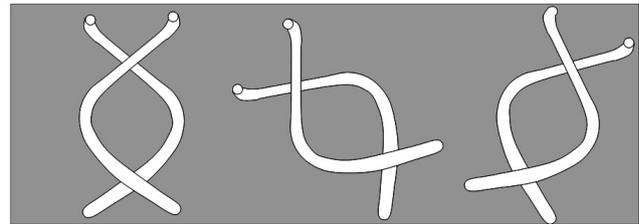


Рис. 2. Геометрия планарного слоя метаматериала

тейнере. Объединенные элементы равномерно расположены в контейнере на расстоянии d друг от друга. На рис. 2 для примера показан пример используемого объединенного спирального элемента.

Спирали в объединенном двойном элементе описываются следующими геометрическими параметрами: N_i – число витков; R_i – радиус витка спирали; h_i – шаг спирали; l_i – длина спирали в расправленном состоянии; r_i – радиус проволоки; $i = 1, 2$ – номер спирали в элементе.

Область 3 на рис. 1 представляет собой диэлектрик (ϵ_3 и μ_3 – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости).

Задача состоит в выводе соотношений для расчета коэффициентов отражения основной (r_{ee}) и кросс-поляризованной (r_{eh}) компонент поля в области 1, а также формул для коэффициентов прохождения основной (t_{ee}) и кросс-поляризованной (t_{eh}) компонент поля в области 3. Здесь уместно отметить, что при взаимодействии падающего СВЧ-излучения с киральной средой всегда возникает явление кросс-поляризации [7; 8], то есть в структуре отраженной и прошедшей волн возникают компоненты поля, ортогональные к компонентам падающей волны. В киральном

метаматериале распространяются две волны с право (ПКП) и левокруговыми (ЛКП) поляризациями [2; 7; 8].

Киральный метаматериал 2 описывается материальными уравнениями, одновременно связывающими между собой индукции и напряженности электрического и магнитного полей [2; 7; 8]:

$$\begin{aligned}\vec{D}^{(2)} &= \varepsilon_2(\omega) \vec{E}^{(2)} \mp i\chi_2(\omega) \vec{H}^{(2)}, \\ \vec{B}^{(2)} &= \mu_2 \vec{H}^{(2)} \pm i\chi_2(\omega) \vec{E}^{(2)},\end{aligned}\quad (1)$$

где верхние и нижние знаки соответствует спиральным элементам с право и левовинтовыми закрутками, соответственно. Материальные уравнения (1) записаны в Гауссовой системе единиц.

Электромагнитное поле в киральном метаматериале определяется из системы двух связанных дифференциальных уравнений 2-го порядка [9]:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E}^{(2)} + k_0^2 (\varepsilon_2 \mu_2 + \chi_2^2) \vec{E}^{(2)} - 2ik_0^2 \mu_2 \chi_2 \vec{H}^{(2)} &= 0; \\ \nabla^2 \vec{H}^{(2)} + k_0^2 (\varepsilon_2 \mu_2 + \chi_2^2) \vec{H}^{(2)} + 2ik_0^2 \varepsilon_2 \chi_2 \vec{E}^{(2)} &= 0,\end{aligned}\quad (2)$$

где $k_0 = \omega/c$ – волновое число для плоской однородной волны в свободном пространстве; ω – круговая частота; c – скорость электромагнитной волны в вакууме.

Система уравнений (2) при помощи стандартного представления в виде полей Бельтрами [2; 7]

$$\vec{E}^{(2)} = \vec{E}_R + \vec{E}_L; \quad \vec{H}^{(2)} = i\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} (\vec{E}_R - \vec{E}_L),\quad (3)$$

сводится к двум однородным уравнениям Гельмгольца для волн ПКП и ЛКП в киральном метаматериале:

$$\nabla^2 \vec{E}_{R,L} \pm k_{R,L}^2 \vec{E}_{R,L} = 0,\quad (4)$$

где \vec{E}_R – напряженность электрического поля волны ПКП; \vec{E}_L – напряженность электрического поля волны ЛКП; волновые числа для волн ПКП и ЛКП в безграничной киральной среде определяются следующим образом:

$$k_{R,L}(\omega) = \frac{\omega}{c} \left[\sqrt{\varepsilon_2(\omega) \mu_2} \pm \chi_2(\omega) \right],\quad (5)$$

Из решения уравнений (4) с использованием представлений (3) для продольных составляющих векторов поля в киральном метаматериале получаются следующие выражения [9]:

$$\begin{aligned}E_z^{(2)} &= T_R^{(-)} e^{-ik_R(\vec{s}_R, \vec{r})} + T_R^{(+)} e^{ik_R(\vec{s}_R, \vec{r})} + \\ &+ T_L^{(-)} e^{-ik_L(\vec{s}_L, \vec{r})} + T_L^{(+)} e^{ik_L(\vec{s}_L, \vec{r})}, \\ H_z^{(2)} &= \frac{i}{\eta_2} \left[T_R^{(-)} e^{-ik_R(\vec{s}_R, \vec{r})} + T_R^{(+)} e^{ik_R(\vec{s}_R, \vec{r})} - \right. \\ &\left. - T_L^{(-)} e^{-ik_L(\vec{s}_L, \vec{r})} - T_L^{(+)} e^{ik_L(\vec{s}_L, \vec{r})} \right],\end{aligned}\quad (6)$$

где $\vec{s}_{R,L}^{(-)} = \{\sin \theta_{R,L}, -\cos \theta_{R,L}\}$ – единичные вектора, вдоль которых распространяются преломленные волны в метаматериале 2; $\vec{s}_{R,L}^{(+)} = \{\sin \theta_{R,L}, \cos \theta_{R,L}\}$ – единичные вектора, вдоль которых распространяются волны, отраженные от области 3; $\theta_{R,L}$ – углы преломления волн ПКП и ЛКП, соответственно; $\eta^{(2)} = \sqrt{\mu_2/\varepsilon_2}$ – характеристическое сопротивление кирального метаматериала; $T_R^{(-)}$ и $T_L^{(-)}$ – коэффициенты прохождения (по полю) волн ПКП и ЛКП в метаматериал 2; $T_R^{(+)}$ и $T_L^{(+)}$ – коэффициенты отражения (по полю) волн ПКП и ЛКП от области 3 в киральный слой.

Явные выражения для всех тангенциальных составляющих векторов $\vec{E}^{(2)}$ и $\vec{H}^{(2)}$ в киральной среде приведены в [9].

Для случая падения плоской электромагнитной волны с перпендикулярной поляризацией для составляющих поля в диэлектрической области 1 справедливы следующие выражения, записанные с учетом кросс-поляризации:

$$\begin{aligned}E_z^{(1)} &= e^{-ik_1(\vec{s}_r, \vec{r})} + r_{ee} e^{-ik_1(\vec{s}_r, \vec{r})}; \\ H_x^{(1)} &= -\frac{\cos \theta}{\eta^{(1)}} e^{-ik_1(\vec{s}_r, \vec{r})} + r_{ee} \frac{\cos \theta}{\eta^{(1)}} e^{-ik_1(\vec{s}_r, \vec{r})}; \\ H_z^{(1)} &= r_{eh} e^{-ik_1(\vec{s}_r, \vec{r})}; \\ E_x^{(1)} &= -r_{eh} \eta^{(1)} \cos \theta e^{-ik_1(\vec{s}_r, \vec{r})},\end{aligned}\quad (7)$$

где $\vec{s}_r = \{\sin \theta, \cos \theta\}$ – единичный вектор, определяющий направление распространения отраженной волны в области 1; r_{ee} – коэффициент отражения (по полю) основной компоненты; r_{eh} – коэффициент отражения (по полю) кросс-поляризованной компоненты; $k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$ – волновое число для плоской однородной волны в области 1. При решении задачи предполагается, что на киральный слой падает волна с единичной амплитудой напряженности электрического поля; $\eta^{(1)} = \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1}$ – характеристическое сопротивление области 1

Для составляющих векторов электромагнитного поля в области 3 с учетом кросс-поляризации можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned}E_z^{(3)} &= t_{ee} e^{-ik_3(\vec{s}_3, \vec{r})}; \\ H_z^{(3)} &= t_{eh} e^{-ik_3(\vec{s}_3, \vec{r})}; \\ E_x^{(3)} &= t_{eh} \eta^{(3)} \cos \theta_3 e^{-ik_3(\vec{s}_3, \vec{r})}; \\ H_x^{(3)} &= -t_{ee} \frac{\cos \theta_3}{\eta^{(3)}} e^{-ik_3(\vec{s}_3, \vec{r})},\end{aligned}\quad (8)$$

где $\vec{s}_3 = \{\sin \theta_3, -\cos \theta_3\}$ – единичный вектор, определяющий направление распространения

прошедшей волны в области 3; t_{ee} – коэффициент прохождения (по полю) основной компоненты; t_{eh} – коэффициент прохождения (по полю) кросс-поляризованной компоненты; $\eta^{(3)} = \sqrt{\mu_3/\epsilon_3}$ – характеристическое сопротивление области 3; $k_3 = k_0\sqrt{\epsilon_3\mu_3}$ – волновое число для плоской однородной волны в области 3.

На последнем этапе решения задачи используются граничные условия для тангенциальных составляющих векторов напряженностей электрического и магнитного полей на границах раздела при $y = 0$ и $y = -h$:

$$\begin{aligned} \vec{E}_\tau^{(1)}(y=0) &= \vec{E}_\tau^{(2)}(y=0); \\ \vec{H}_\tau^{(1)}(y=0) &= \vec{H}_\tau^{(1)}(y=0); \\ \vec{E}_\tau^{(2)}(y=-h) &= \vec{E}_\tau^{(3)}(y=-h); \\ \vec{H}_\tau^{(2)}(y=-h) &= \vec{H}_\tau^{(3)}(y=-h). \end{aligned} \quad (9)$$

В результате подстановки выражений (6), (7) и (8) в граничные условия (9) относительно неизвестных коэффициентов отражения и прохождения получаем неоднородную систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида:

$$\vec{A}\vec{T} = \vec{P}, \quad (10)$$

где \vec{A} – квадратная матрица размером 8×8 , явный вид элементов которой в статье не приводится в силу их громоздкости;

$$\begin{aligned} \vec{T} &= \\ &= [r_{ee} \quad r_{eh} \quad T_R^{(+)} \quad T_R^{(-)} \quad T_L^{(+)} \quad T_L^{(-)} \quad t_{ee} \quad t_{eh}]; \\ \vec{P} &= [0 \quad -1 \quad \cos\theta_1/\eta^{(1)} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]. \end{aligned}$$

Коэффициенты матрицы \vec{A} определяются геометрическими параметрами контейнера и объединенных спиральных элементов; материальными параметрами кирального метаматериала и областей 1 и 3.

Аналогичным образом рассматривается случай падения волны с параллельной поляризацией и решение задачи сводится к СЛАУ (10) с другими коэффициентами матрицы \vec{A} и вектор-столбцом \vec{P} .

2. Дисперсионная модель метаматериала на основе объединенных спиральных элементов

Рассмотрим киральный метаматериал на основе объединенных спиральных элементов (рис. 3). Каждый из двух подэлементов объединенного элемента представляет собой тонкопроволочную проводящую спираль, состоящую из N витков.

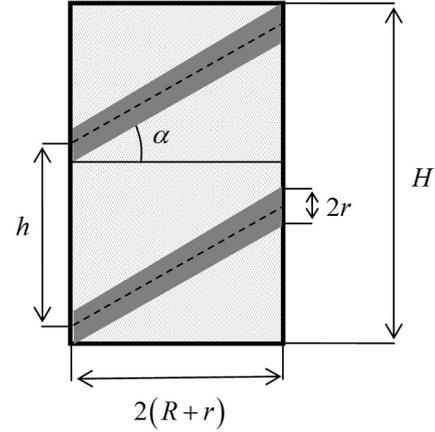


Рис. 3. Поперечное сечение одной спирали из объединенного элемента

Обозначим: N_i – число витков; R_i – радиус витка спирали; h_i – шаг спирали; l_i – длина спирали в расправленном состоянии; r_i – радиус проволоки; α_i – угол накрутки спирали.

Для расчета резонансной частоты объединенного элемента воспользуемся формулой Томсона:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (11)$$

где L – индуктивность объединенного элемента; C – емкость объединенного элемента.

Индуктивность и емкость объединенного элемента определяются через соответствующие характеристики одиночных спиралей следующим образом:

$$C = C_1 + C_2; \quad L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}, \quad (12)$$

где L_i – индуктивность одной из спиралей; C_i – емкость одной из спиралей ($i = 1, 2$).

Емкость одной спирали определяется следующим образом:

$$C_i = C_{nr\ i} + C_{mv\ i} + C_{m\alpha\ i}, \quad (13)$$

то есть в виде суммы емкости проволоки, межвитковой емкости и межэлементной емкости и в итоге выражается следующим образом:

$$C_i = \epsilon_{c2} \left[\frac{l_i}{18 \ln \left(\frac{2l_i}{r_i} \right) - 1} \cdot 10^{-11} + \frac{\pi [(R_i + 2r_i)^2 - R_i^2] (N_i - 1)}{h_i} + \frac{1}{d} \frac{N_i (R_i + r_i)}{\cos \alpha_i} r_i \right]. \quad (14)$$

Индуктивность одной спирали вычисляется по формуле:

$$L_i = \mu_{c2} \frac{\pi N_i^2 R_i^2}{l_i}. \quad (15)$$

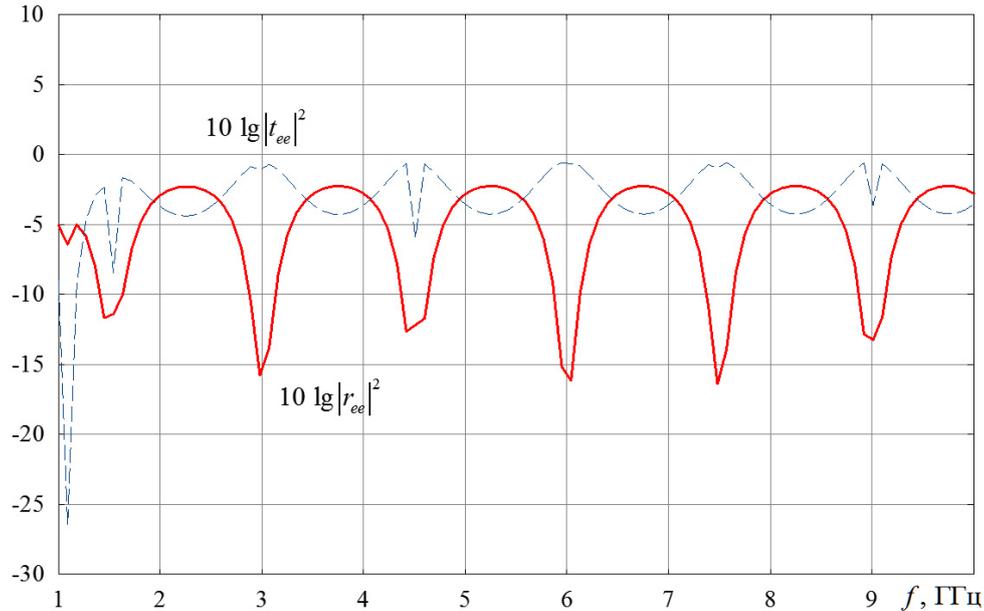


Рис. 4. Частотные зависимости прошедшей и отраженной мощностей для случая идентичных спиралей в объединенном элементе

В формулах (14) и (15) ϵ_{c2} , μ_{c2} — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости контейнера.

Подставляя соотношения (14), (15) в (12), а затем в (11) получаем формулу для резонансной частоты объединенного элемента.

Дисперсия диэлектрической проницаемости и параметра киральности определяются следующими выражениями [10]:

$$\begin{aligned} \epsilon_2(\omega) &= \epsilon_{c2} + \frac{\beta_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}; \\ \chi_2(\omega) &= A_0 \frac{\beta_0^2 \omega}{c(\omega_0^2 - \omega^2)}, \end{aligned} \quad (16)$$

где A_0 и β_0 — параметры, определяемые размерами объединенных элементов и расстоянием между ними, соответственно.

Подставляя в формулы (16) выражение для резонансной частоты объединенного элемента (11), получаем дисперсионные соотношения для диэлектрической проницаемости и относительного параметра киральности метаматериала на основе тонкопроволочных идеально проводящих элементов в виде взаимно ортогональных спиралей.

3. Численные результаты

При анализе численных характеристик основной интерес представлял расчет частотных зависимостей отраженной ($10 \lg|r_{ee}|^2$ и $10 \lg|r_{eh}|^2$) и прошедшей ($10 \lg|t_{ee}|^2$ и $10 \lg|t_{eh}|^2$) мощностей

(в дБ). Контейнер моделировался на основе пенополистирола С-35 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{c2} = 1.5$.

На рис. 4 представлены частотные зависимости отраженной и прошедшей мощностей основной и кросс-поляризованной компонент поля в диапазоне от 1 до 10 ГГц. Штриховыми кривыми на рис. 4 показаны зависимости прошедшей мощности основной компоненты ($10 \lg|t_{ee}|^2$); сплошными линиями — отраженной мощности основной компоненты ($10 \lg|r_{ee}|^2$). 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 компонент 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, то есть 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 нее проходит практически без ослабления (вблизи 0 дБ).

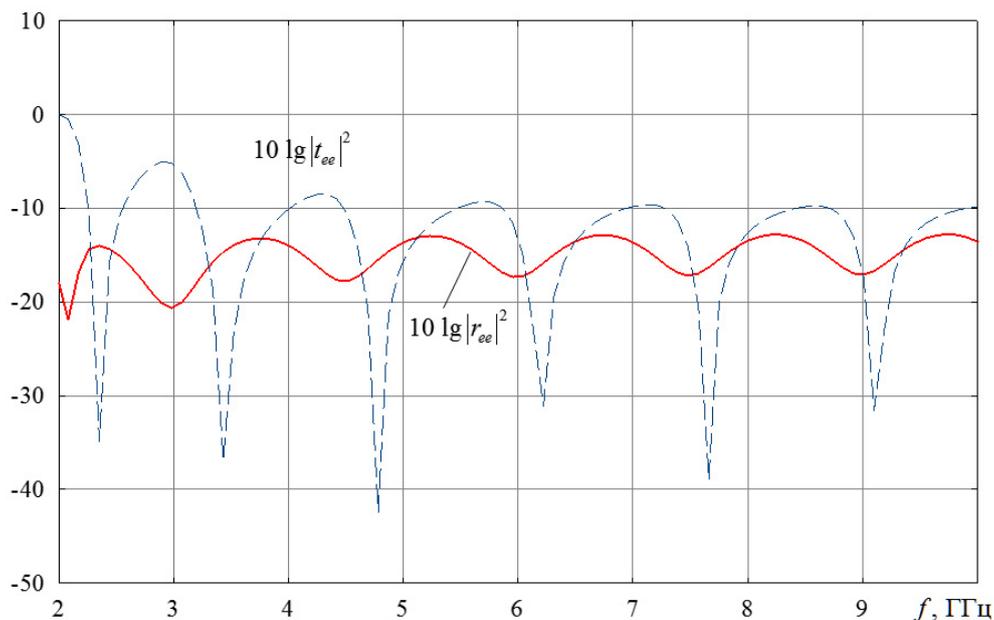


Рис. 5. Частотные зависимости прошедшей и отраженной мощностей для случая неидентичных спиралей в объединенном элементе

Можно отметить, что исследуемая метаструктура на одной частоте может выполнять роль частотно-селективного защитного экрана, не прозрачного для излучения вблизи основной резонансной частоты.

Рассмотрим теперь случай различных по значениям геометрических параметров спиралей в структуре объединенного элемента.

На рис. 5 представлены частотные зависимости отраженной и прошедшей мощностей основной и кросс-поляризованной компонент поля в диапазоне от 1 до 10 ГГц. Штриховыми кривыми на рис. 4 показаны зависимости прошедшей мощности основной компоненты ($10 \lg |t_{ee}|^2$); сплошными линиями — отраженной мощности основной компоненты ($10 \lg |r_{ee}|^2$). Падение волны на метаструктуру считалось нормальным. Расчет был выполнен при следующих значениях параметров структуры: $R_1 = 2R_2 = 0.01$ 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, в случае несимметричного двойного спирального элемента возникает резкая частотная селективность прохождения электромагнитного излучения через метаматериал. В отличие от симметричного двойного спирального элемента здесь возникает сильная киральность и, как следствие, возникает набор дискретных частот, на которых электромагнитная волна через метаматериал не проходит и преобразуется в боковое рассеяние. Также можно отметить, что в этом случае отражение

и прохождение кросс поляризованных компонент поля так же возрастает до -15 – -18 дБ. Кроме того, отсутствуют частоты, начиная с 2 ГГц, на которых уровень ослабления прохождения основной компоненты поля близок 0 дБ, что связано с ростом кросс поляризации. На резонансных частотах структура может играть роль защитного экрана СВЧ.

Также было доказано, что исследуемая метаструктура по свойствам является эквивалентной естественному кристаллу (или искусственной брэгговской решетке) в оптическом диапазоне, а именно частоты резонансных минимумов ослабления прошедшей мощности основной компоненты поля вычисляются из условия Вульфа-Брэгга с учетом преломления электронных волн в кристалле [11]:

$$2d\sqrt{(\epsilon_2\mu_2 - \chi_2^2) - \cos^2\theta} = v\lambda, \quad (17)$$

где v — порядок резонанса; λ — длина волны; θ — угол падения волны.

Заключение

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Наличие двух идентичных тонкопроволочных спиралей в объединенном элементе сводит эффект киральности и, как следствие, частотной селективности всего метаматериала практически до нуля.
2. Наличие двух различных по геометрическим размерам спиралей в объединенном эле-

менте увеличивает степень киральности всего метаматериала в целом и возникают частотная селективность прохождения плоской электромагнитной волны через метаматериал и достаточно большая кросс-поляризация поля.

3. Исследуемая метаструктура в случае различных спиралей в объединенном элементе по свойствам является эквивалентной естественному кристаллу (или искусственной брэгговской решетке) в оптическом диапазоне.

4. Метаструктура в случае различных спиралей в объединенном элементе может выполнять роль частотно селективного защитного экрана СВЧ.

Список литературы

1. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. Boca Raton: Taylor & Francis – CRC Press, 2009. 992 p.
2. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media / I.V. Lindell [et al.]. London: Artech House, 1994. 291 p.
3. Tellegen B.D.H. The gyrator, a new electric network element // Philips Research Reports. 1948. V. 3. № 81. P. 81–101.
4. Tretyakov S.A., Mariotte F. Maxwell Garnett modeling of uniaxial chiral composites with bianisotropic inclusions // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 1995. V. 9. № 7/8. P. 1011–1025.
5. Киральные электродинамические объекты / Б.З. Каценленбаум [и др.] // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 11. С. 1201–1212.
6. Осипов О.В., Плотников А.М., Салимова Н.Р. Использование эффекта азимутального рассеяния электромагнитных волн метаструктурой на основе элементов Телледжена в прикладных задачах электродинамики // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10. № 1. С. 8–15.
7. Третьяков С.А. Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 10. С. 1457–1470.
8. Lakhtakia A., Varadan V.K., Varadan V.V. Time-Harmonic Electromagnetic Fields in Chiral Media. Lecture Notes in Physics. Berlin; Boston: Heidelberg; Springer-Verlag, 1989. 121 p.
9. Неганов В.А., Осипов О.В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
10. Semchenko I.V., Tretyakov S.A., Serdyukov A.N. Research on chiral and bianisotropic media in Byelorussia and Russia in the last ten years // Progress in Electromagnetics Research. 1996. V. 12. P. 335–370.
11. Bragg W.L. The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1914. V. 17. P. 43.

Research of electromagnetic characteristics of chiral metamaterial based on the thin-wire perfectly conducting elements consisting of mutually orthogonal helices

D.S. Klyuev, V.P. Kubanov, O.V. Osipov, A.O. Pochepcov, E.S. Rezepova

The paper considers the solution of the problem of plane linearly polarized electromagnetic waves reflection from a planar metamaterial layer consisting of thin-wire perfectly conducting two mutually orthogonal helices matrix. The dispersion model is built for considered metamaterial. The problem was solved by the partial areas method and solution was reduced to a linear algebraic equations system for the unknown reflection and transmission coefficients. The frequency selective investigated metamaterial properties were identified as a numerical analysis result. In particular, it is proved that the metastructure is a frequency selective screen for microwave radiation at some frequencies.

Keywords: chiral media, metamaterial, metastructure, microwave shield, helices, spatial dispersion, the frequency selectivity.
