

УДК 621.396

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРНЫХ СПИРАЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЛАБОУТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

THE USE OF PAIR HELICES OF THE OPTIMUM FORM FOR CREATION OF WEAK REFLECTING COATINGS IN THE UHF RANGE

I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov

F. Scorina Gomel State University, Gomel

Проведено исследование взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с двумерной решеткой, состоящей из взаимно ортогональных пар спиралей, содержащих левосторонние и правосторонние одновитковые или двухвитковые спиральные элементы с предварительно рассчитанными оптимальными параметрами. Полученные искусственные структуры обладают одинаково значимыми диэлектрическими и магнитными свойствами и компенсированной киральностью. Целью исследования является демонстрация того, что такие структуры могут применяться для создания слабоотражающих покрытий.

Ключевые слова: безотражательные покрытия, композитные среды, киральность, электрический дипольный момент, магнитный момент.

Research of interaction of electromagnetic radiation of the UHF (ultra high frequency) range with the bi-dimensional lattice consisting of mutually orthogonal pairs of helices, containing left-handed and right-handed one-turn or double-turn helical elements with precalculated optimum parameters is carried out. The obtained artificial structures possess equally significant dielectric and magnetic properties and compensated chirality. The purpose of the research is demonstration of the possibility to use such structures for creation of weak reflecting coatings.

Keywords: nonreflecting coatings, composite media, chirality, the electric dipole moment, the magnetic moment.

Введение

Искусственные композитные среды, обладающие киральными свойствами в микроволновом диапазоне, активно исследовались в течение последних пятнадцати лет [1]–[7]. Основным мотивом исследований было предположение, что на основе искусственных киральных материалов могут быть созданы безотражательные покрытия металлических поверхностей. Исследования возможного использования искусственных киральных материалов для уменьшения отражения электромагнитных волн проводились во многих статьях [2]–[5].

Однако в работе [7] сделан вывод о том, что киральность не является существенным свойством при создании безотражательных покрытий. Достичь существенного снижения интенсивности отраженных электромагнитных волн на определенной частоте можно также с помощью некиральных поглощающих слоев. Авторы работы [7] пришли к такому выводу в результате расчета рассеяния электромагнитных волн на металлических спиральных в диэлектрической среде.

Безотражательную среду можно создать искусственно, поместив парные металлические проволочные включения спиральной формы с правой и левой намоткой в диэлектрический материал.

В качестве элементов искусственных структур выбраны спирали, поскольку они характеризуются одновременно диэлектрической и магнитной восприимчивостью. Сочетание диэлектрических и магнитных свойств и, более того, их одинаковая значимость является необходимым условием создания безотражательных покрытий. Однако каждая спираль характеризуется также магнитоэлектрической восприимчивостью, поскольку не обладает зеркальной симметрией и проявляет киральные свойства.

Если киральные свойства будут присущи образцу в целом, то это может вызвать поляризационную селективность искусственного материала. Другими словами, образец может проявлять разные свойства по отношению к волнам с правой и левой циркулярной поляризацией, что может повлечь за собой ухудшение безотражательных свойств. Следовательно, киральные свойства искусственного образца должны быть скомпенсированы.

С этой целью мы предлагаем использовать пары, состоящие из правой и левой спирали с оптимальными параметрами. В результате искусственный материал приобретает равнозначные диэлектрические и магнитные свойства и в то же время не является киральным.

Пары спиралей ориентированы в плоскости искусственного образца во взаимно перпендику-

лярных направлениях. Это позволяет достичь одинаковых свойств образца по отношению к волне с произвольной поляризацией в случае нормального падения волны (рисунок 1).

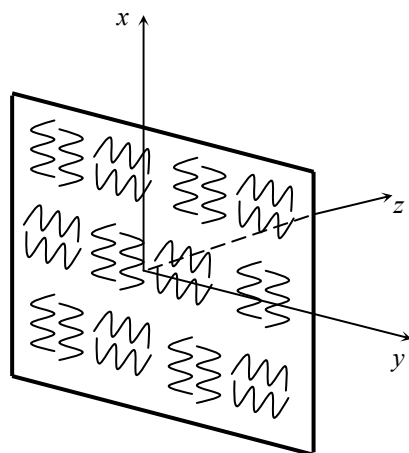


Рисунок 1

1 Анализ взаимодействия электрического и магнитного поля с парой спиралей при различной ориентации плоскости поляризации падающей волны

Характеристики электромагнитного излучения, рассеянного на спиральном элементе, зависят от соотношения геометрических размеров спирали и длины волны. Рассмотрим случай, когда линейные геометрические размеры спирали много меньше длины падающей волны, что позволяет применить дипольное приближение теории излучения [8].

Для этого случая найдем электрический дипольный и магнитный моменты спирали. Одновременное возникновение в каждом спиральном элементе не только электрического дипольного, но и магнитного моментов, связанных между собой и индуцированных внешним полем, является главным условием проявления гиротропных свойств такой структуры.

Необходимо вычислить все компоненты электрического дипольного момента и магнитного момента спирали, такие расчеты были нами проделаны в работах [9]–[10].

Рассмотрим действие электрического поля \vec{E} , осциллирующего вдоль оси ox (рисунок 2, расширяющаяся часть витка – ближняя к читателю). Обозначим суммарный электрический дипольный момент, возникающий в паре спиралей, как \vec{p} . Соответственно \vec{m} – суммарный магнитный момент, индуцированный в паре спиралей.

Для такой пары вертикально расположенных спиралей справедливо соотношение:

- 1) $p_x \neq 0, m_x = 0$ – так как в паре есть правая и левая спираль;
- 2) $p_y = 0, m_y = 0$ – поскольку ток и заряды распределены симметрично относительно центра каждой спирали;

3) $p_z \neq 0$ – но эта составляющая момента не будет давать вклада в волну, распространяющуюся вдоль оси z или навстречу оси z , то есть в прошедшую и отраженную волны; $m_z = 0$, так как в паре есть правая и левая спирали, в которых магнитные моменты взаимно компенсируются.

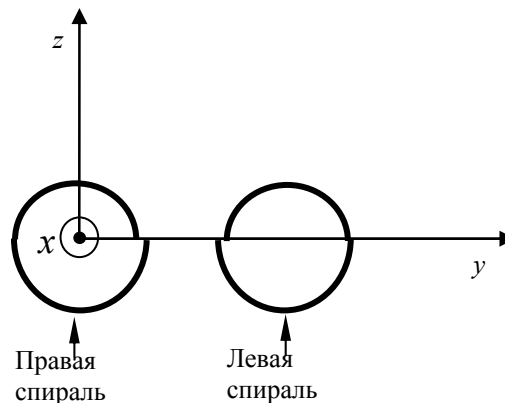


Рисунок 2

Рассмотрим воздействие на пару горизонтально расположенных спиралей электрического поля \vec{E} , осциллирующего вдоль оси oy (рисунок 3, расширяющаяся часть витка – ближняя к читателю).

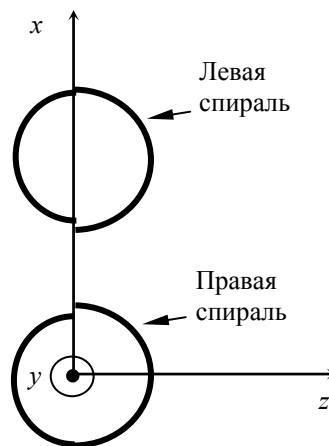


Рисунок 3

Рассуждая аналогично, для такой пары горизонтально расположенных спиралей можно записать:

- 1) $p_y \neq 0, m_y = 0$;
- 2) $p_x = 0, m_x = 0$;
- 3) $p_z \neq 0$.

Теперь рассмотрим влияние магнитного поля \vec{B} , ориентированного в обоих случаях вдоль осей спиралей.

Для горизонтально расположенных спиралей (\vec{B} колеблется вдоль оси oy) имеют место соотношения:

- 1) $m_y \neq 0, p_y = 0$;
- 2) $m_x = 0, p_x = 0$;
- 3) $m_z \neq 0, p_z = 0$.

Используя прежнюю аргументацию для вертикально расположенных спиралей (\vec{B} осциллирует вдоль оси ox) получаем:

- 1) $m_x \neq 0, p_x = 0;$
- 2) $m_y = 0, p_y = 0;$
- 3) $m_z \neq 0, p_z = 0.$

В дипольном приближении напряженность электрического поля излучаемой волны имеет вид [8]:

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi R} \left(\left[\ddot{\vec{p}} \vec{n} \right] \vec{n} + \frac{1}{c} \left[\vec{n} \ddot{\vec{m}} \right] \right), \quad (1.1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, c – скорость света в вакууме, \vec{R} – радиус-вектор, проведенный от спирали в точку наблюдения, \vec{n} – единичный вектор волновой нормали, точки над векторами означают дифференцирование по времени.

Рассмотрим падающую электромагнитную волну, ориентация векторов которой показана на рисунке 4 (индекс i означает падающую волну).

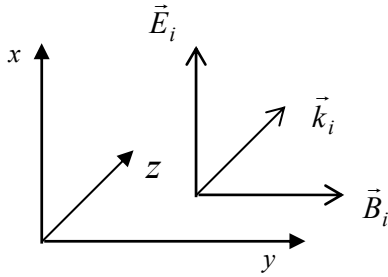


Рисунок 4

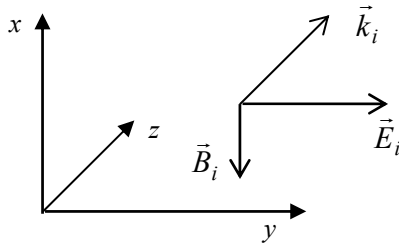


Рисунок 5

Вектор \vec{E}_i создает электрические дипольные моменты в вертикальных спиралах, вектор \vec{B}_i индуцирует ток в горизонтальных спиралах, следовательно, в них возникают магнитные моменты.

Поскольку все спиралы оптимальные, то в них возникают одинаково значимые электрические дипольные и магнитные моменты:

$$|p_x| = \frac{1}{c} |m_y|. \quad (1.2)$$

Это соотношение было получено нами ранее в работах [9]–[10].

Если повернуть плоскость поляризации падающей волны на 90° (рисунок 5), то соотношение (1.2) принимает вид:

$$|p_y| = \frac{1}{c} |m_x|. \quad (1.3)$$

Теперь рассмотрим отраженную волну: $\vec{n} = -\vec{z}_0$, \vec{z}_0 – единичный вектор вдоль оси z (\vec{x}_0, \vec{y}_0 – векторы вдоль осей x и y).

Индукцированные моменты можно представить в комплексной форме

$$\vec{p} = \vec{p}_0 e^{-i\omega t}, \quad \vec{m} = \vec{m}_0 e^{-i\omega t}, \quad (1.4)$$

где ω – циклическая частота волны.

Используя (1.1), вычислим электрическое поле отраженной волны, созданное электрическим дипольным моментом (индекс r означает отраженную волну):

$$\begin{aligned} \vec{E}_p^{(r)} &= \frac{\mu_0}{4\pi R} \left[\left[\ddot{\vec{p}} \vec{n} \right] \vec{n} \right] = -\frac{\mu_0}{4\pi R} \omega^2 \left[\left[\vec{p} \vec{n} \right] \vec{n} \right] = \\ &= -\frac{\mu_0}{4\pi R} \omega^2 \left[\left[p_x \vec{x}_0, (-\vec{z}_0) \right] - \vec{z}_0 \right] = \\ &= -\frac{\mu_0}{4\pi R} \omega^2 \left[-p_x \vec{y}_0, \vec{z}_0 \right] = \frac{\mu_0}{4\pi R} \omega^2 p_x \vec{x}_0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь $p_x \vec{x}_0 = \vec{p}_0 e^{-i\omega t}$ – электрический дипольный момент пары спиралей, $m_y \vec{y}_0 = \vec{m}_0 e^{-i\omega t}$ – магнитный момент пары спиралей.

Аналогично вычисляем электрическое поле отраженной волны, созданное магнитным моментом:

$$\begin{aligned} \vec{E}_m^{(r)} &= \frac{\mu_0}{4\pi R} \frac{1}{c} \left[\vec{n} \ddot{\vec{m}} \right] = -\frac{\mu_0}{4\pi R} \frac{\omega^2}{c} \left[-\vec{z}_0, \vec{m} \right] = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi R} \frac{\omega^2}{c} \left[\vec{z}_0, m_y \vec{y}_0 \right] = -\frac{\mu_0}{4\pi R} \frac{\omega^2}{c} m_y \vec{x}_0. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Складывая выражения (1.5) и (1.6), получаем для отраженной волны:

$$\begin{aligned} \vec{E}^{(r)} &= \vec{E}_p^{(r)} + \vec{E}_m^{(r)} = \frac{\mu_0}{4\pi R} \omega^2 \vec{x}_0 \left(p_x - \frac{m_y}{c} \right) = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi R} \omega^2 \vec{x}_0 \left(|p_x| - \frac{|m_y|}{c} \right) \cdot e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Следовательно,

$$\vec{E}^{(r)} = \vec{E}_p^{(r)} + \vec{E}_m^{(r)} = 0, \quad (1.8)$$

если выполняется условие оптимальности спиралей (1.2).

Рассмотрим другую ориентацию поляризации падающей волны (рисунок 5). Теперь $\vec{p} = p_y \vec{y}_0$, $\vec{m} = m_x \vec{x}_0$. Выполняя аналогичные вычисления, получаем

$$\vec{E}^{(r)} = \vec{E}_p^{(r)} + \vec{E}_m^{(r)} = 0 \quad (1.9)$$

в случае оптимальных спиралей, для которых верно условие (1.3).

Следовательно, для любой элементарной ячейки состоящей из двух пар спиралей, которые

являются взаимно ортогональными, выполняют соотношения (1.8) и (1.9).

Поскольку спирали имеют оптимальную форму, то соотношения (1.2) и (1.3) выполняются вблизи резонансной частоты при любой ориентации плоскости поляризации падающей волны. Это обеспечивает отсутствие отраженной волны в случае нормального падения.

Рассматривая решетку в целом, на основании (1.2) и (1.3) получаем соотношение для диэлектрической и магнитной проницаемости структуры

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \mu_{xx} = \mu_{yy}, \quad (1.10)$$

которое будет выполняться вблизи резонансной частоты.

Таким образом, искусственная структура проявляет одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства.

2 Сравнительный анализ отражения и прохождения электромагнитных волн при их взаимодействии с различными решетками на основе парных спиралей оптимальной формы

Для проведения экспериментальных исследований изготовлен ряд искусственных образцов двумерных решеток, состоящих из различного числа взаимно ортогональных пар спиралей, содержащих левосторонние и правосторонние одновитковые или двухвитковые спиральные элементы.

Одновитковые спирали обладают параметрами: $N_e = 1$, $\alpha = 13,6^\circ$, $L = 0,05$ м, $r = 7,75 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 0,012$ м, $d = 1 \cdot 10^{-3}$ м; двухвитковые – $N_e = 2$, $\alpha = 7,1^\circ$, $L = 0,05$ м, $r = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 3,1 \cdot 10^{-3}$ м, $d = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, где N_e – число витков спирали, α – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали, L – длина проволоки, из которой изготовлена спираль, r – радиус витка, h – шаг спирали, d – диаметр проволоки.

Для простоты проведения сравнительного анализа проведем нумерацию образцов:

№ 1 – образец двумерной решетки, состоящей из 81 (9x9) взаимно ортогональной пары спиралей, содержащей левосторонние и правосторонние одновитковые спиральные элементы, с расстоянием между парами 5 см;

№ 2 – образец двумерной решетки, состоящей из 144 (12x12) взаимно ортогональных пар одновитковых спиралей, с расстоянием между парами 3,5 см (рисунок 6);

№ 3 – образец двумерной решетки, состоящей из 81 (9x9) взаимно ортогональной пары двухвитковых спиралей, с расстоянием между парами 5 см;

№ 4 – образец двумерной решетки, состоящей из 169 (13x13) взаимно ортогональных пар двухвитковых спиралей, с расстоянием между парами 3 см;

№ 5 – образец двумерной решетки, состоящей из 196 (14x14) взаимно ортогональных пар двухвитковых спиралей, с расстоянием между парами 3 см (рисунок 7);

№ 6 – образец двумерной решетки, состоящей из парных линейных вибраторов длиной 5 см и с расстоянием между парами 6 см (рисунок 8).

Результаты экспериментальных исследований с данными образцами приведены на графиках (рисунки 9–14).

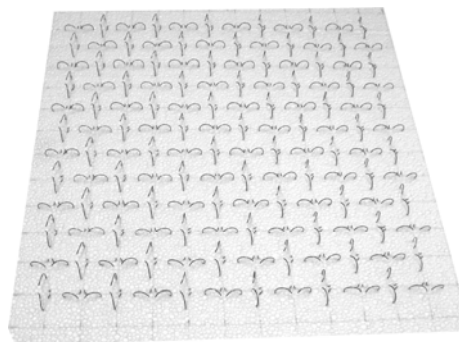


Рисунок 6 – Образец № 2

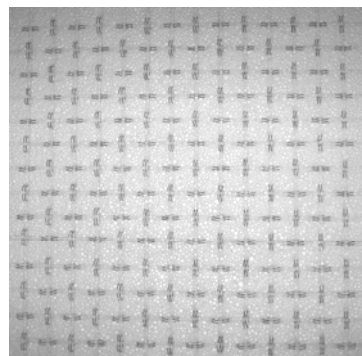


Рисунок 7 – Образец № 5

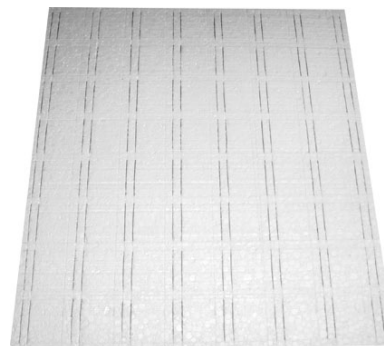


Рисунок 8 – Образец № 6

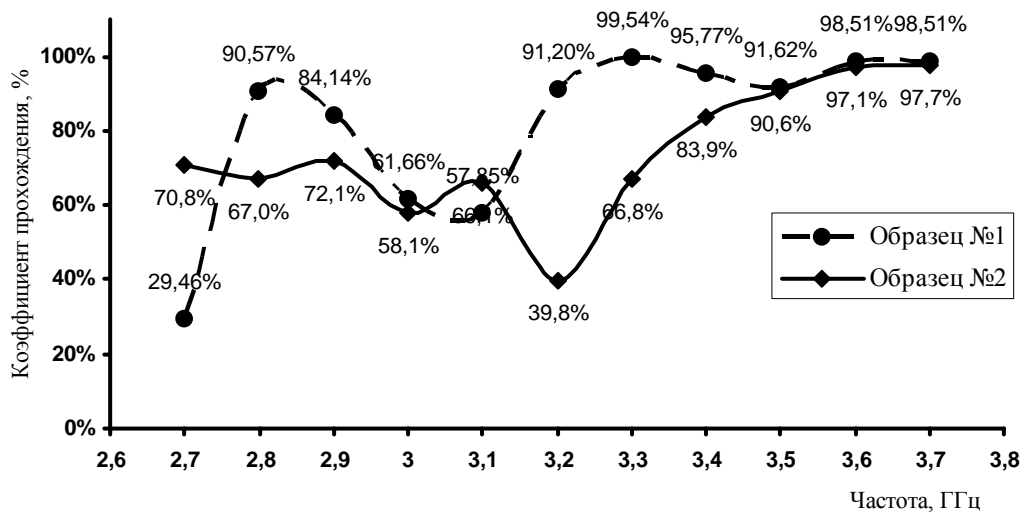


Рисунок 9 – Частотная зависимость коэффициента прохождения электромагнитной волны при взаимодействии с образцами № 1–2 на основе одновитковых спиралей

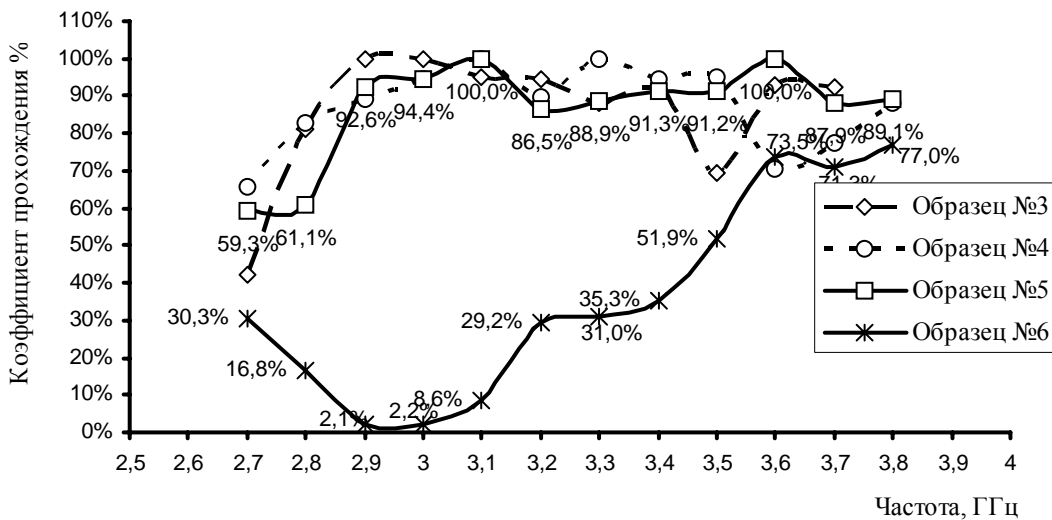


Рисунок 10 – Частотная зависимость коэффициента прохождения электромагнитной волны при взаимодействии с образцами № 3–6 на основе двухвитковых спиралей и линейных вибраторов

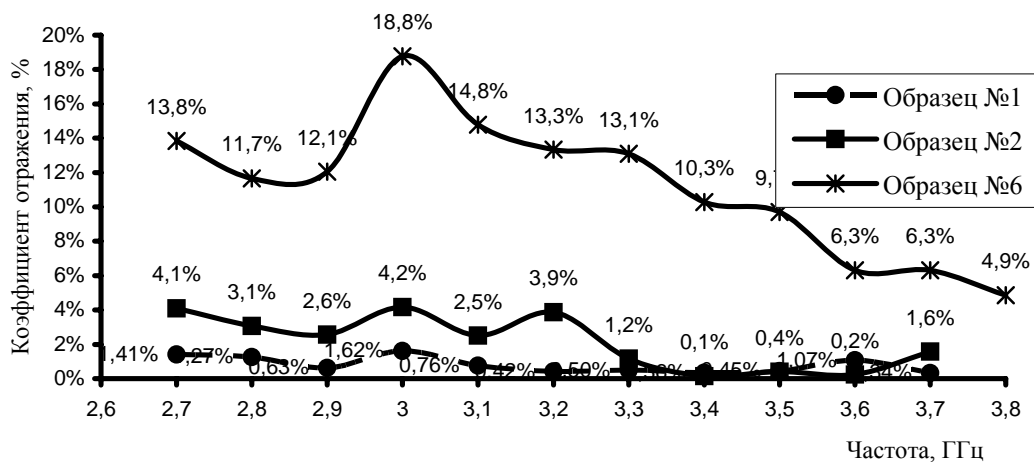


Рисунок 11 – Частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны при взаимодействии с образцами № 1, 2, 6 на основе одновитковых спиралей и линейных вибраторов

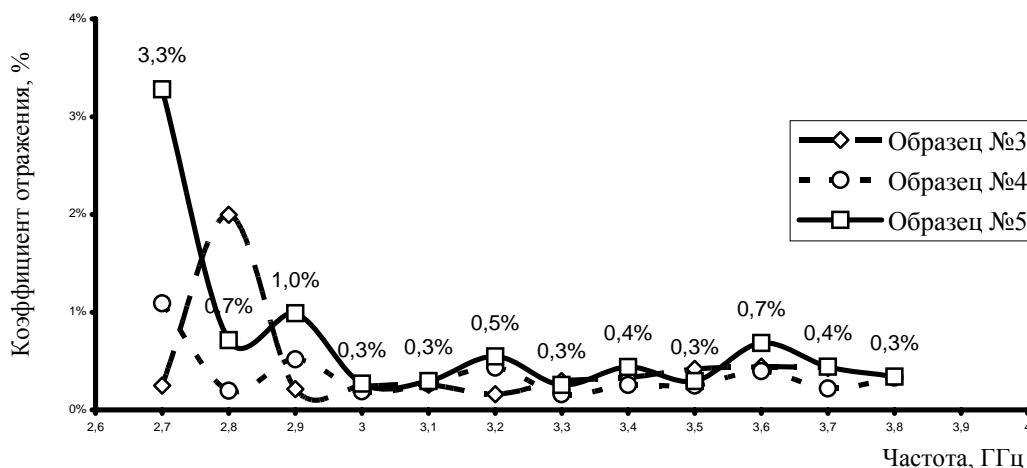


Рисунок 12 – Частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны при взаимодействии с образцами № 3–5 на основе двухвитковых спиралей

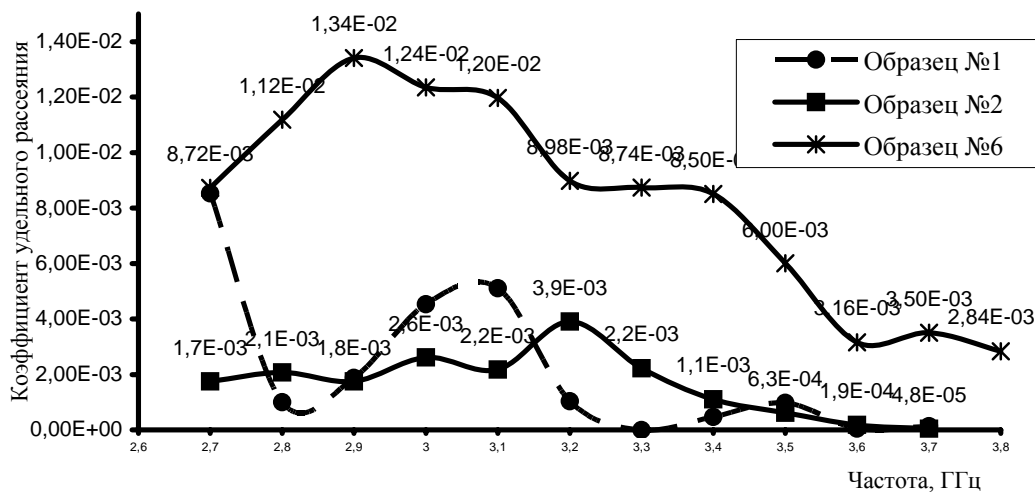


Рисунок 13 – Частотная зависимость коэффициента удельного рассеяния электромагнитной волны при взаимодействии с образцами № 1, 2, 6 на основе одновитковых спиралей и линейных вибраторов

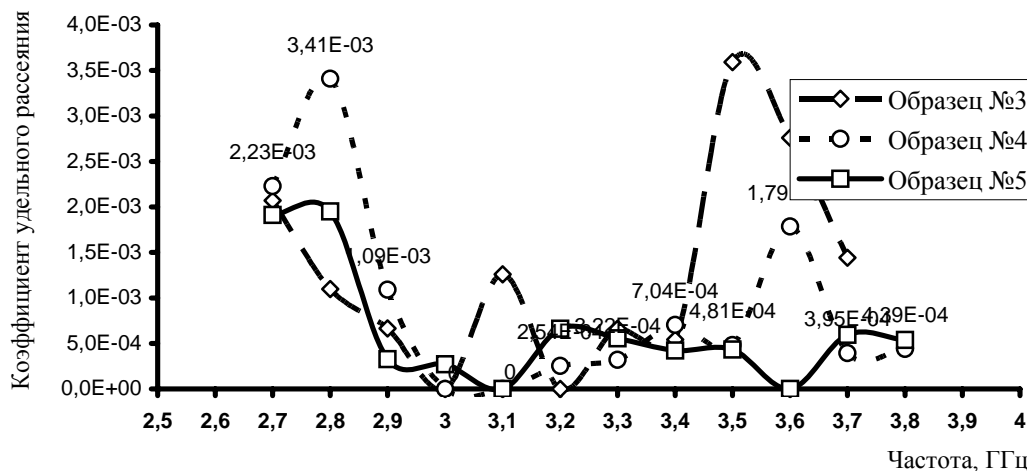


Рисунок 14 – Частотная зависимость коэффициента удельного рассеяния электромагнитной волны при взаимодействии с образцами № 3–5 на основе двухвитковых спиралей

Анализ графиков на рисунках 9 и 11 показывает, что вблизи резонансной частоты (приблизительно 3 ГГц) коэффициент прохождения сигнала для образцов № 1 и № 2 значительно уменьшается, при этом коэффициент отражения на этой частоте достигает максимального значения. Характер кривых для данных образцов схож с кривыми для образца № 6, состоящего из парных линейных вибраторов (возможно, это связано с большими линейными размерами одновитковых спиралей). Но значение коэффициента отражения для образца № 1 не превышает 1,62%, а для образца № 2 – 4,2%, что значительно ниже коэффициента отражения образца № 6, равного 18,8%. Этот результат подтверждает теоретические расчёты и показывает, что двумерные решетки на основе взаимно ортогональных пар, содержащих левосторонние и правосторонние одновитковые спиральные элементы с оптимальными параметрами, проявляют существенно ослабленные отражательные свойства.

Анализ графиков на рисунках 10 и 12 показывает, что образцы № 3–5, состоящие из взаимно ортогональных пар, содержащих левосторонние и правосторонние двухвитковые спиральные элементы, обладают высоким коэффициентом прохождения, независимо от количества пар в образце. Коэффициент отражения для этих образцов не превышает 3,3%, а на резонансной частоте – 0,3%, при этом потери сигнала на рассеяние незначительны (рисунок 14). Этот результат показывает преимущество образцов № 3–5 перед образцами № 1 и № 2 при их использовании в качестве слабоотражающих покрытий.

Для учета влияния количества пар приведены графики частотной зависимости коэффициента удельного рассеяния электромагнитной волны при взаимодействии с образцами. Коэффициент удельного рассеяния рассчитывался как отношение коэффициента рассеяния искусственной структуры на данной частоте к количеству пар спиралей в образце.

Рисунки 13 и 14 показывают ещё одно преимущество оптимальных спиралей перед линейными вибраторами, помимо слабого отражения электромагнитных волн. Образцы, состоящие из парных спиралей с оптимальными параметрами, гораздо слабее рассеивают электромагнитные волны, чем образцы на основе линейных вибраторов. Это приводит к снижению потерь в целом и, следовательно, к возрастанию коэффициента прохождения электромагнитной волны.

Анализируя графики коэффициента удельного рассеяния, можно сделать вывод, что лучшие свойства демонстрируют образцы № 2 и № 5, которые содержат четное количество пар спиралей. Для этих образцов коэффициент удельного рассеяния изменяется в более узком интервале и в среднем принимает более низкие значения по сравнению с образцами № 1, № 3 и

№ 4, которые тоже образованы оптимальными спиральями. Причина заключается в том, что образцы № 2 и № 5 состоят из целого количества завершённых ячеек, каждая из которых включает в себя пару горизонтальных и пару вертикальных спиралей.

Заключение

Проведенные в данной работе исследования позволяют сделать вывод о возможности использования искусственных структур, состоящих из парных одновитковых или двухвитковых спиралей оптимальной формы для создания слабоотражающих покрытий в СВЧ диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Advances in Complex Electromagnetic Materials* / A. Priou [et al.] // Kluwer Academic Publishers, 1997. – Vol. 28. – P. 32–37.
2. Whites, K.W. Composite uniaxial bianisotropic chiral materials characterization: comparison of predicted and measured scattering / K.W. Whites, C.Y. Chang // *J. Electromagn. Waves Applic.* – 1997. – Vol. 11. – P. 371–394.
3. Tretyakov, S.A. Influence of chiral shapes of individual inclusions on the absorption in chiral composite coatings / S.A. Tretyakov, A.A. Sochava, C.R. Simovski // *Electromagnetics.* – 1996. – Vol. 16. – P. 113–127.
4. Cloete, J.H. The role of chirality in synthetic microwave absorbers / J.H. Cloete, M. Bingle, D.B. Davidson // *Proc. Int. Conf. Electromagnetics in Advanced Application.* – 1999. – P. 55–58.
5. Tretyakov, S.A. Proposed composite material for nonreflecting shields and antenna radomes / S.A. Tretyakov, A.A. Sochava // *Electron. Lett.* – 1993. – Vol. 29. – P. 1048–1049.
6. *Reflection and transmission by a uniaxially bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves* / I.V. Semchenko [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998. – № 31. – P. 2458–2464.
7. *Microwave-absorbing chiral composites: Is chirality essential or accidental?* / C.F. Bohren [et al.] // *Applied Optics.* – 1992. – Vol. 31, № 30. – P. 6403–6407.
8. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. – 504 с.
9. *Исследование поляризации электромагнитного излучения, рассеянного на металлической спирали* / И.В. Семченко [и др.] // *Лазерная и оптико-электронная техника.* – 2002. – Вып. 7. – С. 84–91.
10. Семченко, И.В. Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // *Радиотехника и электроника.* – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 917–922.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Поступила в редакцию 15.10.09.