

Дифракция волн на цилиндре, окруженном оптимальными спиралями

И.А. ФАНЯЕВ, И.В. СЕМЧЕНКО, С.А. ХАХОМОВ

Исследована дифракция электромагнитных волн на цилиндре, окруженном оптимальными спиралями, в микроволновом диапазоне от 2,85 до 3,55 ГГц с помощью компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Спирали образуют многослойную структуру, в которой они расположены по заранее определенному закону. Спирали имеют оптимальную форму, поскольку в каждой из них индуцируется одинаково значимые электрический дипольный и магнитный момент. Показано, что плоский фронт волны за цилиндром, окруженным спиралями, частично восстанавливается при двух поляризациях падающей волны.

Ключевые слова: дифракция, двухвитковая спираль, цилиндр, интенсивность.

The electromagnetic waves diffraction by the cylinder surrounded by optimal helices in the microwave range from 2,85 to 3,55 GHz with the help of simulation and experimental research are under study. Helices form a multilayer structure in which they are located at a predetermined law. Helices have the optimal shape, because each of them is induced equally significant electric dipole and magnetic moment. It is shown that a plane wave front of a cylinder surrounded by helices is partially restored for the two polarizations of the incident wave.

Keywords: diffraction, double-turn helix, cylinder, intensity.

Введение. Дифракция волн на бесконечном цилиндре изучена теоретически и экспериментально в [1], [2]. Как известно, при рассеивании плоской электромагнитной волны о цилиндр за ним образуется шлейф (тень). Целью данной работы является уменьшение шлейфа за цилиндром, т.е. восстановление волнового фронта падающей плоской электромагнитной волны за цилиндром. Если фронт волны за цилиндром полностью восстанавливается, тогда цилиндр является невидимым для наблюдателя. Используя метод волнового обтекания, впервые предложенный в статье [3], можно добиться восстановления волнового фронта. Основная идея метода волнового обтекания состоит в том, что оболочка, окружающая объект, должна искривлять фронт падающего электромагнитного излучения, заставляя лучи огибать объект, а на выходе принимать прежнее направление. Идея искривления лучей заключается в том, что внутри оболочки создается пространство с неоднородным показателем преломления, который можно вычислить с помощью необходимого преобразования координат. Осуществлять идею предполагается за счет неоднородности вещества искусственной оболочки. Как известно, если показатель преломления среды изменяется непрерывно, то луч непрерывно преломляется, и его траектория представляет собой гладкую кривую. Параметры оболочки задаются тензорами диэлектрической и магнитной проницаемости, поэтому необходимо найти нужные компоненты тензоров для восстановления электромагнитной волны за цилиндрическим объектом.

Расчет параметров оболочки на основе двухвитковых спиралей. На данный момент наиболее простыми для практического использования являются компоненты тензоров проницаемостей искусственной оболочки, представленные в статье [4], которые даны в цилиндрической системе координат и имеют вид

$$\varepsilon_{rr} = \mu_{rr} = \frac{b}{b-a} \left(\frac{r-a}{r} \right)^2, \quad \varepsilon_{zz} = \mu_{zz} = \varepsilon_{\varphi\varphi} = \mu_{\varphi\varphi} = \frac{b}{b-a}, \quad (1)$$

где a и b – внутренний и внешний радиусы цилиндрической оболочки, r – расстояние между внутренним и внешним радиусами оболочки $r \in [a; b]$. Подробный анализ среды с параметрами (1) разобран в статье [5].

Первая реализация искусственной среды (оболочки) с параметрами (1) была рассмотрена в статье [6]. В качестве элемента метаматериала в статье использовалась каноническая

спираль (рисунок 1а). Предполагалось, что полученная искусственная оболочка на канонических спиральях будет восстанавливать фронт волны сразу для двух поляризаций, так как она имеет одинаковый отклик для горизонтальной и вертикальной поляризаций падающей волны. Вертикальной поляризацией будем называть поляризацию падающей волны (*E-волна*), у которой вектор напряженности электрического поля \vec{E} параллелен оси исследуемого образца (ось z), соответственно, горизонтальная поляризация – поляризация падающей волны (*H-волна*), перпендикулярная оси образца. Однако стоит заметить, что в статье [6] показан результат только для одной поляризации падающей волны.

Для создания искусственной среды, которая активировалась бы сразу при двух поляризациях падающей волны, можно использовать обычную гладкую спираль (рисунок 1б). Преимуществом гладкой спирали по сравнению с канонической спиралью является простота изготовления и реализация в любом диапазоне частот. Существует одновременно электрическое, магнитное и киральное взаимодействие спирали с электромагнитным полем, поэтому для создания искусственной среды с параметрами (1) на основе гладких спиралей, необходимо использовать правосторонние и левосторонние спирали для компенсации (уничтожения) киральности в среде.

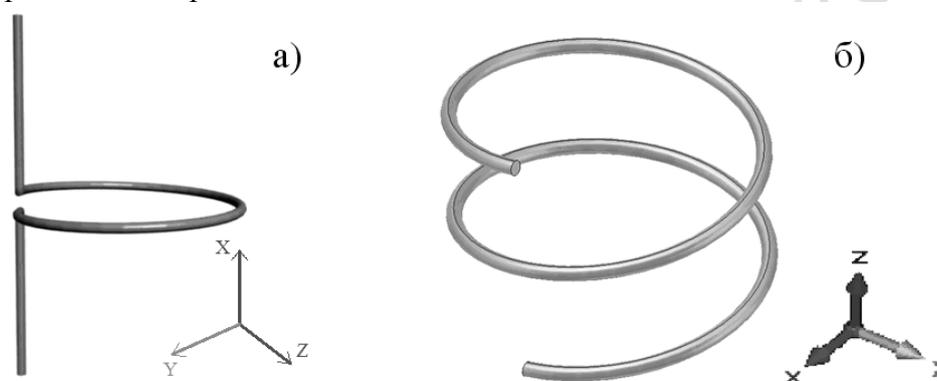


Рисунок 1 –: а) каноническая одновитковая спираль; б) гладкая двухвитковая спираль
Геометрия спиралей

Для получения искусственной оболочки с параметрами (1) необходимо знать диэлектрическую и магнитную проницаемости, которые могут быть выражены через диэлектрическую, а также магнитную восприимчивость среды. Как известно, каждая спираль характеризуется одновременно диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостью (поляризуемостью). Метод расчета всех компонент тензоров восприимчивостей для любых спиралей с заданными параметрами был рассмотрен в [7], [8].

В статье [9] показан теоретический расчет параметров идеально проводящей двухвитковой спирали, для которой выполняется равенство осевых компонент тензоров диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей. Такая спираль является оптимальной по отношению к другим, так как обладает одинаковым откликом для любой поляризации падающей волны. Оптимальные параметры двухвитковой спирали являются следующими:

$$N_e = 2; \alpha = 6,35^\circ; L = 0,05 \text{ м}; r = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; h = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

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. Оптимальные параметры гладкой двухвитковой спирали будут использоваться и в дальнейшем при моделировании электромагнитных свойств спиралей и искусственных образцов на их основе. На рисунке 2 показаны осевые компоненты тензоров диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей двухвитковой спирали.

Полученные данные рассчитываются в дальней зоне в диапазоне частот от 3 до 3,25 ГГц, где наблюдается главный частотный резонанс токов.

Из графика видно, что различия в значениях осевых компонент тензоров составляют не более 1 %, что подтверждает оптимальную форму спиралей.

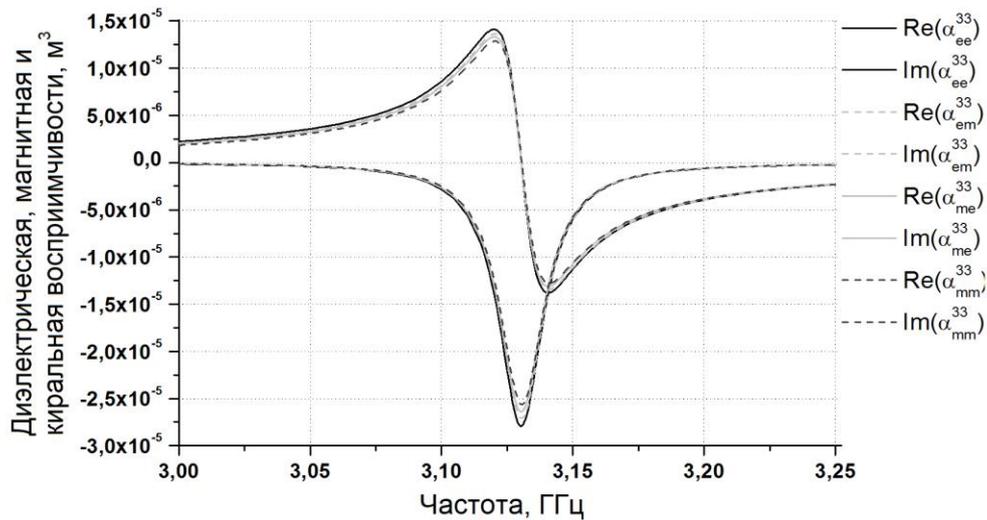


Рисунок 2 – График частотной зависимости действительных и мнимых частей осевых компонент тензоров восприимчивостей двухвитковой спирали

Относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды может быть рассчитана через осевые компоненты тензоров восприимчивостей, с помощью формулы Клаузиуса-Моссоти [10]:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{n}{\operatorname{Re}\left(\frac{1}{\alpha_{ee}^{33}}\right) - \left(\frac{n}{3}\right)}, \quad \mu_r = 1 + \frac{n}{\operatorname{Re}\left(\frac{1}{\alpha_{mm}^{33}}\right) - \left(\frac{n}{3}\right)}, \quad (2)$$

где α_e и α_m – диэлектрическая и магнитная восприимчивости спирали, n – объемная концентрация частиц в среде. Прежде всего, чтобы удовлетворить условию для радиальных параметров анизотропной среды, нужно не забывать о том, что диэлектрическая и магнитная проницаемости среды должны быть равны между собой ($\varepsilon_{rr} = \mu_{rr}$). Элементом такой среды может быть оптимальная двухвитковая спираль, которая имеет одинаковые осевые компоненты тензоров диэлектрической и магнитной восприимчивостей.

Исходя из данных рисунка 2 и используя формулы (1) и (2), можно рассчитать необходимую объемную концентрацию спиралей в оболочке

$$n = \frac{3}{\alpha_{ee}^{33}} \left[\frac{a(r^2 - 2br + ab)}{r^2(3b - 2a) + ab(a - 2r)} \right]. \quad (3)$$

Количество спиралей в оболочке для тонкого цилиндрического слоя рассчитывается по формуле

$$N = nV = nSh = \frac{3}{\alpha_{ee}^{33}} \left[\frac{a(r^2 - 2br + ab)}{r^2(3b - 2a) + ab(a - 2r)} \right] \cdot \pi h(b^2 - a^2), \quad (4)$$

где V – объем слоя, S – площадь слоя, h – высота слоя.

Для расчета необходимого количества спиралей можно использовать формулу (4), при этом задавая произвольно радиус цилиндра и радиус маскирующей оболочки, но параметр r должен изменяться непрерывно. Этого невозможно добиться, поэтому применяют дискретную оболочку, где параметр r разбивается (дискретизируется) в пределе между радиусом оболочки и радиусом цилиндра ($r \in [a; b]$) на конечное число, которое соответствует числу слоев в оболочке.

Создадим искусственную дискретную оболочку со спиральными включениями, состоящую из четырех слоев. Для примера количество спиралей в первом слое рассчитывается по формуле

$$N_1 = \frac{3}{\alpha_{ee}^{33}} \left[\frac{a(r_1^2 - 2br_1 + ab)}{r_1^2(3b - 2a) + ab(a - 2r_1)} \right] \cdot 2\pi h r_1 \delta_1, \quad (5)$$

где δ_1 – толщина первого слоя, r_1 – расстояние от центра до середины первого слоя. Аналогично рассчитывается количество спиралей в остальных слоях. На рисунке 3 показана схема дискретной оболочки, состоящей из четырех слоев и окружающей скрываемый цилиндр.

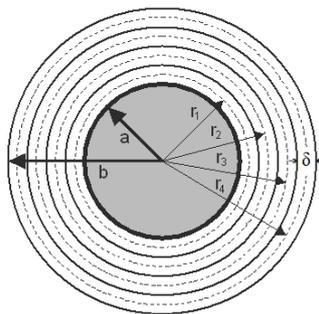


Рисунок 3 – Схема дискретной оболочки

Параметр r берется равным от центра всей структуры до середины каждого слоя, так как именно на этом расстоянии будут располагаться спирали, которые и сформируют слои оболочки.

Расчет искусственной структуры проводится при следующих параметрах: радиус цилиндра $a=7,75$ см; радиус оболочки $b=15,5$ см; толщина одного слоя $h=1$ см; восприимчивость двухвитковой спирали на частоте 3,14 ГГц равна минус 13,8 см³. Значение действительной части восприимчивостей двухвитковой спирали выбирается наиболее отрицательной, для того, чтобы диэлектрическая проницаемость среды изменялась в пределах от единицы до нуля (см. формулу 1).

При рассчитанных параметрах было проведено компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов, рассеяния плоской электромагнитной волны на бесконечной многослойной искусственной структуре. Результаты моделирования представлены на рисунке 4 в виде распределения напряженностей электрических и магнитных полей при вертикальной и горизонтальной поляризации падающей волны.

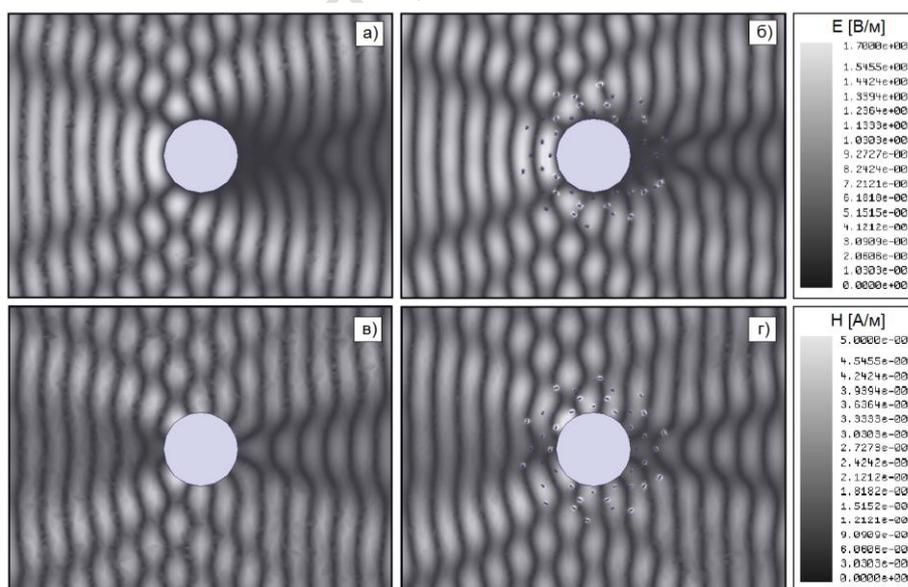


Рисунок 4 – а) металлический цилиндр без оболочки (вертикальная поляризация); б) металлический цилиндр, окруженный искусственной оболочкой (вертикальная поляризация); в) металлический цилиндр без оболочки (горизонтальная поляризация); г) металлический цилиндр, окруженный искусственной оболочкой (горизонтальная поляризация)

Распределение напряженности электрического и магнитного поля на частоте 3,01 ГГц:

Из рисунка 4 видно, что фронт волны частично восстанавливается для вертикальной поляризации, но при этом присутствует достаточно большое рассеяние на структуре.

Напряженность магнитного поля за цилиндром с искусственной оболочкой немного превышает амплитуду магнитного поля за цилиндром без оболочки.

Количественной характеристикой явления огибания электромагнитной волной препятствия может служить интенсивность прошедшей волны за препятствием. В моделировании для измерения интенсивности прошедшей волны строится плоскость, которая расположена позади цилиндра, на расстоянии 30 см от его края. Интенсивность прошедшей волны в моделировании рассчитывается по формуле

$$I = \frac{1}{S} \int_S \dot{\vec{E}} \cdot \dot{\vec{E}}^* dS, \quad (6)$$

где $\dot{\vec{E}}$ – комплексная величина напряженности электрического поля; $\dot{\vec{E}}^*$ – комплексно-сопряженная величина напряженности электрического поля; S – площадь плоской поверхности, построенной за искусственной структурой. На рисунке 5 показана частотная зависимость интенсивности прошедшей волны относительно падающей при различной поляризации падающей волны.

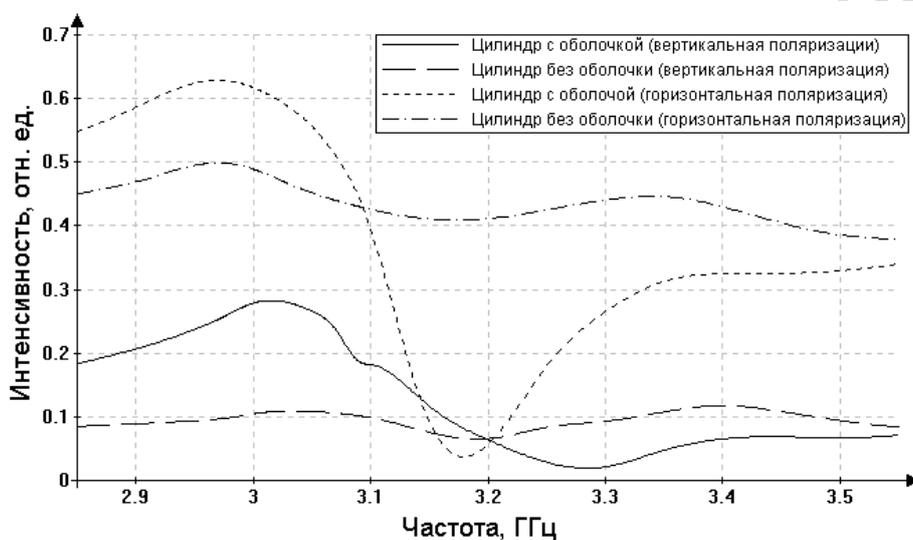


Рисунок 5 – График частотной зависимости интенсивности прошедшей волны относительно падающей при горизонтальной и вертикальной поляризации

Из рисунка 5 следует, что интенсивность прошедшей волны при вертикальной поляризации на частоте 3,01 ГГц за цилиндром с искусственной оболочкой, состоящей из двухвитковых спиралей, больше на 20%, чем интенсивность волны за цилиндром без оболочки. Интенсивность прошедшей волны при горизонтальной поляризации на частоте 3,01 ГГц за цилиндром с искусственной оболочкой больше на 15%, чем за цилиндром без оболочки.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что для двух поляризаций падающей волны проявляется более эффективное восстановление волнового фронта за цилиндром, окруженным двухвитковыми спиральями. При этом главным недостатком исследуемой структуры является достаточно большое рассеяние. Это можно объяснить тем, что большая часть энергии падающей волны рассеивается на цилиндре.

Экспериментальные исследования. Основываясь на результатах, полученных в моделировании, был проведен эксперимент. Для этого изготовлена искусственная структура в соответствии с результатами моделирования. Для получения более точного соответствия спиралей рассчитанным параметрам была разработана технология изготовления спиральных элементов: медная проволока наматывается на заранее изготовленный шаблон, это обеспечивает взаимную идентичность двухвитковых спиралей и точное соблюдение заданных размеров. Для снятия проволоки с шаблона с сохранением параметров, вдоль продольной бороздки, нанесенной на шаблоне, на проволоке ставятся метки, соответствующие двум полным виткам спирали. Затем проволока скручивается с шаблона, и по меткам нарезаются спиральные элементы, полностью соответствующие расчетным параметрам.

На основании схемы (рисунок 3) был изготовлен искусственный образец, состоящий из гладких правосторонних и левосторонних двухвитковых спиралей для реализации восстановления фронта волны за цилиндром, окруженным медными двухвитковыми спиральями. В качестве подложки выбран пенопласт, так как этот материал является радиопрозрачным в исследуемом диапазоне частот и не влияет на результаты измерений. На рисунке 6 показаны фотографии одного слоя оболочки и объемной структуры.

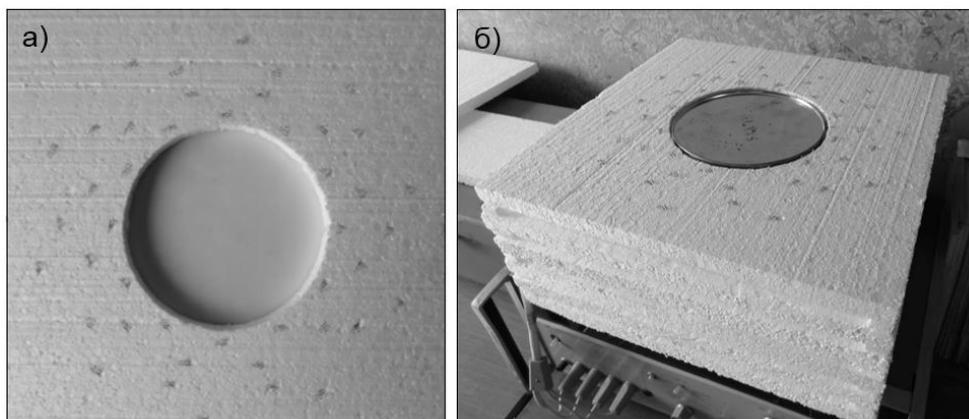
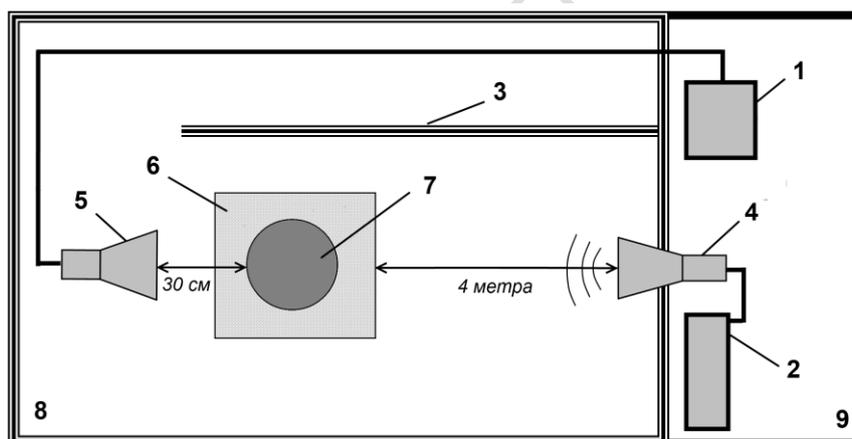


Рисунок 6 – а) один слой; б) объемная структура
Фотографии искусственной структуры на основе двухвитковых спиралей

Исследования были проведены в безэховой камере в диапазоне частот от 2,65 до 3,55 ГГц. Схема проведения эксперимента показана на рисунке 7.



Примечание: 1 – приемник измерительный П5-5Б (2,35–4,0 ГГц); 2 – генератор ГЧ-80 (2,56–4,0 ГГц); 3 – стена из радиопоглощающего материала; 4,5 – антенны измерительные П6-23А; 6 – искусственная оболочка (пенопласт, с включениями из медных двухвитковых спиралей); 7 – металлический цилиндр; 8 – безэховая камера; 9 – камера, в которой фиксируются измерения

Рисунок 7 – Схема проведения эксперимента (вид сверху)

Искусственный образец имеет конечные размеры, поэтому, для того чтобы плоская электромагнитная волна не огибала искусственную структуру снизу и сверху образца, под/на образец ставятся снизу/сверху дополнительные слои радиопоглощающего материала. При этом основная часть излучения будет проходить только через искусственную структуру.

На рисунке 8 показаны экспериментальные кривые частотной зависимости интенсивности прошедшей волны относительно падающей при различной поляризации падающей волны. Для сравнения приведены кривые из рисунка 5, которые были получены в моделировании.

Из рисунка 8 следует, что интенсивность прошедшей волны при вертикальной поляризации для экспериментальной кривой на частоте 3,01 ГГц за цилиндром с искусственной оболочкой, состоящей из двухвитковых спиралей, больше на 15 %, чем интенсивность волны за цилиндром без оболочки. Интенсивность прошедшей волны при

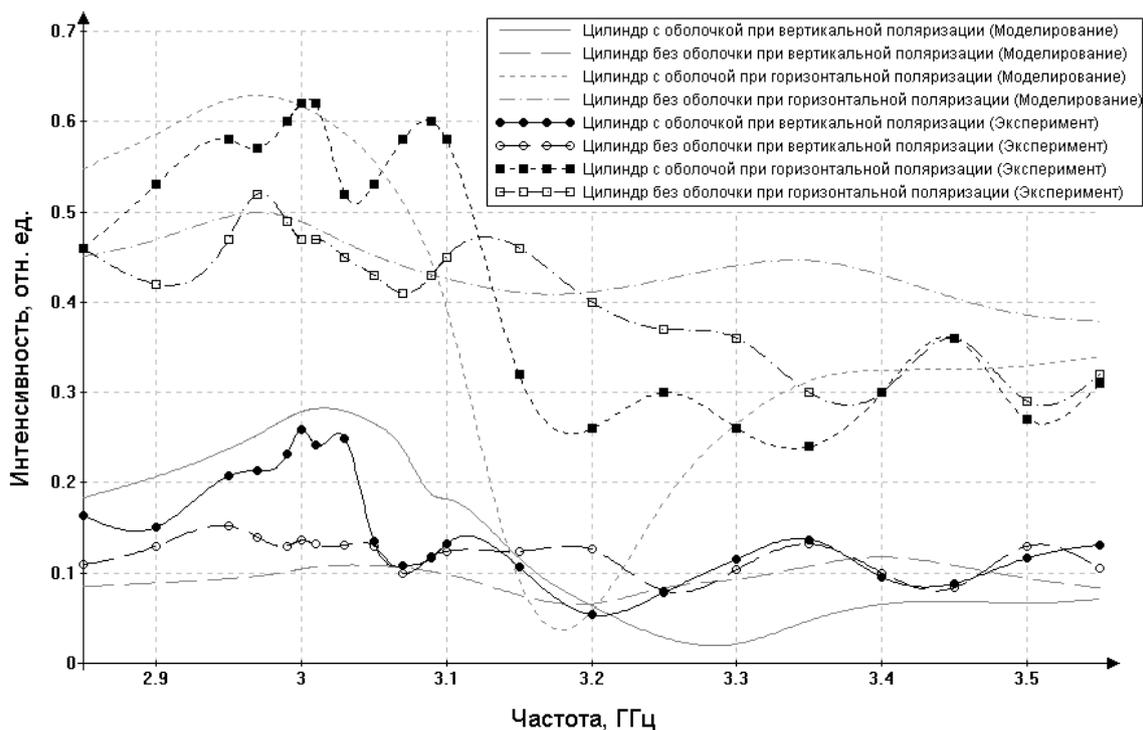


Рисунок 8 – График частотной зависимости интенсивности прошедшей волны относительно падающей

горизонтальной поляризации на частоте 3,01 ГГц за цилиндром с искусственной оболочкой больше на 17 %, чем для цилиндра без оболочки. Также наблюдается пик на частоте 3,09 ГГц, при этом интенсивность прошедшей волны за искусственной структурой превышает интенсивность за цилиндром без оболочки на 20%. Экспериментальные кривые приблизительно согласуются с кривыми, полученными в моделировании. Погрешность экспериментальных данных составляет не более 12%. Различия экспериментальных кривых и кривых, полученных в моделировании, объясняются наличием краевых эффектов на искусственном образце, так как структура имеет конечные размеры, в то время как в моделировании физическая модель является идеализированной и бесконечной.

Заключение. В рамках метода волнового обтекания были рассчитаны параметры искусственной оболочки на основе двухвитковых спиралей для восстановления плоского фронта электромагнитной волны за цилиндром. Проведено компьютерное моделирование рассеяния плоской электромагнитной волны на искусственной структуре. Показано, что интенсивность прошедшей волны при вертикальной поляризации на частоте 3,01 ГГц за цилиндром с искусственной оболочкой больше на 20%, чем интенсивность волны за цилиндром без оболочки, соответственно, при горизонтальной поляризации – больше на 15 %. Основываясь на результатах, полученных в моделировании, были проведены экспериментальные исследования. Показано, что на частоте 3,09 ГГц интенсивность прошедшей волны за искусственной структурой превышает интенсивность за цилиндром без оболочки на 20 %.

Можно сделать вывод о том, что рассмотренная искусственная структура на основе двухвитковых спиралей при двух поляризациях падающей волны дает только частичный эффект восстановления плоской электромагнитной волны за цилиндром. Из-за присутствующих недостатков данная структура подлежит дальнейшему улучшению и оптимизации.

Литература

1. Потехин, А.И. Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн / А.И. Потехин. – М. : Советское радио, 1948. – 139 с.
2. Гольдштейн, Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Советское радио, 1971. – 664 с.

3. Pendry, J.B. Controlling electromagnetic fields / J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith // *Science*. – 2006. – Vol. 312. – P. 1780–1782.
4. Asghar, M. Electromagnetic cloaking with a mixture of spiral inclusions / M. Asghar [et al.] // *Proceedings Metamaterials '2007*. – 22–24 October 2007 / University «Roma Tre»; Editors: F. Bilotti and L. Vegni. – Rome, Italy, 2007 – P. 957–960.
5. Фаняев, И.А. Безотражательное огибание цилиндрических объектов электромагнитными волнами / И.А. Фаняев // *Сб. науч. работ студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины» : в 2 ч. Ч. 1 / О.М. Демиденко (гл. ред.); редкол.: Р.В. Бородич [и др.]*. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – С. 229–232.
6. Guven, K. Electromagnetic cloaking with canonical spiral inclusions / K. Guven, E. Saenz, R. Gonzalo, E. Ozbay and S. Tretyakov // *New Journal of Physics*. – 2008. – no. 10. – P. 1–12.
7. Faniayeu, I.A. The calculation of all tensors components of the dielectric, magnetic and chiral polarizabilities for helices with the optimal parameters / I.A. Faniayeu, V.S. Asadchy // *11th International Conference on Global Research and Education in Engineers for Better Life (inter-Academia)*. – 27–30 August, 2012 / Obuda University; Editors: Annamaria R. Varkonyi-Koczy [et. al.]. – Budapest, 2012. – P. 497–504.
8. Faniayeu, I.A. Calculation and analysis of the tensors of electric, magnetic and chiral polarizabilities of the helices with optimal shape / I.A. Faniayeu, V.S. Asadchy, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Metamaterials '2012: The Sixth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*. – September 17–22, 2012 / National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia; Editors: F. Bilotti and A. Alu. – St. Petersburg, 2012. – P. 324–326.
9. Semchenko, I.V. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2007. – Vol. 52, No. 8. – P. 917–922.
10. Tretyakov, S.A. *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics* / S.A. Tretyakov – Artech House. – Norwood, MA, 2003. – 260 p.