

ектов управления в реальных средах функционирования, что является важным этапом в решении задач и проблем роботизации наземной техники. Полученные результаты находят свое практическое применение в различных отраслях народного хозяйства. Например, в настоящее время по заказу МЧС РФ выполняется ОКР по созданию комплекта программно-аппаратных средств, обеспечивающих автоматический возврат дистанционно-управляемого мобильного пожарного робота в точку старта или в зону уверенного радиообмена при потере радиосвязи между пультом и объектом управления. В рамках этой же ОКР выполняется модернизация пульта дистанционного управления, заключающаяся в том, что оператору будет предоставлена виртуальная объемная модель рабочей зоны, оперативно формируемая по данным бортовых систем объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кутузов А.Н., Лапиов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В.* Опыт разработки и создания автономного интеллектуального робототехнического комплекса на базе серийного танка Т-72: Науч.-технич. сборник Оборонная техника. – 2000. – № 1-2. – С. 15-18.
2. *Буйолов Г.А., Носков В.П. и др.* Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности: Сб. научн. тр. Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов. – 1989. – С. 61-69.
3. *Кузин Ю.Р., Носков А.В., Носков В.П.* Разработка и исследование СТЗ для обеспечения автономного движения: Науч.-технич. сборник Оборонная техника. – 2001. – С. 34-39.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Калинин Алексей Владимирович – НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5; тел.: 84992636019; к.т.н.; с.н.с.

Носков Владимир Петрович – зав. сектором; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Рубцов Иван Васильевич – зав. кафедрой специальной робототехники и мехатроники; начальник отдела НИИ СМ; к.т.н.

Kalinin Alexey Vladimirovich – RI SM Bauman MSTU; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; 5, 2-ya Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia; phone: 84992636019; cand. of eng. sc.; senior research.

Noskov Vladimir Petrovich – head the sector; the department of special robotics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rubtsov Inan Vasil'evich – the department of special robotics and mechatronics; head the department ; cand. of eng. sc.

УДК 681.327.12

Мусаев Максуд Мурад Оглы, Н.Н. Кисель

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Статья посвящена получению и сравнению частотных зависимостей коэффициентов прохождения метаструктуры основанной на спиральных элементах. Экспериментальные значения коэффициента прохождения рассматриваются при различной ориентации периодической структуры, относительно раскрыва рупора. Априорные расчеты ко-

эффицентов прохождения метаструктуры, рассчитываются с помощью САПР FEKO. В статье проводится анализ эффективности комбинирования спиральных элементов в пределах одного периода структуры. Производится анализ возможности построения частотно-селективного экрана на основе спиральных элементов.

Метаматериал [1]; спиральный элемент; пространственная ячейка; коэффициент прохождения; частотно-селективный экран.

Musaev Maxud Murad Ogli, N.N. Kisel'

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE METAMATERIALS BASED ON THE SPIRAL ELEMENTS

The Article is devoted to obtaining and comparing of the frequency dependences and the coefficients of transmission of the metastructure, based on spiral elements. The experimental values of the transmission coefficient are considered at different orientations of the periodic structure, regarding the disclosure of the horn. Priorical calculations of coefficients of metastructures' passing calculated using CAD FEKO. The analysis of the efficiency of combination of the spiral elements within the same period of structure is carried out, as well as the possibility of building a frequency-selective screen on the basis of spiral elements.

Metamaterial [1]; spiral element; the spatial cell; the transmission coefficient; frequency-selective screen.

Введение. Метаматериалы – искусственно созданные композитные материалы, состоящие из элементов, размер которых d , больше размеров атомов и молекул, но меньше длины волны λ [1]. Некоторые из этих материалов имеют отрицательную диэлектрическую проницаемость.

В работах рассматривающих метаматериалы на основе спиральных элементов, рассматривается случай хаотичного либо периодического расположения многовитковых спиралей в пространстве [2]. Однако, не менее интересен и важен случай, когда периодическая структура, формируется спиралью с разными радиусами.

Использование "вложенных" одновитковых спиралей позволяет наиболее эффективно использовать пространство периода структуры, что немаловажно при построении частотно-селективных экранов. В частности, экранов имеющих несколько резонансных полос. Подобная организация периода структуры, позволяет избежать наращивания толщины слоя экрана, за счет применения многослойных структур, либо многовитковых спиралей с изменяющимся радиусом.

Постановка эксперимента. Численное (априорное) исследование характеристик структуры выполнялось с использованием специализированной программы трехмерного электромагнитного моделирования Feko [3]. В качестве основной характеристики данной структуры рассматривался коэффициент отражения и прохождения бесконечной структуры. Один период бесконечной периодической структуры включает три одновитковых спирали, вложенных одна в другую, что показано на рис. 1.

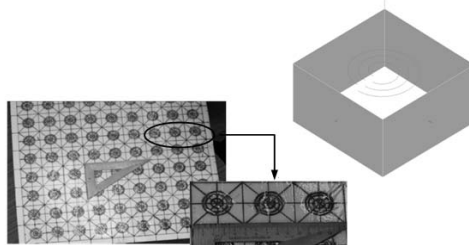


Рис. 1. 3D-модель структуры на основе спиральных элементов, а так же её реализация

Размер выбранной пространственной ячейки 50x50x5 мм, спирали одновитковые, радиусы спиралей 14 мм, 10 мм, 6мм; высота спирали 2 мм. Размер и количество спиралей обусловлены сложностью реализации макета.

На рис. 2 представлена характеристика коэффициента прохождения, полученная в результате расчета.

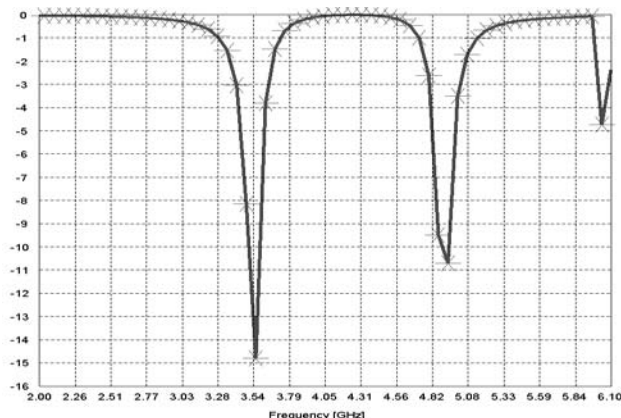


Рис. 2. Частотная зависимость прохождения бесконечной частотно-селективной структуры на основе спиралей; (радиусы спиралей 14 мм, 10 мм, 6мм; высота спирали 2 мм)

Результаты численного моделирования были проверены экспериментально. Экспериментальный стенд базируется на основе векторного анализатора цепей ZVA 40, на входы 1 и 2 которого подсоединены рупора с рабочей полосой от 1 до 18 ГГц. Расстояние между рупорами составляет порядка 6 см.

Анализ экспериментальных результатов. Исследуем частотную зависимость коэффициента прохождения при нормальном падении волны на спиральную структуру, при разных положениях её элементов относительно вектора E .

На рис. 3, приведены экспериментальные характеристики коэффициента прохождения (коэффициент S_{21}) для случаев когда между рупорами отсутствует препятствие (кривая 1, аналогично на всех графиках экспериментов) и для случая расположения между рупорами металлического экрана, полностью перекрывающего раскрыв (кривая 2). Эти зависимости определяют динамический диапазон установки и уровень погрешности.

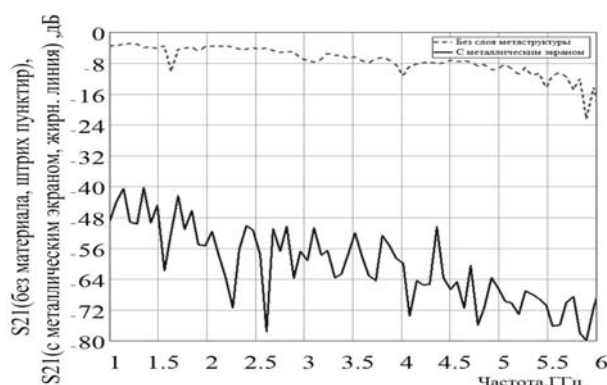


Рис. 3. Частотная характеристика коэффициента прохождения

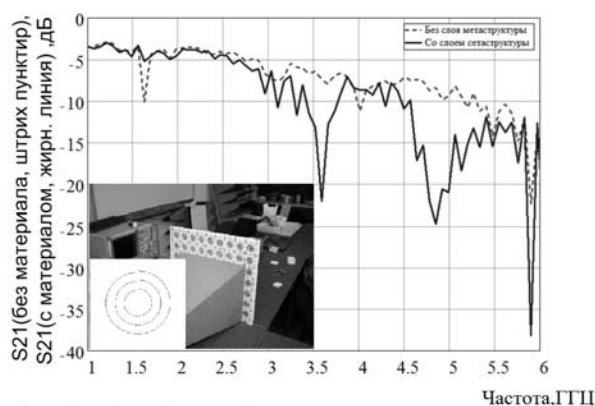


Рис. 4. Частотная характеристика коэффициента прохождения кривая 2 – метаструктура в положении 1

На рис. 4 представлена частотная экспериментальная характеристика коэффициента прохождения, для случая, когда между рупорами расположен слой структуры на основе спиральных элементов. Структура ориентирована таким образом, что радиус проходящий через щель между спиральными элементами параллелен вектору напряженности электрического поля (позиция 1)

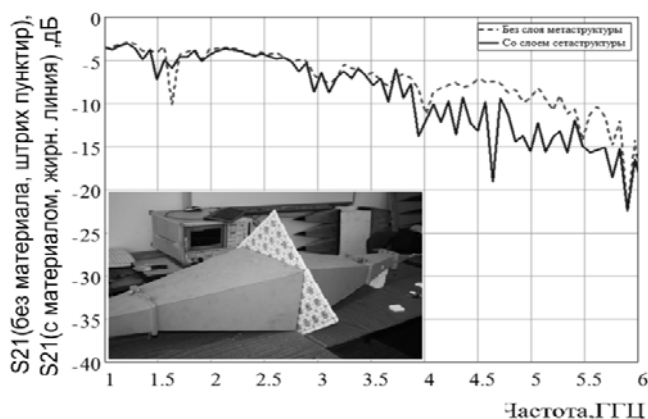


Рис. 5. Частотная характеристика коэффициента прохождения: кривая 2 – метаструктура в положении 2 (слой структуры ориентирован под 450 относительно раскрыва рупора)

Аналогичные результаты для частотных зависимостей коэффициента отражения получены путем поворота по часовой стрелке метаструктуры на 45⁰ (рис. 7), 60⁰ (рис. 8) и 90⁰ (рис. 9).

Как видно из приведенных экспериментальных зависимостей, а также из результатов, полученных с использованием программы FEKO, структура из спиральных элементов может быть использована в качестве частотно-селективного экрана.

Рассмотренный в работе материал эффективно работает только на одной поляризации, когда вектор E параллелен радиусу, проходящему «через разрыв» кольца спирали.

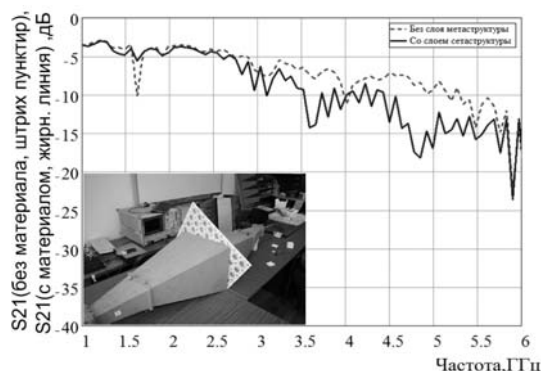


Рис. 6. Частотная характеристика коэффициента прохождения: кривая 2 – метаструктура в позиции 3 (слой структуры ориентирован под 60° относительно раскрыва рупора)

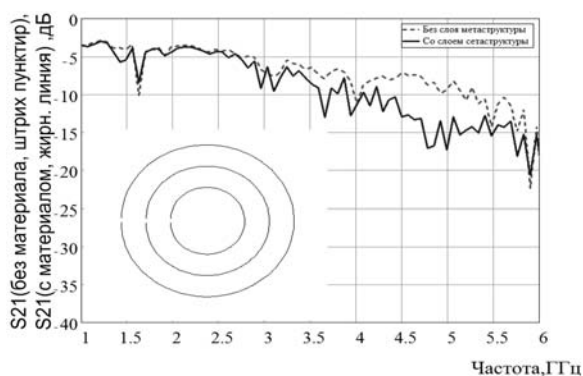


Рис. 7. Частотная характеристика коэффициента прохождения: кривая 2 – метаструктура в позиции 4 (слой структуры ориентирован под 90° относительно раскрыва рупора)

Комбинирование спиралей разных размеров в пределах одной пространственной ячейки, позволило получить несколько рабочих полос структуры, в которых коэффициент прохождения уменьшился не меньше чем на 15 дБ. Полоса частот, в которой обеспечивается защита на уровне – 15дБ не менее 200–300 МГц в области 3.5 ГГц, 4,7–5 ГГц, 5.7–5,9 ГГц. Потери, вносимые структурой в режиме прозрачности, невелики, и не превышают 0,3–0,5 дБ в полосе частот от 1 до 3 ГГц, в полосе более высоких частот уровень потерь несколько увеличивается.

Таким образом метаструктура на основе спиральных элементов обладает небольшими потерями в полосе пропускания и при использовании в составе частотно-селективных поверхностей будет вносить небольшие искажения в диаграмму направленности.

Выводы. С помощью программы 3D моделирования FEKO было произведено численное (априорное) исследование частотно-селективных свойств, структуры, реализованной на основе метаматериала состоящего из спиральных элементов.

Проведены эксперименты, направленные на определение частотной зависимости коэффициента прохождения структуры, при нормальном падении волны и различном положении вектора E относительно радиуса проходящего через разрыв спирали.

Сделано заключение о возможности использования рассматриваемой структуры, как частотно-селективного экрана, с несколькими резонансными полосами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Веселаго В.Г.* Метаматериалы как объект нанотехнологий и их математическое моделирование // XV конференция представителей региональных научно-образовательных сетей "RELARN-2008". 1-8 июня 2008 г. – Нижний Новгород – Пермь.
2. *Lagarkov A.N., Semenenko V.N., Kisel V.N., Chistyayev V.A.* Development and simulation of microwave artificial magnetic composites utilizing nonmagnetic inclusions // Journ. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 258-259. – P. 161-166.
3. Официальный сайт программы FEKO// адрес сайта - <http://www.feko.info> (дата обращения 25.06.2012)
4. Официальный сайт компании Rohde & Schwarz , описание прибора серии ZVA // адрес страницы сайта – http://www.rohde-schwarz.ru/products/test_and_measurement/network_analysis/ZVA (дата обращения 10.07.2012).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Мусаев Максуд Мурад Оглы – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: Vargallow@gmail.com; 347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Кисель Наталья Николаевна – e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Musaev Maxud Murad Ogli – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: Vargallow@gmail.com; GSP 17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; postgraduate student.

Kisel' Natalia Nikolayevna – e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.