

УДК 621.396.67

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАМАТЕРИАЛА

¹Селезнев А.Д., ²Пачурин Г.В., ³Галка А.Г.

¹АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», Нижний Новгород, e-mail: havac@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, e-mail: pachuringv@mail.ru;

³ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород, e-mail: galasnn@appl.sci-nnov.ru

Разработана электрически малая антенна полоскового типа на частоте 300 МГц. В качестве согласующего элемента использован тонкий слой метаматериала, позволяющий существенно улучшить эффективность излучения антенны, с геометрическими размерами, существенно меньшими длины волны. Основой покрытия служит слабопоглощающий в СВЧ-диапазоне силикон с включениями из металлических П-образных резонаторов. В статье представлен способ изготовления метаматериала и покрытия им антенны. Для описания электромагнитных характеристик такой среды представлена математическая модель сосредоточенного колебательного контура. Проведено численное моделирование антенны методом конечных разностей во временной области (FDTD), и рассчитана оптимальная толщина покрытия – 4,1 мм, обеспечивающая максимальную эффективность излучения. Для подтверждения численных результатов была исследована диаграмма направленности, созданной электрически малой антенны, покрытой метаматериалом. Экспериментально установлено, что мощность излучения антенны, покрытой слоем метаматериала, возрастает в несколько раз по сравнению с антенной без такого покрытия. Экспериментально установлено, что покрытие антенны метаматериалом приводит к сужению диаграммы направленности и заметному увеличению амплитуды сигнала.

Ключевые слова: метаматериал, электрически малая антенна, согласование антенн, направленность антенн

DEVELOPMENT ELECTRICALLY SMALL ANTENNAS WITH USE METAMATERIAL

¹Seleznev A.D., ²Pachurin G.V., ³Galka A.G.

¹Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering (NNIIRT), Nizhny Novgorod, e-mail: havac@mail.ru;

²Nizhny Novgorod State Technical University (NSTU) n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: pachuringv@mail.ru;

³Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, e-mail: galasnn@appl.sci-nnov.ru

An electrically small strip-type antenna was developed at a frequency of 300 MHz. As the coordinating element the thin layer of metamaterial allowing to improve significantly efficiency of radiation of the antenna with geometrical sizes significantly smaller wavelengths is used. The basis of the coating is a silicone with a low absorption in the microwave range with inclusions from metal П-shaped resonators. The way of production of metamaterial and a covering is presented to them in article antennas. For the description of electromagnetic characteristics of such environment the mathematical model of the concentrated oscillatory contour is presented. Numerical modeling of the antenna by method of final differences in a time domain (FDTD) is carried out and the optimum thickness of a covering of 4.1 mm providing maximum efficiency of radiation is calculated. For confirmation of numerical results the directional pattern, the small antenna created electrically covered with metamaterial has been investigated. It is experimentally established that the power of radiation of the antenna covered with a metamaterial layer increases several times in comparison with the antenna without such covering. It is experimentally established that the antenna covering metamaterial leads to narrowing of the directional pattern and noticeable increase in amplitude of a signal.

Keywords: metamaterial, electrically small antennas, antenna matching, antenna directivity

Известно [1], что антенна эффективно излучает энергию, если ее характерный размер сравним с длиной волны излучения. Если размеры антенны заметно меньше длины волны, то сопротивление излучению существенно падает, и для восстановления эффективности излучения необходимо дополнительно ее модифицировать. Существует достаточно много различных способов, как, например, покрытие антенны керамикой или использование у-колена [2]. Однако, на данный момент все существующие

способы решения достигли предела своей эффективности. Поэтому необходим новый способ, который с одной стороны поможет существенно улучшить излучательно-приемные характеристики антенны, размеры которой много меньше длины, а с другой стороны, не приведет как к существенному удорожанию, так и к увеличению массогабаритных характеристик.

Одним из наиболее перспективных направлений в технологии электрически малых антенн последних десятилетий

считается использование метаматериалов с отрицательными значениями диэлектрической и/или магнитной проницаемостью. Обзорные статьи [3–6] посвящены использованию метаматериалов в технике антенн в диапазоне частот от 0,1 до 100 ГГц. Основные направления связаны с достижением широкополосности и уменьшением размеров антенных элементов, компенсацией реактивности электрически малых антенн в широкой полосе частот, достижением узкой пространственной направленности элементарных излучателей. Однако, анализ опубликованных статей показал, что расчеты и изготовление антенн в метаматериале ведутся на частотах, превышающих радиочастотный диапазон – порядка нескольких ГГц и более. В связи с этим актуальным видится направление применения метаматериалов в антенной технике в радиочастотном диапазоне. Данная статья посвящена разработке и апробации полосковой антенны, покрытой метаматериалом.

Экспериментальная часть

Метаматериалы обычно представляют собой периодические структуры, поэтому достаточно произвести моделирование одной элементарной ячейки с установкой периодических граничных условий. Вычисление характеристик структур в таких расчётах производится при фиксированных геометрических параметрах резонаторов и их ориентации в самом метаматериале, количество и время вычислений возрастают пропорционально их числу, что не всегда удобно. В этом случае можно воспользоваться периодичностью метаматериалов и проводить вычисление их характеристик

в два этапа. На первом этапе проводится расчет отдельного резонатора, а на втором, по определённым свойствам, вычислять отклик всей структуры.

Рассмотрим соответствующий подход более подробно. Наиболее эффективным резонатором, входящим в состав метаматериала, для нашей задачи является П-образный резонатор. Остановимся на простой модели, позволяющей оценить его свойства, и рассчитать эффективные параметры объёмной структуры, состоящей из таких резонаторов.

Простейшей моделью, позволяющей оценить характеристики П-образного резонатора, является модель сосредоточенного колебательного контура. Можно представить, что частица состоит из емкости C и индуктивности L (рис. 1). Такой подход широко используется в литературе [4].

Проводя прямую аналогию между геометрическими параметрами резонатора и колебательного контура, емкость определяется сечением резонатора и шириной ёмкостного зазора:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_c \frac{wh}{g},$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε_c – относительная диэлектрическая проницаемость в ёмкостном зазоре, w и h – поперечные размеры зазора, g – величина зазора. Тогда индуктивность, пропорциональная отношению площади соленоида, образованного резонатором, к его высоте:

$$L = \mu_0 \frac{l^2}{h},$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

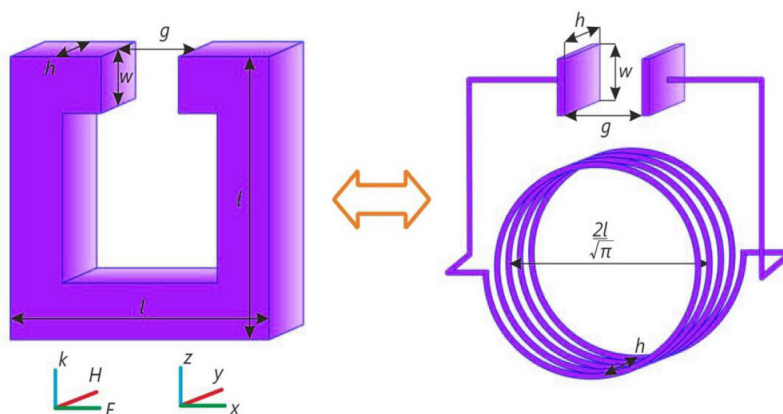


Рис. 1. П-образный резонатор и колебательный контур. Показана ориентация резонатора относительно координатных осей и падающего поля

Резонансная частота колебаний контура следующая:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{l} \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_c}} \sqrt{\frac{g}{\omega}},$$

где c_0 – скорость распространения электромагнитных излучений в вакууме. Таким образом, если пропорции резонатора зафиксированы и окружающая резонатор среда не имеет дисперсии, то изменение его длины стороны приводит к пропорциональному линейному сдвигу резонансной длины волны. Кинетическую энергию движения электронов можно определить с помощью постоянной кинетической индуктивности в колебательном контуре:

$$L_{kin} = \frac{m_e V_{SRR}}{n_e e (wh) S^2},$$

где e – заряд электрона, m_e – масса электрона в металле, n_e – концентрация электронов, V_{SRR} – объём резонатора.

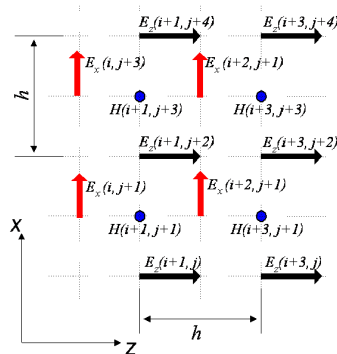
Пусть резонатор ориентирован по отношению к падающему полю так, как показано на рис. 1, и период расположения резонаторов p_{xy} и p_z поперёк волнового вектора и вдоль, соответственно. Тогда фактор заполнения метаматериала определяется следующим соотношением:

$$F = \frac{l^2 h}{p_{xy}^2 p_z}.$$

По известным поляризациям выводятся соотношения для характеристик метаматериала:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \left(\frac{g c_0}{l^2} \right)^2 \frac{F}{\omega_{LC}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega};$$

а)



$$\mu(\omega) = 1 + \frac{F \omega^2}{\omega_{LC}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega};$$

$$\xi(\omega) = -\frac{g c_0}{l^2} + \frac{F \omega^2}{\omega_{LC}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega};$$

где $g = R/L$ – коэффициент поглощения эквивалентного контура, R – сопротивление ξ – параметр бианизотропии.

Математическая модель полосковой антенны, излучающей в безграничном однородном пространстве, в настоящее время хорошо представлена в литературе [7]. Теория антенн, покрытых оболочкой, в частности из метаматериала, довольно сложна. Поэтому было принято решение отказаться от аналитического подхода для описания работы антенн, покрытых метаматериалом, а проводить численный анализ работы антенн путем прямого решения уравнений Максвелла, дополненных материальными уравнениями для среды из метаматериала, которые могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} - i\tilde{\xi} \vec{H} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} + i\tilde{\xi} \vec{E} \end{cases}$$

Численное решение системы уравнений проводилось в двумерной, так и в трехмерной геометрии. Использование двухмерной модели позволяло экономить машинное время и, соответственно, перебрать большое количество входных параметров задачи.

Расчёт производился на специальной пространственной сетке, изображенной на рис. 2. Шаг сетки определяется из минимального характерного размера системы (длина ЭМ-волны, минимальный геометрический размер излучающей антенны, толщина слоя из метаматериала).

б)

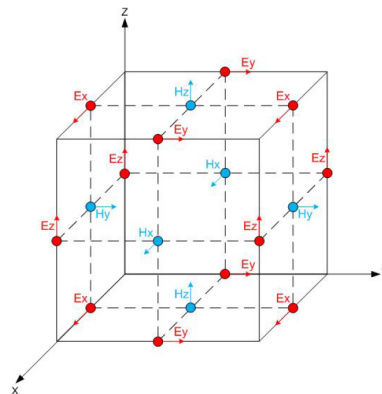
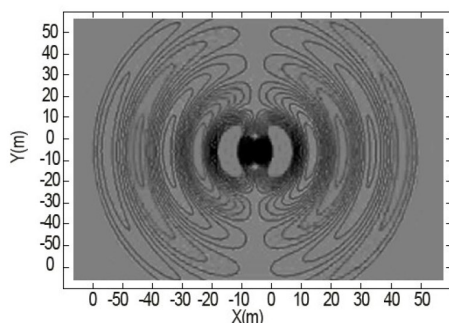


Рис. 2. Пространственная сетка для решения системы уравнений Максвелла методом FDTD: а – в двумерной геометрии; б – в трехмерной геометрии

На рис.3 представлено электрическое поле полосковой антенны, с размерами намного меньше длины волны излучения, покрытой метаматериалом с П-образными резонаторами, рассчитанное методом FDTD в двухмерной геометрии.



На рис. 4 представлена зависимость отношения квадрата электрического поля антенны в дальней зоне при наличии оболочки из метаматериала с П-образными резонаторами к квадрату электрического поля антенны без оболочки в зависимости от толщины

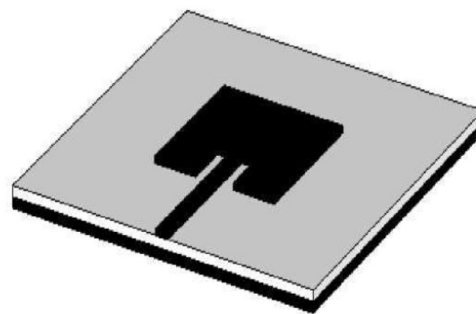


Рис. 3. Распределение электрического поля симметричной антенны, с размерами намного меньше длины волны излучения, покрытого метаматериалом с П-образными резонаторами, рассчитанное методом FDTD в двухмерной геометрии. Справа представлена схема полосковой антенны с размерами подложки 7x7 см, полоска 3x3 см; диэлектрик – фторопласт толщиной 4 мм

В численном моделировании в работе задавались следующие параметры: электрофизические свойства метаматериала – $\epsilon = -1,1$; $m = 1,01$; $\chi = 0,0025$; частота излучения – $f = 300$ МГц, размеры антенны – 3x3 см.

Основным результатом численных расчетов является нахождение оптимальной толщины покрытия из метаматериала с П-образными резонаторами для полосковой антенны, обеспечивающего максимальную эффективность работы антенны.

В численном моделировании задавались те же параметры. Максимальная эффективность антенны наблюдается при толщине покрытия из метаматериала $b = 2,8$ мм. Электрофизические параметры покрытия рассчитывались на основе приведенных выше формул математической модели, описывающей метаматериал с П-образными резонаторами. Размеры и параметры резонаторов подбирались для частотного диапазона 260–340 МГц.

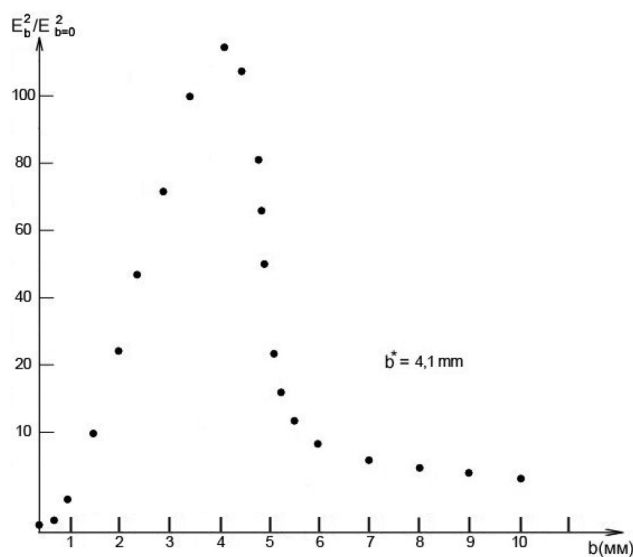


Рис. 4. Зависимость отношения квадрата электрического поля антенны в дальней зоне при наличии оболочки из метаматериала к квадрату электрического поля антенны без оболочки в зависимости от толщины b покрытия из метаматериала

Для экспериментальной проверки результатов была создана электрически малая полосковая антенна. Для изготовления метаматериала для частоты 300 МГц с целью удержания П-образных резонаторов был залит тонкий слой синего силикона, в который после частичного затвердевания были помещены П-образные резонаторы. При этом силикон доступен по цене и поглощение электромагнитной волны на частоте 300 МГц достаточно мало, тангенс угла диэлектрических потерь порядка 10^{-4} . Далее полученный

образец метаматериала наносился на антенну. В связи с тем, что исследование излучательно-приемных характеристик антенны необходимо проводить в дальней зоне, где расстояние между антеннами в несколько раз превышает длину волны, расстояние между антеннами было выбрано порядка 6 метров, что в несколько раз превышает длину волны излучения на частоте 300 МГц. На рис. 5 представлена частотная зависимость коэффициента отражения для антенны с покрытием метаматериала (а) и без (б).

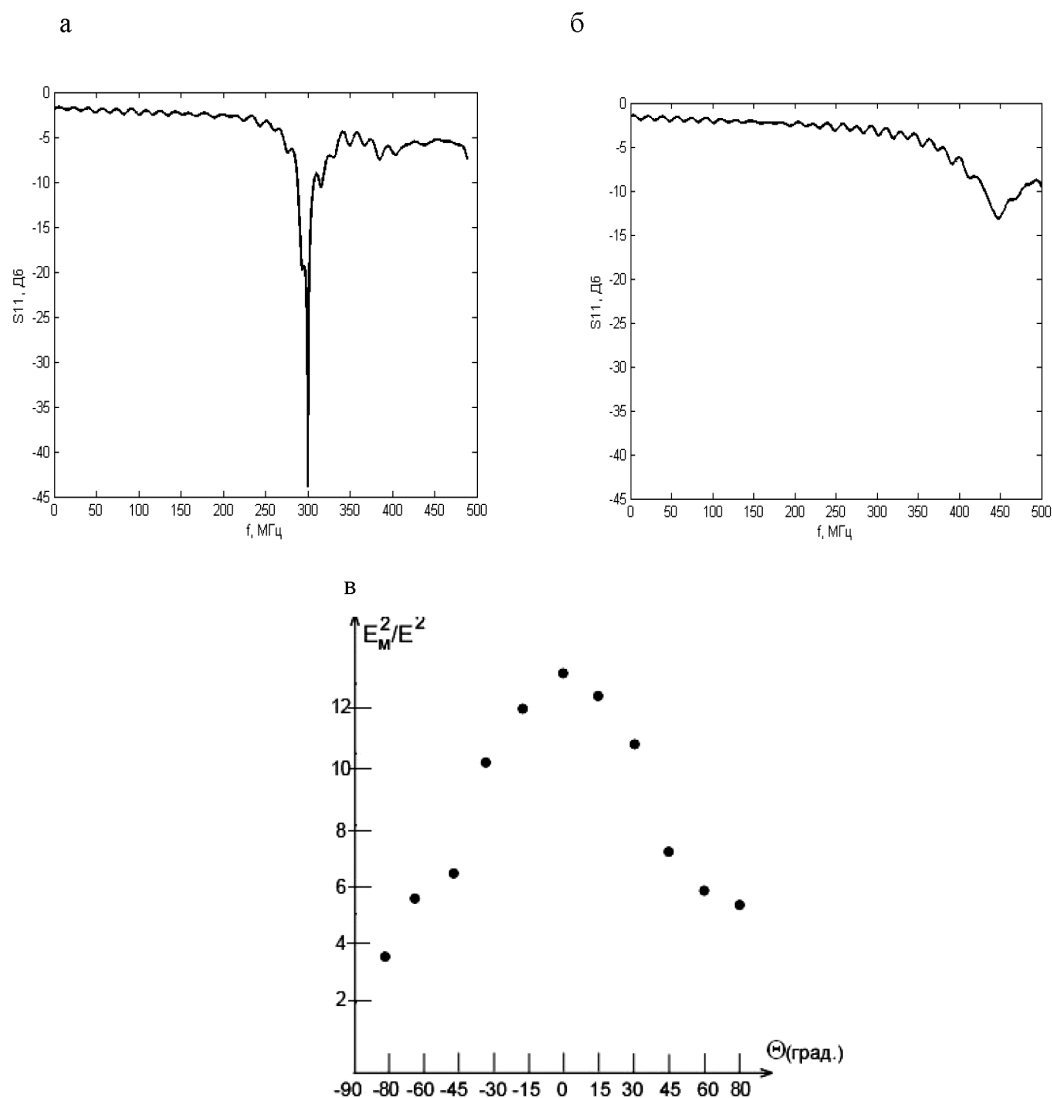


Рис. 5. Экспериментальное исследование характеристик изготовленной антенны.
Частотная зависимость коэффициента отражения антенн:
а – с применением метаматериала; б – без него; в – диаграмма направленности антенны,
покрытой слоем метаматериала

В ходе эксперимента было установлено (рис. 5 в), что мощность излучения антенны, покрытой слоем метаматериала, возрастает до 10 раз по сравнению с антенной, не покрытой метаматериалом. Так как это был первый пробный эксперимент с созданным вручную метаматериалом, из-за ряда потерь и неидеальности выполнения покрытия метаматериалом результаты эксперимента оказались несколько ниже теоретически ожидаемых.

Выводы

По результатам численного расчета был изготовлен и нанесен на антенну слой метаматериала, состоящего из П-образных резонаторов, и проведено экспериментальное исследование. В ходе эксперимента было установлено, что покрытие антенны метаматериалом приводит к обужению диаграммы направленности, что также предсказывается теоретически, но важно отметить, что, тем не менее, в любом направлении наблюдается заметное увеличение амплитуды сигнала. Что свидетельствует о том, что покрытие антенны метаматериалом заметно повышает эффективность излучения, до 10 раз,

а также подтверждает правильность работы рассчитанного нами алгоритма.

Данная работа выполнена при поддержке гранта ФСРМФПНТС, госконтракт 10234ГУ2/2015 от 14.06.2016.

Список литературы

1. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М.: АСТ, 1988. – 440 с.
2. Бестугин А.Р., Горбачкий В.В., Красюк В.Н. Аналитические и экспериментальные исследования влияния диэлектрических покрытий на излучение апертурных антенн // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 6. – С. 34–40.
3. Сивухин Д.В. Об энергии электромагнитного поля в диспергирующих средах // Оптика и спектроскопия. – 1957. – Т. 3. – С. 308–312.
4. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. – 2010. – № 3–4. – С. 44–60.
5. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92. – № 7. – С. 517–526.
6. Chen P.Y. et al. Synthesis design of artificial magnetic metamaterials using a genetic algorithm // Optics express. – Vol. 16, № 17, 18 August 2008, P. 12806–12818.
7. Панченко Б.А., Нефёдов Е.И. Микрополосковые антенны. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.