

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ

А.С. Авдюшин, М.Ю. Власов, Ю.Г. Пастернак

В статье приводится сводная информация о метаматериалах, их классификация и особенности электродинамических свойств. Рассматриваются элементарные способы реализации искусственных сред с отрицательной электрической и/или магнитной проницаемостью. Перечисляются варианты применения метаматериалов в антенной технике

Ключевые слова: метаматериалы, кольцевой разомкнутый резонатор, отрицательный индекс преломления, левосторонние среды, антенны

Массовое распространение и взрывная эволюция мобильных устройств в последнее десятилетие ставит перед инженерами и учеными все новые задачи по повышению энергоэффективности и одновременному уменьшению массы и габаритов используемых радиоэлектронных компонентов. Не в последнюю очередь это относится к антенным системам, к которым в современных устройствах предъявляются все более жесткие требования по таким параметрам, как эффективность, широкополосность, надежность и функциональность. Удовлетворение этим требованиям невозможно без реализации новых физических явлений, разработки новых материалов и технологий. В последние годы разработчиков СВЧ устройств и антенн всё больше привлекают новые материалы и среды с необычными электродинамическими свойствами, и прежде всего метаматериалы.

Метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. Искусственная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемости исходного материала. [1]

Таким образом, метаматериалы представляют собой искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. Приставка «мета» переводится с греческого как «вне», что позволяет трактовать термин «метаматериалы» как структуры, чьи эффективные электромагнитные свойства выходят за пределы свойств образующих их компонентов.

Анализ публикаций по различным аспектам технологий метаматериалов позволяет классифицировать все многообразие естественных и искусственных сред в зависимости от эффективных зна-

чений их диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей (рис. 1). У почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемости больше нуля. Существенно, что у подавляющего большинства сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот эти параметры, как правило, вообще больше или равны единице. В зарубежной литературе данные материалы обычно называют DPS (double positive, двойные положительные), подчеркивая тем самым положительность значений как ϵ , так и μ (правый верхний квадрант на рис. 1). DPS-среды считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы. [2]

Материалы, у которых отрицательна ϵ либо μ , называют SNG (single negative, моноотрицательные). В таких средах электромагнитные волны быстро затухают по экспоненте. В отношении подобных материалов полагают, что они непрозрачны для излучения, если их толщина больше, чем характерная экспоненциальная длина затухания электромагнитных волн. Если $\epsilon < 0$ и $\mu > 0$, SNG-материал называют ENG (ϵ -отрицательный), если $\epsilon > 0$ и $\mu < 0$ – MNG (μ -отрицательный).

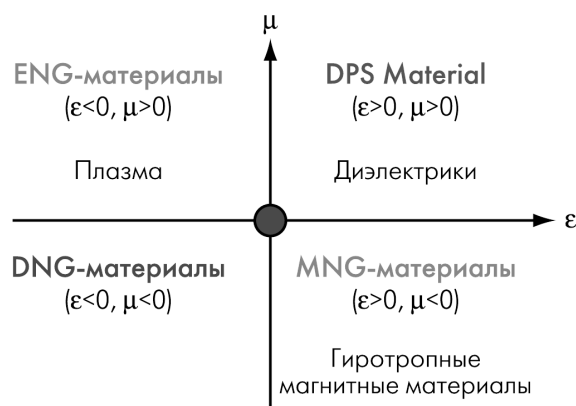


Рис. 1. Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей [3]

Наиболее известным примером естественной ENG-среды, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в

Авдюшин Артем Сергеевич - ЗАО «ИРКОС», начальник отдела, e-mail: AvdushinAS@gmail.com

Власов Михаил Юрьевич - ВГТУ, аспирант, e-mail: mivlas@inbox.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: PasternakYG@mail.ru

зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (1)$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой (радиальной частотой собственных колебаний плазмы) и зависящий от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов. Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна, и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери средой прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\varepsilon > 0$, и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\varepsilon(\omega) < 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением. [2]

В качестве примера метаматериала, представляющего собой искусственную ENG-среду, можно привести систему из тонких расположенных параллельно металлических проводников (рис. 2).

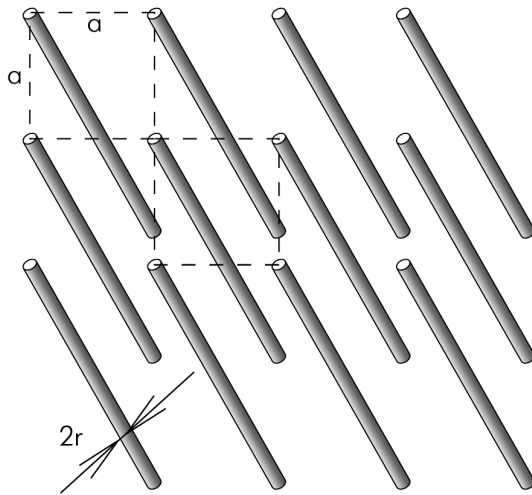


Рис. 2. Метаматериал ENG-типа в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик

Если электрическое поле параллельно осям проводников, то в них возбуждается ток, создающий эквивалентные электрические дипольные моменты. Усреднение дипольных моментов образует диэлектрическую проницаемость структуры с частотной зависимостью плазменного типа:

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega\xi}, \quad (2)$$

где ω_{pe} – частота электронной плазмы, ξ – параметр затухания:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{2\pi c^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)}}, \quad (3)$$

$$\xi = \frac{2\omega_{pe}^2 \varepsilon_0}{\pi \sigma} \left(\frac{a}{r}\right)^2. \quad (4)$$

Здесь a – расстояние между проводниками, r – радиус проводника, c – скорость света, σ – удельная электропроводность материала проводника. [1]

Для достижения независимости избирательных свойств метасреды от направления электромагнитных волн следует использовать трехмерные формы структурообразующих элементов. Обобщением проводных решетчатых на изотропный вариант ENG-материалов является триплетная конструкция (рис. 3).

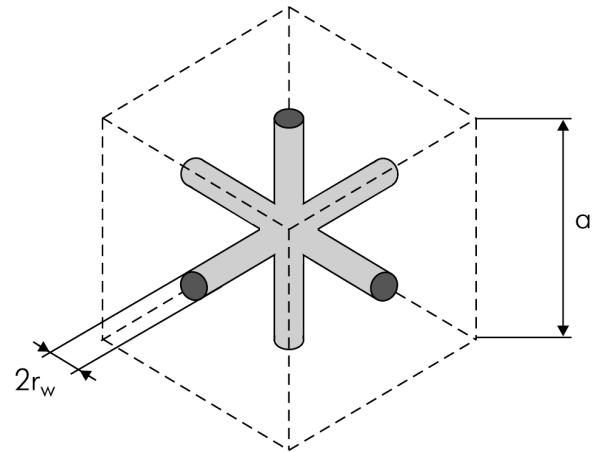


Рис. 3. Триплетный элемент для создания изотропных ENG-структур [4]

Средами с положительной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостями являются, в определенных частотных режимах, некоторые гиротропные вещества. Простейшим элементом, позволяющим создать искусственную MNG-среду (метаматериал), является кольцевой разомкнутый резонатор (КРР, англ. split ring resonator, SRR) (рис. 4).



Рис. 4. Кольцевой разомкнутый резонатор

В этой структуре емкость между двумя кольцами компенсируется их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые, в зависимости от резонансных свойств структуры, порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к положительным или отрицательным эффективным значениям μ [2]. Магнитная проницаемость метаматериала, созданного с применением таких структур, описывается формулой:

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i\omega\xi}, \quad (5)$$

где ω_{0m} – резонансная частота кольцевого резонатора, ξ – параметр затухания:

$$\omega_{0m} = c \sqrt{\frac{3p}{\pi \ln(2\omega a^3/\delta)}}, \quad (6)$$

$$F = \pi \left(\frac{a}{p} \right)^2, \quad (7)$$

$$\xi = \frac{2pR_1}{a\mu_0}. \quad (8)$$

Здесь a – внутренний радиус меньшего кольца, δ – радиальное расстояние между кольцами, p – расстояние между центрами соседних КРР, R_1 – погонное сопротивление металлического проводника.

Как видно из формулы (5), на частотах выше резонансной эффективная магнитная проницаемость такого метаматериала отрицательна. [1]

Применение этих структур для получения метаматериалов, обладающих отрицательными эффективными значениями диэлектрической и магнитной составляющей, впервые предложил Джон Пендри [5] в 1999 году. Его подход заключался в том, что если композитный материал состоит из дискретных рассеивающих элементов, размер которых меньше длины волны излучения, то данный композит с точки зрения электродинамики можно рассматривать как непрерывный в ограниченной полосе частот. Другими словами, физическая среда будет непрерывной в электромагнитном смысле, если ее свойства могут быть описаны усредненными параметрами, изменяющимися в масштабе, намного большем, чем размеры и интервал образующих материал компонентов.

Уже через год эта идея была развита Дэвидом Смитом с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего, представившими [6] метаматериал, построенный на основе сочетания форм разнообразнейших элементарных антенн (рис. 5).

Таким образом был впервые получен материал, обладающий одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями (DNG-материал). До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако и лишь в 2006 году было

установлено, что кристаллы $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ обладают такими же свойствами в диапазоне 150 ГГц.

DNG-материалы обладают рядом интересных свойств, наиболее примечательным из которых является отрицательный коэффициент преломления электромагнитных волн n . Впервые этот эффект был теоретически предсказан в работах Виктора Веселаго [7], а после создания первой DNG-структуры подтвержден экспериментально. Результаты прямого измерения угла преломления для призмы, изготовленной на основе метаматериала, приведенного на рис. 5, убедительно показали, что преломление электромагнитной волны на границе вакуума и такой композитной среды подчиняется закону Снеллиуса с отрицательным значением индекса n . [8]



Рис. 5. Комбинация структур с отрицательной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостями (экспериментальная реализация) [1]

Кроме этого, в DNG-среде векторы Умова-Пойтинга и фазовой скорости (волновой вектор $\mathbf{k}$) противоположны, соответственно $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$ и $\mathbf{k}$ формируют левостороннюю систему координат (в отличие от DPS среды, в которой они формируют правостороннюю систему). Из-за этого DNG-среды также называют LHM (left-hand materials, левосторонние материалы).

Отрицательная величина коэффициента преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из DNG-материалов. Например, фокусирующая линза становится рассеивающей. Напротив, отклоняющая двояковогнутая линза, изготовленная из DNG-материала, действует как фокусирующая. Кроме того, обычная плоскопараллельная пластина с $n = -1$ может выступать в роли собирающей линзы. [7]

Поскольку метаматериалы являются структурами с уникальными электромагнитными свойствами, они находят широкое применение при разработке и производстве различных СВЧ-устройств. На их основе строят резонаторы, фазовращатели, фильтры и т.п.

Компоненты электромагнитных цепей, обладающие свойствами метаматериалов, применяются также в технике антенн в диапазоне частот от 100

МГц до 100 ГГц. Основными направлениями использования метаматериалов при этом являются:

- излучатели, расположенные над высокоимпедансной поверхностью;
- антенны с излучающей поверхностной волной;
- уменьшение взаимного влияния элементов антенных решеток, в том числе в ММО-устройствах;
- увеличение коэффициента усиления рупорной антенны. [1]

Использование метаматериалов является одним из наиболее перспективных и динамических развивающихся направлений в СВЧ-технике. Потенциал, заложенный в нем, еще только предстоит полностью раскрыть, но уже сейчас применение искусственных структур с необычными электродинамическими свойствами позволяет создать СВЧ-устройства и антенны, характеристики которых недостижимы другими способами.

Литература

1. И.Б. Вендик, О.Г. Вендик. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3-28.

2. В. Слюсар. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ. 2009. № 7. С. 70–79

3. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations/Edited by N. Engheta and R. W. Ziolkowski. – Wiley-IEEE Press, 2006.

4. M. Hudlička, J. Machač, I.S. Nefedov. A Triple Wire Medium as an Isotropic Negative Permittivity Metamaterial – Progress in Electromagnetics Research, PIER 65, 2006, p. 233–246.

5. J.B. Pendry et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 47, No.11, 1999, p. 2075–2084.

6. D.R. Smith et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity – Physical Review Letters, Vol. 84, N 18, 1 May 2000, p. 4184–4187.

7. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. № 7. С. 517–526.

8. R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. – Science, 6 April 2001, Vol. 292, No. 5514, p. 77–79.

Закрытое акционерное общество «ИРКОС» (г. Воронеж)
Воронежский государственный технический университет

APPLICATION OF METAMATERIALS IN ANTENNA TECHNOLOGY

A.S. Avdushin, M.Yu. Vlasov, Yu.G. Pasternak

The article is a summary of metamaterials, their classification and specifics of electrodynamic properties. Discusses how to implement the basic artificial media with negative permittivity and / or permeability. Includes options for use of metamaterials in antenna technology

Key words: metamaterials, split ring resonator, negative refractive index, left-hand materials, antennas