

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ

*Маишкова Маргарита Антоновна,
студент МТУСИ, Москва, Россия,
MargaritaMashckova20@yandex.ru*

*Саргсян Александра Давитовна,
студент МТУСИ, Москва, Россия,
alexa.sargsyan@bk.ru*

*Каравашкина Валентина Николаевна,
доцент кафедры «Электроника», к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия,
v.n.karavashkina@mtuci.ru*

Аннотация

Представлена краткая историческая справка по развитию метаматериалов. Рассмотрена классификация метаматериалов по степени преломления и электродинамическим свойствам. Приведены примеры использования метаматериалов в радиотехнических устройствах. Описаны способы применения метаматериалов и метаструктур в конструкциях электрически малых и рупорных антенн и излучателей.

***Ключевые слова:** метаматериалы, метаструктуры, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, электрически малые антенны, рупорные антенны, широкополосность, минитюаризация.*

Ещё в середине прошлого столетия создание материалов со свойствами, на первый взгляд сложно согласующимися с законами физики, позволяющими воплотить самые смелые фантазии о сверхминиатюрной технике, мощных лазерах и даже невидимости, казалось если не антинаучной сказкой, то по крайней мере технологически сложной привилегией будущего. Но уже сейчас невероятная скорость научного прогресса позволяет воплотить в жизнь многие смелые фантазии и оставляет огромный простор для воображения. Да, на данный момент у нас по-прежнему нет невидимых глазу самолетов и плащей-невидимок, и вряд ли в ближайшем будущем мы сможем на них рассчитывать. Но уже сейчас мы можем создавать конструкции, невидимые для излучения инфракрасного, красного и сине-зеленого спектра. Для этих целей современные технологии позволяют создавать совершенно необычные по свойствам материалы, названные «метаматериалами». Данный класс материалов уже широко применяется в радиотехнике, военной технике, медицине, в космической отрасли и других областях. Рассмотрим в данной статье использование метаматериалов в радиотехнических устройствах, в частности в антенных системах.

Говоря о метаматериалах нельзя ограничиться лишь простым определением их искусственно созданной многокомпонентной структуры. Имея поистине потрясающую природу, метаматериалы по праву занимают место среди главных научных достижений современности. Особая периодическая структура этих материалов обеспечивает их различными оптическими, электромагнитными и другими свойствами, практически не встречающимися у материалов природного происхождения. Особого внимания заслуживают отрицательная магнитная и диэлектрическая проницаемости. Как будет показано ниже, именно они и будут определяющими в использовании этих материалов в антенных системах.

Уже само название «метаматериалы» позволяет судить об их необычных свойствах – заимствованная из греческого языка приставка «мета-» означает «вне». Такой выбор названия неслучаен: необычные свойства метаматериалы приобретают не за счет индивидуальных свойств материалов, из которых они состоят, а благодаря микроструктуре композитных материалов [1, 6, 7].

Первым в своих работах о них написал Джагадис Чандра Боze еще в конце 19 века, упомянув о своем микроволновом эксперименте, в котором он исследовал поляризационные свойства

искривленных структур.

В 1950-х годах американский инженер и исследователь Уинстон Э. Кок сконструировал микроволновые линзы, являющих собой совокупность периодически расположенных металлических полосок, проводящих сфер и дисков. Такая конструкция позволяла получить необычный эффективный показатель преломления, что приближало ее к структуре метаматериала. Таким образом, Уинстон Э. Кок и созданная им среда еще на один шаг приблизили человечество к эре метаматериалов.

Первым из советских ученых о метаматериалах написал Виктор Георгиевич Веселаго в 1967 году. В одной из своих статей он упомянул, что допускает существование так называемых «левосторонних» материалов. И если «обычные», «правосторонние» материалы обладали положительным коэффициентом преломления, то «левосторонние», наоборот, по словам В.Г.Веселаго, обладали коэффициентом преломления, меньшим нуля. Подобное отличие существенно повлияло на разницу оптических свойств этих материалов. Однако гипотеза В.Г.Веселаго на тот момент не нашла подтверждения, так как технический прогресс того времени не предоставлял возможности доказать ее экспериментально, вследствие чего о ней забыли вплоть до конца XX века.

Интерес к метаматериалам был возвращён в начале XXI века, когда в 2000 году Дэвид Смит совместно с группой ученых из Калифорнийского университета объявили, что им удалось создать композитный материал с отрицательным показателем преломления.

Классификация метаматериалов

Несмотря на относительную молодость, метаматериалы имеют весьма обширную классификацию. В данной статье будут приведены лишь два критерия, являющиеся наиболее существенными при использовании данных материалов в радиотехнических устройствах, в частности в конструкциях антенн.

По степени преломления

1. Одномерные метаматериалы состоят из слоёв элементов, которые расположены параллельно и имеют разные степени преломления. В них волна распространяется лишь в одном направлении.
2. Двумерные метаматериалы – это метаповерхности. В них распространение волны может происходить в двух направлениях.
3. Трёхмерные метаповерхности – метаструктуры – представляют из себя объёмную структуру (шар, куб и т.д.), расположенную в трёхмерном пространстве. Степень преломления в них постоянно меняется в трёх направлениях [2].

В зависимости от электродинамических свойств

1. ϵ -негативные (*ENG*-материалы) ($\epsilon < 0$). Как видно из названия, такие среды обладают отрицательной диэлектрической проницаемостью. Но что примечательно, одним из существенных свойств данных материалов является возможность управления их диэлектрической проницаемостью. Так, изменяя частоту возбуждения, можно сделать данную среду прозрачной или непрозрачной для электромагнитной волны. Соответственно, при $\epsilon > 0$ электромагнитная волна будет проходить через материал, при $\epsilon < 0$, наоборот, ее прохождение через материал будет существенно затруднено. Кроме того, подобные среды можно встретить и в природе – это плазма. К средам с отрицательной ϵ , созданным человеком, можно отнести систему из тонких металлических параллельных проводов или индуктивных петель, собранных при помощи двух разрезных рамок.

2. μ -негативные (*MNG*-материалы) ($\mu < 0$). Важнейшим материалом такого типа является двойной кольцевой резонатор (*split ring resonator, SRR*). Ёмкость, возникающая в таком резонаторе между двумя кольцами (что на первый взгляд может показаться существенной проблемой), компенсируется их индуктивностью. Знак магнитной проницаемости таких материалов, так же как и в случае *ENG*-материала, можно изменять. В этом случае роль своеобразного «управляющего» будет выполнять направленность вторичного магнитного поля, которое создаётся изменяющимся во времени магнитным полем.

3. Бинегативные или *DNG*-материалы ($\epsilon < 0$ и $\mu < 0$). Одновременная отрицательность ϵ и μ обеспечивает такой среде отрицательный коэффициент преломления. Это и есть те самые «левосторонние» материалы, о которых в свое время и писал В.Г.Веселаго. На сегодняшний день они представляют особенный интерес для инженеров, занимающихся разработкой и конструированием

Использование метаматериалов в радиотехнических устройствах

Развитие устройств мобильной связи, эволюция систем радиолокации, радиоастрономии, радионавигации требуют новых принципов в построении и функционировании радиотехнических устройств. И одна из важнейших задач, стоящих на сегодняшний день перед учёными и инженерами, – это уменьшение массы и габаритов радиоэлектронных компонентов при одновременном повышении их энергоэффективности, надежности и функциональности.

Революция технологий производства и проектирования в области микроэлектроники позволила добиться компактных размеров радиоэлектронных устройств. Однако на сегодняшний день технология сокращения габаритов микрополосовых антенн достигла своих пределов. Тем самым она утратила свою былую перспективность, уступив место использованию в конструкциях антенн новых материалов и сред с необычными электродинамическими свойствами. Этим объясняется все возрастающий интерес к созданию и применению в радиоэлектронике метаматериалов.

На данный момент применение метаматериалов в антенной технике позволяет:

1. В первую очередь, как было сказано выше, уменьшить размеры антенных элементов при одновременном увеличении их широкополосности;
2. Добиться компенсации паразитных ёмкостей и индуктивностей в электрически малых антеннах. В основном это достигается за счёт использования *MNG*-материалов, о которых говорилось выше;
3. Уменьшить влияние элементов антенных решеток друг на друга;
4. Улучшить способность излучателя концентрировать сигнал в определенном направлении, то есть достичь сужения его пространственной направленности;
5. Усилить свойства рупорных и других видов антенн [4].

Подложки из метаматериалов

Для начала следует дать краткое определение электрически малым антеннам (здесь и далее – ЭМА). ЭМА представляют собой особый класс антенн. По размерам ЭМА значительно меньше половины длины волны колебаний, принимаемых или излучаемых ими.

Изготовление подложек из метаматериалов и дальнейшее применение их в печатных миниатюризированных антеннах позволяет решить одну из главнейших задач современной микроэлектроники – значительно уменьшить габариты излучателей. Следует ожидать, что подобное уменьшение размеров ЭМА приведёт к снижению эффективности их излучения, однако применение метаматериалов позволяет добиться совершенно иного результата. Благодаря увеличению полосы пропускания, применение данной технологии позволяет не только миниатюризировать устройства, но и не потерять, и даже увеличить их эффективность.

При этом данная технология предоставляет достаточно широкий выбор подходящих материалов: можно выбрать как однородную, так и композитную структуру метаматериала. Рассмотрим следующую конструкцию: в качестве подложки для печатной антенны использована композитная *MNG*-структура – вертикальные квадратные рамки с разрезами, которые при желании могут быть заменены другими элементами, будь то элементы U-образной (при этом их необходимо расположить горизонтально) или спиральной формы. Элементы при этом погружают в диэлектрическую подложку. На рисунке 1 приведена иллюстрация подобной конструкции.



Рис. 1. Печатная антенна с *MNG*-подложкой

В качестве альтернативного варианта в данном случае можно создать и использовать бинегативную среду. При этом конструкция будет представлять собой совокупность ячеек, и сочетать в себе как правосторонние, так и левосторонние элементы. Общепринятое наименование таких материалов – праволевосторонние (от английского *Composite Right/Left-Handed* – здесь и далее *CRLH*) [4] – при учёте их свойств весьма очевидно. Рассмотрим пример такого «гибрида». Как было сказано выше, он представляет собой совокупность ячеек, причем ячейки из правостороннего, «обычного» материала чередуются в нём с ячейками из *DNG*-материала. Обладая отрицательным коэффициентом преломления ($n < 0$) в области низких частот, этот материал при превышении значения некоторой граничной частоты становится материалом с положительным коэффициентом преломления ($n > 0$). Данную частоту можно легко регулировать, лишь изменяя и подбирая оптимальные размеры сегментов. При этом можно также добиться значительной миниатюризации устройств.

Применение метаматериалов в конструкции излучателей

Американская компания *Netgear* является одной из компаний, сделавших первые шаги в использовании метаматериалов в серийном изготовлении печатных антенн. За основу были взяты антенны *MIMO* компании *Rayspan*, в конструкцию которых была внедрена композитная *CRLH*-структура [5]. Очевидным преимуществом такого решения было не только заметное уменьшение габаритов излучателей, но и снижение их влияния друг на друга. Примечательно, что расположение между двумя традиционными печатными антеннами вставки из совокупности металлических спиралей существенно повлияло на величину их полосы пропускания: компании удалось добиться её увеличения на 15% [4].

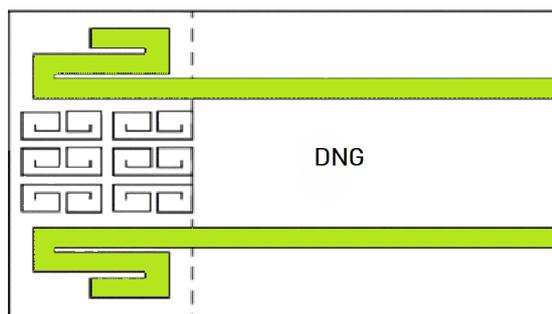


Рис. 2. Использование метаматериала в антенной системе *MIMO*

Метаоболочки, используемые в электрически малых антеннах

При конструировании электрически малых антенн можно использовать *ENG*-материалы, что довольно удобно. Если взять за основу антенны ЭМА-диполь, то придется столкнуться с проблемой его достаточно высокой реактивной ёмкости. Использование *ENG*-оболочки в данном случае будет компенсировать эту ёмкость. При этом можно избежать обычно возникающего в ходе подобной операции затухания электромагнитного поля. Толщина метаоболочки, которая при определённых условиях может составлять меньше сотых долей длины волны, не приводит к заметным ослаблениям поля.

Теперь рассмотрим конструкцию из *ENG*-оболочки, выполняющей роль своеобразного колпака находящегося внутри него монополя, соединённого с коаксиальным фидером. Наиболее важным является то, что такая конструкция, выполненная из простых метаматериалов, обладает добротностью, большей фундаментального предела Чу. Таким образом, сделан ещё один шаг к созданию сверхминиатюрных антенн. Также стоит отметить, что на резонансной частоте для *ENG*-материала КПД составляет около 98-99% [4].

Соответствующий класс излучателей получил название метаинспирированных (от англ. «вдохновленных метаматериалами») антенн (АИМ) [4].

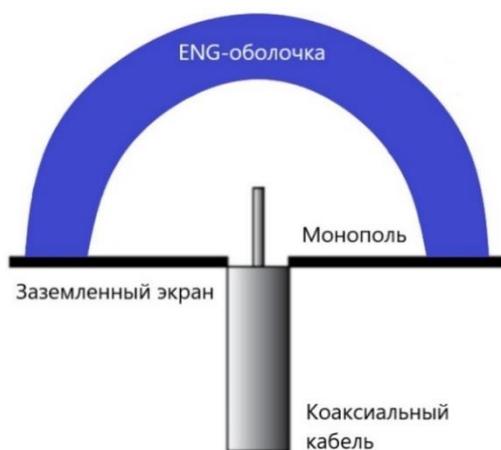


Рис. 3. Метаоболочки в электрически малых антеннах

Но данные конструкции, преимуществом которых является электрически малый размер, все же обладают достаточно узкой полосой пропускания и, как было рассмотрено выше, максимально эффективны при резонансной частоте. Одним из способов расширения полосы частот таких конструкций является оптимизация вспомогательного элемента, например, использование в качестве него так называемую «пиксельную» конструкцию [4].

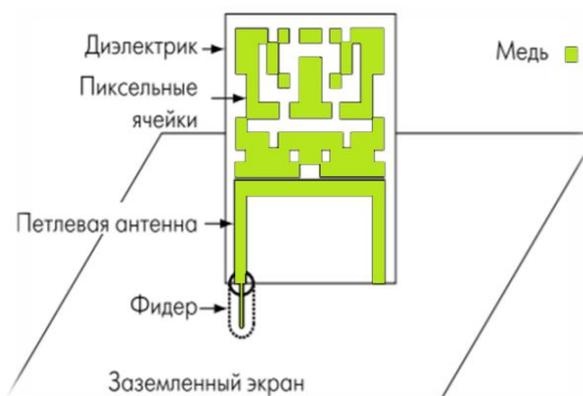


Рис. 4. "Пиксельная" конструкция АИМ

Узкая пространственная направленность

В общих словах, диаграмма направленности дает графическое представление, насколько эффективен приём или излучение электромагнитного сигнала антенной в выбранной пространственной ориентации. При улучшении способности антенны концентрировать основной сигнал в определённом направлении, ее диаграмма направленности будет сужаться. Следственно, сужение пространственной направленности излучения – это ещё одна задача современной антенной техники, решение которой также кроется в использовании метаматериалов.

Явление, при котором диаграмма направленности излучателя существенно сужается, впервые было замечено в конструкциях антенн на основе резонаторов Фабри-Перо. Технически они представляют собой достаточно простую систему, представленную в виде двух экранов. Над первым экраном, обычно представляющем собой металлическую поверхность, располагается излучатель. На расстоянии, равном целому числу полуволн, параллельно первому располагают второй экран. Обычно он полупрозрачен для электромагнитных волн. На данный момент можно добиться существенного разнообразия модельного ряда таких антенн, ведь ничто не запрещает использовать в качестве материалов для экранов не только металлы, но и различные метаматериалы. В частности, в качестве экранирующей поверхности можно использовать решётки из диэлектрических резонаторов (ДР) [5] – у данной технологии достаточно перспективное будущее.

Использование метаэкранов позволяет также уменьшить габариты антенн (уменьшается их высота). Кроме того, это позволяет управлять их полосой пропускания и резонансной частотой.

Применение метаматериалов в конструкции рупорных антенн

Покрытие метаматериалами внутренней поверхности раструба рупора помогает повысить эффективность его работы. В качестве метаматериала в таком случае можно использовать квадратные решётки, обычно изготавливаемые из меди, вставленные в раструб рупора, как показано на рисунке 5. Кроме того, вместо трёх слоев медных решёток можно использовать многослойные сетки из других проводников. Размещение такой конструкции в качестве линзы в раскрытие рупора позволяет повысить его коэффициент усиления и при этом сократить длину раструба до 56% [4]. Однако необходимо помнить, что подобная операция может привести к сужению полосы пропускания антенны. Есть несколько решений этой проблемы, в общем случае сводящихся к поиску оптимальных для данных условий и задач параметров метавставок. Можно, к примеру, изменить интервал между слоями таких вставок или поработать с конструкцией самих решёток, изменив количество и расстояние между проводниками и т.д.

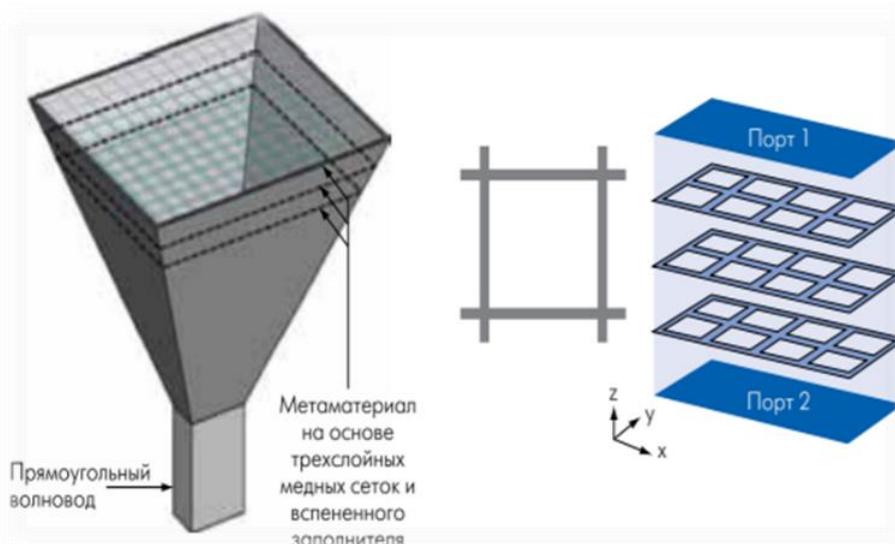


Рис.5. Конструкция рупорной антенны с вставками из метаматериалов

Использование комбинации продольных и поперечных решеток проводников позволяют еще больше сократить длину рупорного раструба.

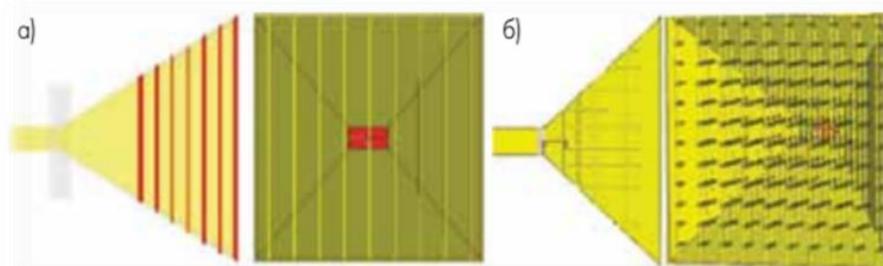


Рис.6. Конструкция рупорной антенны с вставками из метаматериалов:

- а) в раструб рупора помещена конструкция из N -ого количества проводящих слоев, $N=7$;
- б) метавставка представляет собой сетку продольных проводников, совмещённую со слоями проводников в поперечной плоскости

Заключение

Подводя итоги ко всему выше сказанному, остается лишь добавить: уверенное развитие и внедрение метаматериалов в различные отрасли делают их разработку одним из перспективных направлений прикладной физики. Удивительные, почти не встречающиеся в природе свойства метаструктур и конструкций на их основе открывают перед человечеством широкий спектр возможностей от защиты космических аппаратов от радиации и конструирования микроскопической техники до создания конструкций, невидимых при определенных частотах. В частности, появление метаматериалов и применение их в радиотехнических устройствах и по сей день сопровождается открытиями целого ряда эффектов, появлением на рынке новых серийных изделий и технологий. Хотя на данный момент широкое применение метаматериалов ограничивается их высокой себестоимостью и сложностью производства, есть все основания полагать, что это лишь начало новой грандиозной эры - эры, в которой человечество ждет немало впечатляющих открытий.

Литература

1. Новый метаматериал, необычно преломляющий свет, ускорит работу компьютеров [Электронный ресурс] // Импульс/ МФТИ. – 2015. – URL: <https://mipt.ru/newsblog/lenta/pro>.
2. Метаматериалы. Виды и устройство. Работа и применение [Электронный ресурс]. – URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrotehnika/metamaterialy/>
3. Бузов, А.Л., Ключев Д.С., Нецерет А.М., Неганов В.А. Перспективы использования метаматериалов в антеннах нового поколения [Электронный ресурс] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы – 2017. – №3. – С.15-20. – URL: <file:///C:/Users/HP/Downloads/7078-16309-2-PB.pdf>.
4. Вендик, И.Б., Вендик, О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот: обзор // Журнал технической физики. 2013. №1. С.3.
5. Слюсар, В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Последняя миля – 2010. №3-4. С. 44-58.
6. Елизаров А.А., Шаймарданов Р.В., Пчельников Ю.Н., Каравашкина В.Н. Исследование замедляющей системы типа "ребристый стержень в азимутально-неоднородном экране" // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 7. С. 3-12.
7. Каледина А.В., Чехов А.С., Каравашкина В.Н. Применение high-k плёнок в современной электронике // Телекоммуникации и информационные технологии. 2016. Т. 3. № 1. С. 75-77.

APPLICATION OF METAMATERIALS IN ANTENNA SYSTEM

Margarita A. Mashkova,
Student MTUCI, Moscow, Russia,
MargaritaMashkova20@yandex.ru

Aleksandra D. Sargsyan,
Student MTUCI, Moscow, Russia,
alexa.sargsyan@bk.ru

Valentina N. Karavashkina,
Associate Professor of Department of the Electronics, PhD, MTUCI, Moscow, Russia,
v.n.karavashkina@mtuci.ru

Abstract

Here is presented the brief historical background on the development of metamaterials. The classification of metamaterials according to the degree of refraction and electrodynamic properties is considered. Examples of the use of metamaterials in radio engineering devices are given. Methods of using metamaterials and metastructures in constructions of electrically small antennas, horn antennas and in emitters are described.

Keywords: metamaterials, metastructures, dielectric constant, magnetic permeability, electrically small antennas, horn antennas, broadband, miniaturization.