

УДК 621.396.67

Абдыраева Нурипа Рахматиллаевна,
кандидат технических наук,
Ошский технологический университет
E-mail: nabdyraeva80@mail.ru
Абдыраева Нурипа Рахматиллаевна,
техника илиминин кандидаты
Ош технологиялык университети
Abdyraeva Nuripa Rahmatillaevna
candidate of technical sciences,
Osh technological University

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Аннотация. Целью исследования этой статьи является исследование применения метаматериалов в антенной технике. Проведена оценка возможности применения метаматериала в качестве подложек DNG-материалом. Для определения характеристик антенн рассмотрено свойства границы раздела между свободным пространством и искусственным материалом. Разнообразные антенные системы на основе метаматериалов могут использоваться для поддержки датчиков наблюдения, линий связи, навигационных систем и систем управления. Помимо миниатюризации, новые конфигурации антенн имеют широкий спектр применения: от радиочастотных устройств до оптических устройств. Изучаются и другие комбинации антенных подсистем из метаматериала для различных устройств. По результатам анализов предложена высокоимпедансная поверхность на основе метаматериалов.

Ключевые слова: метаматериал, высокоимпедансная поверхность, эффективность, антенная техника, метасреда.

АНТЕННА ТЕХНИКАСЫНДА МЕТАМАТЕРИАЛДАРДЫ КОЛДОНУУ

Аннотация. Бул макаланын максаты - антенна технологиясында метаматериалдарды колдонууну изилдөө. DNG материалындагы подложка катары колдонулган материалдардын колдонуу мүмкүнчүлүгү бааланган. Антенналардын мүнөздөмөлөрүн аныктоо үчүн бош мейкиндик менен жасалма материалдардын ортосундагы бөлүнүү чегинин касиеттери каралган. Ар кандай метаматериалдыкнегизиндеги антенна системалары көзөмөл сенсорлорун колдоодо, байланыш линиясында, навигация системаларын жана башкаруу системаларын колдоо үчүн колдонулушу мүмкүн. Кичирейтүүдөн тышкары жаңы антенна конфигурациялары кеңири спектрге ээ: радио жыштык түзүлүштөрүнөн оптикалык түзүлүшкө чейин. Ар кандай түзүлүштөр үчүн башка комбинациядагы метаматериалдык антенна подсистемаларын изилденип жатат. Анализдердин жыйынтыгы боюнча метаматериалдарга негизделген жогорку импеданстык катмар сунушталган.

Негизги сөздөр: метаматериал, жогорку импеданстуу катмар, эффективдүүлүк, антенналык техника, метачөйрө.

APPLICATION OF METAMATERIALS IN ANTENNA TECHNOLOGY

Abstract. The purpose of this article is to investigate the application of metamaterials in antenna technology. The possibility of using the metamaterial as a substrate with DNG material was assessed.

To determine the characteristics of antennas, the properties of the interface between free space and artificial material are considered. A variety of metamaterial-based antenna systems can be used to support surveillance sensors, communications links, navigation and control systems. In addition to miniaturization, new antenna configurations have a wide range of applications, from RF devices to optical devices. Other combinations of metamaterial antenna subsystems are being explored for various devices. Based on the results of the analyses, a high-impedance surface based on metamaterials was proposed.

Keywords: metamaterial, high-impedance surface, efficiency, antenna technology, metamedium.

Введение

Перспективным направлением развития антенной техники является использование метаматериалов. Хотя около 20 лет назад технология микрополосковых антенн казалась многообещающей, она также имела ограничения в уменьшении размеров устройств, использующих антенную технологию. Поэтому поиск нетрадиционных подходов к созданию СВЧ-технологий в последнее время значительно активизировался, о чем свидетельствует серия публикаций авторов по технологиям электрически малых антенн (ЭМА) [2,3].

Достижения в области создания и применения метаматериалов являются новым направлением развития теории ЭМА. Рассмотрим основные результаты в этой области применительно к вопросу совершенствования технологии ЭМА.

Метаматериалы — композиционные материалы, свойства которых определяются несвойствами их компонентов, а периодической структурой искусственно созданных макроскопических элементов произвольного размера и формы. В 1946–1948 гг. Уинстон Э. Кок [7] создал первую микроволновую линзу, используя проводящие сферы, диски и периодически расположенные металлические полоски, образующие искусственную среду с определенным эффективным показателем преломления. С тех пор сложные искусственные материалы стали предметом изучения многих исследователей по всему миру. В последние годы новые концепции синтеза метаматериалов способствовали созданию структур, имитирующих электромагнитные свойства известных материалов или имеющих качественно новые функциональные возможности.

В настоящее время устройства, работающие в беспроводных сетях, быстро развиваются. Это связано с увеличением абонентов мобильной

связи и развитием Интернет-технологий [1]. В последнее время интерес к использованию метаматериалов в антенной технике значительно возрос. Рост исследований в области антенных технологий на основе метаматериалов приведет к качественным изменениям параметров технологических решений.

Метаматериалы в антенной технике

Антенны из метаматериалов — это тип антенн, в которых метаматериалы используются для улучшения характеристик миниатюрных (электрически малых) антенных систем. Как и электромагнитные антенны, цель этих антенн — излучать энергию в свободное пространство. К этому классу антенн относятся метаматериалы — материалы, созданные на основе новых микроскопических структур с необычными физическими свойствами.

Антенны, использующие метаматериалы, могут увеличить излучаемую мощность антенны. Как вы знаете, обычные антенны очень малы по сравнению с их длиной волны, поэтому они отражают большую часть сигнала обратно к источнику. Антенна из метаматериала намного больше своего фактического размера и имеет структуру, которая накапливает и переизлучает энергию. Компоненты электромагнитных цепей со свойствами метаматериалов нашли применение в антенной технике в гораздо более высоком диапазоне частот от 0,1 до 100 ГГц. К основным применениям метаматериалов в антенной технике относятся:

- производство подложек и излучателей для печатных антенн для достижения широкой полосы пропускания и уменьшения размеров антенных элементов;

- достижение узкой пространственной ориентации первичного излучателя, погруженного в метасреду;

- эмиттер, расположенный на высокоомной поверхности;
- антенна, излучающая поверхностные волны;
- уменьшает взаимное влияние элементов антенной решетки, включая устройства с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO);
- увеличивает усиление рупоров и других типов антенн.

Конструкции антенн

Конструкции антенн с использованием метаматериалов могут увеличить излучаемую мощность антенны. Современные антенны из метаматериала излучают до 95% входящего радиосигнала. Для эффективной работы стандартная антенна должна иметь как минимум половину длины волны сигнала. Например, на частоте 300 МГц длина антенны должна составлять 0,5 м.

В отличие от простых антенн, экспериментальные антенны из метаматериалов достигают одной пятидесятой длины волны и могут быть даже меньше. Метаматериалы обеспечивают основу для миниатюризации микроволновых антенн с эффективной мощностью и приемлемой полосой пропускания. Антенны на основе метаматериалов преодолевают ограничения эффективности и пропускной способности ранее разработанных небольших антенн. Использование метаматериалов позволяет создавать антенные элементы меньшего размера, которые охватывают более высокие и более широкие диапазоны частот, что позволяет эффективно использовать доступное пространство в приложениях с ограниченным пространством. В этих случаях очень важен высокий коэффициент усиления антенны, поскольку излучающие элементы объединяются в большие антенные решетки.

Кроме того, отрицательный показатель преломления метаматериалов фокусирует электромагнитное излучение с помощью плоской

линзы по сравнению с дисперсными материалами. Первыми исследованиями антенн из метаматериалов были аналитические исследования небольших дипольных антенн, окруженных метаматериалами. Среди других названий эти материалы известны как метаматериалы с отрицательным индексом (NIM) или метаматериалы с двойным отрицательным индексом (DNG). Аналитически и численно эта конфигурация, по-видимому, позволяет значительно увеличить мощность. Это снижает реактивное сопротивление. Оболочка DNG также становится естественной сетью согласования импеданса для определенных систем.

Метаматериалы в качестве подложек

Изготовление подложек с использованием метаматериалов позволяет уменьшить размеры традиционных излучателей, улучшить их полосы пропускания и эффективность излучения. Структура метаматериалов, образующих подложку, может быть однородной либо сформированной, образованной из нескольких типов сред.

Композитные подложки часто содержат структуры, сочетающие в себе правые и левые сегменты. Одним из привлекательных свойств этих гибридных решений является то, что они обеспечивают зависимость показателя преломления. Например, привлекателен композитный материал, сочетающий ячейки из обычных материалов (ϵ и $\mu > 0$) с двойным отрицательным DNG-материалами.

В материалах первого типа векторы напряженности электрического и магнитного поля образуют с волновым вектором правую систему координат, а в материалах DNG — левостороннюю, поэтому такие композиционные материалы называются правосторонними (CRLH, Composite Right/Left-Handed). В низкочастотном диапазоне материалы CRLH могут иметь отрицательный

показатель преломления, а выше определенной предельной частоты — положительный показатель преломления. Выбирая размер правого и левого сегментов, можно регулировать резонансную частоту печатной антенны. Например, режимы TM_{010} и TM_{020} можно использовать одновременно, чтобы сделать его двухдиапазонным [5].

Поэтому можно заметно уменьшить размеры печатных антенн за счет использования подложек, частично заполненных материалом DNG. Основная проблема, которую предстоит решить разработчикам это найти электромагнитные параметры метаматериалов с низкой дисперсией.

Высокоимпедансная поверхность

Рассмотрим свойства границы раздела свободного пространства и искусственных материалов. Целью разработки материалов является создание материалов с поверхностным сопротивлением электромагнитным волнам СВЧ-диапазона, значительно превышающим характеристическое сопротивление свободного пространства $Z_0=120\Omega$.

Поверхности с таким высоким поверхностным сопротивлением называются магнитными «стенами». Известно, что металлы с высокой проводимостью имеют поверхностное сопротивление электромагнитным волнам микроволнового диапазона, измеряемое сотыми долями Ома. Металлы с высокой проводимостью называются «электрическими стенками».

В природе не существует материал, обладающий свойствами магнитной стенки. Этим свойством обладают ферромагнитные материалы с большой величиной магнитной проницаемости. Магнитные стенки могут получены с помощью искусственным путем. На рис. 1, а, б показана схема конструкции, образованной металлическими элементами в форме грибочков [3]. Структурные

размеры каждого грибочка значительно меньше длины электромагнитных волн, падающих в свободное пространство на структуру, образованную грибочками. На рис. 1, с показана эквивалентная схема цепи, образованная двумя соседними грибочками. Ножки грибочков образуют сосредоточенную индуктивность, а зазор между шляпками формирует сосредоточенную емкость.

Такая эквивалентная схема повторяет эквивалентную схему ячейки линии передачи с отрицательной дисперсией [3]. Каждая ячейка в магнитной стенке представляет собой резонансный контур с достаточно высоким коэффициентом добротности $Q>100$. Резонансная частота контура определяется геометрическими размерами ячейки и находится в диапазоне от 0,1 до 100 ГГц. Эксперименты с магнитной стенкой позволили получить следующие количественные оценки для частоты 16 ГГц: $L=2$ нГн, $C=0,05$ пФ.

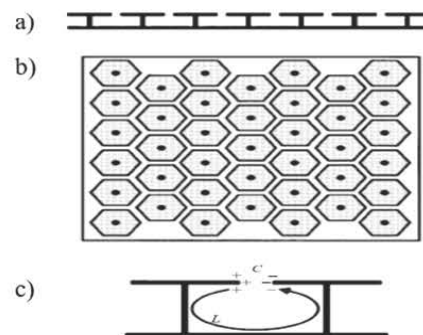


Рис. 1. Конструктивное решение высокоимпедансной поверхности

На резонансной частоте $f_0 = 16$ ГГц при добротности $Q = 100$ поверхностное сопротивление $Z_{\text{пов}}=20000 \Omega$, и оно сохраняется достаточно большим в пределах рабочей полосы частот $f=0,2$ ГГц. Следует подчеркнуть, что искусственные магнитные стенки сохраняют свои «магнитные» свойства в достаточно узкой полосе частот, определяемой их резонансными свойствами.

Рассмотрим влияние высокоомных поверхностей (магнитных стенок) и идеально проводящих поверхностей проводника на свойства СВЧ-излучателей, расположенных на этих поверхностях. На рис. 1 представлена схема эмиттера, расположенного параллельно высокоомной поверхности (а) и идеально проводящей поверхности проводника (b). В обоих случаях воздействие поверхности эквивалентно току, протекающему через проводник, представляющий собой зеркало, отраженное от поверхности. Этот ток эквивалентен наличию второго эмиттера. В случае магнитной стены ток в отраженном проводнике находится в фазе с током в основном эмиттере. Для стен из металлов с высокой проводимостью ток в отраженном проводнике не совпадает по фазе с током в основном эмиттере.

В первом случае наличие отражений усиливает излучение основного излучателя, даже если расстояние между этим излучателем и стеной очень мало.

Параметры h_0 и h_1 (рис. 2) измеряются в сотых долях длины волны. Во втором случае излучение двух противофазных токов при малом расстоянии между проводниками будет взаимно уничтожаться. Излучение проводника на металлической поверхности активизируется, когда расстояние между основным излучателем и плоскостью его отражения близко к четверти длины волны в свободном пространстве ($h_2 = 0,25\lambda_0$). Конструктивное решение системы активных и пассивных излучателей на высокоимпедансной поверхности многократно проверено и находит практическое применение в разработке миниатюрных антенн [4,5].

Следует отметить еще одну особенность излучателей, установленных на высокоомных поверхностях. В этом случае поверхностный ток не течет в обратную сторону носителя и в системе нет излучения, противоположного

основному излучению антенны. Если основной излучатель расположен на высокопроводящем металле, за носителем течет поверхностный ток, сопровождающийся излучением в направлении, противоположном основному излучению антенны.

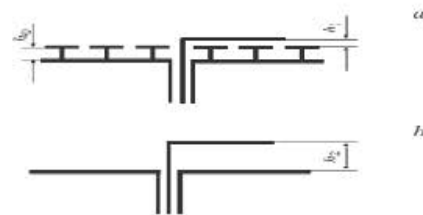
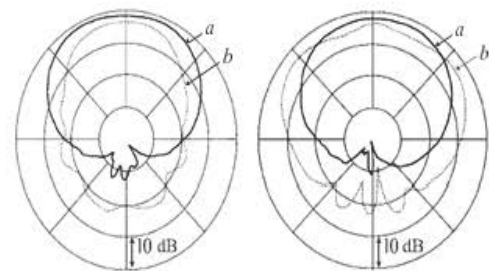


Рис. 2. Горизонтальный вибратор над высокоимпедансной поверхностью (а) и над металлической поверхностью с высокой проводимостью (b)



H-plane radiation pattern E-plane radiation pattern

Рис. 3. Диаграммы направленности в E-и H-плоскостях горизонтального вибратора над высокоимпедансной поверхностью (а) и над металлической поверхностью (b)

На рис. 3 представлена диаграмма направленности эмиттера, размещенного на высокоомной поверхности и на идеальном проводнике. Глядя на график выше, мы видим, что обратное излучение от горизонтального генератора на поверхности с высоким импедансом гораздо меньше.

Заключение

В заключение следует отметить, что анализируя известные направления исследований теории метаматериалов, можно прогнозировать появление антенных структур на основе активных и нелинейных метаструктур.

Разнообразные антенные системы на основе метаматериалов могут использоваться для поддержки датчиков наблюдения, линий связи, навигационных систем и систем управления.

Помимо миниатюризации, новые конфигурации антенн имеют широкий спектр применения: от радиочастотных

устройств до оптических устройств. Изучаются и другие комбинации антенных подсистем из метаматериала для различных устройств.

Учитывая, что успешный старт эры метаматериалов в антенной технике начался с открытия ряда удивительных эффектов, есть основания ожидать, что ее продолжение будет не менее впечатляющим.

Список литературы:

1. Абдыраева Н.Р., Ташполотов Ы. Разработка фрактальной антенны Кривой Коха для сотовых систем связи работающих на частоте 2100 и 2600 МГц. Бюллетень науки и практики.-РФ, –Нижевартовск: 2018.-№3.-С.164-169.

2. Слюсар В. Антенны PIFA для мобильных средств связи: многообразие конструкций. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, № 1, с. 64–74.

3. Слюсар В. Синтез антенн на основе генетических алгоритмов. – Первая миля, 2008, № 6, с. 16–23; 2009, № 1, с. 22–25.

4. A.Semichaevsky and A. Akyurtlu. Homogenization of Metamaterial Loaded Substrates and Superstrates for Antennas, – Progress In Electromagnetics Research, № 71, 2007, p.129–147. <http://ceta.mit.edu/PIER/pier71/08.07021001.S.Akyurtlu.pdf>.

5. P.Y.Chen et al. Synthesis design of artificial magnetic metamaterials using a genetic algorithm. - OPTICS EXPRESS, vol. 16, № 17, 18 August 2008, p.12806–12818.

6. Jiang Xiong, Hui Li, Yi Jin and Sailing He. Modified TM₀₂₀ Mode of a Rectangular Patch Antenna Partially Loaded With Metamaterial for Dual-Band Applications. – IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 8, 2009, p. 1006–1009.

7. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. Electromagnetic waves in Chiral and Bi-Isotropic Media. – London: Artech House, 1994.