

# МЕТАМАТЕРИАЛЫ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ:

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В.Слюсар, д.т.н. / swadim@inbox.ru

Применение метаматериалов – это новое и чрезвычайно перспективное направление развития радиотехники, в первую очередь затрагивающее область антенных систем. Технология микрополосковых антенн, которая была столь многообещающей около двух десятилетий назад, ныне достигла своих пределов относительно сокращения габаритов СВЧ-устройств. Поэтому поиск нетрадиционных подходов к созданию микроволновой техники в последнее время существенно активизировался, о чем свидетельствует серия публикаций автора по технологиям электрически малых антенн (ЭМА) [1–4]. Одно из новых направлений в развитии теории ЭМА связано с достижениями в области создания метаматериалов. Рассмотрим основные результаты в данной области применительно к задаче совершенствования техники ЭМА, опустив физические основы и часть истории этого вопроса, которые более подробно изложены в работе [5].

### ИСТОРИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Метаматериалы – это искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. Первые работы в этом направлении относятся еще к 19 веку [6]. В 1898 году Джагадис Чандра Бозе провел первый микроволновый эксперимент по исследованию поляризационных свойств созданных им структур искривленной конфигурации [7]. В 1914 году Линдман воздействовал на искусственные среды, представлявшие собой множество беспорядочно ориентированных маленьких проводов, скрученных в спираль и вложенных в фиксировавшую их среду [8].

В 1946–1948 годах Уинстон Е. Кок [9, 10] впервые создал микроволновые линзы, используя проводящие сферы, диски и периодически расположенные металлические

полоски, фактически образовавшие искусственную среду со специфичным по величине эффективным индексом преломления. С тех пор сложные искусственные материалы стали предметом изучения для многих исследователей во всем мире. В последние годы новые понятия и концепции в синтезе метаматериалов способствовали созданию структур, имитирующих электромагнитные свойства известных веществ или обладающих качественно новыми функциями.

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.

Все многообразие естественных и искусственных сред можно классифицировать в зависимости от эффективных значений их диэлектрической ( $\epsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостей (рис.1). У почти всех встреча-

ющихся 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, дважды позитивные), подчеркивая тем самым положительность значений как  $\epsilon$ , так и  $\mu$  (правый верхний квадрант на рис.1). DPS-среды считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы.

Материалы, у которых отрицательна  $\epsilon$  либо  $\mu$ , на принятом за рубежом научном сленге называют SNG (single negative, мононегативные). 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 ( $\epsilon$ -негативные), если  $\epsilon > 0$  и  $\mu < 0$  – MNG ( $\mu$ -негативные).

### ε-НЕГАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Наиболее известным примером естественной ENG-среды, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения  $\omega$ , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле [11]:

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

где  $\omega_p$  – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой (радиальная частота 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  $\epsilon > 0$ , и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера Земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при  $\epsilon(\omega) < 0$ ), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением.

В числе искусственных сред с отрицательной  $\epsilon$  одной из первых была описана система из тонких металлических проводов, расположенных параллельно (рис.2).

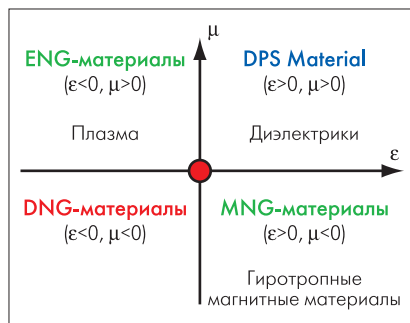


Рис.1. Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической ( $\epsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостей [6]

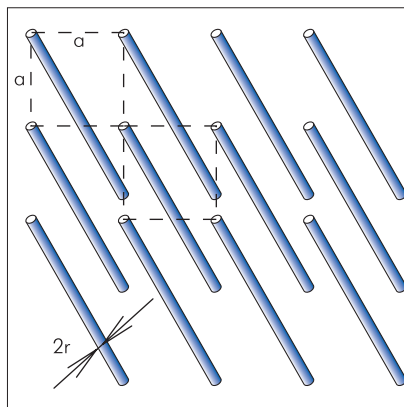


Рис.2. Метаматериал ENG-типа в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик

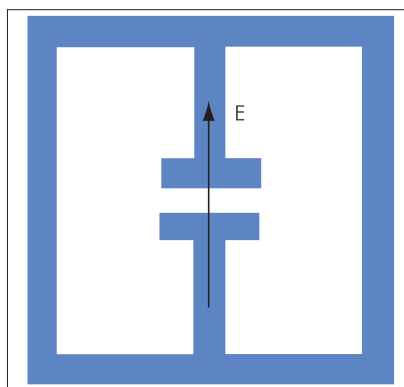


Рис.3. Альтернативный вариант элемента ENG-среды

О такой среде как искусственном диэлектрике для микроволновых применений сообщалось в работе Джона Брауна [12] еще в 1953 году. Он получил соотношение для плазменной частоты данного метаматериала:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{2\pi r}\right)},$$

где  $c_0$  – скорость света,  $a$  – интервал между проводниками (см. рис.2),  $r$  – радиус проводника. Позднее оно было подтверждено Уолтером Ротманом, который в 1961 году продемонстрировал возможность использования множества тонких проводников для моделирования плазмы, поскольку их эффективная диэлектрическая проницаемость выражается той же формулой (1) [13]. В частности, для метаструктуры на основе алюминиевых

проводников с радиусом  $r=1$  мкм и интервалом между ними  $a=5$  мм радиальная плазменная частота составляет примерно 8,2 ГГц.

Наряду с проводными структурами известны и другие конструкции искусственных ENG-материалов. Например, в работе [14] описаны элементы со структурой, изображенной на рис.3. Индуктивные петли, образованные двумя разрезными рамками, создают взаимно противоположные магнитные поля, компенсирующие друг друга. В результате характеристики отклика элемента определяются в основном емкостью разреза в сочетании с активным сопротивлением материала рамки. На основе таких структур получен метаматериал с отрицательным  $\epsilon$  в терагерцевом диапазоне [14]. При межэлементном интервале 50 мкм внешние габариты рамки составили всего 36 мкм, а ширина разреза на центральной перемычке – 2 мкм.

Для достижения изотропности метасреды по отношению к направлению электромагнитных волн предложены трехмерные формы структурообразующих элементов (рис.4).

### μ-НЕГАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

История искусственных MNG-материалов начинается в 1950-х годах, когда различные кольцевые и кольцеподобные структуры с отрицательной магнитной проницаемостью представляли интерес как типовые блоки для создания искусственных диэлектриков при изготовлении микроволновых линз. В этом контексте разрезное кольцо, использовавшееся еще в экспериментах Герца для приема электромагнитных волн, было вновь востребовано

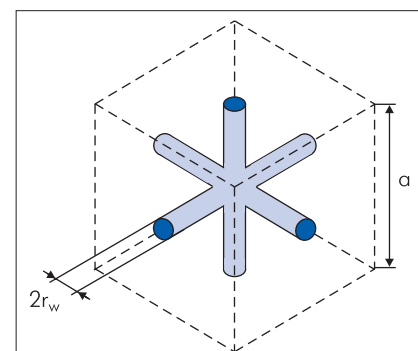


Рис.4. Триплетный элемент для создания изотропных ENG-структур

и описано в учебнике Шелкунова и Фрииса [15].

Основные структуры, используемые для получения MNG-сред, сегодня включают тонкие вложенные металлические цилиндры, рулонные структуры типа "рулет", вложенные разрезные кольца,  $\Omega$ -подобные и прямоугольные рамки и т.д. Рассмотрим наиболее важные из них.

Двойной кольцевой резонатор (split ring resonator, SRR [16]) (рис.5) – очень удачная структура, в которой емкость между двумя кольцами компенсируется их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает токи, которые, в зависимости от резонансных свойств структуры, порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к положительным или отрицательным эффективным значениям  $\mu$ .

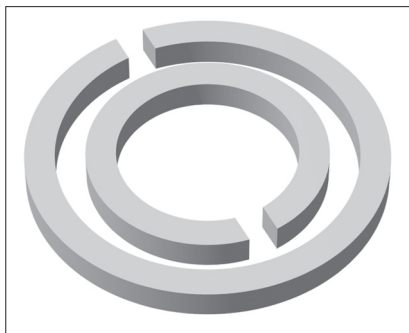


Рис.5. Двойной кольцевой резонатор (SRR)

Двойной цилиндр в качестве структурной ячейки для создания MNG-материалов можно заменить так называемым рулетным элементом, который формируется при свертывании в рулон металлического листа (рис.6) [12]. Вместо сплошного двойного цилиндра на прак-

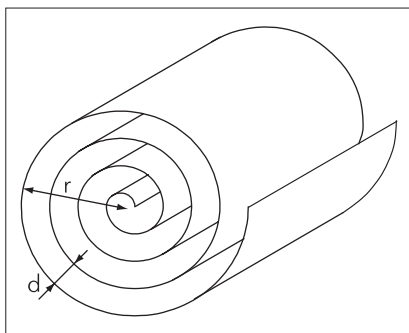


Рис.6. Рулетный элемент

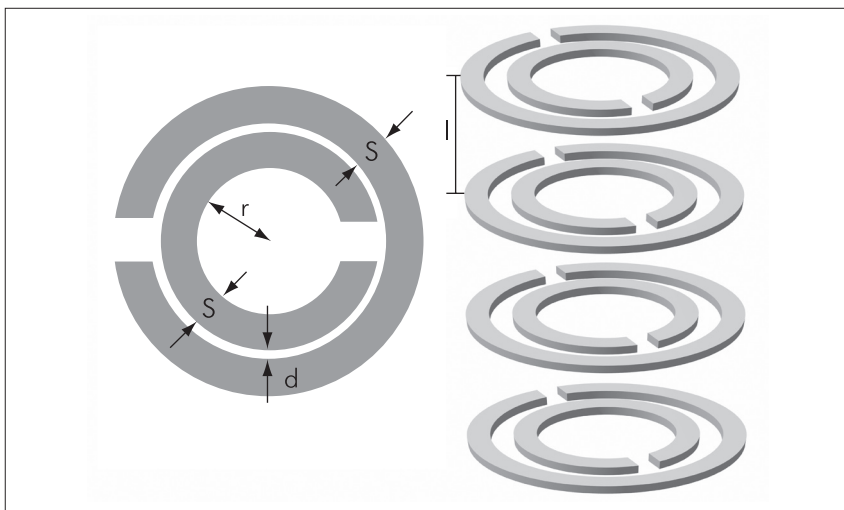


Рис.7. Стек из разрезных колец

тике проще использовать набор его дискретных сечений, расположенных в стеке друг над другом с интервалом (рис.7) [16]. При таком формировании метасреды резонансная частота многослойной сборки из разрезных колец с толщиной стенок  $s$  определяется как

$$\omega_0^2 = \frac{3lc_0^2}{Br^3 \ln \frac{2s}{d}}$$

Аналогичные стековые решения возможны также на основе дискретных вырезов рулетного элемента. Вместо разрезных колец могут использоваться вложенные квадратные рамки [17], причем не обязательно расположенные в одной плоскости, а смещенные на некоторое расстояние вдоль общей нормали. Наконец, возможны структуры-метасоленоиды на основе разрезных прямоугольных рамок с чередующейся ориентацией разреза (рис.8) [18], S-образных элементов [17] и др.

### БИНЕГАТИВНЫЕ СРЕДЫ (DNG)

Последние несколько лет были богаты событиями в области создания метаматериалов с отрицательным коэффициентом преломления электромагнитных волн. Эффект отрицательного преломления обусловлен одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей ( $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ ). Такие материалы часто называют бинегативными средами (DNG, double negative). До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако в 2006 году было установлено, что кристаллы  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$  имеют отри-

цательный коэффициент преломления электромагнитных волн в диапазоне 150 ГГц.

К пониманию физики сред DNG современная наука подошла исподволь. Судя по доступным публикациям, пальму первенства в практической постановке вопроса о существовании волн с отрицательной групповой скоростью следует отдать английскому физiku Артуру Шустеру (1851–1934). Вывод о том, что отрицательная групповая скорость возможна из-за аномальной дисперсии волн, подтвердил в 1905 году Фон Лауэ (Max Theodor Felix von Laue, 1879–1960) [19]. В том же году Поклингтон в небольшой заметке [20] еще раз показал, что в определенной среде, где возможна обратная волна, активизированный источник колебаний формирует волну с групповой скоростью, направленной от источника, в то время как ее фазовая скорость ориентирована ему навстречу.

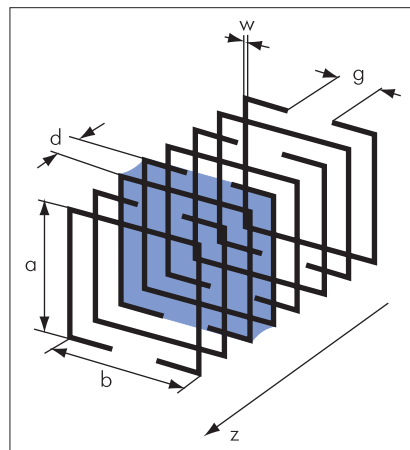
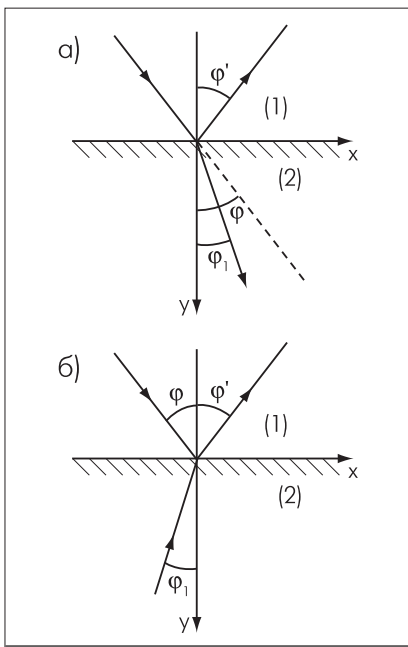


Рис.8. Метасоленоид



**Рис.9. Иллюстрации Л.И. Мандельштама [21]. Преломление луча: а) в обычной среде, б) в среде, где групповая скорость волн отрицательна**

Однако очевидного практического применения у обнаруженных эффектов тогда не было, и интерес исследователей к ним поутих на несколько десятилетий, четко определив рубеж между первым и вторым этапами становления теории DNG.

С появлением в 1940-х годах СВЧ-устройств, использующих обратные волны, многие из уже основательно забытых положений теории обратных волн вновь оказались в поле зрения физиков. Формальным началом второго этапа становления теории DNG-сред можно считать лекции по оптике Л.И.Мандельштама (1879–1944) [21], датированные 1944 годом. В них детально рассмотрены эффект обратного распространения волн и необычный закон преломления при падении волны из свободного пространства в среду, где групповая и фазовая скорости волн направлены навстречу друг другу. При этом преломленный луч отклоняется в противоположную сторону от нормали к поверхности, нежели при падении на "обычную" среду (рис.9).

Наиболее развитую теорию веществ с отрицательным коэффициентом преломления, с одновременно отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$ , предложил, как это признано зарубеж-

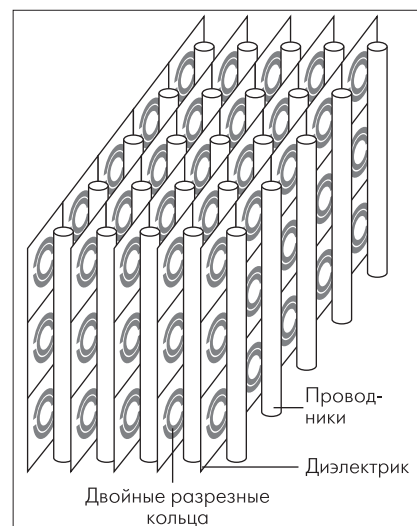
ными учеными, советский физик Виктор Георгиевич Веселаго [22]. В серии своих публикаций в 1960-х годах В.Г.Веселаго обосновал возможность существования физических сред с отрицательным коэффициентом преломления, обладающих свойствами, парадоксальными с обычной точки зрения. Его основополагающая работа [22] содержала теоретическое описание свойств среды с одновременно отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$ , а также исследование решения уравнений Максвелла для этого случая. При интерпретации уравнений Максвелла В.Г.Веселаго впервые использовал в качестве индекса преломления  $n$  выражение для  $\epsilon$ ,  $\mu < 0$ , что явилось довольно неожиданным логическим приемом. Отмечая гипотетичность соответствующей среды, Веселаго указал на бесспорный факт, что ее существование не исключается уравнениями Максвелла, и теоретически проанализировал процесс распространения электромагнитных волн в подобных средах.

Отрицательная величина индекса преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из DNG-материалов. Например, фокусирующая линза становится рассеивающей. Напротив, отклоняющая двояковыпуклая линза, изготовленная из DNG-материала, действует как фокусирующая. Кроме того, В.Г.Веселаго первым показал, что обычная плоскопараллельная пластина с  $n = -1$  может выступать в роли собирающей линзы. В его работе [22] предсказаны такие электромагнитные эффекты в DNG-материалах, как реверсивные изменения доплеровского сдвига частоты и эффекта черенковской радиации, обращение светового давления на световое притяжение. Существенно, что эти явления не были экспериментально доказуемы и/или очевидны на момент разработки теории Веселаго, поскольку не было примеров реализаций соответствующей метасреды. Усилия В.Г.Веселаго и его коллег по получению материала с отрицательным преломлением на основе магнитного полупроводника  $CdCr_2Se_4$  оказались тщетными из-за существенных технологических трудностей его синтеза. Эта неудача, а также систематический прессинг со стороны тогдашнего директора ФИАН им.П.Н.Лебедева

Д.В.Скобельцына, заключавшийся в обвинении В.Г.Веселаго в занятиях лженаукой [23], надолго охладил внимание исследователей к подобным проблемам.

Тем не менее, учитывая значительный вклад статьи Веселаго [22] в теоретическое обоснование свойств среды с отрицательным преломлением, многие авторы именуют DNG-материалы средой Веселаго (особенно в случае  $\epsilon = \mu = -1$ ), средой с отрицательной рефракцией или с отрицательным индексом преломления (negative refractive index, NRI), а также "леворукими" материалами (left-handed materials, LHM), принимая во внимание отмеченную в [22] левостороннюю ориентацию векторов электромагнитной волны.

Новым толчком к развитию данного направления и началом современного (третьего) этапа в формировании теоретических представлений о DNG-средах послужила публикация Джона Пендри [24], в которой описывались конкретные искусственно созданные материалы особой конструкции с отрицательными эффективными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Пендри предложил массово использовать структуры из миниатюрных разрезных кольцевых рамок, выполняющих роль магнитных диполей, и прямолинейных отрезков провода. Этот подход основан на том, что если композитный материал состоит из



**Рис.10. Метаматериал, впервые экспериментально подтвердивший эффект "леворукости" [26]**

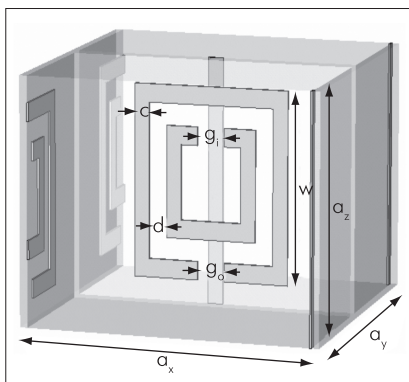


Рис.11. Оптимизированная трехмерная ячейка DNG-метаструктуры [28]

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.

Удивительно, что Пендри был лишь в одном шаге от лежащей на поверхности идеи сочетания форм рассмотренных им разновидностей элементарных антенн (рис.10). Эту идею

позднее опубликовал и запатентовал [25, 26] Дэвид Смит вместе с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего. Именно такая очевидная комбинация структурных элементов, следовавшая из публикации Пендри, позволила в 2000 году исследовательской группе Дэвида Смита создать первый материал, обладающий в сантиметровом диапазоне (4,2–4,6 ГГц) отрицательным коэффициентом преломления. Этот метакомпозит состоял из диэлектрической основы, в которой располагалось множество медных стержней и разрезных колец, расположенных в строгом геометрическом порядке. Стержни, по сути, являлись антеннами, взаимодействующими с электрической компонентой электромагнитного поля, а разрезные кольца – антеннами, реагирующими на магнитную составляющую. Основные размеры всех элементов и расстояние между ними были меньше длины волны, а вся система в целом обладала отрицательными эффективными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . Результаты прямого измерения угла преломления для призмы, изготовленной из данного композита [27], убедительно показали, что преломление электромагнитной волны на границе вакуума и такой композитной среды подчиняется закону Снеллиуса с отрицательным значением индекса  $n$ . Тем самым экспериментально подтвердились основные положения работы В.Г.Веселаго [22].

Как и следовало ожидать, публикации [25–27] послужили толчком к появлению многочисленных работ в данной области. Однако основными недостатками первых метаматериалов, основанных на использовании кольцевых и прямоугольных SRR, являются узкополосность, высокие уровни электромагнитных потерь, громоздкость и непрактичность для микроволновых технических применений.

Для решения проблемы узкополосности в дальнейшем было предложено много вариантов магниточувствительных элементов, в частности – в форме  $\Omega$ . Существенно, что проблема узкой полосы пропускания может быть в определенной мере решена путем оптимизации геометрических размеров SRR-резонаторов. Например, в работе [28] для прямоугольных SRR (рис.11) в диапазоне 10,57–11,82 ГГц получена ширина полосы пропускания 11,2%, что в 2,3 раза лучше, чем в первоначальном варианте, предложенном в [29].

DNG-структуры обладают интересными и полезными для практики свойствами. Например, у электрически малых антенн (ЭМА), изготовленных из идеальных метаматериалов без потерь и без частотной дисперсии, существенно, по сравнению с пределом Чу [1–3], расширяется полоса пропускания, и достигаются значения добротности, более низкие, чем это следует из теории указанного фундаментального предела. К сожалению, реальные конструкции метасред обладают частотной дисперсионностью и потерями, что приводит пока к катастрофической деградации свойств антенн из метаматериалов. Поэтому основной задачей совершенствования метаструктур является синтез таких сред, которые бы обладали минимальными потерями и маловыраженными дисперсионными свойствами.

**АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ**

В последнее время значительно растет интерес к использованию метаматериалов в радиотехнических приложениях. Свидетельство тому – резкий скачок числа публикаций по данной тематике, фиксируемый в цифровой библиотеке сайта IEEE Xplore. Например, по состоянию на 1 мая 2010 года поиск по ключевому слову Metamaterial за период с

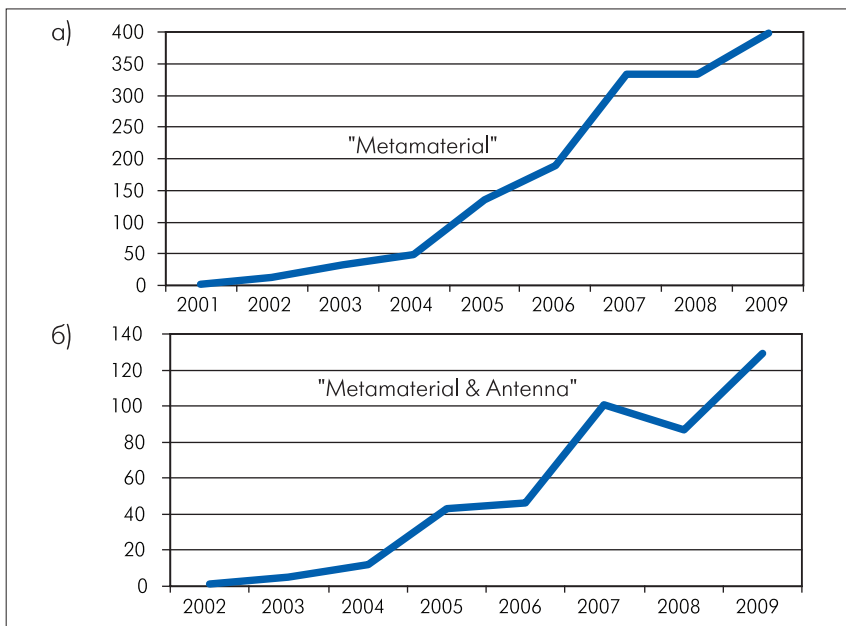


Рис.12. Число публикаций в IEEE Xplore, соответствующих поисковому запросу "Metamaterial" (а) и "Metamaterial & Antenna" (б)

2001 по 2010 год позволил выявить 1545 публикаций, из которых более 72,7% (1124) приходится на последние три года (рис.12а). Аналогичные процессы происходят и в отношении антенной тематики – по запросу "Metamaterial & Antenna" (рис.12б). Такой рост исследований в области антенных конструкций на основе метаматериалов должен неизбежно привести к качественным изменениям параметров технических решений и серийный изделий на их основе. Многие из результатов совместных усилий научного сообщества, предлагаемых в этой сфере, доступны на рынке уже сегодня. Метаматериалы в технике антенн сегодня в основном применяются для:

- изготовления подложек и излучателей в печатных антеннах для достижения широкополосности и уменьшения размеров антенных элементов;
- компенсации реактивности электрически малых антенн в широкой полосе частот, в том числе превышающей фундаментальный предел Чу [1];
- достижения узкой пространственной направленности элементарных излучателей, погруженных в метасреду;
- изготовления антенн поверхностной волны;
- уменьшения взаимного влияния между элементами антенных решеток, в том числе в МИМО-устройствах;
- согласования рупорных и других типов антенн.

Рассмотрим достижения в некоторых из этих областей.

### МЕТАМАТЕРИАЛЫ В КАЧЕСТВЕ ПОДЛОЖЕК

Метаматериалы в качестве подложек для печатных миниатюризованных антенн позволяют снижать размеры традиционных излучателей, увеличивать их полосы пропускания и эффективность излучения.

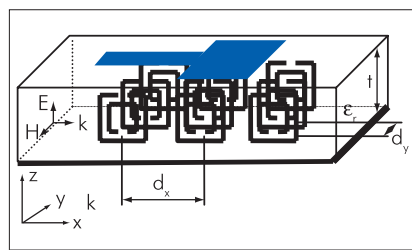


Рис.13. Печатная антенна с подложкой из MNG [30]

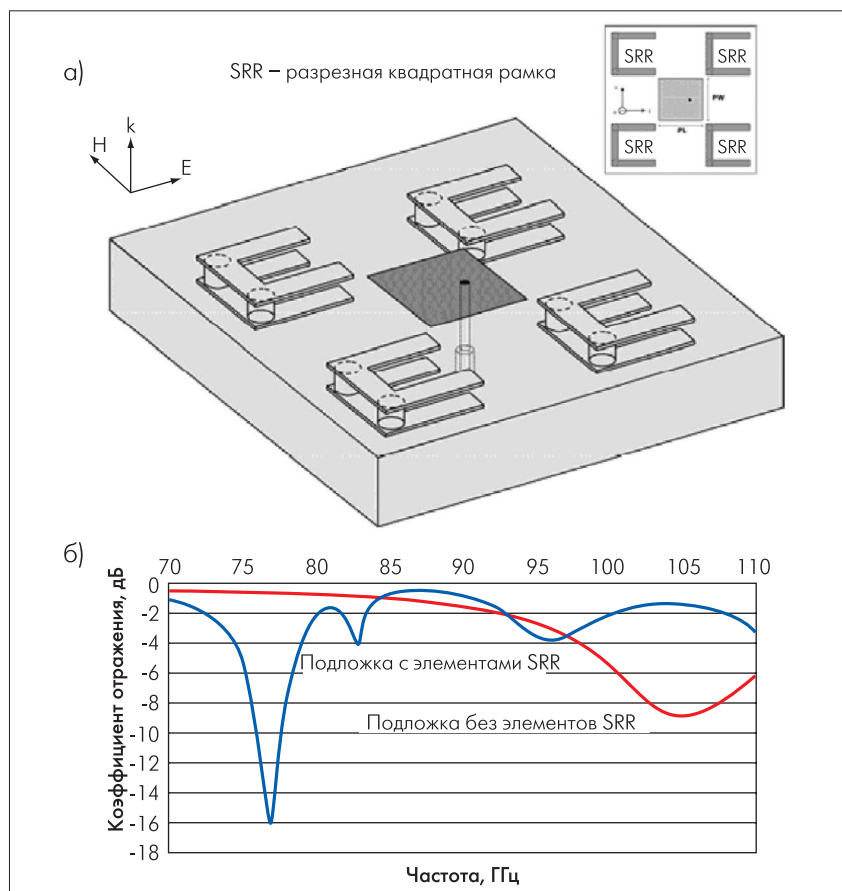


Рис.14. Антенна для автомобильного радара: а) конструкция, б) частотная зависимость ее коэффициента отражения [32]

Структура метаматериала, формирующего подложку, может быть однородной либо композитной, образованной из нескольких типов сред. Так, в работе [30] описана однородная  $\mu$ -негативная MNG-подложка, сформированная из погруженных в диэлектрическую подушку вертикальных разрезных квадратных рамок (рис.13). Вместо рамок могут использоваться различные по форме спиральные элементы, а также структуры, форма которых оптимизирована, например, на основе генетических алгоритмов [31].

Аналогичное решение на основе U-образных горизонтально ориентированных элементов предложено в [32] для миллиметрового диапазона волн, в частности – для антенны автомобильного радара (рис.14). Нетрудно заметить, что использование метаматериала эквивалентно увеличению электрической длины антенны, что приводит к снижению ее резонансной частоты. Альтернативный вариант конструкции возможен на основе  $\epsilon$ - и  $\mu$ -негативной среды, в которой

образующие элементы представляют собой ячейки, приведенные на рис.15 [33].

Среди композитных подложек распространены структуры, сочетающие в себе правосторонние и левосторонние сегменты. Одно из привлекательных свойств таких гибридных решений – возможная зависимость коэффициента преломления от частоты. Например, привлекателен композитный материал, в котором сочетаются ячейки из обычного материала ( $\epsilon$  и  $\mu > 0$ ) с DNG-материалами. Поскольку у материалов первого типа векторы напряженности электрического и магнитного полей образуют с волновым вектором пра-

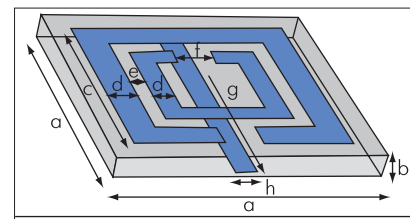


Рис.15. Ячейка DNG-метаматериала [33]

востороннюю систему координат, а в DNG-материалах – левостороннюю, такие композитные материалы называют праволевосторонними (CRLH, Composite Right/Left-Handed). В низкочастотном диапазоне у CRLH-материалов возможен отрицательный коэффициент преломления, а при превышении некоторой граничной частоты – положительный. Подбором размеров право- и левосторонних сегментов удается регулировать резонансную частоту печатной антенны, а также сделать ее двухдиапазонной, например, за счет одновременного использования мод  $TM_{010}$  и  $TM_{020}$  [34].

Характерный пример композитной подложки рассмотрен в работе [33] (рис.16). Электрическая длина печатной антенны задана равной  $0,2\lambda$ , что меньше традиционного ограничения в  $0,5\lambda$ . Геометрические размеры антенны:  $L=W=8$  мм,  $L_L=10L/19$  и  $L_R=9L/19$ . Здесь  $L_R$  и  $L_L$  – длины участков с традиционным и DNG-материалом, соответственно. Значения  $L_L$  и  $L_R$  выбирались при условии  $L_L/L_R = \mu(DPS)/\mu(DNG)$ . DNG-блок образован двумя рядами из 40 ячеек, приведенных на рис.15. Размеры такой ячейки:  $a=3,2$  мм,  $b=d=h=0,25$  мм,  $c=2,62$  мм,  $e=0,3$  мм,  $f=0,46$  мм и  $g=3,0$  мм. Результаты исследований (рис.17) показывают, что при использовании в печатной антенне монолитной подложки с  $\epsilon=1$  и  $\mu=1$  антенна не может излучать на частотах в районе 7,7 ГГц (сплошная линия), так как ее электрическая длина  $0,2\lambda$  намного короче, чем полуволновое ограничение. Если половина печатной антенны нагружена идеальной недисперсионной подложкой, выполненной из DNG-материала с  $\epsilon=-1$  и  $\mu=-1$ , то возможно излучение и прием сигналов в широкой полосе частот. При наличии дисперсионности среды DNG, несмотря на узкую рабочую полосу, антен-

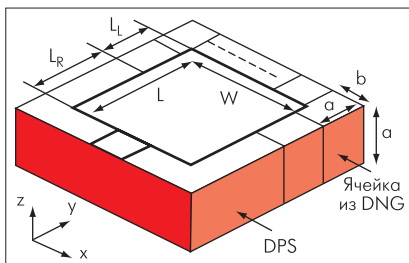


Рис.16. Печатная антенна с композитной подложкой [33]

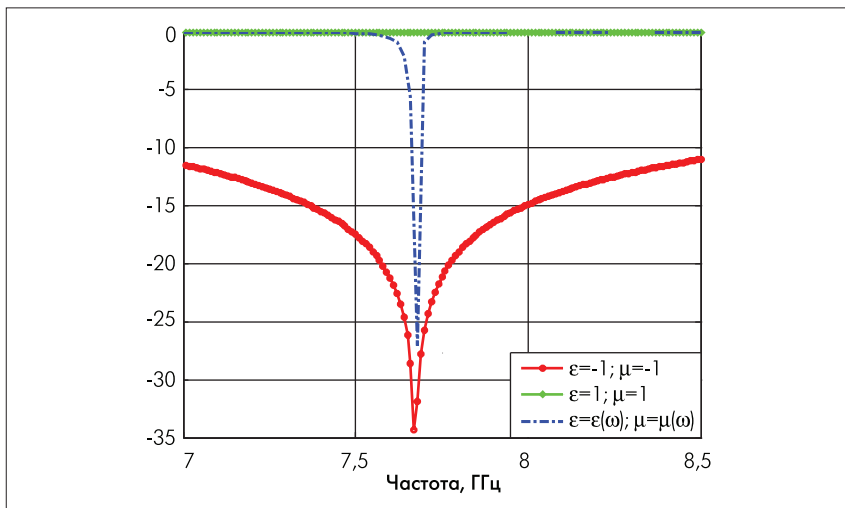


Рис.17. Расчетный коэффициент отражения печатной антенны для различных значений  $\epsilon$  и  $\mu$  материала подложки [33]

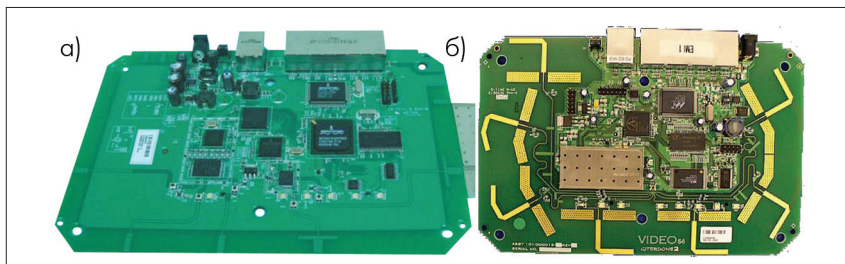


Рис.18. Маршрутизатор Netgear WNR3300 RangeMax с восемью печатными метаантеннами (а) и его предшественник с такими же габаритами и семьей обычными печатными излучателями (б)

на по-прежнему работает на частоте 7,7 ГГц, что доказывает правильность теоретических расчетов.

Таким образом, применяя подложку, частично заполненную DNG-материалом, можно заметно миниатюризировать габариты печатной антенны. Основная проблема, которую предстоит решать разработчикам, – это поиск метаматериалов, имеющих небольшую дисперсионность электромагнитных параметров.

Другое направление совершенствования печатных антенн связано с применением метаматериалов непосредственно в конструкции излучателей. Один из первых примеров использования метаматериалов для серийного изготовления печатных антенн – антенные решетки MIMO компании Rayspan ([www.rayspan.com](http://www.rayspan.com)), использованные фирмой Netgear в точке доступа WNR3500 и WNR3300 с радиointерфейсом IEEE 802.11n (рис.18). Детали технических решений, легших в основу

конструкции метаантенн, описаны в патентных заявках фирмы Rayspan [35, 36]. Суть их состоит в использовании для изготовления печатной антенны композитной структуры CRLH на основе фрагмента линии передачи с отрицательным индексом преломления (рис.19). Принцип фор-

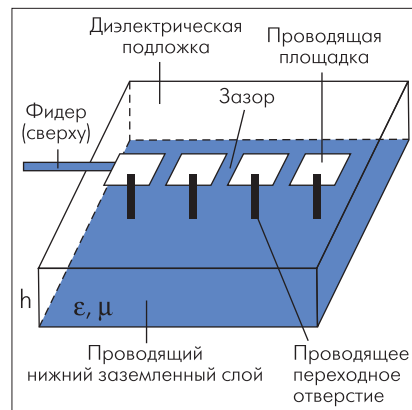
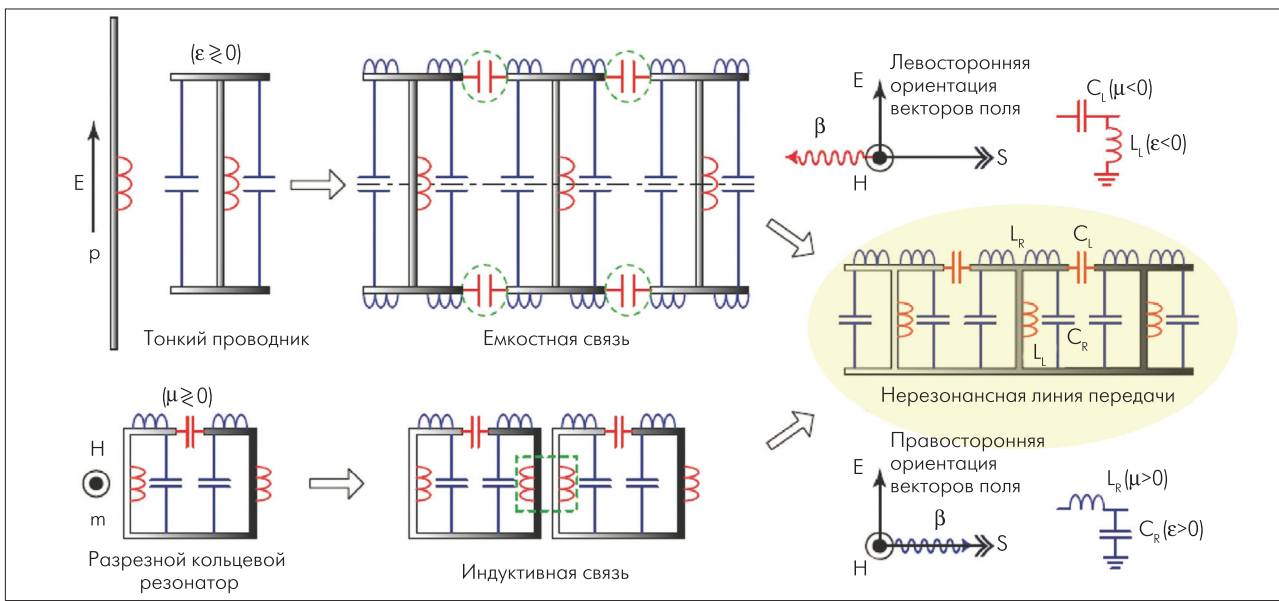


Рис.19. Печатная антенна из композитной структуры CRLH [35, 36]



**Рис.20. Принцип формирования металлины передачи на основе комбинации эквивалентных LC-цепей**

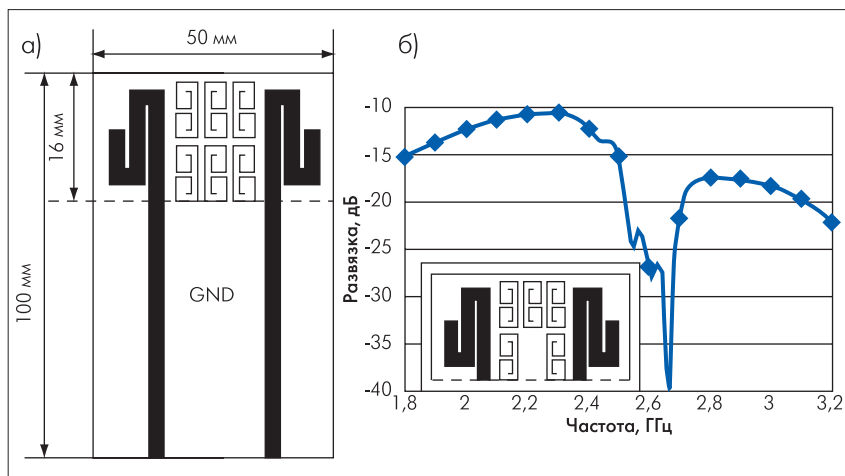
мирования такой металлины передачи основан на комбинации эквивалентных LC-цепей (рис.20). Чисто внешне новый тип антенн мало отличается от своих печатных прототипов, однако достигнутые результаты рассеивают сомнения скептиков в перспективности подобных решений. В частнос-

ти, на основе метаструктур удалось заметно уменьшить габариты излучателей антенной решетки MIMO, что позволило снизить их взаимное влияние. Электрическая длина печатной метаантенны в Netgear WNDR3300 снижена до  $0,1\lambda$ , что меньше известного ограничения в половину длины

волны. При этом обеспечена работа в двух диапазонах частот (2,4 и 5,2 ГГц), а полоса пропускания антенн увеличена на 15%.

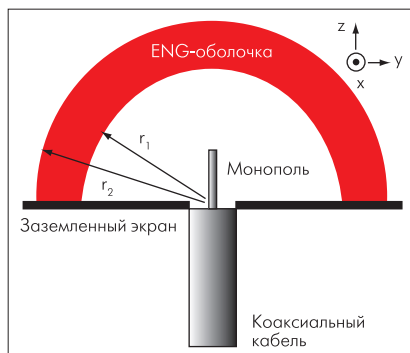
Следует отметить, что поиск эффективных конструкций MIMO-антенн на основе метаматериалов – одно из наиболее актуальных направ-



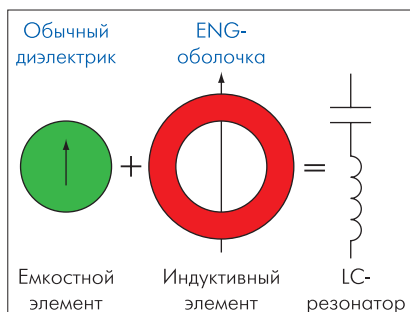


**Рис.21. Проект антенной системы ММО с изолирующей вставкой из многослойного метаматериала [38]: а) конструкция, б) частотная зависимость развязки между антеннами**

лений исследований. При этом основное внимание уделяется минимизации габаритов решетки излучателей не только за счет уменьшения размеров антенных элементов, но и сокращения расстояния между ними при условии обеспечения максимальной взаимной развязки.



**Рис.22. Конструкция ЭМА в составе монополя и ENG-оболочки [40]**



**Рис.23. Принцип компенсации реактивности ЭМА с помощью метаоболочки [40]**

Опираясь на использование MNG-подложки, в работе [37] изложены результаты экспериментального исследования эффективности межэлементной развязки в антенне MIMO за счет применения MNG-метаматериала в субстрате подложки. При межантенном интервале 0,1λ MNG-подложка с погруженными в диэлектрик (аналогично рис.13) квадратными спиралями позволила снизить взаимное влияние антенн почти на 15 дБ (до -37 дБ) по сравнению со стандартной подложкой из диэлектрика FR4. Впрочем, следует отметить, что несовершенство технологии, использовавшейся при изготовлении экспериментальных метаантенн, не позволило получить выигрыш от их применения над обычной конструкцией с подложкой из FR4 по величине спектральной эффективности передачи данных с помощью OFDM-сигналов.

В работе [38] рассмотрен гибридный проект антенной системы MIMO, использующей пару традиционных печатных антенн, для уменьшения взаимного влияния которых в диапазоне 2,6 ГГц в межантенном пространстве расположена изолирующая вставка из многослойного метаматериала. Его ячейки представляют собой набор металлических спиральных элементов (рис.21). Достигнутая развязка антенн превысила 21 дБ в полосе 2,5–2,7 ГГц при расстоянии между ними 0,18 длины волны (рис.21б). В районе же резонансной частоты метавставки уровень развязки почти достиг 40 дБ.

К числу гибридных печатных антенн следует также отнести новый тип излучателя, предложенный в работе [39]. Он представляет собой обычный печатный диполь, нагруженный решеткой из 2×3 DNG-ячеек, выполненных в виде встречно-направленных спиральных элементов, которые расположены по разные стороны от диэлектрической подложки. Такое решение позволило получить ширину полосы пропускания 63% в диапазоне 1,3–2,6 ГГц. В дальнейшем на основе подобных DNG-ячеек могут быть сконструированы целые семейства излучателей печатных антенн.

**МЕТАОБОЛОЧКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН**

Согласно работе [40], основная идея использования ENG-материалов в технике электрически малых антенн состоит в компенсации высокой реактивной емкости ЭМА-диполя индуктивностью окружающей его ENG-оболочки. При этом толщина метаоболочки может быть меньше сотых долей длины волны в свободном пространстве, что не приводит к заметным затуханиям электромагнитного поля. В качестве примера рассмотрим описанную в [40] идею интеграции ENG-обтекателя с классическим монополем, расположенным над плоским экраном и подключенным к коаксиальному фидеру, причем сам монополь находится внутри полусферического колпака из ENG-материала (рис.22). Результаты моделирования антенны данной конструкции (в случае ничтожно малых потерь) свидетельствуют, что при резонансе мощность излучения монополя возрастает на 60–65 дБ по отношению к варианту без ENG-покрытия. Сама по себе полусфера из ENG-материала под воздействием излучения монополя может рассматриваться как электрически малая антенна. Однако этот элемент из-за отрицательной диэлектрической постоянной действует как индуктивность, формируя вместе с емкостным монополем LC-резонатор (рис.23). Поэтому при фиксированной частоте резонанса с увеличением модуля отрицательной диэлектрической проницаемости ENG-среды толщина оболочки должна уменьшаться.

В 1948 году Чу (Chu) впервые вывел фундаментальные пределы добротности передающих ЭМА с линейной

и круговой поляризациями излучения, вписанных в радианную сферу с радиусом  $\lambda/2\pi$  [1]. Минимальная добротность характеризуется отношением запасенной электромагнитной энергии внутри окружающей антенну радианной сферы к излучаемой за ее пределы мощности  $P$ :  $Q=2\omega W/P$ , где  $W=W_e$  или  $W=W_m$  – запасенные энергии электрического или магнитного полей (в зависимости от вида используемого диполя),  $\omega$  – радиальная частота электромагнитных колебаний.

Наиболее важный вывод авторов работы [40] состоит в том, что рассмотренная ЭМА, будучи выполненной из доступных метаматериалов, обладает добротностью, большей фундаментального предела Чу [1]. В частности, согласно расчетам в [40], величина добротности  $Q$  в 1,583 раза превышает предел Чу. Существенно, что для ENG-материала на резонансной частоте удалось добиться величины активного сопротивления около 50 Ом и почти нулевого реактивного сопротивления, КПД при этом составил около 98–99%.

Аналогичная идея может использоваться и для случая DNG-оболо-

чек, которые по сравнению с ENG-покрытием позволяют дополнительно уменьшить размеры (толщину и радиус) колпака. Объясняется это тем, что использование среды с  $\mu < 0$  эквивалентно внесению емкости последовательно с емкостью диполя, что уменьшает результирующую емкость ЭМА и требует меньшей по величине компенсирующей индуктивности.

Подтверждением эффектов, описанных в работе [40], являются экспериментальные результаты [41], полученные для электрически малого диполя, погруженного в плазменный разряд в газе. Плазма формировалась в вакуумной трубке с непрерывным разрядом на постоянном токе. При этом было зафиксировано более чем 100-кратное повышение напряженности электрического поля передающей электрически малой антенны ( $l/\lambda \ll 10^{-3}$ ) ( $l$  – длина диполя), погруженной в плазму, по сравнению с таким же диполем, находящимся в свободном пространстве. Данное явление можно легко объяснить по аналогии с рассмотренными свойствами вибратора в оболочке из ENG-структуры. Подобный эффект может найти

применение, например, для решения задачи длинноволновой связи со спускаемым космическим аппаратом.

Эффект компенсации с помощью метаоболочки реактивности электрически малой антенны подтолкнул исследователей к идее совершенствования традиционных конструкций антенн путем привнесения в них компенсационных реактивных элементов, улучшающих согласование и резонансные свойства антенны. Соответствующий класс излучателей в зарубежной литературе называется антеннами, инспирированными ("вдохновленными") метаматериалами (АИМ), либо метаинспирированными антеннами. Наиболее исчерпывающий перечень первых конструкций таких антенн приведен в патенте [42] (рис.24). Описаны антенные конструкции, в которых индуктивность магнитного (рис.24.а,б) монополя компенсируется дополнительным емкостным экраном. Аналогичная идея воплощена в отношении электрически малых вибраторов, чья реактивная емкость компенсируется индуктивностью вспомогательного меандрового элемента (рис.24.в) или спиральной оболочки (рис.24.г).

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



В.М. Вишнеvский,  
С.Л. Портной, И.В. Шахнович  
**Энциклопедия WiMAX.  
Путь к 4G**

Книга издана под эгидой WiMAX Forum. Она посвящена современным широкополосным сетям передачи данных городского/регионального масштаба.

Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Впервые в отечественной литературе описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей, детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, сотовые сети стандартов 3G и LTE, а также технологии широкополосного цифрового теле- и радиовещания (DVB и DAB).

Москва: Техносфера, 2009 г. – 472 с.  
ISBN 978-5-94836-223-6

Подробная информация о книгах, выпускаемых издательством ТЕХНОСФЕРА, на сайте: <http://www.technosphera.ru>. Заявки на книги принимаются по адресу [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru).

## АГС АППАРАТУРА ГРОМКОГОВОРЯЩЕЙ СВЯЗИ (совместимо с аппаратурой "Орех", АГС-10(20), ДПУ)

Предназначена для организации двусторонней громкоговорящей связи между приборами, рассчитанными для работы по 3-х (2-х) проводной линии связи с управлением (и без управления) постоянным током.

ПУЛЬТ ДИСПЕТЧЕРА  
емкостью от 5 до 35 абонентов



2-проводные абоненты

ПЦС-3М



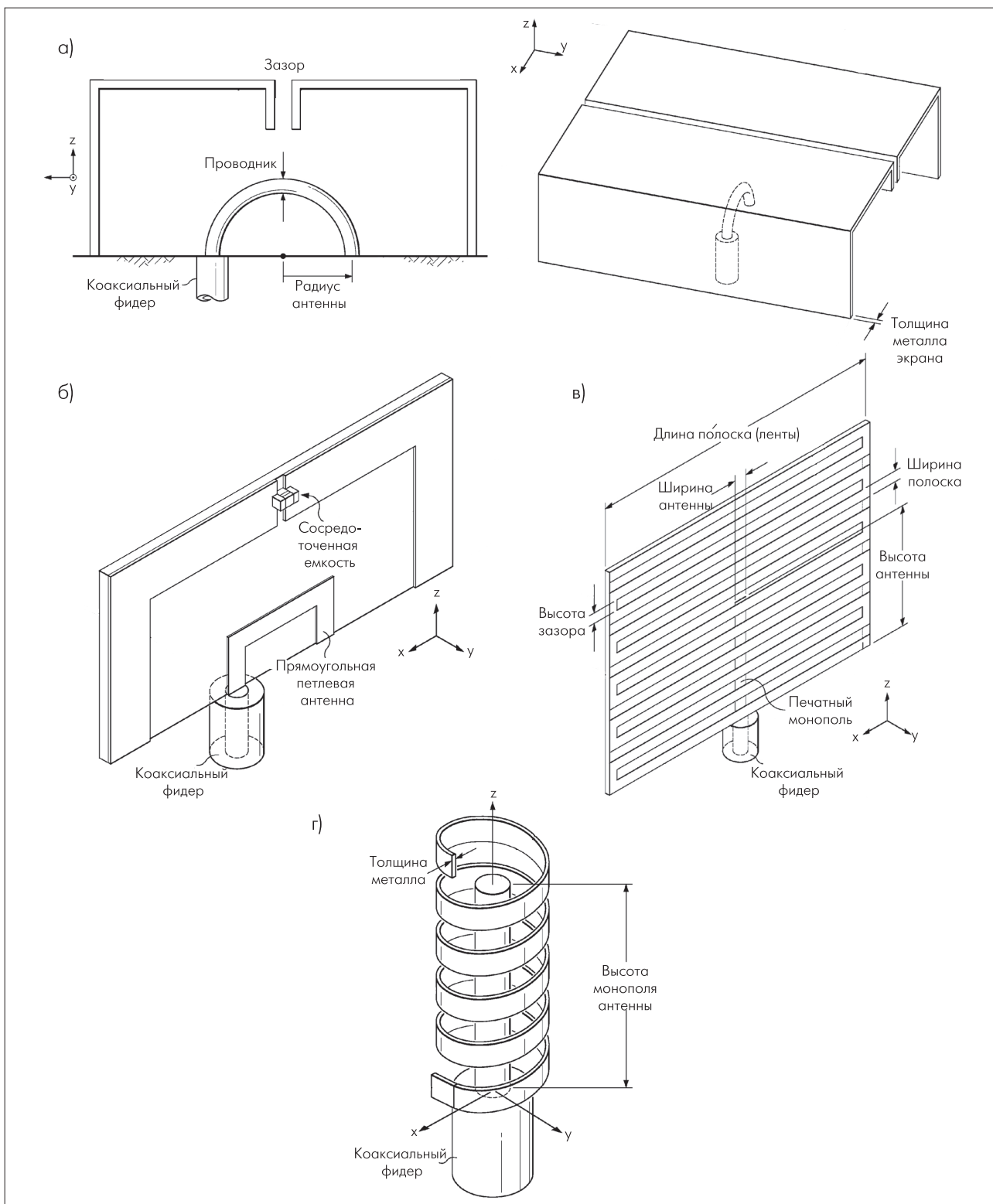
3-проводные абоненты:

- ДПУ-16
- АГС-10(20)
- аппаратура "Орех"



Россия, 602264, Владимирская обл.,  
г.Муром, Карачаровское шоссе, 2  
тел./факс: (49234) 3-03-71,  
e-mail: [info@commteh.ru](mailto:info@commteh.ru)  
<http://www.commteh.ru>

**КОМ  
Тех**



**Рис.24. Конструкции антенн, инспирированных метаматериалами [42]: а) магнитный монополю с дополнительным емкостным экраном, б) магнитный монополю с компенсирующей емкостной реактивностью, в) печатный вибратор с серпантинной индуктивностью, г) электрический монополю со спиральной индуктивностью**

Запатентованные конструкции в случае электрически малых размеров обладают достаточно узкой полосой пропускания и максималь-

но эффективны на резонансной частоте. Чтобы расширить рабочую полосу частот, можно изменить форму вспомогательного эле-

мента, применив, например, генетические алгоритмы оптимизации. Подобный подход применен в работе [43] для повышения эффектив-

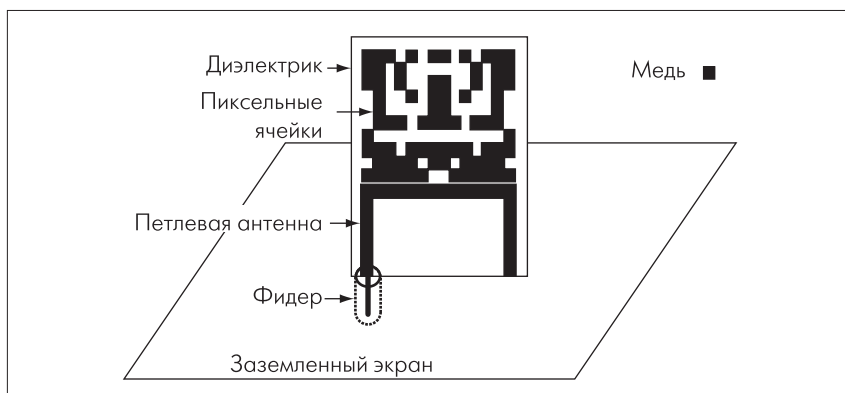


Рис.25. "Пиксельная" конструкция АИМ [43]

ности антенны на резонансной частоте. "Пиксельная" конструкция, представленная на рис.25, позволила повысить эффективность полупетлевого магнитного вибратора до 93% на резонансной частоте 960 МГц. При этом сама резонансная частота была снижена на 60% по сравнению со случаем отсутствия вспомогательного элемента.

Однако более радикальное решение сводится к применению в составе АИМ активных цепей согласования. В случае ЭМА с реактивной емкостью постоянства компенсирующей индуктивности в широкой полосе частот можно достичь, используя конвертор отрицательного импеданса (NIC) (преобразователь отрицательного сопротивления). В работе [44] отмечено, что на этой основе удалось достичь полосы пропускания в 10% для ЭМА с купольным вспомогательным элементом (рис.26), чьи габариты позволяют вписать антенну в сферу радиусом  $a=0,0467/k$ , где  $k$  – волновое число. Без активной согласующей цепи антенна имела бы ширину полосы пропускания лишь 0,0133%. В целом, использование активных цепей в составе АИМ – это достаточно перспективная идея, позволяющая создавать широкополосные ЭМА, чья рабочая полоса частот существенно превосходит фундаментальный предел Чу.

#### СУЖЕНИЕ ДИАГРАММ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭМА

Уже получено достаточно много экспериментальных подтверждений эффекта направленности излучения у элементарного монополя, помещенного в DNG-среду. В частности, в работе [45] описан один из таких экспериментов по измерению диаграммы направленности вибратора ( $\lambda/4$ -монополя), расположенно-

го внутри метаматериала, образованного из разрезных квадратных рамок (SRR) и печатных проводников (рис.27). Такая антенна продемонстрировала в ограниченном пространственном секторе отрицатель-

ный коэффициент преломления в диапазоне 10,3–10,8 ГГц.

Метаматериал был сформирован из двух типов печатных плат квадратной формы (размером 246×246 мм). На платах первого типа расположен массив из 48 параллельных проводников шириной 0,5 мм и длиной 238 мм, следующих с интервалом 5 мм. Платы второго типа содержали матрицу 48×48 квадратных SRR-элементов (рис.28). Интервал между SRR-элементами – 5 мм.

В сборном стеке метаструктуры платы этих двух типов располагались, чередуясь, параллельно друг другу с интервалом 2,5 мм. Всего использовалось 49 плат первого типа и 50 – второго. Четвертьволновый вибратор размещался параллельно печатным проводникам внутри стека плат над горизонтальным про-

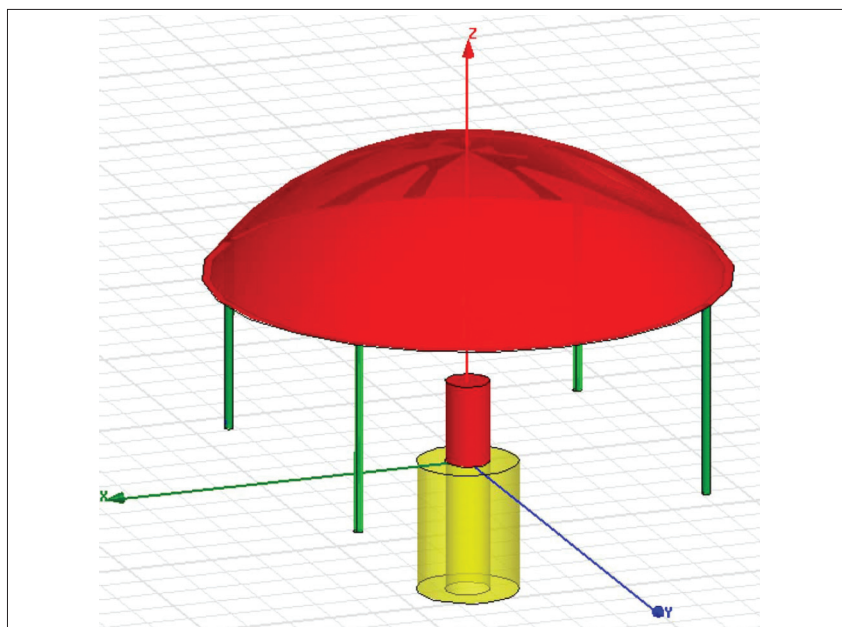


Рис.26. ЭМА с купольным вспомогательным элементом

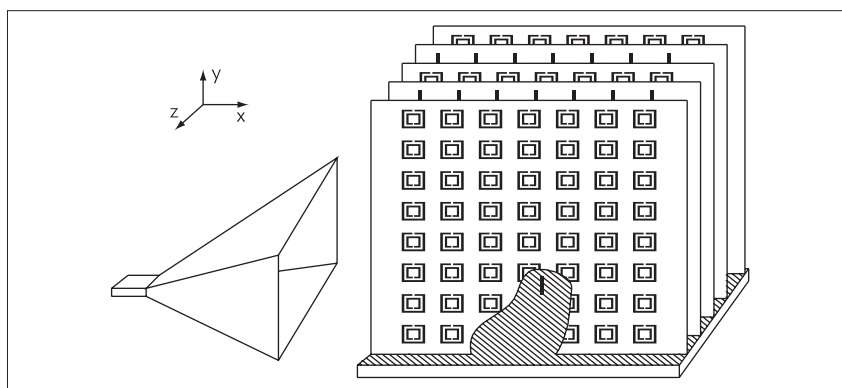
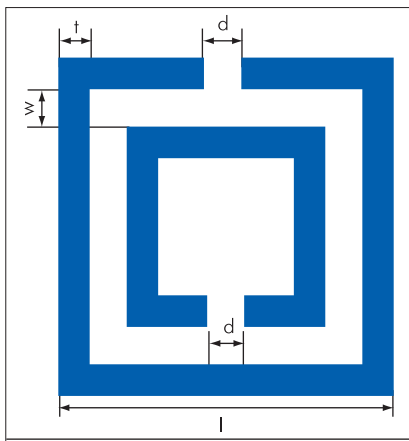


Рис.27. Схема эксперимента по снятию диаграммы направленности монополя, погруженного в DNG-среду [45]



**Рис.28. Квадратный SRR-элемент, использованный для создания метасреды [45].  $l=3$  мм,  $d=t=w=0,3$  мм**

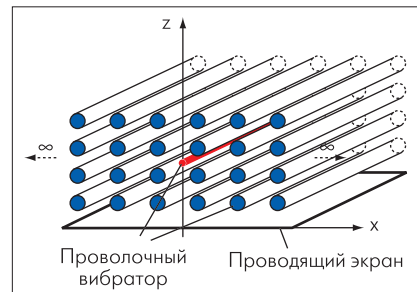
водящим экраном. Оценка диаграмм направленности (рис.29) проводилась путем вращения метаструктуры вокруг монополя. В качестве приемной использовалась рупорная антенна.

Для сужения диаграммы направленности элементарного излучателя может применяться также ENG-среда. В работе [46] представлен обзор результатов исследования особенностей диаграмм излучения элементарного проволочного вибратора, встроенного в метасреду ENG-типа, образованную множеством параллельных проводников, расположенных над проводящим экраном (рис.30). Расчеты поля в дальней области проводились с помощью метода моментов. Пример рез-

кого сужения диаграммы направленности вибратора, погруженного в ENG-метасреду, в случае ее плазменной частоты 20 ГГц и частоты излучения 20,155 ГГц, приведен на рис.31. Соответствующее моделирование проводилось как для двумерного, так и для трехмерного случая. Высота метаструктуры над экраном составила  $h=60$  мм, а источник располагался на расстоянии  $h_s=30$  мм от поверхности метапанели.

Следует обратить внимание, что описанный в [45, 46] эффект сужения диаграммы направленности ранее наблюдался в аналогичных по формату конструкциях антенн, представляющих собой разновидность резонатора Фабри-Перо. Первое описание антенны данного типа, с указанием на сужение ее диаграммы направленности, было опубликовано Трентини еще в 1956 году [47]. Антенны на основе резонатора Фабри-Перо представляют собой систему из двух параллельных экранов, расстояние между которыми кратно целому числу полуволн. Один из экранов, над которым располагается излучатель, представляет собой металлическую поверхность, а другой – полупрозрачен для прохождения электромагнитных волн за пределы резонатора. Согласно [48], ширина диаграммы направленности такой антенны по уровню половинной мощности на резонансной частоте пропорциональна  $\sqrt{Q/2}$ , где  $Q$  – добротность резонатора.

В последнее время многообразия конструкций антенн на основе



**Рис.30. Вибратор, встроенный в ENG-плиту из множества проволок [46]**

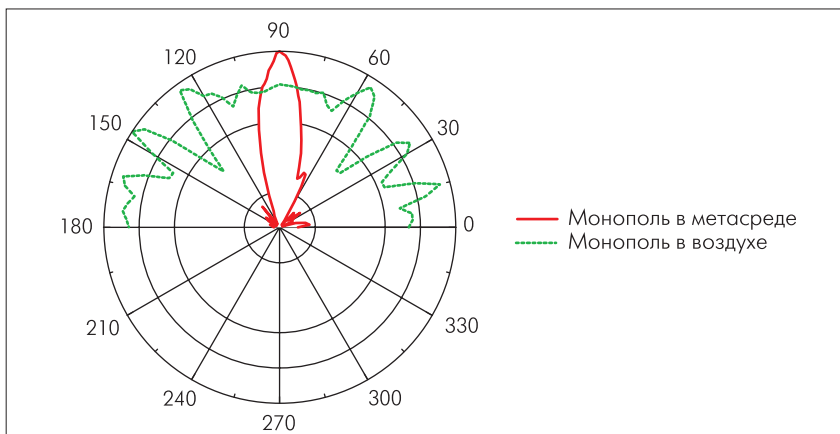
резонатора Фабри-Перо расширялось за счет изготовления экранирующих поверхностей из различных, в том числе диэлектрических, метаматериалов. Их применение позволяет уменьшить высоту антенны, управлять ее резонансной частотой и полосой пропускания.

В работе [49] исследована направленность печатной антенны в случае расположения над ней ковра из метаматериала, образованного двумя слоями металлических пластин, перфорированных круглыми отверстиями. Так, для печатной антенны размером  $46,3 \times 37,2$  мм на частоте 2,55 ГГц ширина диаграммы направленности значительно сужалась, когда ее покрывали метаковром квадратной формы со стороной 315 мм (см. табл.) [50]. Достигнутое усиление антенны 17,2 дБ довольно близко к теоретическому максимуму 19,5 дБ, определяемому для антенны с ашертурой того же размера, что и метаковер, согласно выражению

$$G = 10 \lg(4\pi A_e / \lambda^2),$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $A_e$  – ашертура (эффективная площадь излучающей/приемной поверхности). В пользу определяющего влияния размеров метаматериала говорит также факт выравнивания коэффициента усиления в обеих анализированных плоскостях по сравнению с почти двукратной его разницей для свободной от покрытия печатной антенны.

Достаточно перспективно направление создания метаэкранов на основе решеток из диэлектрических резонаторов (ДР) В работе [51] предложено использовать ДР для создания DNG-среды. Дальнейшее развитие этой идеи – решетка из дисковых диэлектрических резонаторов с напыленными на их поверхности медными кольцами [52]. По анало-



**Рис.29. Нормализованная диаграмма направленности монополя в плоскости XZ на частоте 10,6 ГГц [45]. Пунктирная линия соответствует свободно расположенному в пространстве вибратору, а сплошная линия – случаю погружения монополя в метасреду**

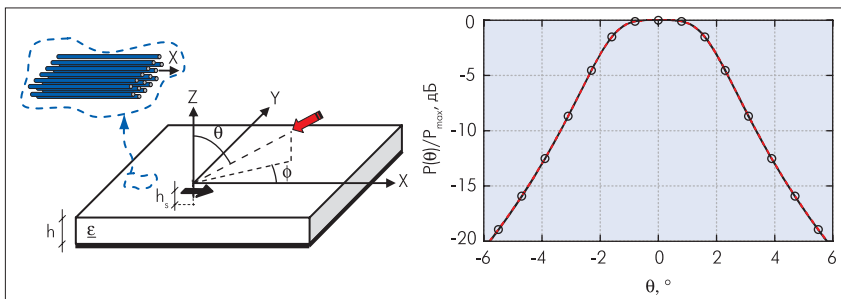


Рис.31. **Диаграмма направленности вибратора в проводочной метаплите [46]. Результаты для различных направлений в горизонтальной плоскости ( $\varphi = 0^\circ, 45^\circ$  и  $90^\circ$ ) совпадают**

гии с оптическим диапазоном волн, возможно использование и других форм резонаторов – сферических, кубических [53], эллипсоидных, а также полостей соответствующей формы в диэлектрической плите. Такие решения могут быть технологически проще, чем традиционные для метаматериалов ячейки из проводников специфичной формы.

Наряду с исследованиями в сфере элементарных антенн и решеток из элементарных излучателей, проводятся работы и по улучшению пара-

метров более сложных антенных конструкций, например, рупорных антенн. Так, покрытие метаматериалом внутренней поверхности рупора (рис.32) [54] позволяет улучшить его согласование, повысить эффективность работы и снизить уровень кроссполаризационного излучения.

В работе [55] рассмотрена плоская линза на основе метаматериала с нулевым индексом преломления, размещение которой в раскрытии пирамидального рупора (рис.33)

### Увеличение направленности печатной антенны, покрытой ковром из метаматериала [50]

Наличие метаконтура	Коэффициент усиления (дБ)	Ширина диаграммы направленности в плоскостях	
		x-z	y-z
Есть	6,8	63°	117°
Нет	17,2	25°	27°

позволило повысить его коэффициент усиления более, чем на 2 дБ в диапазоне частот 16,1–17,3 ГГц. Линза представляет собой набор из трех слоев медных решеток с квадратными ячейками. На частоте 16,4 ГГц ее наличие позволило увеличить коэффициент использования апертуры с 0,32 до 0,6. Металлинза обеспечила сокращение длины раструба рупора до 56% от оптимальной схемы без линзы.

В качестве метавставок в раскрытии рупора могут использоваться также многослойные сетки из проводников (рис.34а) [56]. Однако при внесении

### НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



**Г.Ле Бодик**  
**Технологии и службы мобильной передачи данных**  
В издании представлен всесторонний материал о последних научных и промышленных достижениях в области мобильной связи. Описана техническая база сервисов SMS, EMS и MMS, приведен анализ передовых промышленных разработок. Отражены последние предложения по стандартизации сервиса MMS.

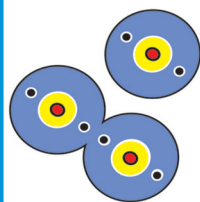
Книга станет неопределимым источником информации для разработчиков прикладных программ, производителей, операторов связи и контент-провайдеров, а также для сотрудников и руководителей IT-отделов профильных компаний.

Москва: Техносфера, 2008. – 544 с.  
ISBN 978-5-94836-162-8

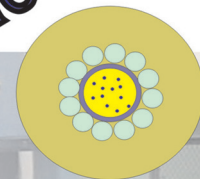
Подробная информация о книгах, выпускаемых издательством ТЕХНОСФЕРА, на сайте: <http://www.technosphaera.ru>. Заявки на книги принимаются по адресу [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru).

141002, г.Мытищи, М.О.  
ул.Ядреевская д.4

**Волоконно-оптические кабели**



ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**ЯУЗА-кабель**



- Производство волоконно-оптических кабелей;**
- Исследования и испытания волоконно-оптических кабелей;**
- Разработка конструкций и технологии производства волоконно-оптических кабелей.**

**Кабели имеют сертификат Министерства связи РФ**

WWW: <http://www.yauzacab.ru>  
E-mail [yauzacab@df.ru](mailto:yauzacab@df.ru)  
тел/факс: 583-68-69



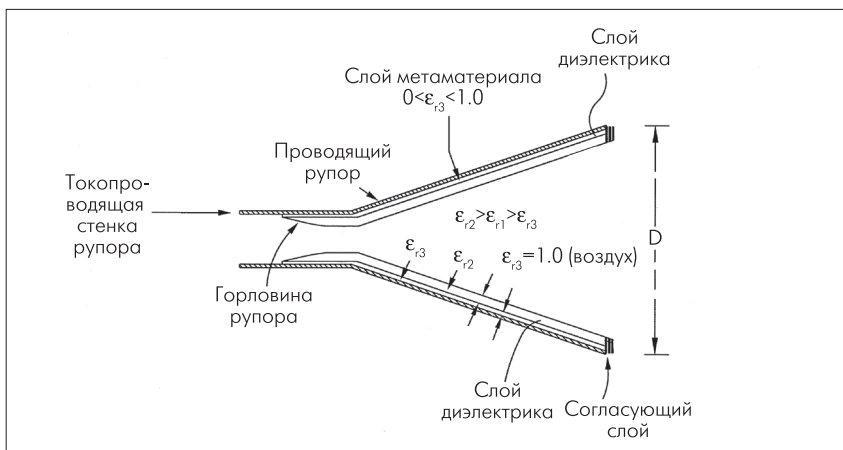


Рис.32. Рупорная антенна с покрытием метаматериалом внутренней поверхности раструба [54]

таких метавставок в раскрыв рупора необходимо контролировать полосу пропускания антенны, которая может сужаться. Для ее расширения используют численные алгоритмы оптимизации параметров метавставок, изменяя, к примеру, количество проводков и расстояние между ними в слое, интервал между слоями и т.д.

Применение такой оптимизации для пирамидального рупора с метавставками на основе семи слоев проводников позволило увеличить

ширину полосы пропускания антенны X-диапазона до 12% по уровню коэффициента усиления 3 дБ. При этом длина раструба рупора составила 52% от длины оптимального рупора без метавставок.

Используя более сложную структуру из комбинации поперечных и продольных (вдоль главной оси рупора) решеток проводников (рис.34б), удалось добиться еще большего сокращения длины рупорного раструба (33% от исходного). При этом

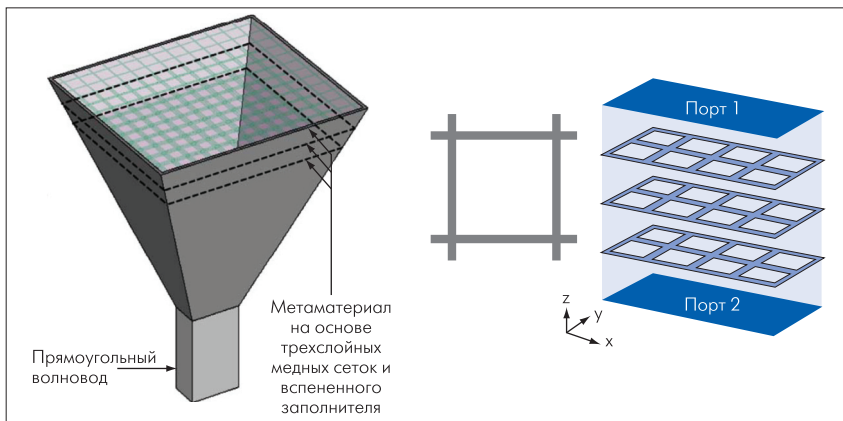


Рис.33. Рупорная антенна с металлизацией [55]

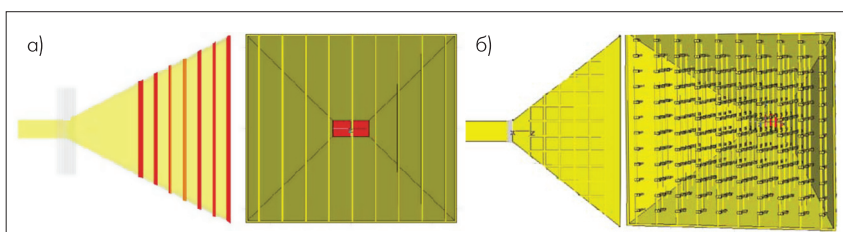


Рис.34. Рупорная антенна со слоями проводников: а) семь слоев проводников в поперечной плоскости, б) сетка продольных проводников (10×12), совмещенная со слоями проводников в поперечной плоскости (10×6) [56]

использовалась решетка из 12×10 шт. проводников (в продольной плоскости) и 6 слоев по 10 проводников в поперечной плоскости. Однако при этом полоса пропускания антенны, даже в случае численной оптимизации параметров метавставки, сужается до 6%.

В целом, применение метаматериалов для совершенствования рупорных антенн имеет перспективу и очевидный потенциал.

В заключение отметим, что анализ известных направлений исследований в теории метаматериалов позволяет спрогнозировать появление антенных конструкций на основе активных и нелинейных метаструктур, теорию и технологии которых еще предстоит разработать. Вполне вероятно, что в этот процесс могут быть вовлечены также хиральные метасреды [57], материалы с искусственным магнитным и квадрупольным откликом, метаматериалы с сильной пространственной дисперсией, с помощью которых уже пытаются создавать оптические приборы с разрешением, превышающим дифракционный предел. Учитывая успешное начало эры метаматериалов в антенной технике, сопровождавшееся открытием целого ряда замечательных эффектов, есть основания надеяться, что ее продолжение станет не менее впечатляющим.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсар В. Антенны RIFA для мобильных средств связи: многообразие конструкций. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, № 1, с. 64–74.
2. Слюсар В. Диэлектрические резонаторные антенны. Малые размеры, большие возможности. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, № 4, с. 89–95.
3. Слюсар В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, № 5, с. 78–83; № 6, с. 82–89.
4. Слюсар В. Синтез антенн на основе генетических алгоритмов. – Первая миля, 2008, № 6, с. 16–23; 2009, № 1, с. 22–25.
5. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2009, № 7, с. 70–79.
6. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations/Edited by

- N. Engheta and R. W. Ziolkowski. – Wiley-IEEE Press, 2006.
7. **J.C. Bose.** On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure. – Proc. Roy. Soc., 1898, vol. 63, p. 146–152.
  8. **K.F. Lindman.** Om en genom ett isotropt system av spiralformiga resonatorer alstrad rotationspolarisation av de elektromagnetiska vegorna. — Ufversigt af Finska Vetenskaps-Societetens förhandlingar. A. Matematik och naturvetenskaper. – Vol. LVII, N°3, 1914–1915, pp. 1–32. – <http://www.biodiversitylibrary.org/item/50732#103>.
  9. **W.E. Kock.** Metal-lens antennas. – Proceedings of Inst. Radio. Engrs. and Waves and Electrons, vol. 34, November, 1946, p. 828–836.
  10. **W. E. Kock.** Metallic delay lenses. – Bell Sys. Tech. J., 1948, vol. 27, p. 58–82.
  11. **Дж. Джексон.** Классическая электродинамика/Пер. с англ. Г.В. Воскресенского и Л.С. Соловьева. – М.: Мир, 1965, с. 254–255.
  12. **John Brown.** Artificial dielectrics having refractive indices less than unity. – Proc. Inst. Elect. Eng (London), May 1953, Part IV, vol. 100, Monograph N° 62R, p. 51–62.
  13. **Walter Rotman.** Plasma simulation by artificial and parallel plate media. – IRE Trans. Ant. Propagat, Januare 1962, vol. 10, Issue 1, p. 82–95.
  14. **Hou-Tong Chen et al.** Active terahertz metamaterial devices. – Nature, Vol. 444, 30 November 2006, p. 597–600. – <http://physics.bu.edu/documents/thz.pdf>.
  15. **Шелкунов С., Фриис Г.** Антенны (Теория и практика). Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1955.
  16. **J.B. Pendry et al.** Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1999, N° 47, p. 2075–2081.
  17. **Patel, Neil.** Theory, Simulation, Fabrication and Testing of Double Negative and Epsilon Near Zero Metamaterials for Microwave Applications/ Master's Thesis in Electrical Engineering. – California Polytechnic State University, June 2008. – <http://digitalcommons.calpoly.edu/theses/7/>.
  18. **S.A. Tretyakov and many colleagues.** Research on negative refraction and backward-wave media: A historical perspective. – Radio Laboratory / SMARAD Helsinki University of Technology, 2005. – [http://users.tkk.fi/sergei/slides\\_tretyakov\\_latsis.pdf](http://users.tkk.fi/sergei/slides_tretyakov_latsis.pdf).
  19. **M. Laue.** Die Fortpflanzung der Strahlung in dispergierenden und absorbierenden Medien. – Ann. Phys., 1905, 18, p. 551.
  20. **H.C. Pocklington.** Growth of a wave-group when the group velocity is negative. – Nature, vol. 71, 1905, p. 607–608.
  21. **Мандельштам Л.И.** Лекции по некоторым вопросам теории колебаний (1944 г.). Четвертая лекция/ В кн.: Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. – М.: Наука, 1972, с. 431–437.
  22. **Веселаго В.Г.** Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . – Успехи физических наук, 1967, т. 92, N°7, с. 517–526.
  23. О Веселаго – весело и с добрыми пожеланиями. – За науку (газета МФТИ), 2004, N° 1685. – <http://za-nauku.mipt.ru/hardcopies/2004/1685/veselago75.html>.
  24. **J.B. Pendry et al.** Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 47, N°11, 1999, p. 2075–2084.
  25. **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. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs\\_smith\\_group/Smith\\_PRL\\_84\\_4184\\_\(2000\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Smith_PRL_84_4184_(2000).pdf).
  26. USA Patent N° 6791432B2.
  27. **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. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs\\_smith\\_group/Shelby\\_Science\\_\(2001\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_Science_(2001).pdf).
  28. **Christine T. Chevalier, Jeffrey D. Wilson.** Frequency Bandwidth Optimization of Left-Handed Metamaterial. – NASA/TM-2004-213403, November 2004. – <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2004/TM-2004-213403.pdf>.
  29. **R.A. Shelby, D.R. Smith, S.C. Nemat-Nasser and S. Schultz.** Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. – Appl. Phys. Lett., 22 January 2001, vol. 78, p. 489–491. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs\\_smith\\_group/Shelby\\_APL\\_\(2001\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_APL_(2001).pdf).
  30. **A. Semichaevsky and A. Akyurtlu.** Homogenization of Metamaterial-Loaded Substrates and Superstrates for Antennas, – Progress In Electromagnetics Research, N° 71, 2007, p. 129–147. <http://ceta.mit.edu/PIER/pier71/08.07021001.S.Akyurtlu.pdf>.
  31. **P.Y. Chen et al.** Synthesis design of artificial magnetic metamaterials using a genetic algorithm. - OPTICS EXPRESS, vol. 16, N° 17, 18 August 2008, p. 12806–12818.
  32. **Kwang Kim, Vasundara V. Varadan.** Millimeter Wave Dual-band Microstrip Antennas with Metamaterial Substrates using the LTCC Process. – Proceedings of Metamaterials 2007, Rome, 22-24 October, 2007.
  33. **M.-F. Wu et al.** Miniaturization of a Patch Antenna with Dispersive Double Negative Medium Substrates. – APMC2005 Proceedings. <http://www.ee.nus.edu.sg/lwli/Publications/Conferences/2005/2005%20Invited%20b.pdf>
  34. **Jiang Xiong, Hui Li, Yi Jin and Sailing He.** Modified TM<sub>020</sub> 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.
  35. US Patent Application No. 2008/0258993. Oct. 23, 2008.
  36. US Patent Application N° 2008/0048917. Feb. 28, 2008.
  37. **Prathaban Mookiah, Kapil R. Dandekar.** Metamaterial-Substrate Antenna Array for MIMO Communication System. – IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 57, No. 10, October 2009, p. 3283–3292.
  38. **Chih-Chun Hsu et al.** Design of MIMO Antennas with Strong Isolation for Portable Applications. – Antennas and Propagation Society International Symposium, APSURSI '09, 1–5 June 2009.
  39. **Merih Palandoken, Andre Grede, and Heino Henke.** Broadband Microstrip Antenna With Left-Handed Metamaterials. – IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 57, N° 2, February 2009, p. 331–338.
  40. **Richard W. Ziolkowski, Aycan Erentok.** Metamaterial-Based



- Efficient Electrically Small Antennas. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, No. 7, July 2006, p.2113–2130.
41. **Пахотин В.А.** Излучение электрически короткой антенны из ограниченного объема газоразрядной плазмы. – Письма в ЖТФ, 2007, том 33, вып. 8, с. 22–29.
42. US Patent Application No. 2009/0140946. Oct. 31, 2008.
43. **Raoul O.** Ouedraogo et al. In Situ Optimization of Metamaterial-Inspired Loop Antennas. – IEEE antennas and wireless propagation letters, vol. 9, 2010, p. 75–78.
44. **Peng Jin, Richard W. Ziolkowski.** Broadband, Efficient, Electrically Small Metamaterial-Inspired Antennas Facilitated by Active Near-Field Resonant Parasitic Elements. – IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 58, N° 2, February 2010, p. 318–327.
45. **Q. Sui, C. Li, L. L. Li, and F. Li.** Experimental Study of  $\lambda/4$  Monopole Antennas in a Left-Handed Meta-Material. – Progress In Electromagnetics Research, 2005, N° 51. p. 281–293. <http://ceta.mit.edu/PIER/pier51/16.0401122.Sui.LL.pdf>.
46. **P.Burghignoli, G. Lovat, et. al.** Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire-Medium Slabs: Physical Mechanisms And Full-Wave Analysis. – [http://www.elettromagnetismo.it/atti\\_rinem/2006S05A01.pdf](http://www.elettromagnetismo.it/atti_rinem/2006S05A01.pdf).
47. **G.V.Trentini.** Partially reflecting sheet array. – IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1956, vol. 4, p. 666–671.
48. **Zhen-guo Liu.** Fabry-Perot Resonator Antenna. – Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2010, vol. 31, N° 4, p. 391–403.
49. **Zi-bin Weng, Nai-Biao Wang, Yong-Chang Jiao.** Study on High Gain Patch Antenna with Metamaterial Cover. – 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, ISAPE '06, 26–29 Oct. 2006.
50. **P.-H.Tichit, S.N.Burokur, and A. de Lustrac.** Design of an ultra-directive antenna using spatial coordinate transformation. – IEEE International Workshop on Antenna Technology, iWAT 2009, 2–4 March 2009.
51. **T.Ueda, N.Michishita, T.Itoh.** Left-handed metamaterial structures using dielectric resonators. – EMTS 2007, International URSI Commission B, Electromagnetic Theory Symposium, July 26–28, 2007, Ottawa, Canada.
52. **J.F.Wang et al.** Wide-angle polarization-independent planar left-handed metamaterials based on dielectric resonators. – Progress In Electromagnetics Research B, 2009, vol. 12, p. 243–258.
53. **Irina Vendik, Mikhail Odit, Dmitryi Kozlov.** 3D Metamaterial Based on a Regular Array of Resonant Dielectric Inclusions. – Radioengineering, vol. 18, N° 2, June 2009.
54. US Patent Application No. 2009/0213022. Aug 27, 2009.
55. **Q.Wu, et al.** A novel flat lens horn antenna designed based on zero refraction principle of metamaterials. – Applied Physics A 87, 2007, p. 151–156.
56. **S.Hrabar, D.Muha, Z.Sipus.** Optimization of Wire-medium-based Shortened Horn Antenna – 4th European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2010, Barcelona, 12–16 April 2010.
57. **Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J.** Electromagnetic waves in Chiral and Bi-Isotropic Media. – London: Artech House, 1994.



## ЭЛЕКТРОКАБЕЛЬ

### Шкаф телекоммуникационный уличный (ШТУ)



Совместно разрабатываемое решение компании ВСС и ООО «Электрокабель» для ОАО «ЮТК» позволит разместить оборудование доступа в распределительных шкафах различной ёмкости с целью сокращения абонентского шлейфа, что повысит качество предоставляемых сервисов по передаче данных, голосового трафика и видеоконтакта.

В опытной эксплуатации находятся шкафы ШТУ1200 и ШТУ 2400, имеющие отсек для размещения активного оборудования в 19" конструктиве. Шкафы имеют теплоизоляцию.

ШТУ1200 – двухдверный, ШТУ2400 – трехдверный. Размеры (Ш×В×Г) – 1110×1600×600.

ООО «Электрокабель»  
350059, Россия, г. Краснодар, ул. Тихорецкая 22/1  
Тел./факс.: (861) 274-87-48, 274-87-79, 2-748-778  
[www.elcabel.ru](http://www.elcabel.ru), e-mail: [elcab@mail.ru](mailto:elcab@mail.ru)