

МЕТАМАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИЯХ АНТЕНН

В предшествующей публикации (см. Слюсар В. **Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы.** – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, №7, с. 70–79) мы рассмотрели само понятие и основные свойства метаматериалов, которые могут использоваться в антенной технике. Пора переходить к анализу самих конструкций антенн на основе этих удивительных структур. Напомним, что терминология и ряд аббревиатур были введены в первой части. Особенности электрически малых антенн (ЭМА) описаны автором в работе [1].

КОНСТРУКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕТААНТЕНН

Метаматериалы в качестве подложек для печатных миниатюризированных антенн позволяют снижать размеры излучателей, увеличивать их полосы пропускания и эффективность излучения. Структура метаматериала, формирующего подложку, может быть однородной либо композитной, образованной из нескольких типов сред. Так, в работе [2] описана однородная μ -негативная MNG-подложка, сформированная из погруженных в диэлектрическую подушку разрезных квадратных рамок (рис.1). Аналогичное решение возможно и на основе ϵ - и μ -негативной (DNG) среды, в которой образующие элементы представляют собой ячейки, приведенные на рис.2.

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 (ϵ и $\mu > 0$, DPS) с DNG-материалами. Поскольку у материалов первого типа векторы напряженности электрического и магнитного полей образуют с волновым вектором правостороннюю систему координат, а в DNG материалах – левостороннюю, такие композитные материалы называют право-левосторонними (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.

В.Слюсар, д.т.н.
swadim@inbox.ru

Характерный пример композитной подложки рассмотрен в работе [3] (рис.3). 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.2. 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.4) 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, антенна по-прежнему работает на частоте 7,7 ГГц, что доказывает правильность теоретических расчетов.

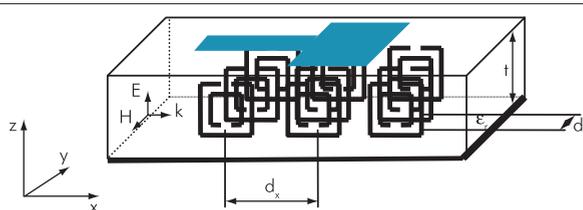


Рис.1. Печатная антенна с подложкой из MNG [2]

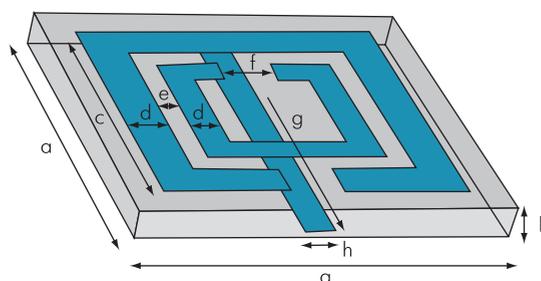


Рис.2. Ячейка DNG-метаматериала [3]

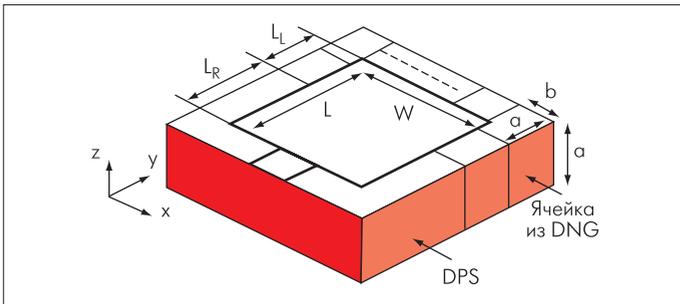


Рис.3. Печатная антенна с композитной подложкой [3]

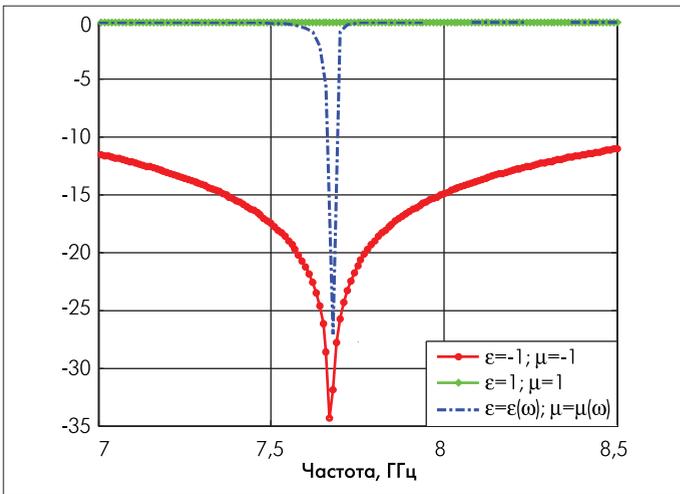


Рис.4. Расчетный коэффициент отражения печатной антенны для различных значений ϵ и μ материала подложки [3]

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

Один из первых примеров практического использования метаматериалов для серийного изготовления печатных антенн – антенные решетки MIMO компании Rayspan (www.rayspan.com), использованные фирмой Netgear в точках доступа WNR3500 и WNDR3300 с радиointерфейсом IEEE 802.11n. Детали технических решений, легших в основу конструкции метаантенн, описаны в патентных заявках фирмы Rayspan [4, 5]. Суть их состоит в использовании для изготовления печатной антенны композитной структуры CRLH на основе отрезка линии передачи с отрицательным индексом преломления (рис.5). Чисто внешне новый тип антенн мало отличается от своих печатных прототипов, однако достигнутые результаты рассеивают сомнения скептиков в перспективности подобных решений. В частности, на основе метаструктур удалось заметно уменьшить габариты излучателей антенной решетки MIMO, что позволило снизить их взаимное влияние. Электрическая длина печатной метаантенны может быть снижена до $0,1\lambda$, что меньше известного ограничения в половину длины волны. При этом обеспечена работа в двух диапазонах частот (в районе 2,4 ГГц и 5,2 ГГц), а пропускания антенн увеличена на 15%.

МЕТАОБОЛОЧКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН

Согласно работе [6], 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 [6] идею интеграции ENG-обтекателя с классическим монополем, расположенным над плоским экраном и подключенным к коаксиальному фидеру, причем сам монополь на-

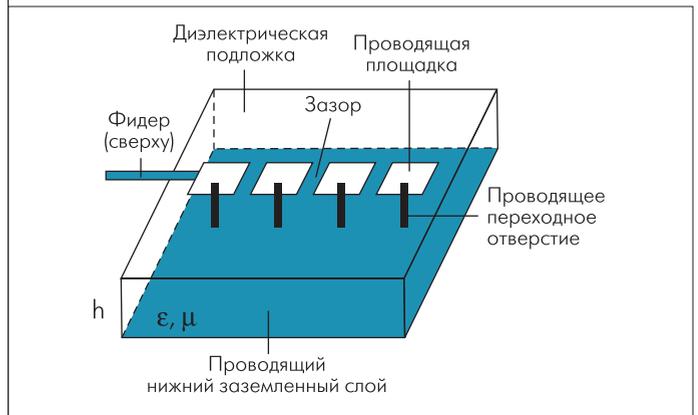


Рис.5. Печатная антенна из композитной структуры CRLH [4, 5]

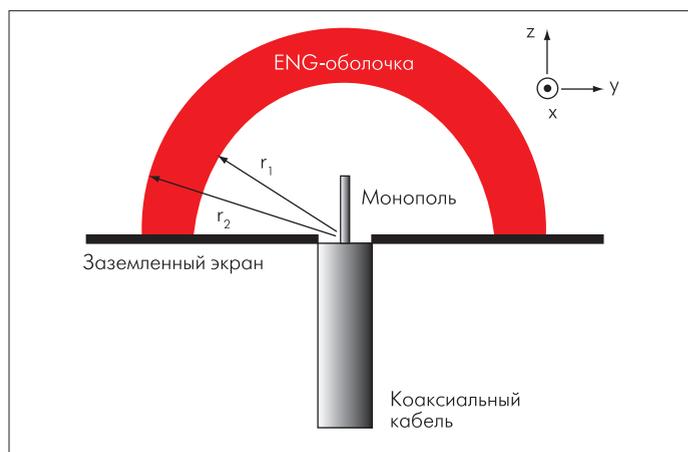


Рис.6. Конструкция ЭМА в составе монополя и ENG-оболочки [6]

ходится внутри полусферического колпака из ENG-материала (рис.6). 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.7). 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), ω – радиальная частота электромагнитных колебаний.

Наиболее важный вывод авторов работы [6] состоит в том, что рассмотренная ЭМА, будучи выполненной из доступных метаматериалов, обладает, тем не менее, вы-

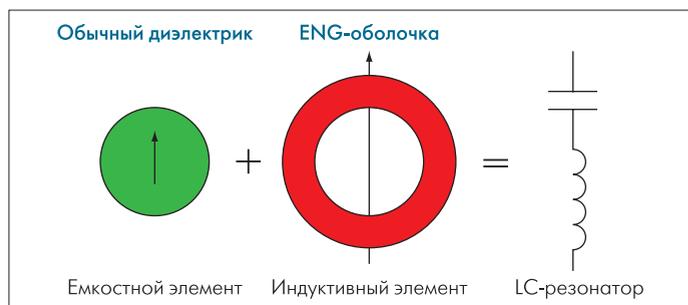


Рис.7. Принцип компенсации реактивности ЭМА с помощью метаоболочки [6]

раженным превосходством над пределом Чу [1]. В частности, для использованных в расчетах уровней потерь и дисперсионности достижимая величина добротности Q в 1,583 раза превышает предел Чу. Существенно, что для ENG-материала на резонансной частоте удается добиться активного сопротивления около 50 Ом и почти нулевого – реактивного, КПД составил около 98–99 %.

Аналогичная идея может использоваться и для случая DNG-оболочек, 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 [6], являются экспериментальные результаты [7], 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.

СУЖЕНИЕ ДИАГРАММ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭМА

Уже получено достаточно много экспериментальных подтверждений эффекта возникновения направленных свойств излучения у элементарного монополя, помещенного в DNG-среду. В работе [8] описан один из таких экспериментов по измерению диаграммы направленности вибратора ($\lambda/4$ -монополя), расположенного внутри метаматериала, образованного из разрезных квадратных рамок (SRR) и печатных проводников (рис.8). Такая антенна продемонстрировала в ограниченном пространственном секторе отрицательный 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.9). 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

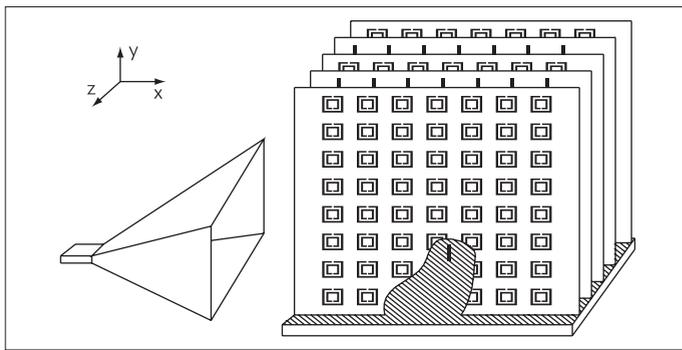


Рис.8. Схема эксперимента по снятию диаграммы направленности монополя, погруженного в DNG-среду [8]

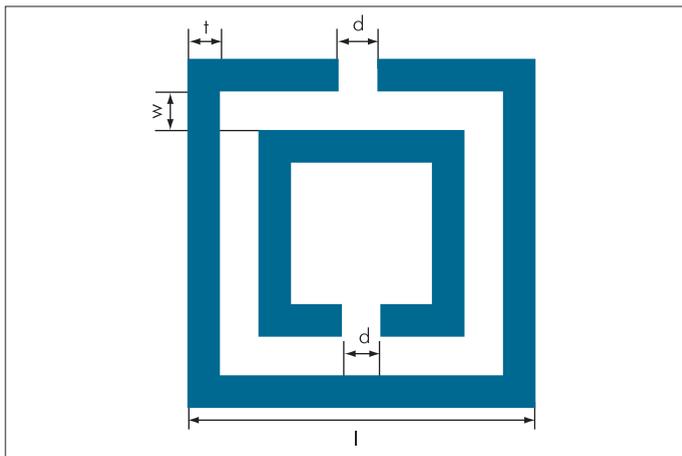


Рис.9. Квадратный SRR-элемент, использовавшийся для создания метасреды [8]. $l = 3$ мм, $d = t = w = 0,3$ мм

50 – второго. Четвертьволновый вибратор размещался параллельно печатным проводникам внутри стека плат над горизонтальным проводящим экраном. Оценка диаграмм направленности (рис.10) проводилась путем вращения метаструктуры вокруг монополя. В качестве приемной использовалась рупорная антенна.

Необходимо отметить, что для всестороннего изучения эффекта сужения диаграмм направленности вибратора в мета-

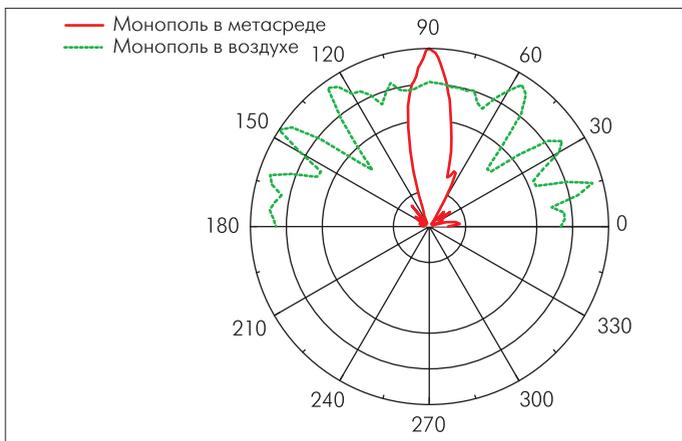


Рис.10. Нормализованная диаграмма направленности монополя в плоскости XZ на частоте 10,6 ГГц [8]. Пунктирная линия соответствует свободно расположенному в пространстве вибратору, а сплошная линия – случаю погружения монополя в метасреду

среде рассмотренный в [8] эксперимент следовало бы дополнить оценкой зависимости ширины диаграммы направленности монополя от габаритов метаоболочки. Это позволило бы получить однозначный ответ на высказанное в работе [9] предположение, что угловые размеры диаграммы направленности вибратора, окруженного метасредой, определяются площадью ее раскрыва. Кроме того, для подобных излучающих структур необходима дополнительная проверка теоремы взаимности передающего и приемного режимов работы. Поскольку рассмотренный метаматериал составлен из гомогенных периодических структур, ряд исследователей высказывают гипотезу, что плоская волна в режиме приема может быть направлена метаоболочкой под иным углом, чем в режиме передачи. Пример нарушения теоремы взаимности в отношении обтекателя антенны радиолокационной станции, изготовленного из метаматериала, приведен, например, в работе [10].

Для обужения диаграммы направленности элементарного излучателя может применяться также ENG-среда. В работе [11] представлен обзор результатов исследования особенностей диаграмм излучения элементарного проволочного вибратора, встроенного в метасреду ENG-типа, образованную множеством параллельных проводников, расположенных над проводящим экраном (рис.11). Расчеты поля в дальней области проводились с помощью метода моментов.

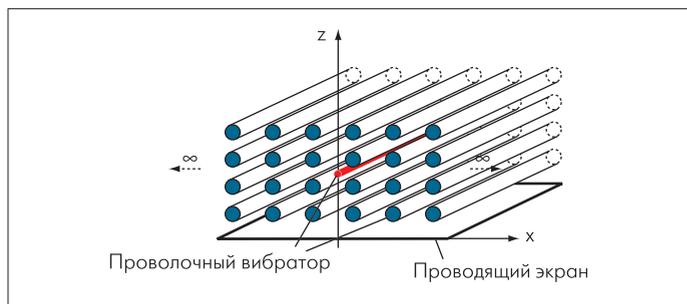


Рис. 11. Вибратор, встроенный в ENG-плиту из множества проволок [11]

Пример резкого сужения диаграммы направленности вибратора, погруженного в ENG-метасреду, в случае ее плазменной частоты 20 ГГц и частоты излучения 20,155 ГГц, приведен на рис.12. 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.

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 [12], 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 цело-

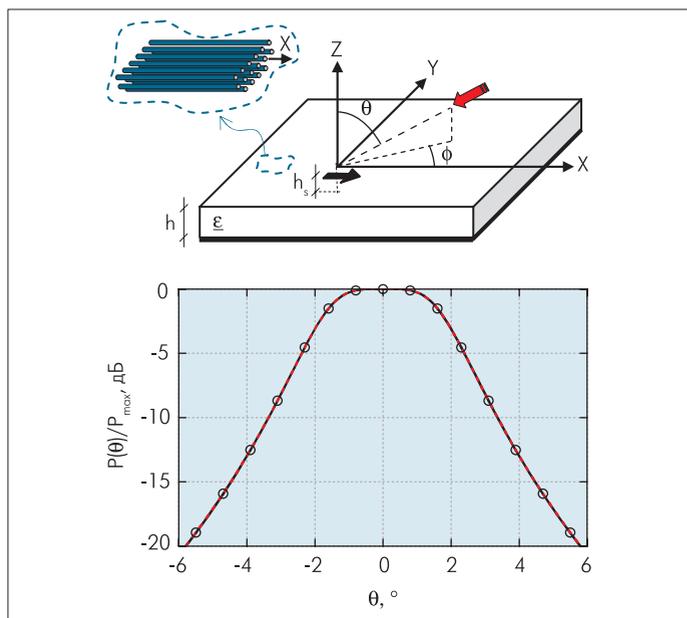


Рис. 12. Диаграмма направленности вибратора в проволочной металлите [11]. Результаты для различных направлений в горизонтальной плоскости ($\phi = 0^\circ, 45^\circ$ и 90°) совпадают

го ряда замечательных эффектов, есть основания надеяться, что ее продолжение станет не менее впечатляющим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсар В. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №7, с. 10–19.
2. 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>.
3. 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>
4. US Patent Application No. 2008/0258993. Oct. 23, 2008.
5. US Patent Application No. 2008/0048917. Feb. 28, 2008.
6. 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.
7. Пахотин В.А. Излучение электрически короткой антенны из ограниченного объема газоразрядной плазмы. – Письма в ЖТФ, 2007, том 33, вып. 8, с. 22–29.
8. 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>.
9. Митра Р. Критический взгляд на метаматериалы. – Радиотехника и электроника, 2007, том 52, № 9, с. 1051–1058.
10. H. Cory, Y.J. Lee, Y. Hao and C.G. Parini. Use of conjugate dielectric and metamaterial slabs as radomes. – IET Microwave Antennas Propagation, Vol. 1, N 1, February 2007, p. 137–143.
11. 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/attirinem/2006S05A01.pdf>.
12. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. Electromagnetic waves in Chiral and Bi-Isotropic Media. – London: Artech House, 1994.