

Перспективы использования метаматериалов в антеннах нового поколения

А.Л. Бузов¹, Д.С. Клюев², А.М. Неццет¹, В.А. Неганов²

¹ АО «Концерн «Автоматика»
127106, Российская Федерация, г. Москва
ул. Ботаническая, 25

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

В статье приведен обзор существующих исследований по возможностям применения метаматериалов в антенной технике, а также ряд новых исследований авторов. Обоснована перспективность применения метаматериалов в конструкции антенных систем для совершенствования их электрических и массо-габаритных характеристик.

Ключевые слова: метаматериал, киральная среда, антенна, улучшение антенных характеристик.

Расширение перечня функциональных задач, решаемых современной радиоэлектроникой, а также их усложнение стимулировало в последние десятилетия интенсивное развитие теории и техники антенн. Основные области использования радиофизики – связь, телевидение, радиолокация, радиоуправление, радиоастрономия, а также системы радиоэлектронного противодействия, самонаведения, телеметрии и другие невозможны без применения различных антенных систем, в связи с чем, проблема усовершенствования их характеристик и миниатюризации является чрезвычайно важной.

Анализ литературы показывает [1–3], что многообещающим подходом к созданию антенн нового поколения является применение в их конструкции искусственных композитных материалов, как правило, обладающих про-

странственной дисперсией – метаматериалов. В общем случае, метаматериал представляет собой, искусственно созданный композиционный материал, обладающий уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, нехарактерными для природных материалов, и обусловленными периодической структурой из макроскопических элементов определенной формы. Одним из важнейших свойств метаматериала, с точки зрения электродинамики, является возможность достижения в некоторой полосе частот отрицательных значений эффективных диэлектрических и/или магнитных проницаемостей.

В зависимости от значений эффективных проницаемостей, все метаматериалы можно классифицировать следующим образом (рис. 1) [4]: ENG-материалы ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$), DPS-материалы ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$), DNG-материалы ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$) и MNG-материалы ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$). Примерами DPS-материалов могут служить обычные диэлектрики. Примером ENG – материалов является электромагнитная плазма (ионосфера земли), у которой на частотах ниже плазменной имеет место отрицательное значение диэлектрической проницаемости. Примером искусственного ENG-метаматериала может служить совокупность параллельно расположенных проводников. Однако в таком слу-

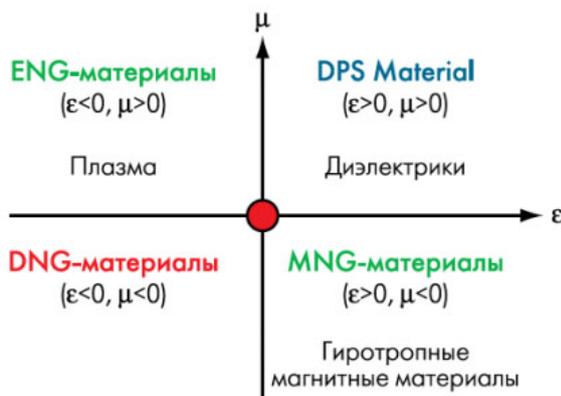


Рис. 1. Классификация метаматериалов

чае среда является анизотропной. Для создания изотропного ENG-метаматериала были использованы триплетные элементы. В качестве примера MNG – материала может служить метаматериал, созданный на основе кольцевого разомкнутого резонатора. За счет резонансных свойств такой структуры, вторичное магнитное поле может усиливать исходное магнитное поле либо ему противодействовать, что приводит, соответственно, к положительным или отрицательным магнитным проницаемостям. В частности, такие структуры имеют отрицательное значение эффективной магнитной проницаемости на частотах ниже резонансной.

Логично предположить, что объединяя рассматриваемые выше ENG и MNG материалы можно получить, материал с одновременно отрицательными эффективными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Такой подход впервые предложил Д. Пендри в 1999 г. [5], и впоследствии, Д. Смитом был получен экспериментальный образец метаматериала [6], подтвердивший отрицательные значения эффективных проницаемостей. Среды, у которых эффективные проницаемости одновременно принимают отрицательные значения, в своей основополагающей работе [7] В.Г. Веселаго, назвал «левыми» (Left-handed media), поскольку ранее Сивухин Д.В. заметил [8], что в таком случае вектор Пойнтинга \vec{S} (1) направлен противоположно волновому вектору \vec{k} , и, следовательно, векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{k} образуют левую тройку (рис. 2).

$$\begin{aligned} [\vec{k}, \vec{E}] &= \frac{\omega}{c} \mu \vec{H}; \\ [\vec{k}, \vec{H}] &= -\frac{\omega}{c} \varepsilon \vec{E}; \\ \vec{S} &= \frac{c}{4\pi} [\vec{E}, \vec{H}]. \end{aligned} \quad (1)$$

Среди метаматериалов особняком следует выделить киральные среды, представляющие собой диэлектрический контейнер в котором равномерно распределены проводящие включения зеркально-асимметричной формы [9]. В качестве таких включений могут выступать спирали, S-элементы, Ω – частицы, разомкнутые кольца и др. Данные среды обладают рядом уникальных свойств, основными из которых являются кросс-поляризация падающего поля и циркулярный дихроизм, благодаря которому в среде происходит бифуркация нормальных волн на волны с лево- и правокруговыми поляризациями. Двумя основными типами киральных сред являются

$$\mu < 0; \quad \varepsilon < 0;$$

Векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{k} образуют левую тройку

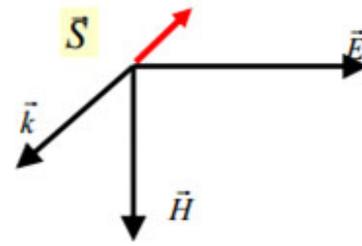


Рис. 2. «Левая» среда

биизотропные (изотропные киральные) материалы, в которых зеркально асимметричные элементы ориентируются произвольным образом, тем самым обеспечивая изотропию среды для волн с право- и левокруговыми поляризациями и бианизотропные (анизотропные киральные) среды, в которых элементы ориентированы одинаково, создавая оси анизотропии.

В большинстве случаев в основе исследований киральных сред лежит феноменологическая теория, которая предполагает использование специальных материальных уравнений и выражений (2) для электромагнитного поля (3) [9]. В данных выражениях присутствует обобщенный параметр киральности χ , характеризующий степень взаимосвязи процессов электрической и магнитной поляризации в среде.

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon_1 \vec{E} \mp i\chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu_0 \mu_1 \vec{H} \pm i\chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \vec{E} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} + k^2 (\varepsilon_1 \mu_1 + \chi^2) \vec{E} \mp 2i\omega \mu_0 \mu_1 k \chi \vec{H} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + k^2 (\varepsilon_1 \mu_1 + \chi^2) \vec{H} \pm 2i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 k \chi \vec{E} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В связи с тем, что киральная среда является частным случаем метаматериалов, для нее также характерны отрицательные значения эффективных проницаемостей. В [2] приведен экспериментальный образец кирального метаматериала на основе спиралей, обладающий одновременно отрицательными эффективными диэлектрической и магнитной проницаемостями (рис. 3). Материал такого типа является биизотропным, что достаточно сложно получить, используя включения другого типа.

Благодаря вышесказанным свойствам, достаточно широкое распространение метаматериалы получили в СВЧ устройствах (частотно- и поляризационно-селективные фильтры, преобразователи поляризации, защитные и радио-

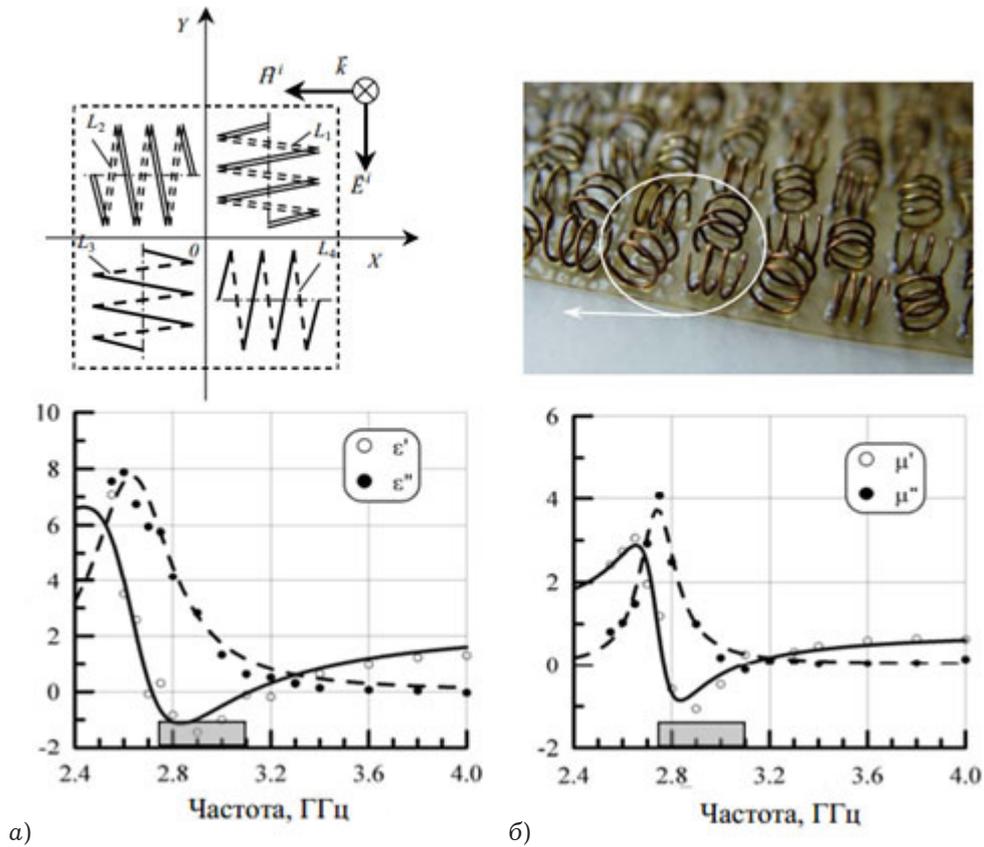


Рис. 3. Эффективные диэлектрические (а) и магнитные проницаемости кирального метаматериала на основе спиралей

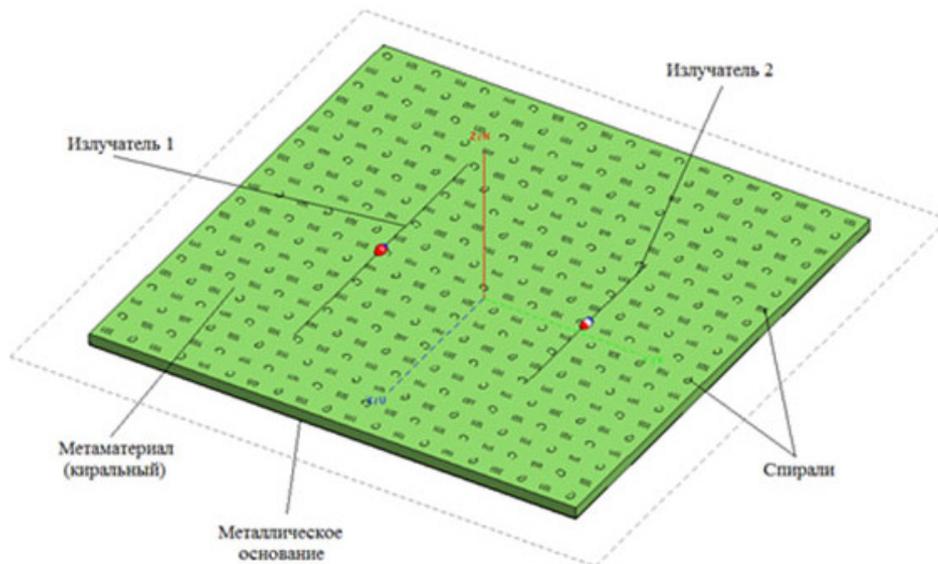


Рис. 4. Два излучателя, расположенные на киральном метаматериале

поглощающие экраны, резонаторы, волноводы, фазовращатели, концентраторы и т. д.), а также в антенной технике. Как показывают результаты исследований, применение метаматериалов позволяет улучшить характеристики данных устройств.

В частности, применение метаматериалов в антенной технике позволяет существенно уменьшить массо-габаритные показатели и также улучшить направленные свойства [1; 10; 11],

компенсировать реактивность электрически-малых антенн [12] (причем, как утверждается в работе [12], удалось преодолеть фундаментальный предел Чу). Использование метаматериала также позволяет уменьшить взаимное влияние между излучателями в антенных решетках ММО систем [13]. Кроме того, как показало дальнейшее исследование, использование метаматериала позволяет значительно улучшить развязку между близко расположенными излучателями.

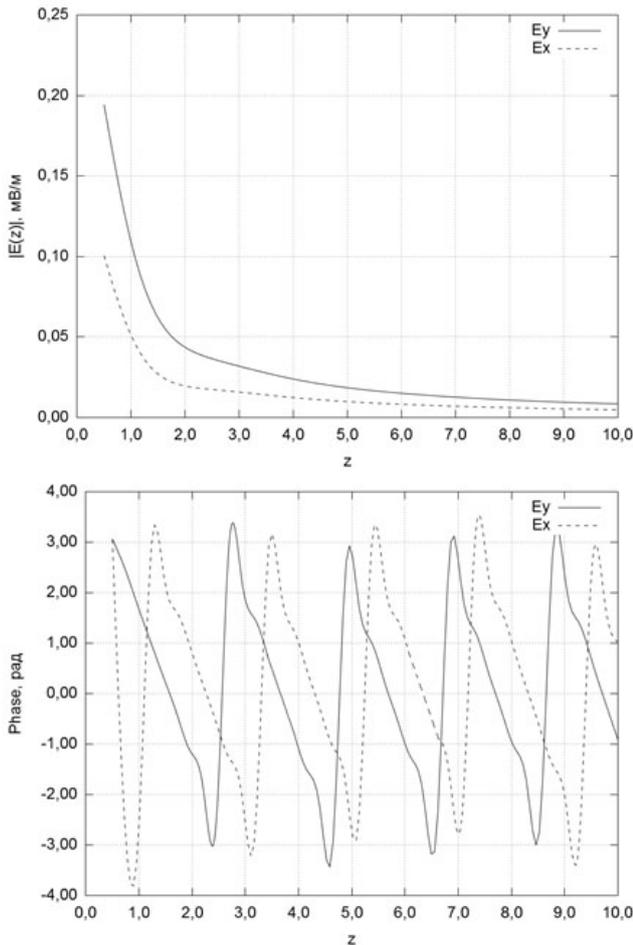


Рис. 5. Зависимость модулей составляющих напряженности электрического поля от координаты

Причем из четырех рассматриваемых вариантов конструкций (излучатели расположены на диэлектрике, киральной подложке, разделены кольцевым разомкнутым резонатором, накрыты киральным слоем), наиболее эффективным, является расположение излучателей на подложке из кирального метаматериала (рис. 4).

Особое место в антенной технике занимают микрополосковые антенны (МПА), обладающие рядом несомненных достоинств: малые габариты, относительная простота и дешевизна изготовления и т. д. Обычно, подложка у таких антенн изготавливается из высокочастотного диэлектрика, однако такой подход для дальнейшего улучшения массо-габаритных и электрических характеристик практически исчерпал себя. В связи с этим, предлагается в качестве подложки МПА использовать киральный метаматериал на основе спиралей, на которой расположен плоский излучатель. Применение такой подложки позволило сместить резонансы по частоте, а также существенно снизить добротность, т. е. сократить габариты. Было уставлено,

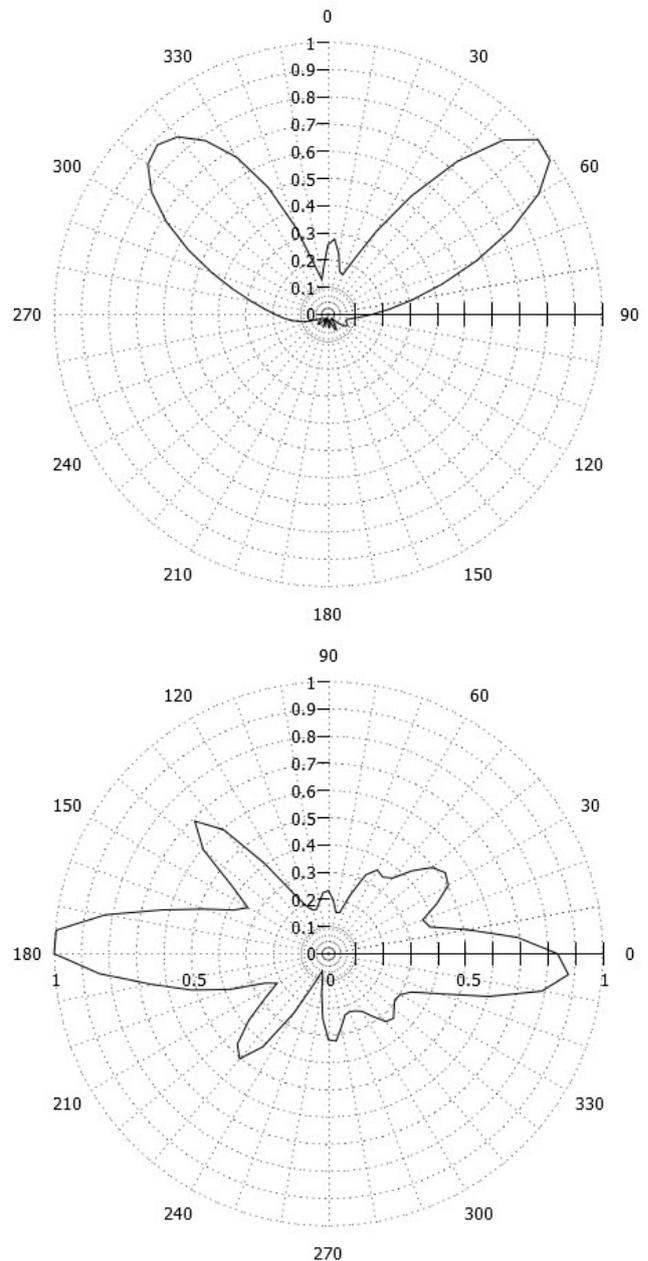


Рис. 6. ДН МПА с киральной подложкой

что подобные антенны могут излучать и принимать электромагнитные волны эллиптической поляризации (рис. 5), а также то, что они обладают ассиметричными диаграммами направленности (ДН) (рис. 6).

Перспективным направлением может оказаться применение метаматериалов в составе защищенных антенных систем КВ-диапазона. Было рассмотрено несколько вариантов структуры, в которых турникетный излучатель располагался над слоем из кирального метаматериала и под ним. Такая конструкция подземной антенны позволила улучшить согласование антенны в относительно большой полосе частот, а также увеличить коэффициент усиления. При этом, наи-

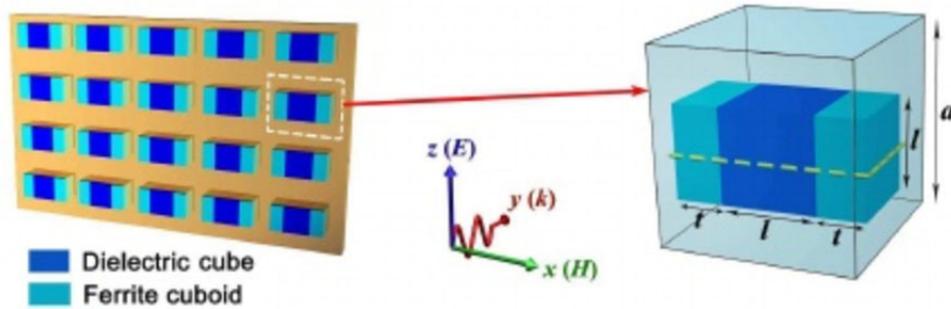


Рис. 7. «Управляемый метаматериал»

более эффективный вариант конструкции антенны – в случае, когда метаматериал расположен под излучателем.

С другой стороны, метаматериалы также не свободны и от недостатков. Критический взгляд по этому поводу был изложен в статье Митры Р. [14], где было показано, что наиболее важными факторами, ограничивающими возможности метаматериалов, являются высокие потери, узкая полоса частот, а также анизотропное поведение. Однако в настоящее время активно проводятся исследования так называемых «управляемых» метаматериалов (рис. 7) [15], представляющих собой слой из диэлектрического материала с внедренными элементами, материальные параметры (4) которого зависят от внешних электрических и магнитных полей (феррит, сегнетоэлектрик и т. п.). Использование данных «управляемых» метаматериалов в конструкции антенн позволит управлять ее характеристиками при помощи внешних электрических и магнитных полей. Это, по-видимому, поможет снять часть подобных ограничений.

$$\begin{aligned} \epsilon_{eff} &= \epsilon_1 \left(1 + \frac{3v}{\frac{F(\theta) + 2K_c}{F(\theta) - K_c} - v} \right); \\ \mu_{eff} &= \mu_1 \left(1 + \frac{3v}{\frac{F(\theta) + 2K_m}{F(\theta) - K_m} - v} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \frac{2(\sin(\theta) - \theta \cos(\theta))}{(\theta^2 - 1)\sin(\theta) + \theta \cos(\theta)}; \\ \theta &= k r_0 \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}; \quad k = 2\pi / \lambda; \quad K_c = \epsilon_1 / \epsilon_2; \\ K_m &= \mu_1 / \mu_2; \quad v = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{r_0}{\rho} \right)^3. \end{aligned}$$

В связи с достаточно большой сложностью конструктивного исполнения метаматериалов, возникает задача в разработке специальных ме-

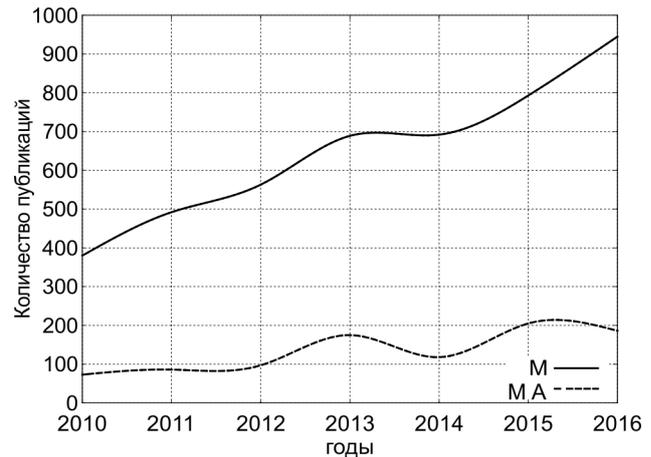


Рис. 8. Публикационная активность

тодов их электродинамического анализа и синтеза, обеспечивающих приемлемую точность вычислений. Для решения электродинамических задач анализа антенн с использованием в своей конструкции метаматериалов на сегодняшний день практически отсутствуют подобные методы. Их численный анализ проводится, как правило, с помощью зарубежных пакетов электромагнитного моделирования (FEKO, HFSS, CST MicrowaveStudio и т. д.). Однако в связи с «закрытостью» данных программных комплексов вопрос «доверия» к полученным результатам всегда остается открытым. Другой распространенный подход связан с применением методов интегральных уравнений Фредгольма первого рода, численное решение которых, как известно, относится к классу некорректно поставленных задач по Адамару, вследствие чего, возникают сложности с их численным решением ввиду отсутствия сходимости.

Перспективным для анализа антенн на основе метаматериалов представляется применение подхода, основанном на использовании метода сингулярного интегрального представления поля [16; 17]. Данный подход обладает достаточной сходимостью и не так требователен к вы-

числительным ресурсам, как зарубежные программные комплексы электродинамического моделирования. На примере тестовой задачи, было выявлено, что время вычисления в случае данного метода в 7 раз меньше, чем в случае с ФЕКО.

В заключении хочется отметить, что данный подход к дальнейшему совершенствованию антенн является перспективным, о чем дополнительно также свидетельствуют графики активности публикаций в журналах и материалах конференций IEEE (рис. 8) по направлениям «Metamaterials - M» и «Metamaterials & Antennas - M&A» за 2010–2016 г.

Список литературы

1. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. № 3–4. С. 44–60.
2. Электродинамика и электродинамика метаматериалов / А.Н. Лягарьков [и др.] // ТВТ. 2010. № 48:6. С. 1031–1048.
3. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3–28.
4. Авдюшин А.С., Власов М.Ю., Пастернак Ю.Г. Применение метаматериалов в антенной технике // Вестник ВГТУ. 2013. Т. 9. Вып. 3–1. С. 132–135.
5. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena / J.B. Pendry [et al.] // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1999. Vol. 47. № 11. P. 2075–2084.
6. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith [et al.] // Physical Review Letters. 2000. Vol. 84. № 18. P. 4184–4187.
7. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. Вып. 3. С. 517–526.
8. Sivuhin D.V. About the energy of electromagnetic field in dispersing media // Optica i Spektroskopiya. 1957. Vol. 3. № 4. P. 308–312. (in Russian)
9. Неганов В.А., Осипов О.В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
10. Манахова М.С., Шорохова Е.А. Исследование возможности улучшения характеристик излучающих систем за счет использования метаматериала // Материалы XXIV всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ-24) Иркутск, 29 июня – 05 июля 2014 г. С. 142–145.
11. Kim K., Varadan V.V. Millimeter wave dualband microstrip antennas with metamaterial substrates using the LTCC process // Proceedings of Metamaterials. 2007. Rome. P. 22–24.
12. Ziolkowski R.W., Erentok A. Metamaterial-based efficient electrically small antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54. № 7. P. 2113–2130.
13. Design of MIMO antennas with strong isolation for portable applications / Chih-Chun Hsu [et al.] // Antennas and Propagation Society International Symposium, APSURSI '09, 1–5 June 2009.
14. Митра Р. Критический взгляд на метаматериалы // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 9. С. 1051–1058.
15. Magnetically tunable Mie resonance-based dielectric metamaterials / K. Bi [et al.] // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. P. 7001.
16. Анализ микрополосковой антенны на киральной подложке с учетом пространственной дисперсии / Д.С. Ключев [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 67–72.
17. Нещерет А.М. Применение сингулярных интегральных уравнений для анализа микрополосковых антенн, расположенных на киральной структуре из левовинтовых спиралей // Радиотехника. 2016. № 4. С. 118–126.

Prospects of using metamaterials in the new generation antennas

A.L. Buzov, D.S. Klyuev, A.M. Neshcheret, V.A. Neganov

The article gives an overview of existing studies on the possibilities of using metamaterials in antenna technology, as well as a number of new studies by the authors. The prospects of using metamaterials in the design of antenna systems for improving their electrical and mass-dimensional characteristics are substantiated.

Keywords: metamaterial, chiral media, antennas, improvement of antenna characteristics.