

© Кочугов А.А., Росляков Н.М., Тенякова Н.А.
Kochugov A., Roslyakov N., Tenyakova N.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН КВ–УКВ-ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В ИХ КОНСТРУКЦИИ

PROBLEM QUESTIONS OF INCREASE OF EFFICIENCY OF ELECTRICALLY SMALL ANTENNAS HF VHF BANDS ON THE BASIS OF APPLICATION OF METAMATERIALS IN THEIR DESIGN

Аннотация. На основе анализа проблемы создания электрически малых антенн (ЭМА) КВ–УКВ-диапазонов показана актуальность разработки и синтеза метаматериалов для импедансных оболочек малогабаритных излучателей электрического и магнитного типов.

Приведены возможные варианты элементов структур метаматериалов для импедансных оболочек электрически малых излучателей при различных сочетаниях знаков их диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Материалы статьи разработаны при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Контракт № 07.524.11.4015 от 15.05.2012 г.)

Annotation. Analysing the problem of creating electrically small antennas (ESA) of SW - USW bands, the actuality of development and synthesis of the metamaterials for impedance envelope for small-sized radiators of electric and magnetic types is shown.

The variants of metamaterial structure elements for impedance envelopes of electrically small radiators are given at different combinations of theirs permittivity and permeability signs.

Article Submissions are developed with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Contract № 07.524.11.4015 15.05.2012).

Ключевые слова. Антенна электрически малая, оболочка импедансная, метаматериал, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, сопротивление излучения, экстремальное значение.

Key words. Electrically small antenna, impedance envelope, metamaterial, permittivity, permeability, radiation resistance, extreme meanings.

Анализ проблемы создания ЭМА показывает, что интенсивные поиски и разработки ЭМА ведутся практически во всем диапазоне радио- и оптических волн. По данным [1], в последнее время отмечается резкое повышение интереса к применению метаматериалов в антенной тематике.

Под метаматериалами принято понимать искусственно созданные среды, способные при взаимодействии с электромагнитным полем определенной частоты проявлять свойства, характеризующиеся отрицатель-

ными значениями диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей.

Если в миллиметровом диапазоне длин волн для создания искусственных диэлектриков и магнетиков разрабатываются стержневые композиты, а в оптическом – градиентные метаматериалы в виде диэлектрических слоев с показателями преломления, изменяющимися по заранее заданному закону [2, 3], то в области низких частот радиодиапазона публикаций о заметных результатах в этой области нет.

Кочугов Александр Александрович – доктор технических наук, заместитель генерального директора, ОАО «ВИКОР», тел. 8-495-543-36-77;

Росляков Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, 4НИИ МО РФ;

Тенякова Надежда Архитовна – кандидат физико-математических наук, доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики.

Kochugov Alexander – doctor of technical science, deputy director general, JSC "Vikor", tel. 8-495-543-36-77;

Roslyakov Nikolay – doctor of technical science, professor, principal scientific collaborator, 4 Research Institute of the Ministry of defense of Russian Federation;

Tenyakova Nadedzda – candidate of physical and mathematical sciences, senior lecturer, Povoldzsky state university of telecommunications and computer science.

Известные применения низкотемпературной плазмы для создания импедансных оболочек с отрицательными значениями диэлектрической проницаемости за счет выбора отношения значений частоты сигнала ω_c и плазмы ω_p , меньшего единицы, при которых обеспечивается ряд положительных эффектов в ЭМА [4-8], как и попытки разработки искусственной твердотельной плазмы для импедансных покрытий излучателей в диапазонах СВЧ и УКВ [9, 10], до настоящего времени не привели к технологическому прорыву в изготовлении миниатюрных антенн КВ – УКВ-диапазонов.

Поэтому, несмотря на актуальность, проблема синтеза метаматериалов в диапазоне радиочастот, прежде всего его низкочастотной области, находится на начальной стадии поисковых исследований и экспериментальной подборки их структур и требует глубокого и серьезного научного обоснования. Задача должна решаться в органическом единстве электродинамических процессов излучения, согласования, диссипации и преодоления физических ограничений на частотно-энергетические параметры.

При этом эффективность ЭМА в импедансных оболочках должна определяться на основе решения электродинамических задач по возбуждению и определению их характеристик излучения для различных моделей излучателей.

Важно подчеркнуть невозможность использования принципа масштабирования, т.е. использования методов и результатов исследования антенн оптического диапазона для антенн низкочастотного радиодиапазона, поскольку металл в оптическом диапазоне не является идеальным проводником, а имеет свойства плазмы твердого тела, обусловленной наличием газа свободных электронов [3].

В решении задач синтеза материалов для оболочек ЭМА одним из определяющих параметров, комплексно характеризующих эффективность излучения элементарных излучателей, является сопротивление излучения, которое для случая симметричного вибратора в свободном пространстве существенно уменьшается, если длина плеча вибратора меньше полуволны. Аналогичное явление имеет место и для рамки электрически малого размера.

В ряде работ [4–8] показано, что излучающие свойства электрически коротких антенн можно улучшить, помещая их внутрь магнитоэлектрической оболочки с определенными значениями диэлектрической $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 - j\varepsilon''_1$ и магнитной $\mu_1 = \mu'_1 - j\mu''_1$ проницаемостей.

Так, влияние шаровой оболочки с $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1$ и $\mu_1 = \mu'_1$ ($\varepsilon'_1 > 0$, $\mu'_1 > 0$), окружающей электрический диполь, было подробно исследовано в работе Вольперта [4]. В работах

[5-8] проанализированы характеристики излучения электрически коротких антенн различного типа при отрицательных значениях ε'_1 и μ'_1 . Отмечено увеличение сопротивления излучения на несколько порядков по сравнению с антеннами в свободном пространстве.

Следует отметить, что оболочка в виде низкотемпературной плазмы, покрывающая ЭМА электрического типа, является весьма эффективной моделью среды, в частности, с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

Однако, как установлено в результате экспериментальных исследований [11,12], эксплуатационные характеристики макетов таких антенн показали недостаточную надежность и стабильность характеристик излучения в диапазонах КВ и УКВ из-за взаимодействия частиц плазмы с материалами конструкций макетов. Поэтому для преодоления этого недостатка необходимы поиск и синтез искусственных диэлектриков с параметрами, близкими к установленным в плазменных оболочках.

Целесообразно проведение исследований характеристик излучения ЭМА рамочного типа при использовании оболочек с отрицательными значениями магнитной проницаемости.

Ряд вопросов, касающихся пределов изменения значения ε'_1 и μ'_1 , возможности их обеспечения на основе некой структуры импедансной оболочки, соотношения размеров оболочки и излучателя в диапазонах КВ и УКВ, остается неизученным и в то же время актуальным.

Расчет характеристик излучения антенн конечного размера в магнитоэлектрической оболочке связан с большими математическими трудностями.

Поэтому представляет интерес на основе простой модели элементарных излучателей в шаровой оболочке выяснить область значений $\varepsilon'_1 < 0$ и $\mu'_1 < 0$, приводящих к экстремальным значениям сопротивления излучения.

Согласно результатам работы [4], отношение сопротивлений излучения электрического диполя в оболочке R_σ и в свободном пространстве $R_{\sigma 0}$ в дальней зоне выражается формулой

$$\frac{R_\sigma}{R_{\sigma 0}} = \frac{|\mu_1|^2}{B}, \quad (1)$$

где

$$B = \left| k_1 a \left\{ j_1(k_1 a) \left[k_2 a h_1^{(2)}(k_2 a) \right]' - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} h_1^{(2)}(k_2 a) \left[k_1 a j_1(k_1 a) \right]' \right\} \right|^2,$$

где $k_1, k_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \mu_1, \mu_2$ – постоянные распространения, относительные диэлектрические проницаемости, относительные магнитные проницаемости в оболочке и свободном пространстве соответственно;

a – радиус шаровой оболочки;
 $j_1(z)$ и $h_1^{(2)}(z)$ – сферические функция Бесселя первого и третьего рода соответственно;

знаком штрих отмечены производные по аргументам функций от выражений, стоящих в квадратных скобках.

Существенный прикладной интерес представляют предельные случаи малых и больших радиусов шаровой оболочки a .

Если ограничиться первыми членами в разложениях сферических функций Бесселя при малых значениях аргумента z [11]

$$j_1(z) \approx \frac{z}{3}, [z j_1(z)]' \approx \frac{2z}{3};$$

$$h_1^{(2)}(z) \approx \frac{z}{3} + j \frac{1}{z^2}; [z h_1^{(2)}(z)]' \approx \frac{2z}{3} - j \frac{1}{z^2},$$

то формула (1) примет вид

$$\frac{R_\sigma}{R_{\sigma 0}} = \left| \frac{9}{j(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} + 2) + 2(k_0 a)^3 (\epsilon_2 \mu_2)^{3/2} (1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2})} \right|^2, \quad (2)$$

где k_0 – постоянная распространения электромагнитных волн в вакууме.

Из выражения (2) следует, что при отсутствии поглощения электромагнитных волн сопротивление излучения вибратора особенно возрастает при $\epsilon_1' = -2\epsilon_2'$. Этот результат был отмечен ранее в работе Пистолькорса и Зиминной [5]. Магнитная проницаемость шаровой оболочки μ_1' в данном приближении не оказывает существенного влияния на сопротивление излучения.

Численные расчеты, результаты которых приведены далее, как для положительных, так и отрицательных значениях ϵ_1' и μ_1' при отсутствии поглощения электромагнитных волн позволяют сделать следующие выводы.

При малых «электрических размерах» оболочки $k_0 a$, $\epsilon_1' = -2$ и положительных значениях μ_1' сопротивление излучения диполя увеличивается на несколько порядков (рис.1). Рост магнитной проницаемости материала оболочки сдвигает область экстремальных значений $R_\sigma/R_{\sigma 0}$ в сторону меньших величин $k_0 a$, не изменяя кардинально характер зависимости.

Переход к отрицательным значениям μ_1' не изменяет общую тенденцию увеличения сопротивления излучения ЭМА при $\epsilon_1' = -2$ и малых $k_0 a$ (рис. 2). Можно утверждать, что рост сопротивления излучения в диапазоне очень малых $k_0 a$ обусловлен именно отрицательным значением диэлектрической проницаемости вещества оболочки. При положительных значениях ϵ_1' и том же наборе величин μ_1' нет существенного возрастания отношения $R_\sigma/R_{\sigma 0}$ (рис. 3 и рис. 4). Дальнейший рост $k_0 a$

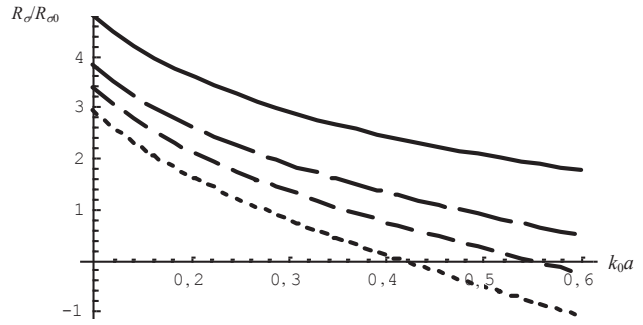


Рис. 1. Зависимости отношения $R_\sigma/R_{\sigma 0}$ сопротивлений излучения диполя в оболочке и свободном пространстве в дальней зоне в области малых значений $k_0 a$ при $\epsilon_1' = -2$ (сплошная линия – $\mu_1' = 2$; длинный пунктир – $\mu_1' = 4$; средний пунктир – $\mu_1' = 10$; мелкий пунктир – $\mu_1' = 20$, логарифмический масштаб по оси ординат)

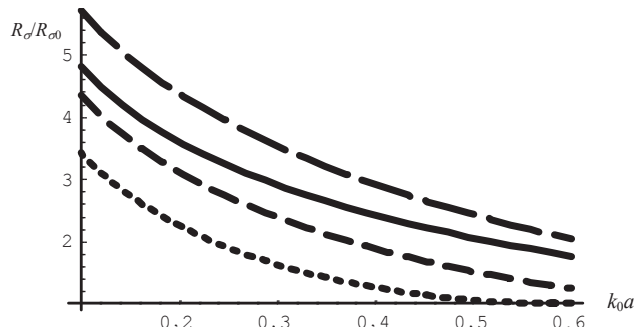


Рис. 2. Зависимости отношения $R_\sigma/R_{\sigma 0}$ в области малых значений $k_0 a$ при $\epsilon_1' = -2$ (сплошная линия – $\mu_1' = -2$; длинный пунктир – $\mu_1' = -4$; средний пунктир – $\mu_1' = -10$; мелкий пунктир – $\mu_1' = -20$).

при $\mu_1' > 0$ приводит к появлению череды экстремумов, отмеченных в работе [4] и возникающих при $k_1 a = n\pi$ и $k_1 a = (2n + 1)\pi/2$, где k_1 – постоянная распространения в шаровой оболочке; n – целое число. При этом характер экстремума (максимум или минимум) зависит от соотношения между диэлектрическими и магнитными проницаемостями.

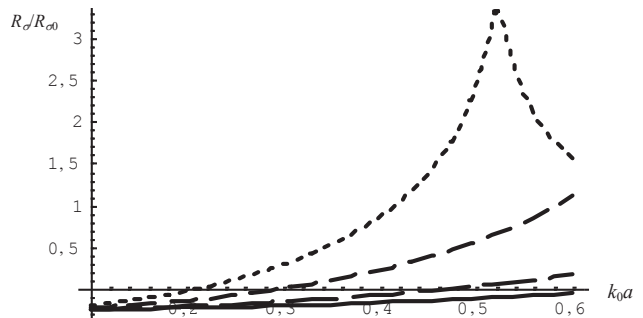


Рис. 3. Зависимости отношения $R_\sigma/R_{\sigma 0}$ в области малых значений $k_0 a$ при $\epsilon_1' = 2$ (сплошная линия – $\mu_1' = 2$; длинный пунктир – $\mu_1' = 4$; средний пунктир – $\mu_1' = 10$; мелкий пунктир – $\mu_1' = 20$).

При исследовании другого предельного случая больших a воспользуемся представлениями сферических функции Бесселя для больших значений аргумента z [11]:

$$j_1(z) \approx -\frac{\cos z}{z}, [z j_1(z)]' \approx \sin z;$$

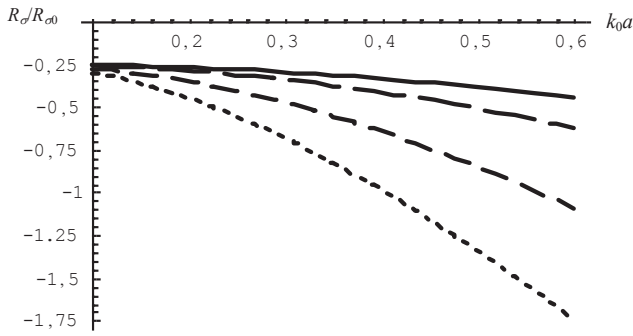


Рис. 4. Зависимости отношения $R_{\sigma}/R_{\sigma 0}$ в области малых значений $k_0 a$ при $\varepsilon'_1 = 2$ (сплошная линия – $\mu'_1 = -2$; длинный пунктир – $\mu'_1 = -4$; средний пунктир – $\mu'_1 = -10$; мелкий пунктир – $\mu'_1 = -20$)

$$h_1^{(2)}(z) \approx -\frac{1}{z} e^{-jz}, [z h_1^{(2)}(z)]' \approx j e^{-jz}.$$

Формула (1) при этом упрощается

$$\frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma 0}} = \left| \frac{e^{jk_0 a} \varepsilon_1 \mu_1}{-j \varepsilon_1 \mu_2 \cos(k_1 a) + \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1 \varepsilon_2 \mu_2} \sin(k_1 a)} \right|^2. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при $\varepsilon'_1 < 0$ и $\mu'_1 > 0$ или $\varepsilon'_1 > 0$ и $\mu'_1 < 0$ сопротивление излучения ЭМА, начиная со значений $k_0 a$ в несколько единиц, быстро убывает (рис. 5

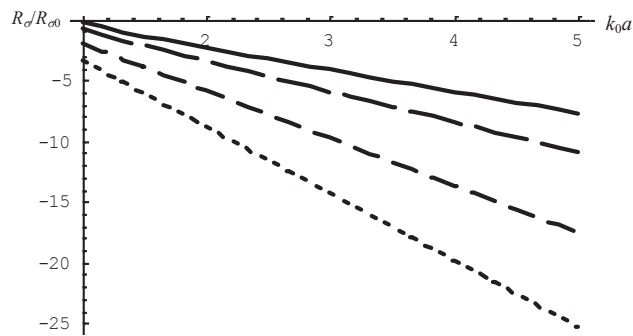


Рис. 5. Зависимости отношения $R_{\sigma}/R_{\sigma 0}$ в области малых значений $k_0 a$ при $\varepsilon'_1 = -2$ (сплошная линия – $\mu'_1 = 2$; длинный пунктир – $\mu'_1 = 4$; средний пунктир – $\mu'_1 = 10$; мелкий пунктир – $\mu'_1 = 20$)

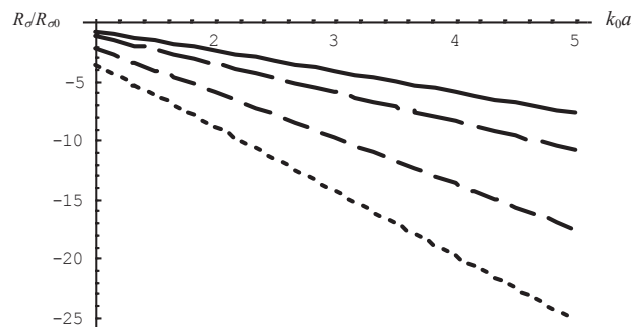


Рис. 6. Зависимости отношения $R_{\sigma}/R_{\sigma 0}$ в области больших значений $k_0 a$ при $\varepsilon'_1 = 2$ (сплошная линия – $\mu'_1 = -2$; длинный пунктир – $\mu'_1 = -4$; средний пунктир – $\mu'_1 = -10$; мелкий пунктир – $\mu'_1 = -20$)

и рис. 6).

Если же диэлектрическая и магнитная проницае-

мости шара имеют одинаковые знаки, мы получаем кривые, характерные для положительных значений ε'_1 и μ'_1 (рис. 7 и рис. 8), так как в формулу (4), полученную из (3) для этого случая

$$\frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma 0}} = \frac{(\varepsilon'_1 \mu'_1)^2}{C}, \quad (4)$$

где

$$C = (\varepsilon'_1 \mu_2 \cos(k_0 a \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1}))^2 + \varepsilon'_1 \mu'_1 \varepsilon_2 \mu_2 \sin^2(k_0 a \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1}),$$

входят только произведения этих величин, либо их ква-

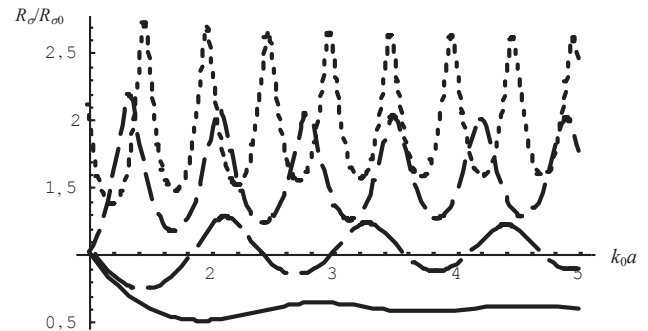


Рис. 7. Зависимости отношения $R_{\sigma}/R_{\sigma 0}$ в области больших значений $k_0 a$ при $\varepsilon'_1 = -2$ (сплошная линия – $\mu'_1 = -2$; длинный пунктир – $\mu'_1 = -4$; средний пунктир – $\mu'_1 = -10$; мелкий пунктир – $\mu'_1 = -20$).

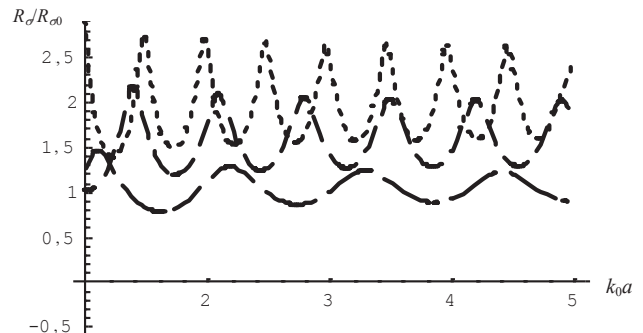


Рис. 8. Зависимости отношения $R_{\sigma}/R_{\sigma 0}$ в области больших значений $k_0 a$ при $\varepsilon'_1 = 2$ (сплошная линия – $\mu'_1 = 2$; длинный пунктир – $\mu'_1 = 4$; средний пунктир – $\mu'_1 = 10$; мелкий пунктир – $\mu'_1 = 20$).

драты.

Как было показано, увеличение сопротивления излучения диполя, покрытого шаровой магнитоэлектрической оболочкой, в области малых $k_0 a$ наблюдается при $\varepsilon'_1 = -2\varepsilon'_2$. Представляет интерес исследовать поведение магнитного диполя (элементарной рамки с током) в магнитоэлектрическом шаре. Предварительные результаты могут быть получены сразу, исходя из принципа двойственности уравнений Максвелла путем замены $E \leftrightarrow H, \varepsilon \leftrightarrow \mu, I \leftrightarrow j\mu\omega l S$, где I – сила стороннего тока в диполе или рамке; l – длина диполя; S – площадь рамки;

ω – циклическая частота переменного электромагнитного поля. Тогда увеличение сопротивления излучения магнитного диполя будет наблюдаться при $\mu'_1 = -2\mu'_2$.

Таким образом, магнитодиэлектрическую среду, материал оболочки малогабаритного излучателя следует выбирать либо с отрицательным значением ϵ'_1 для линейного вибратора, либо с отрицательным значением μ'_1 для рамки с током. Соотношения размеров импедансного покрытия излучателя и его геометрической длины могут быть установлены с использованием приведенных выражений.

Синтез материалов, характеризующихся отрицательными значениями диэлектрической проницаемости для ЭМА КВ–УКВ-диапазонов, может быть осуществлен на основе металлических проводников; метаматериалов с отрицательными значениями магнитной проницаемости – на основе индуктивно-щелевых резонаторов в виде вложенных резонансных колец с размерами много меньше длины волны, на которой они возбуждаются; метаматериалы с отрицательными значениями и диэлектрической, и магнитной проницаемостей – на основе регулярных структур, включающих резонаторы и линейные проводники [12,13].

Эти положения получили определенное подтверждение в экспериментальных исследованиях полусферического металлического монополя с искусственным диэлектрическим покрытием, согласованным с фидером, имеющим $\rho=0,75$ Ом. Антенна в виде металлической полусферы диаметром $d < \lambda$ (коэффициент совершенства $v \approx 0,22$), соответствующая выбранной электродинамической модели, возбуждалась экваториальной щелью, заполненной фторопластом, над металлическим экраном. В качестве импедансного покрытия использовались цилиндрические нагрузки – стержни из кольцевых пластин с намотанной параллельно им спиралью, которые закреплялись на поверхности антенны с гальваническим контактом. Расстояния между стержнями на поверхности ЭМА a_c и диаметр катушки D_H соответствовали условию поло-

жительного значения мнимой части импеданса ($D_H < a_c$), а распределение стержней по поверхности сферы вдоль меридианов и параллелей поверхности полусферы отвечало условию $T_{0,op}/\lambda < 0,5$, когда все гармоники, за исключением нулевой, являются неизлучающими [14].

Эксперимент показал наличие резонансных свойств у такой ЭМА, зависимость ширины полосы пропускания и резонансной частоты от числа и мест подключения нагрузок. При радиусе полусферы $R/\lambda = 0,032 \dots 0,037$ и относительной полосе пропускания $\Delta f/f = 6,5 \dots 12,5$ % КПД антенны составил $\eta = 5$ %, а входное сопротивление $z_{вх} = 91 + 123j$ Ом. С учётом данных, полученных в эксперименте, коэффициент мощности излучения

$$K_{\Sigma 0}^{\ominus} = \eta \frac{\Delta f}{f} = (3,25 \dots 6,25) 10^{-3}$$

и значения коэффициента совершенства ЭМА [10]

$$v_{ма} = K_{\Sigma 0}^{\ominus} / K_{\Sigma 0} = 0,37 \dots 0,72.$$

Следует отметить, что такие значения коэффициента совершенства $v_{ма}$ ЭМА показывают то, что традиционные технические решения малогабаритных антенн по этому показателю весьма далеки от предельных его значений, а также то, что это направление совершенствования ЭМА позволяет существенно повысить его значение.

Поэтому применение импедансных покрытий с отрицательными значениями диэлектрической проницаемости для ЭМА электрического типа следует считать одним из эффективных путей реализации потенциальных возможностей ЭМА в повышении их энергетических параметров. При этом очевидно, что отсутствие каких-либо нелинейных элементов в твердотельном импедансном покрытии излучателя обеспечивает возможности применения такого типа ЭМА как в качестве приемных, так и в качестве передающих.

Материалы настоящей статьи позволят проводить более обоснованно разработку и проектирование электрически малых антенн, выбор и применение метаматериалов для импедансных покрытий излучателей электрического и магнитного типов в КВ–УКВ-диапазонах.

Литература

1. Слюсар В.И. *Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты.* – Первая мила. 3-4/2010, с. 45 – 60.
2. Шварцбург А.Б. УФН, 2007, 177, 43.
3. Руденко О.В., Шварцбург А.Б. *Акустический журнал*, 2010, 56, 149.
4. Вольерт А.Р. *О сопротивлении излучения вибратора, окруженного шаровой магнитодиэлектрической оболочкой.* – *Радиотехника*, 1948, т. 3, № 6, с. 29-48.
5. Пистолькорс А.А., Зимина В.И. *Об излучении вибратора, окруженного слоем изотропной плазмы.* – *Вопросы радиоэлектроники. Серия XII Общетеχνическая*, 1963, № 1, с. 3-12.
6. Акиндинов А.А., Еремин С.М., Киселев С.И., Мишин И.В., Евтихов М.Г. *Излучение сферической антенны, покрытой слоем изотропной плазмы.* – *Радиотехника и электроника*, 1978, т. 23, № 9, 1807-1814.
7. Беликов Ю.П., Лишин И.В., Киселев С.И., Росляков Н.М., Чиж А.А. – *Способ излучения электромагнитной энергии.* А.С. 197742, СССР. – 1984.

8. Росляков Н.М., Тенякова Н.А. Излучение вытянутой сфероидальной антенны с плазменным покрытием. – *Радиотехника и электроника*, 1992, вып. 4, с. 583-592.
9. Гераськин А.П., Пермяков Е.А., Ситнинский Б.Д. и др. Моделирование однородной плазмы с помощью искусственного стержневого диэлектрика. *Труды МЭИ*. – М.: МЭИ, 1972, с. 5-15.
10. Беликов Ю.П., Булыгин В.А., Росляков Н.М., Чиж А.А. О входном сопротивлении малогабаритной антенны в плазменной оболочке. 1980. Деп. В ЦИВТИ МО, №Р8277.
11. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979, 832 с.
12. Головков А.А., Кейс С.В. Добротность и собственные частоты разрезного кольцевого резонатора. – *Радиотехника*, 2012, №7. С.57-61.
13. Сарычев А.К., Шалаев В.М. Электродинамика метаматериалов. Пер. с англ. Аракчеева В.Г., Владимировой Ю.В., Научн. Ред. Задков В.Н. – М.: Научный мир, 2011 (Фундаментальные основы нанотехнологий: лучшие зарубежные учебники).
14. Воскресенский Д.И., Пономарев Л.И., Филиппов В.С. Вытянутые сканирующие антенны (основы теории и методы расчета).- М.: Сов. Радио, 1978, 304 с.

Материал поступил в редакцию 01. 07. 2013 г.