

Эффект обратного излучения электромагнитных волн волноводной структурой из метаматериала

Н. П. Балабуха²⁾, А. А. Башарин¹⁾²⁾, В. Н. Семенов²⁾

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 марта 2009 г.

После переработки 8 апреля 2009 г.

На примере волноводной структуры в виде трубки прямоугольного сечения, выполненной из метаматериала с отрицательными значениями действительных частей относительных диэлектрических и магнитных проницаемостей, продемонстрированы аномальные свойства излучения электромагнитных волн такой антенной. Метаматериал представляет собой изотропную двумерную решетку проволочных лево- и правозакрученных спиралей, расположенных на тонкой полиуретановой подложке. По одной трети от общего числа проволочных спиралей образца расположены вдоль осей x , y и z . На основе численных расчетов методом моментов и измерений диаграмм направленности антенны в безэховой камере, на частотах, близких к резонансной частоте метаматериала 3 ГГц, показана возможность излучения такой структуры преимущественно в заднем направлении. Выявлены причины и условия существования этого эффекта.

PACS: 41.20.Jb, 42.70.Nq

Предсказание существования веществ с отрицательными относительными диэлектрическими и магнитными проницаемостями [1] и возникновение первых опытных образцов метаматериалов [2, 3] породило открытие необычных явлений в таких средах [4].

В частности, авторы работы [5] показали, что использование метаматериалов вблизи источников электромагнитного излучения позволяет существенно повысить коэффициент усиления антенны за счет уменьшения реактивной энергии вокруг излучателя. В [6] продемонстрирована возможность создания сканирующей антенны, состоящей из метаматериала, расположенного на металлической подложке, излучающей в двух разных направлениях. При отрицательном значении коэффициента преломления метаматериала антенна излучает в секторе углов от -90° до 0° , при положительном – в секторе углов от 0° до $+90^\circ$. Авторы работы [7] исследуют вытекающие моды волноводной антенны из метаматериала со значением относительной диэлектрической проницаемости, близкой к нулю и имеющей диаграмму направленности с подавленным главным лепестком и острыми (шириной около 2°) боковыми лепестками. В [8] исследован источник, помещенный в слой метаматериала, имеющего коэффициент преломления, близкий к нулю. Лучи, формируемые источником, на границе метаматериал – воздух, преломляясь, формируют

плоскую волну и, следовательно, диаграмма направленности такого источника имеет форму с очень узким главным лепестком. Применение метаплоскости [9], установленной перед дипольной антенной, позволяет улучшить ее направленные свойства и уменьшить заднее излучение. В принятой в печать работе [10] авторы теоретически исследуют излучение антенны на основе планарного волновода из метаматериала. Показано, что такая антенна, в случае существования прямой волны в волноводе, излучает в прямом направлении, в случае обратной волны – в заднем и в случае существования стоячей волны – одинаково в прямом и обратном направлениях. Таким образом, очевиден интерес к вопросам излучения структур с метаматериалами.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение эффекта обратного излучения электромагнитных волн на примере антенны в виде прямоугольной трубки из метаматериала толщиной d с отрицательными значениями действительных частей относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Сущность эффекта заключается в излучении антенной структуры преимущественно в обратном направлении. На основе численного моделирования (метод моментов) и измерений диаграмм направленности в дальней зоне в безэховой камере показано, что такое излучение возможно только, при отрицательных значениях действительных частей относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала. Однако при

¹⁾ e-mail: basharin@list.ru

²⁾ N.P. Balabukha, A.A. Basharin, V.N. Semenko.

положительных значениях такая антенна ведет себя как обычная диэлектрическая антенна и излучает в главном направлении.

Геометрия антенны на основе волновода в виде трубки из метаматериала представлена на рис.1. Антенна возбуждалась стандартным коаксиально-

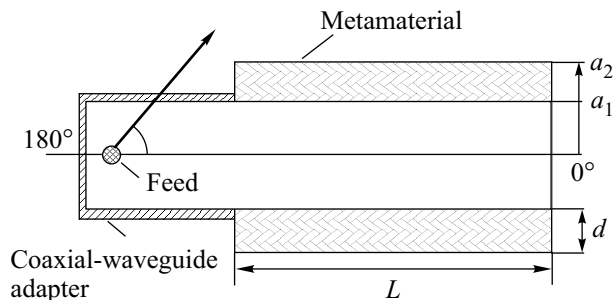


Рис.1. Схема антенны на основе волновода в виде трубки из метаматериала

волноводным переходом 10-см диапазона длин волн с поперечным размером волновода 50×25 мм. Длина трубки $L = 150$ мм. Средний слой выполнен из пенополистирола (пенопласт), относительная диэлектрическая проницаемость которого близка к 1. На фотографии (рис.2) показана исследуемая антенна.



Рис.2. Фото исследуемой антенны

Авторы работы [11] описывают свойства анизотропного метаматериала. Отличительными свойствами используемого в данной работе метаматериала являлись его изотропные в пространстве резонансные электрические и магнитные свойства в одном и том же частотном диапазоне. Метаматериал представлял собой изотропную двумерную решетку проволочных нихромовых спиралей, расположенных на

тонкой полиуретановой подложке толщиной 0.2 мм. Для исключения возникновения киральных свойств метаматериала использовалось одинаковое количество лево- и правозакрученных спиралей. Спирали имели по 3 витка нихромового провода диаметром 0.4 мм с шагом витка 1 мм. Внешний диаметр спирали равнялся 5 мм.

Спираль с ненулевым шагом является одновременно электрическим и магнитным диполем, эффективно возбуждаемым как электрическим, так и магнитным полем при условии поляризации поля вдоль оси спирали. При падении волны на слой метаматериала электрическое поле возбуждает электрический дипольный момент в спиральях, оси которых параллельны вектору \mathbf{E} , а магнитное поле – магнитный момент в спиральях, параллельных вектору \mathbf{H} . На частотах, несколько больших резонансной частоты спирали, фазовый сдвиг между полем падающей волны и полем, наведенным токами в элементах метаматериала, становится отрицательным и, как следствие, приводит к отрицательным значениям действительных частей диэлектрической и магнитной проницаемостей [12].

В экспериментах использовался листовой метаматериал толщиной 5.2 мм (рис.3 – по 1/3 от общего ко-

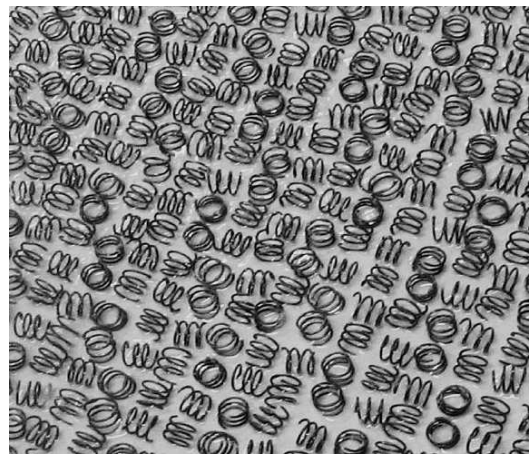


Рис.3. Внешний вид плоского образца метаматериала

личества проволочных спиралей расположены вдоль осей x , y и z , соответственно). Параметры образца подобраны таким образом, чтобы обеспечить резонанс диэлектрической и магнитной проницаемостей на частоте, близкой к 3 ГГц. Экспериментальная частотная зависимость эффективных материальных параметров образца, пересчитанная по формулам Френеля из измеренных значений S -параметров (комплексных коэффициентов отражения и прохождения) плоского образца метаматериала, представле-

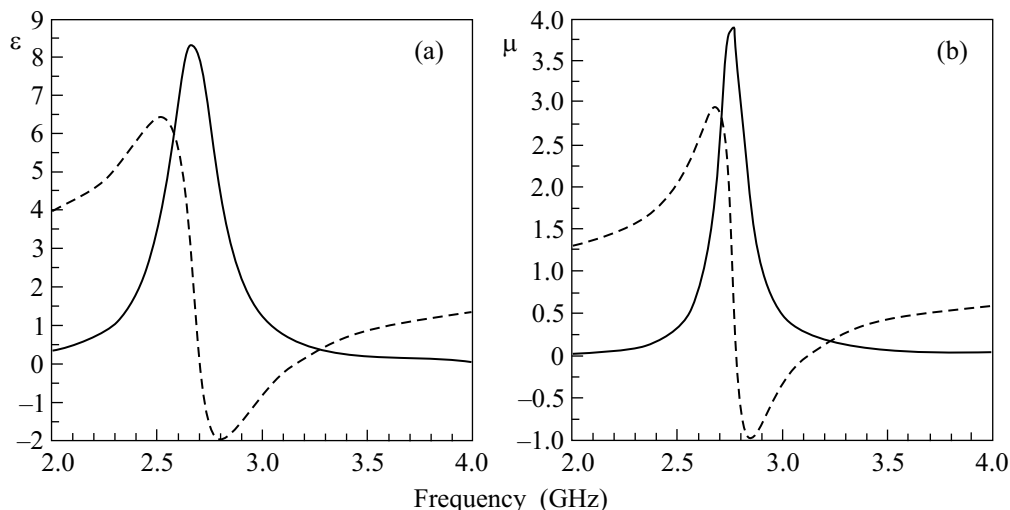


Рис.4. Частотная зависимость эффективных значений комплексных проницаемостей метаматериала

на на рис.4 (пунктир – действительная часть, сплошная кривая – мнимая часть). Как показывает опыт исследования листовых материалов [2, 11, 13], результаты измерений для двух слоев и более от приведенных на рис.4 принципиально не отличаются и здесь не приводятся. Окрестность частоты 3 ГГц является областью отрицательных значений относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала. Измерения образца производились по ранее разработанной и аттестованной методике измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей листовых материалов в ближней зоне рупорных антенн [14], основанной на измерении S -параметров. Методика реализована с использованием четырехпортового векторного анализатора электрических цепей фирмы Rohde&Schwarz ZVA 24. Тестовые измерения на эталонных образцах показали, что ошибки измерения значений относительных диэлектрических и магнитных проницаемостей не превышают 5%.

Рассмотрим поля, распространяющиеся в волноводной части антенны. Приближенно можно считать, что расчет характеристик прямоугольного волновода из метаматериала можно свести к расчету характеристик планарного [15]. Поля в волноводной части антенны (в трубке из метаматериала) представим с помощью продольных составляющих электрического вектора Герца (см. таблицу),

где

$$k_1 = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_0 \mu_0 - h^2}, \quad (7)$$

$$k_2 = \sqrt{k_0^2 \varepsilon \mu - h^2}, \quad (8)$$

$$k_3 = \sqrt{h^2 - k_0^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (9)$$

h – продольное волновое число, k_0 – волновое число в вакууме, ε_0 , μ_0 – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, ε , μ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости метаматериала; A, B, C, D – коэффициенты.

Волны TE -типа записываются аналогично. Здесь и далее временной множитель $e^{i\omega t}$ опущен. Составляющие поля выражаются через векторы Герца следующим образом:

$$E_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Pi_z^e}{\partial z} \right), \quad E_z = k_0^2 \varepsilon \mu \Pi_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Pi_z^e}{\partial z} \right),$$

$$H_y = ik_0 \varepsilon \frac{\partial \Pi_z^e}{\partial z}, \quad (10)$$

Граничные условия непрерывности тангенциальных компонент E_z и H_y на границах раздела $x = a_1$ и $x = a_2$ позволяют получить характеристические уравнения для TM -волн. Также необходимо использовать условие непрерывности продольного волнового числа h . Характеристическое уравнение позволяет найти продольное волновое число h и типы волн, распространяющихся в волноводе из метаматериала.

Плотность потока энергии характеризуется продольной составляющей вектора Пойтинга. Из (1)–(10) получим для четных TM -волн:

$$S_{z1} = A^2 \cos^2(k_1 x) h k_1^2 k_0 \varepsilon_0, \quad |x| < a_1, \quad (11)$$

$$S_{z2} = h k_2^2 k_0 \varepsilon_1 (B \cos(k_2 x) - C \sin(k_2 x))^2, \quad a_1 < |x| < a_2, \quad (12)$$

$$S_{z3} = D^2 e^{-2k_3 x} h k_3^2 k_0 \varepsilon_0, \quad |x| > a_2. \quad (13)$$

Для нахождения потока мощности в каждом слое проинтегрируем (11), (12), (13) по поперечному сече-

Для четных ТМ волн	Для нечетных ТМ волн
$\Pi_z^e = A_1 \sin(k_1 x) e^{ihz}$, для $ x < a_1$ (1);	$\Pi_z^e = A_1 \cos(k_1 x) e^{ihz}$, для $ x < a_1$ (4);
$\Pi_z^e = (B \sin(k_2 x) + C \cos(k_2 x)) e^{ihz}$ для $a_1 < x < a_2$ (2);	$\Pi_z^e = (B \sin(k_2 x) + C \cos(k_2 x)) e^{ihz}$ для $a_1 < x < a_2$ (5);
$\Pi_z^e = D e^{-k_3 x } e^{ihz}$ для $ x > a_2$ (3);	$\Pi_z^e = D e^{-k_3 x } e^{ihz}$ для $ x > a_2$ (6);

нию волновода. Нормированный график зависимости полного потока мощности S_Σ от толщины трубки d для частоты 3 ГГц (область отрицательных значений относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала) показан на рис.5. Как

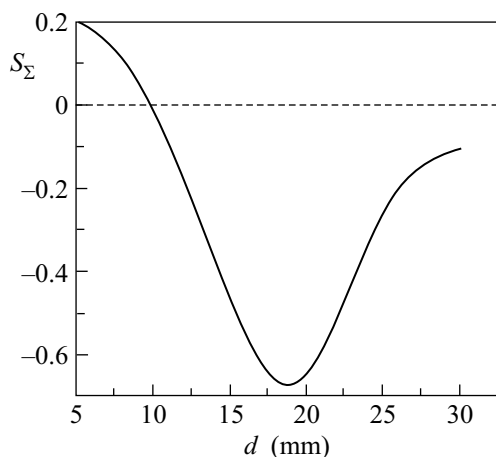


Рис.5. Зависимость полного потока мощности S_Σ от толщины трубки d

видно, полный поток мощности S_Σ может быть положительным ($d < 10$ мм), отрицательным ($d > 10$ мм) и равным нулю ($d \approx 10$ мм).

На основе численных расчетов методом моментов [16] (пунктирные кривые) и измерений диаграмм направленности в безэховой камере (сплошные кривые) антенны на основе волновода, в виде прямоугольной трубки из метаматериала, возбуждаемой коаксиально-волноводным переходом, на частотах близких к резонансной частоте метаматериала 3 ГГц, продемонстрированы диаграммы направленности при излучении такой антенны (зависимость амплитуды напряженности поля от угловой координаты θ , обозначенной на рис.1). На рис.6–11 представлены нормированные диаграммы направленности на максимальное значение в дБ. Расхождения между измеренными и расчетными диаграммами направленности могут достигать 5 дБ. Проследим эволюцию диаграмм направленности антенны на основе такого волновода в зависимости от толщины трубки d .

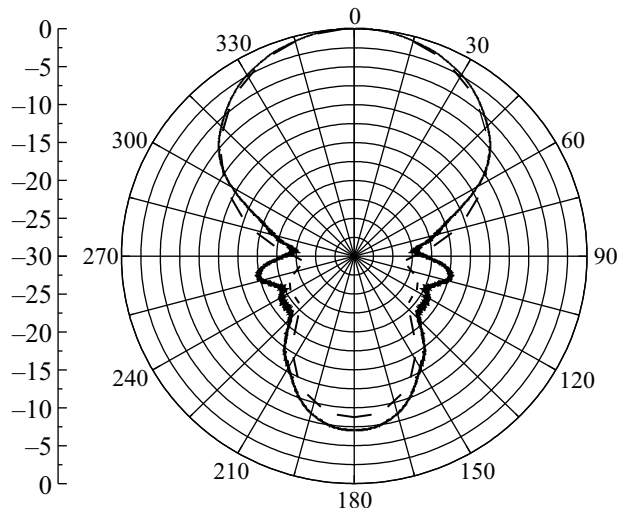


Рис.6. Диаграмма направленности волноводной антенны в виде трубки из метаматериала толщиной $d = 5$ мм на частоте 3 ГГц

При толщине трубки d до 10 мм полный поток мощности положителен (рис.6). В волноводе распространяется, согласно [17], прямая волна в направлении 0° . На рис.6 показана диаграмма направленности антенны на основе трубки из метаматериала толщиной $d = 5$ мм на частоте 3 ГГц.

Значение $d = 10$ мм соответствует нулевому значению полного потока мощности S_Σ . В волноводе образуется стоячая волна, которая является результатом интерференции прямой и обратной волн в волноводе, имеющих продольные волновые числа h , равные по модулю и различные по знаку. Это соответствует диаграмме направленности антенны на основе такого волновода, при которой главный лепесток приближенно равен заднему (рис.7).

Толщина трубки волновода из метаматериала $d > 10$ мм соответствует отрицательному полному потоку мощности S_Σ , то есть в отрицательном направлении (180°) распространяется обратная волна. Это соответствует росту амплитуды заднего лепестка и “вырождению” главного лепестка. Рис.8, 9, 10 построены для значений $d = 15; 20; 30$ мм, соответственно. При толщине 30 мм (рис.10) разница между задним и главным лепестками диаграммы направлен-

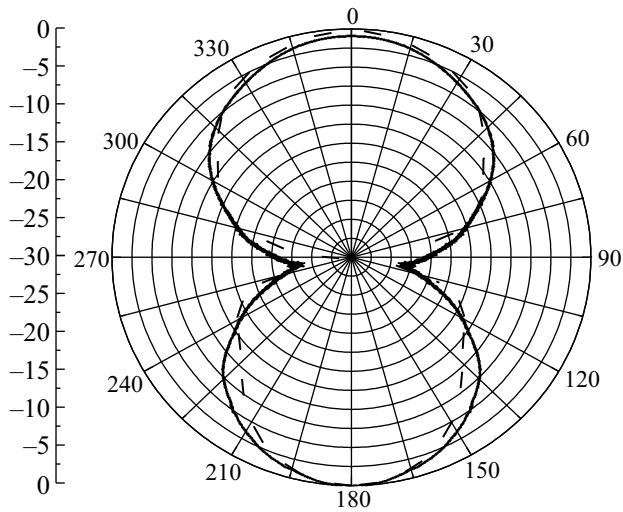


Рис.7. Диаграмма направленности волноводной антенны в виде трубки из метаматериала толщиной $d = 10$ мм на частоте 3 ГГц

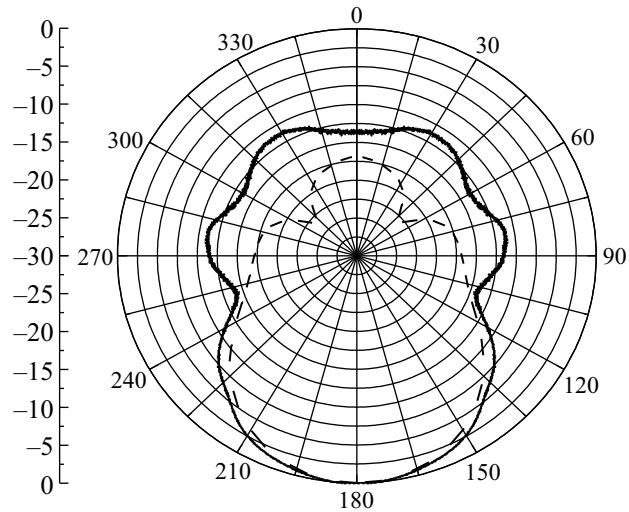


Рис.9. Диаграмма направленности волноводной антенны в виде трубки из метаматериала толщиной $d = 20$ мм на частоте 3 ГГц

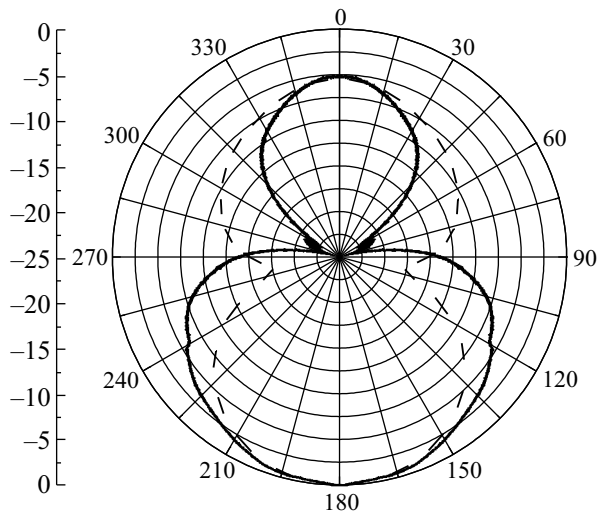


Рис.8. Диаграмма направленности волноводной антенны в виде трубки из метаматериала толщиной $d = 15$ мм на частоте 3 ГГц

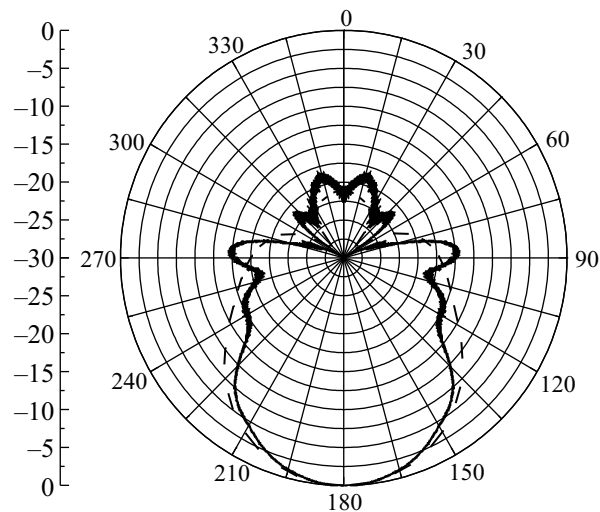


Рис.10. Диаграмма направленности волноводной антенны в виде трубки из метаматериала толщиной $d = 30$ мм на частоте 3 ГГц

ности составляет более 20 дБ, и антенна излучает в основном в заднем направлении 180° .

Таким образом, в случае нулевого полного потока мощности в волноводе из метаматериала наблюдается излучение антенны с одинаковой интенсивностью в направлениях 0 и 180° . В случае существования поля обратной волны имеет место эффект обратного излучения, то есть излучение антенны в направлении 180° , и в случае прямой волны – излучение в направлении 0° .

Данный эффект наблюдается только при отрицательных значениях действительных частей относительных диэлектрической и магнитной проницаемос-

тей. На рис.11 приведена диаграмма направленности волновода с трубкой из метаматериала толщиной $d = 20$ мм на частоте 3.5 ГГц, для которой относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, согласно рис.4, больше нуля. В этом случае диаграмма направленности имеет обычный вид, при котором главный лепесток превышает задний, то есть антенна излучает в основном в прямом направлении 0° .

Таким образом, экспериментально продемонстрирован эффект обратного излучения электромагнитных волн антенной на основе волновода в виде трубки из метаматериала. Показано, что данный эффект

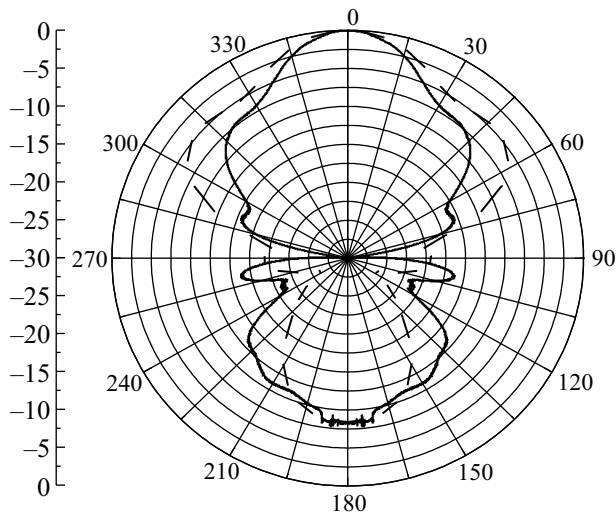


Рис.11. Диаграмма направленности волноводной антенны в виде трубки из метаматериала толщиной $d = 20$ мм на частоте 3.5 ГГц

наблюдается при условии существования поля обратной волны и при наличии отрицательных значений относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала. В то время как в случае положительных материальных параметров такой эффект не наблюдается.

Авторы работы выражают благодарность за внимание к работе А.Н. Лагарькову, В.Н. Киселю, а также уважаемому рецензенту за конструктивную критику и замечания.

1. В. Г. Веселаго, УФН **92**, 517 (1967).
2. A. N. Lagarkov, V. N. Semenenko, V. A. Chistyayev et al., *Electromagnetics* **17**, 213 (1997).

3. J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966 (2000).
4. A. N. Lagarkov and V. N. Kissel, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 077401 (2004).
5. N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *IEEE Trans.* **292**, 1535 (2005).
6. C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*, A John Wiley & Sons, Inc, 2006.
7. A. Alu, F. Bilotti, N. Engheta, and L. Vegni, *Antennas and Propagation, IEEE* **55**, 1698 (2007).
8. S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux et al., *Phys. Rev. Lett.* **89**, 213902 (2002).
9. E. Saenz, I. Ederra, P. Ikonen et al., *J. Optics A-Pure and Applied Optics* **9**, S308 (2007).
10. Н. П. Балабуха, А. А. Башарин, В. Н. Семененко, *Радиотехника и электроника* №7 (2009), принято в печать.
11. A. N. Lagarkov, V. N. Semenenko, V. N. Kissel, and V. A. Chistyayev, *J. of Magnetism and Magnetic Materials* **258-259**, 161 (2003).
12. Ю. В. Гуляев, А. Н. Лагарьков, С. А. Никитов, *Вестник РАН* **78**, №5 (2008).
13. *Электрофизические свойства перколяционных систем*, Под редакцией А. Н. Лагарькова, М.: ИВТАН, 1990.
14. В. Н. Семененко, В. А. Чистяев, А. В. Калашников, *Методика измерения СВЧ проницаемости листовых материалов в свободном пространстве на основе векторного анализатора цепей*, Девятая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, 2008.
15. В. Ф. Взятыхев, *Диэлектрические волноводы*, М.: Сов. радио, 1970.
16. C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Wiley & Sons, 1997.
17. В. В. Шевченко, *Радиотехника и электроника* **50**, 1363 (2005).