

**А.В. Щелокова¹, П.В. Капитанова¹, А.Н. Поддубный^{1,2},
П.А. Белов^{1,3}, Ю.С. Кившар^{1,4}**

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

² Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе

³ Queen Mary University of London

⁴ Australian National University

Реализация гиперболических сред с помощью искусственных длинных линий

В работе представлена реализация искусственной среды с гиперболическим изочастотным контуром, которая выполнена с использованием искусственных двумерных длинных линий. Своеобразный характер распространения волн в таких средах визуализируется крестообразным распределением излучения от источника. Мы представляем результаты моделирования гиперболической среды в сравнении с результатами, полученными в ходе аналитического расчета.

Ключевые слова: метаматериалы, гиперболическая среда, искусственные длинные линии

Гиперболическая среда – это структура, в которой поперечная и продольная составляющие эффективной диэлектрической (или магнитной) постоянной имеют противоположные знаки 1, 2. В связи с этим такие среды имеют гиперболические изочастотные контура в пространстве волновых векторов, что приводит к ряду необычных свойств. Во-первых, волны на границе могут проявлять отрицательное преломление, как и в случае метаматериалов 3, 4. Во-вторых, расхождение плотности фотонов способствует сверхвысокой скорости спонтанного излучения 8. Это делает концепцию гиперболических сред перспективной и объясняет интенсивные попытки реализации гиперболических плазмонных метаматериалов 9.

Целью данной работы является моделирование и реализация двумерной гиперболической среды на основе искусственных длинных линий (ДЛ), которые уже получили широкое распространение для реализации одно-, двух- и трехмерных метаматериалов с положительными или отрицательными эффективными параметрами 10 - 12. Однако, метаматериалы с одноосными эффективными параметрами, а именно гиперболические среды, выполненные на основе искусственных ДЛ еще не были представлены.

В этой работе мы рассматриваем анизотропную гиперболическую среду с тензором диэлектрической проницаемости размером 2×2 , в котором $\epsilon_{xx} > 0$, $\epsilon_{yy} < 0$, и постоянной положительной магнитной проницаемостью μ . Данная среда поддерживает распространение волн с ТМ поляризацией. Дисперсионное уравнение такой среды выглядит следующим образом:

$$\frac{(k_x)^2}{\omega^2 \epsilon_{yy} \mu_z} + \frac{(k_y)^2}{\omega^2 \epsilon_{xx} \mu_z} = 1, \quad (1)$$

где k_x и k_y - x и y компоненты волнового вектора, ω - частота.

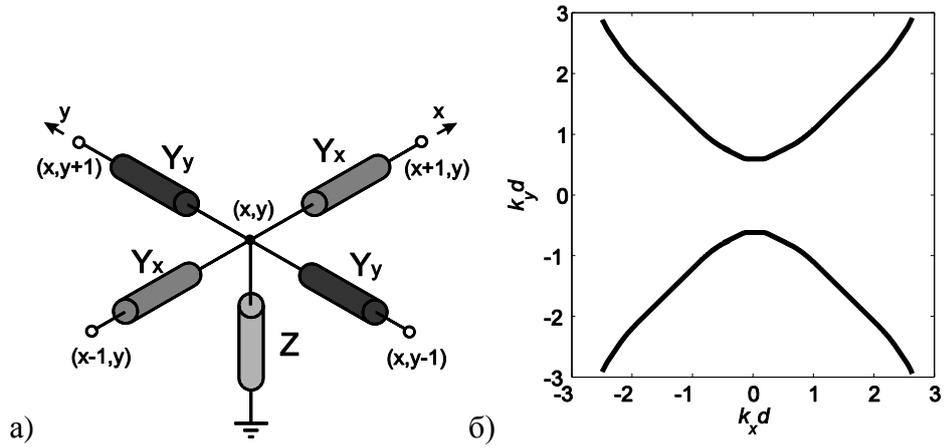


Рис. 1.

Мы предлагаем моделировать такую среду двумерной сеткой, состоящей из искусственных ДЛ на элементах с сосредоточенными параметрами. Элементарная Т-ячейка такой двумерной ДЛ состоит из двух последовательных проводимостей по направлениям x и y и параллельного сопротивления (рис. 1а).

На первом этапе мы рассматриваем гиперболическую среду, состоящую из бесконечного числа элементарных ячеек и находим дисперсионное уравнение. Запишем уравнения Кирхгофа для токов втекающих и вытекающих в узел:

$$Y_x (U_{x-1,y} + U_{x+1,y}) + Y_y (U_{x,y-1} + U_{x,y+1}) - 2U_{x,y} (Y_x + Y_y) = U_{x,y} / Z. \quad (2)$$

Ищем решение данного уравнения в виде плоской волны:

$$U_{x,y} = U_0 \exp(j(k_x d + k_y d)). \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) преобразуется к следующему виду:

$$Y_x \sin^2(k_x d/2) + Y_y \sin^2(k_y d/2) = -1/(4Z). \quad (4)$$

На частотах, где период структуры намного меньше длины волны ($k_x d \ll 1$, $k_y d \ll 1$) уравнение (4) можно переписать в виде:

$$-Y_x Z (k_x d)^2 - Y_y Z (k_y d)^2 = 1. \quad (5)$$

Сравнивая уравнения (1) и (5) можно сделать вывод, что проводимости Y_x и Y_y должны иметь противоположные знаки, чтобы обеспечить гиперболическую форму дисперсионной кривой (рис. 1б):

$$Y_x / Y_y = \varepsilon_{xx} / \varepsilon_{yy}. \quad (6)$$

На следующем этапе, мы находим связь между материальными параметрами двумерной гиперболической среды и номиналами элементов ее сосредоточенного аналога:

$$\begin{aligned} j\omega\varepsilon_{yy}d &\rightarrow Y_x \\ j\omega\varepsilon_{xx}d &\rightarrow Y_y \\ 1/(j\omega\mu_z d) &\rightarrow Z \end{aligned} \quad (7)$$

В математическом пакете MatLab было произведено моделирование структуры гиперболической среды, состоящей из 51×51 элементарных ячеек. Были выбраны следующие параметры эффективной среды: $\varepsilon_{xx} = 4 \cdot 10^4 \cdot \varepsilon_0$, $\varepsilon_{yy} = -4 \cdot 10^4 \cdot \varepsilon_0$, $\mu = 0,84 \cdot \mu_0$. И

найлены соответствующие параметры $Z_x=1i$, $Z_y=-1i$, $Z_z=2.985i$ на центральной частоте $f=50$ МГц. Источник находился в центре структуры между двумя соседними узлами по оси y . Было показано, что пространственное распределение амплитуды напряжения имеет явно выраженную «крестообразную» форму, при этом в одном направлении происходит перенос энергии сигнала, а в другом направление сигнал быстро затухает, что мы и предполагали наблюдать (рис. 2).

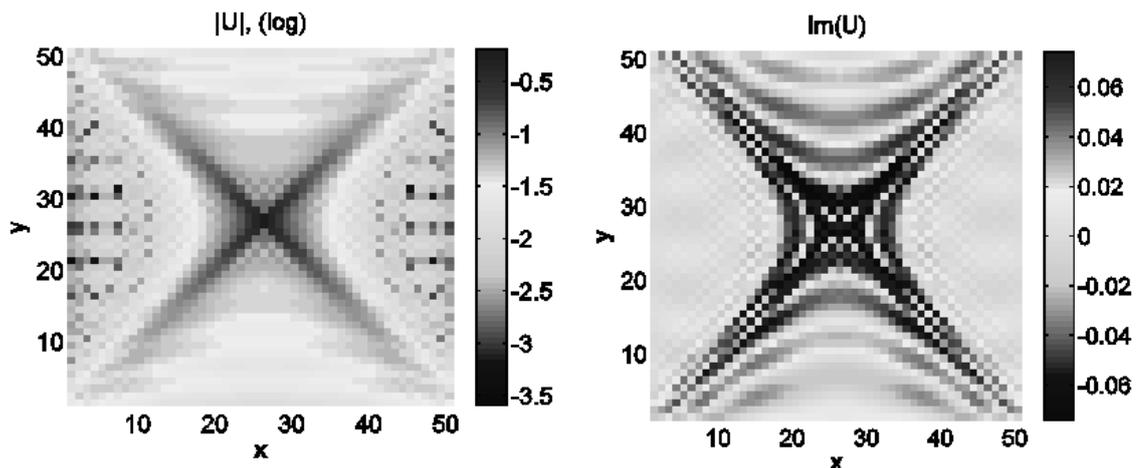


Рис. 2.

Библиографический список

1. Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors / D. R. Smith, D. Schurig. // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 90. Pp. 077405.
2. Radiation and Scattering of Waves / L. Felsen, N. Marcuvitz. Wiley Interscience, N.Y., 2003.
3. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ / V. G. Veselago. // *Sov. Phys. Usp.* 1968. Vol. 10. Pp. 509–514.
4. Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications / G.V. Eleftheriades, K.G. Balmain. Wiley and IEEE Press, N.Y., 2005.
5. M. A. Noginov, H. Li, Y. A. Barnakov, D. Dryden, G. Nataraj, G. Zhu, C. E. Bonner, M. Mayy, Z. Jacob, E. E. Narimanov. // *Opt. Lett.* 2010. 35. Pp. 1863.
6. Dipole radiation near hyperbolic metamaterials: applicability of effective-medium approximation / S. Zhukovskiy, O. Kidwai, J.E. Sipe. // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36. Pp. 2530-2532.
7. Spontaneous radiation of a finite-size dipole emitter in hyperbolic media / A. N. Poddubny, P. A. Belov, Y. S. Kivshar // *Phys. Rev A.* 2011. Vol. 84. 023807.
8. Z. Jacob, V. M. Shalaev // *Science.* 2011. 334. Pp. 463.
9. R. K. Fisher, R.W. Gould // *Phys. Rev. Lett.* 1969. 22. Pp. 1093.
10. Electromagnetic Metamaterials: Transmission line Theory and Microwave Applications / C. Caloz, T. Itoh. Wiley, New Jersey, 2006.
11. Periodic analysis of a 2-D negative refractive index transmission line structure / A. Grbic and G. V. Eleftheriades // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2003. Vol. 51. Pp. 2604–2611.
12. Tensor Transmission-Line Metamaterials / G. Gok, A. Grbic // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* 2010. Vol. 58. No. 5. Pp. 1559-1566.