

УДК 537.876.23+ 621.385.6

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С МИКРОПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ПОГЛОТИТЕЛЯ

Н.Н. ГРИНЧИК, У.М. ХАРМА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 30 июня 2016

Построена согласованная физико-математическая модель распространения электромагнитных волн в гетерогенной среде с использованием обобщенного волнового уравнения и теоремы Дирихле. Приведены данные численного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с волокнистым материалом, имеющим двойную пористость. Результаты численного моделирования показывают, что наличие микро- и макропор (среды с двойной пористостью) в ткани обеспечивает максимальный маскирующий эффект.

*Ключевые слова:* электромагнитная волна, гетерогенная среда, поверхностный заряд, пористый поглотитель, двойная пористость.

### Введение

Создание экранов электромагнитного излучения на основе волокнистых материалов позволяет получить конструкции, обладающие небольшим весом и гибкостью. Базовый модуль экрана электромагнитного излучения (ЭМИ) включает следующие слои: 1) машинно-вязаная основа; 2) влагосодержащий поглотитель; 3) герметизирующий материал.

Максимальный маскировочный эффект будет достигаться при максимальном поглощении электромагнитных волн (ЭМВ). Если ткань сухая, когда равновесная относительная влажность  $l \leq 0,4$ , то она фактически является диэлектриком и поэтому происходит отражение ЭМВ от маскируемого объекта. Если ткань мокрая, т.е.  $l \rightarrow 0$ , то практически все поры и микропоры заполнены влагой и происходит отражение ЭМВ от маскируемого объекта, т.к. обычная вода не является дистиллятом. При наличии соли электропроводность воды возрастает, так в 10%-м водном растворе NaCl электропроводность составляет 0,0825 Ом·м. Однако эффект поглотителя ЭМВ зависит не только от количества влаги в единице объема, но и от структуры пористой среды.

Машинно-вязаная ткань, как правило, является средой с двойной пористостью: микропоры, определяющие капиллярный эффект и сорбционные свойства, входят в состав нитей, микропоры составляют пространство между нитями. Вследствие наличия микропор капиллярный потенциал ткани (капиллярное число) невелик, поэтому при моделировании можно ограничиться только учетом сорбционных процессов и переконденсацией пара.

В работе рассматривается процесс взаимодействия ЭМВ с тканью, которая имеет двойную пористость в 2Д. Для численного моделирования взаимодействия ЭМВ с пористой структурой использовалась методика, изложенная в [1–3]. Приведены данные численного моделирования взаимодействия ЭМИ с волокнистым материалом, имеющим двойную пористость. Результаты численного моделирования показывают, что наличие микро- и макропор (среды с двойной пористостью) в ткани обеспечивает максимальный маскирующий эффект.

## Математическая модель

Рассмотрим поверхность раздела двух сред с различными электрофизическими свойствами. По обе ее стороны векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции, а также векторы электрического поля и электрического смещения конечны и непрерывны, но на поверхности  $S$  они могут претерпевать разрыв первого рода. Кроме того, на границе раздела под действием внешнего электрического поля возникают наведенные поверхностные заряды  $\sigma$  и поверхностные токи  $i$  (векторы, лежащие в касательной плоскости к поверхности  $S$ ).

При исследовании электрического поля, взаимодействующего с материальной средой, используем векторное волновое уравнение [1–3], которое получено из уравнений Максвелла.

$$\frac{\partial j_{total}}{\partial t} = \frac{1}{\mu\mu_0} \nabla^2 E - \frac{1}{\mu\mu_0} \text{grad}(\text{div}E). \quad (1)$$

В декартовых координатах (1) будет иметь вид

$$\frac{\partial j_{totalx}}{\partial t} = \frac{1}{\mu\mu_0} \left\{ \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \right\} - \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right\}. \quad (2)$$

$$\frac{\partial j_{totaly}}{\partial t} = \frac{1}{\mu\mu_0} \left\{ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} \right\} - \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right\}. \quad (3)$$

$$\frac{\partial j_{totalz}}{\partial t} = \frac{1}{\mu\mu_0} \left\{ \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} \right\} - \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right\}. \quad (4)$$

На поверхности раздела справедливо также соотношение:

$$\text{div}i_\tau + I_{qx_1} - I_{qx_2} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t}. \quad (5)$$

Закон сохранения заряда на границе раздела смежных сред. Граничные условия запишем в декартовой системе координат:

$$D_{x_1} - D_{x_2} = \sigma, \quad (6)$$

$$E_{y_1} - E_{y_2} = 0, \quad (7)$$

$$E_{z_1} - E_{z_2} = 0, \quad (8)$$

$$B_{x_1} - B_{x_2} = 0, \quad (9)$$

$$H_{y_1} - H_{y_2} = i_z, \quad (10)$$

$$H_{z_1} - H_{z_2} = i_y, \quad (11)$$

где  $i_\tau = i_y j + i_z k$  – плотность поверхностного тока, при этом координата  $x$  направлена по нормали к границе раздела. Под плотностью  $i_y$ ,  $i_z$  поверхностных токов понимаем количество электричества, протекающего в единицу времени через единицу длины отрезка, расположенного на поверхности, по которой течет ток, и перпендикулярного направлению тока.

Порядок системы дифференциальных уравнений (2)–(4) равен 18. Поэтому на границе раздела  $S$  необходимо, вообще говоря, задать девять граничных условий. Кроме того, на этой границе должны выполняться еще три условия формулы (6), (10) и (11), содержащие неизвестные (до решения) величины. Следовательно, общее число условий сопряжения на границе  $S$  должно равняться 12 для корректного решения задачи.

Дифференцируя выражение уравнения (6) по времени и учитывая соотношение (5), на границе раздела сред получаем условие для нормальных составляющих полного тока:

$$\text{div}i_\tau + j_{totalx_1} = j_{totalx_2}. \quad (12)$$

Метод решения системы уравнений (2–4) изложен в [1–3]. Разбитие среды на конечные элементы нами осуществлялось таким образом, чтобы узлы конечно-элементной сетки, лежащие на границе раздела, одновременно принадлежали средам с разными

электрофизическими свойствами. В этом случае на границе раздела должно выполняться условие равенства полных токов и равенство потоков заряда.

### Пример расчета

Расчеты проводились с использованием пакета ComsolMultiphysics 3.3 и метода «кожуха», т.е. выбиралась прямоугольная область с размерами, превышающими размер поглотителя и объекта маскировки. На границе прямоугольной области были заданы периодические функции  $E_x(t) = \sin(10^9 t)$ ,  $E_y(t) = \cos(10^9 t)$ . Параметры среды, заполняющий прямоугольник (воздух):  $\epsilon_r = 1.0000001$ ,  $r = 0$ ,  $\mu_r = 1$ . Внутри прямоугольника в 2D находится маскируемый объект – четырехугольник, сделанный из меди ( $\epsilon_r = 1$ ,  $r = 5,998 \cdot 10^7$  Ом·м,  $\mu_r = 1$ ). Время расчета  $10^{-6}$  сек с шагом  $10^{-7}$ . Размер расчетной области  $0,6 \times 0,6$  м. Четырехугольник, выделенный на рис. 1, 2, сделан из меди. На четырехугольнике (2D) находится ткань с параметрами  $\epsilon_r = 1$ ,  $r = 0,04$  Ом·м,  $\mu_r = 1$  и геометрией, изображенной на рис. 1 ( $E_x$  компоненты поля), рис. 2 ( $E_y$  компоненты поля). Из графиков рис. 1 и рис. 2 видно, что ткани обеспечивают значительное уменьшение отражательной способности меди. Однако в реальности сделать укрытие из тканей указанной геометрии затруднительно и не экономично. В то же время без укрытия тканями медь, как и любой проводящий материал, даже для малых размеров (размер области  $10^{-2} \times 1,4 \cdot 10^{-12}$  м), обладает свойством фокусировки электромагнитного поля на острых гранях рис. 3. Медь также укрывалась тканью большим величиной коэффициента удельного электрического сопротивления  $r = 0,4$  Ом·м. Результаты таких расчетов приведены на рис. 4 ( $E_x$ ) и рис. 5 ( $E_y$ ). Является неожиданным тот факт, что укрытие меди машинно-вязанной тканью (сочетание макро- и микропор), размер расчетной области:  $4 \cdot 10^{-4} \times 0 \cdot 10^{-3}$  м, также приводит к эффекту уменьшения интенсивности отраженных электромагнитных волн (рис. 6 –  $E_y$ , рис. 7 –  $E_x$ ). Таким образом, для целей маскировки наиболее эффективно использование сред с двойной пористостью, т.е. сочетание микропор и макропор, при этом микропористые нити должны хорошо проводить электрический ток (влажная ткань). В силу наличия макропор действие капиллярных течений является незначительным, поэтому для моделирования неизоотермического влагопереноса в дальнейшем можно ограничиться использованием только уравнения фильтрации пара и уравнения энергии.

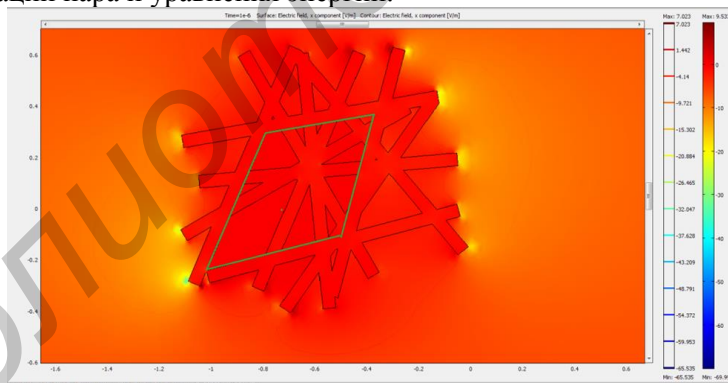


Рис. 1. График (с изолиниями) компоненты  $E_x$  электромагнитного поля

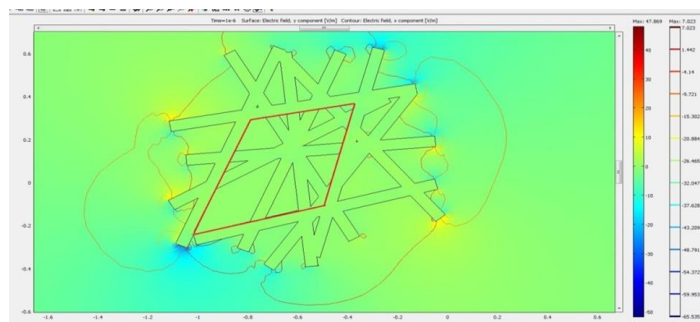


Рис. 2. График (с изолиниями) компоненты  $E_y$  электромагнитного поля

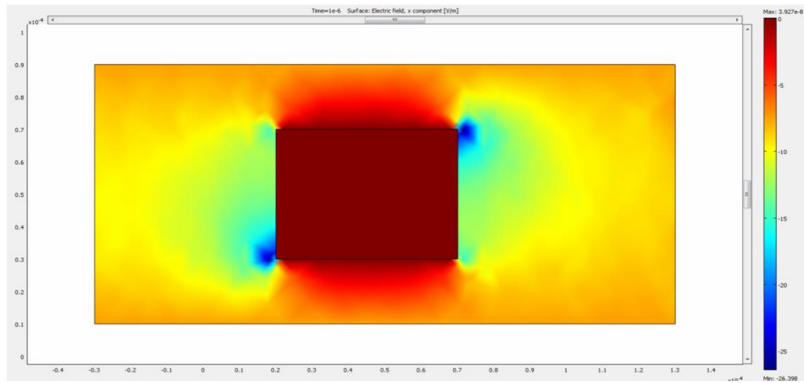


Рис. 3. График компоненты  $E_x$  электромагнитного поля

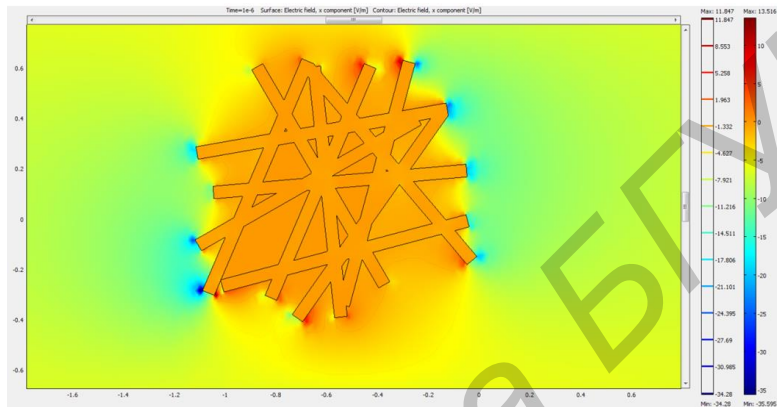


Рис. 4. График (с изолиниями) компоненты  $E_x$  электромагнитного поля

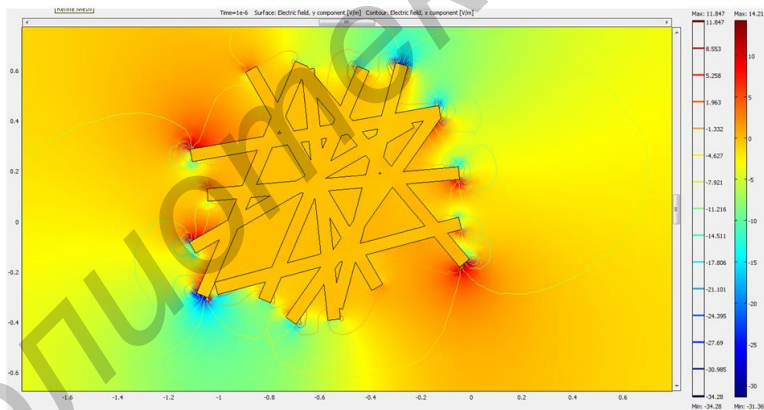


Рис. 5. График (с изолиниями) компоненты  $E_y$  электромагнитного поля

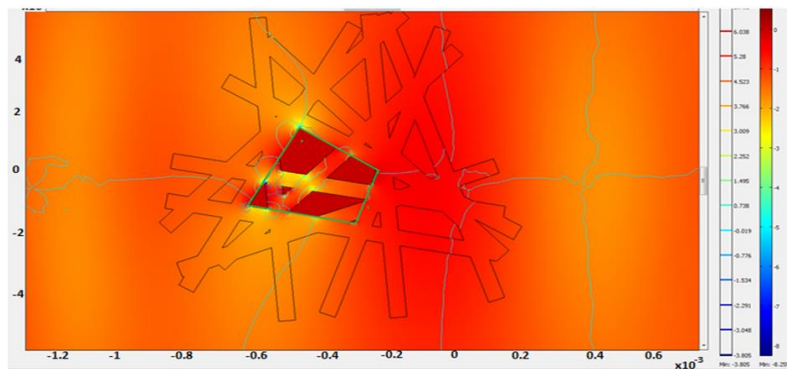


Рис. 6. График (с изолиниями) компоненты  $E_y$  электромагнитного поля

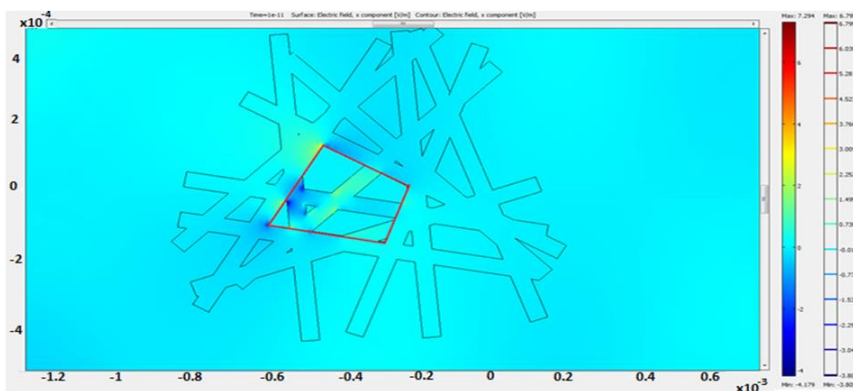


Рис. 7. График (с изолиниями) компоненты  $E_x$  электромагнитного поля

### Заключение

Построена согласованная физико-математическая модель распространения электромагнитной волны в гетерогенной среде с использованием обобщенного волнового уравнения и теоремы Дирихле. Получены и обоснованы 12 условий на границах раздела смежных сред без использования в явном виде поверхностного заряда и поверхностного тока. Условия автоматически выполняются в каждом сечении гетерогенной среды, являются сопряженными, что позволило для расчетов использовать схемы сквозного счета. Приведены данные численного моделирования взаимодействия ЭМИ с волокнистым материалом, имеющим двойную пористость. Результаты численного моделирования показывают, что наличие микро- и макропор (среды с двойной пористостью) в ткани обеспечивает максимальный маскирующий эффект.

## NUMERICAL MODELING OF THE ELECTROMAGNETIC WAVES INTERACTION WITH MICROPOROUS STRUCTURE ABSORBER

N.N. GRINCHIK, O.M. KHRMA

### Abstract

Consistent physics and mathematics model of electromagnetic waves propagation in heterogeneous medium using the generalized wave equation and the Dirichlet theorem is built. The data of numerical simulation of the electromagnetic interference interaction with a fibrous material having a double porosity. The results of numerical simulation show that the presence of micro- and macropores (medium with double porosity) of the fabric ensures maximum masking effect.

*Keywords:* electromagnetic wave, heterogeneous medium, surface charge, porous absorber, dual porosity.

### Список литературы

1. Grinchik N.N., Korogoda O.P., Khomich M.S. et. al. Electromagnetic Waves Propagation in Complex Matter / Ed. by Ahmed Kishk. InTech, 2011
2. Grinchik N.N., Grinchik Yu. N. // Physics Research International. 2012. Vol. 2012. Article ID 185647.
3. Grinchik N.N. // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.4236/jemaa.2014.65009>. – Дата доступа: 01.06.2016.