

УДК 538.56

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРОВ

АЛИ СААД ФАРХАТ

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

Поступила в редакцию 30 мая 2012

Рассмотрены экраны, образованные искусственными электромагнитными средами в предположении наличия краевых эффектов, вызванных ограниченностью их размеров. Показано, что краевые эффекты могут существенно сказываться на энергии и поляризации поля рассеяния и, следовательно, на радиолокационной заметности экрана, а также на степени экранирования радиоэлектронных устройств оболочками и экранами. В работе рассмотрена возможность представления экрана из метаматериала не имеющей толщины импедансной поверхностью, вдоль которой распространяются волны. Такой подход позволит создать упрощенную аналитическую модель экрана ограниченных размеров, позволяющую оценить влияние краев посредством введения поверхностных волн возникающих на краях. Показано, что вклад в общее поле рассеяния поверхностных волн существенен даже для больших размеров экрана. Проведены результаты расчетов и измерений амплитуды и постоянных распространения краевых волн в зависимости от геометрии структуры.

*Ключевые слова:* защита информации, экранирование, радиолокационная заметность, открытый резонатор, краевые волны.

### Введение

Электромагнитное излучение и радиолокационная заметность являются существенными демаскирующими факторами, влияющими на функциональное состояние радиотехнических систем в целом. Поскольку в ряде случаев использование сплошных экранирующих поверхностей бывает невозможным или нецелесообразным, в настоящее время активно разрабатываются искусственные среды, т.н. метаматериалы, представляющие собой периодическую двухмерную либо трехмерную структуру, образованную идентичными элементами произвольной формы, состоящими из естественных материалов. Исследования волновых свойств метаматериалов в виде различных периодических структур показало возможность реализации как резонансного отражения электромагнитных волн [1], так и резонансного прохождения и поглощения [2, 3]. Эти результаты послужили основой для формирования нового взгляда на использование экранов из метаматериалов в задачах экранирования, излучения и поглощения электромагнитных волн.

Исследования показали, что, метаматериалы могут рассматриваться как среды, имеющие диэлектрическую и магнитную постоянные произвольной величины, в том числе менее единицы и даже быть отрицательными. Однако при представлении таких материалов параметрами проницаемости необходимо помнить, что метаматериал может иметь нулевую в смысле  $d/\lambda$  толщину и, следовательно, понятие диэлектрической и магнитной проницаемости должно применяться с большой осторожностью. В таком случае целесообразным является представление метаматериального экрана в виде импедансной поверхности [4, 1].

Здесь возникает проблема взаимодействия поверхностных волн, существующих на поверхности, с краями экрана. Вместе с тем практически все исследования метаматериалов про-

водятся численными методами в предположении того, что метаматериал представляет собой строго периодическую структуру, не имеющую краев.

В данной работе сделана попытка восполнить этот пробел и рассмотреть свойства экранов ограниченных размеров.

### Объект и метод исследования

В качестве объектов теоретических и экспериментальных исследований экранов были выбраны экраны, образованные периодически расположенными элементами в виде металлических колец и рамок, а также кольцевых и рамочных щелей на металлической плоскости. Цель исследования состояла в определении влияния нерегулярности экрана в смысле наличия краев поверхности на экранирующие свойства. Геометрия образцов показана на рис. 1. Теоретические исследования проводились методами частичных областей и интегрального уравнения.

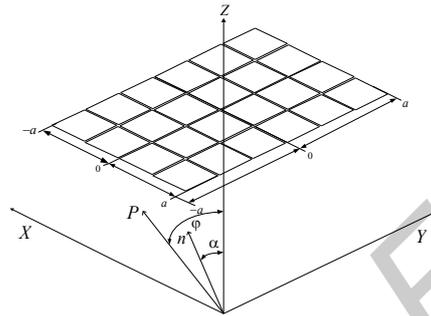


Рис. 1. Геометрия образца экрана

Метод частичных областей применялся для расчета параметров в предположении отсутствия краев и кривизны. Метод интегрального уравнения и экспериментальные исследования проводились на образцах ограниченных размеров и наличии кривизны поверхности. Экспериментальные образцы экранов изготавливались из фольгированного материала методом фотолитографии, подложка имеет толщину 0,15–0,2 мм ( $0,005\lambda$ ), что позволяет считать ее влияние пренебрежительно малой. Применялись две методики исследования: расчет и измерение распределения полей в волновой зоне; расчет и измерения характеристик рассеяния в дальней зоне. Экспериментальные измерения в волновой зоне осуществлялись методами пробного тела, а в дальней зоне – путем измерения коэффициента усиления отверстия в системе из 2-х поглощающих поверхностей, между которыми размещен экран.

### Основные положения метода исследования

Рассмотрим экран, образованный периодической структурой идентичных элементов, расположенных в пространстве согласно рис. 1. Известно, что в приближении физической теории дифракции поле рассеяния структуры можно представить в следующем виде:

$$U(P) = U_0(P, Q) - \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ U \frac{\partial}{\partial n_e} \left[ \frac{e^{ik\rho}}{\rho} \right] - \frac{e^{ik\rho}}{\rho} \frac{\partial U}{\partial n_e} \right\} ds, \quad (1)$$

где  $U_0(P, Q)$  – поле источника излучения в точке наблюдения;  $\rho$  – расстояние между точкой на поверхности  $S$  и точкой наблюдения;  $n_e$  – внешняя нормаль к поверхности  $S$ ;  $U$  – поле на поверхности экрана;  $S$  – поверхность экрана.

Выражение (1) показывает, что для определения поля рассеяния экраном необходимо знать  $U$  и  $\partial U / \partial n_e$  на поверхности экрана. Представим, что экран представляет собой поверхность с известным коэффициентом отражения  $R$  и прохождения  $T$  в бесконечно плоском приближении. При этом  $R$  и  $T$  как функции угла и поляризации могут быть получены при решении задач рассеяния на бесконечно плоском экране и формализованы в виде тензора и соответствующей ему матрицы рассеяния. При этом следует иметь в виду принцип двойственности [5],

в соответствии с которым задача дифракции на произвольной проводящей поверхности соответствует задаче дифракции на дополнительной поверхности, образованной путем замены металла на диэлектрик. При этом  $R$  и  $T$  меняются местами.

Определение  $R$  и  $T$  аналитическими методами, как правило, невозможно, и для их решения используются численные методы, основанные на предположении строгой периодичности единичных элементов экрана. В этом случае задача дифракции на конечном экране сводится к задаче дифракции на периоде, что делает возможным проведение численных расчетов.

$R$ ,  $T$  и соответствующий им тензор проницаемости, полученный в предположении того, что структура экрана строго периодична и он бесконечен, будем в соответствии с [6] в дальнейшем называть «равномерным» решением, а отличие между «равномерным» решением и действительным будем в дальнейшем называть «неравномерным». При определении неравномерной части поля будем следовать следующей методике [4].

Представим поле, рассеянное экраном чисто реактивным, т.е. удовлетворяющим граничному условию

$$\frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{x=0} = -k \frac{Z_m}{Z_0}, \quad (2)$$

где  $\frac{Z_m}{Z_0} = -iZ / Z_0$  – вещественная величина;  $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi$  (Ом) – импеданс свободного пространства.

Пусть на экран падает плоская волна

$$\bar{E} = (e^{ikr \cos(\theta-\alpha)} + \Gamma_0 e^{ikr \cos(\theta+\alpha)}) \bar{e}_x \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), находим величину коэффициента отражения от экрана

$$R_0 = \frac{\sin \alpha - i \frac{Z_m}{Z_0}}{\sin \alpha + i \frac{Z_m}{Z_0}} \quad (4)$$

Таким образом, поле рассеяния может быть получено, используя (1) и (3).

$$U_0(P, Q) U = T_0 e^{ikz \cos(\theta-\alpha)} + R_0 e^{ikr \cos(\theta+\alpha)}, \text{ считая } (R_0^2 + T_0^2) = 1. \quad (5)$$

Очевидно, что при этом не учтены поверхностные и краевые волны. Если рассматривать задачу нахождения поверхностных волн и задачу приближения однократной дифракции, то она становится эквивалентной задаче дифракции на бесконечной плоскости, возбуждаемой щелью, которая изложена в работе [4]. В силу граничного условия, которому должны удовлетворять поверхностные волны и возбуждающего поля

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{-\gamma}{\omega \epsilon} \frac{i}{|\bar{H}_s|} |\bar{H}_s|; \quad \bar{H}_s = e^{-\gamma z} e^{i\beta z} \bar{e}_y; \quad \bar{E}_s = -\frac{i\gamma}{\omega \epsilon} H_{S1} \bar{e}_x - \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_{S1} \bar{e}_z.$$

Могут быть получены постоянные распространения поверхностных волн  $\gamma_Z = \frac{Z_m}{Z_0} k$ ,

$$\beta = k \sqrt{1 + \left( \frac{Z_m}{Z_0} \right)^2}. \quad (6)$$

С учетом этого в одномерном приближении поле на поверхности экрана может быть записано как

$$E^{\Sigma} = E_0 - \frac{Z_m}{\sqrt{Z_0^2 + Z_m^2}} \exp \left( ik \sqrt{1 + \left( \frac{Z_m}{Z_0} \right)^2} |x| \right), \quad (7)$$

где  $E_0$  – регулярная часть поля.

При этом  $\frac{Z_m^2}{Z_0^2 + Z_m^2} + \frac{Z_0^2}{Z_0^2 + Z_m^2} = T_0^2$ , где первое слагаемое – мощность, излучаемая поверхностными волнами.

В соответствии с (2), при  $Z_m = 0$  мощность поверхностных волн становится равной нулю. Это не совсем соответствует действительности, поскольку известно, что так называемая «нерегулярная» часть тока [6] имеет место и на поверхности идеально проводящих экранов, но, в отличие от рассматриваемых экранов фазовый множитель у «нерегулярной» части тока такой же, как и в свободном пространстве и равен  $kr + \pi/4$ . Представляет интерес, в какой степени вычисленный в соответствии с (4) коэффициент отражения экрана в «регулярном» приближении может быть использован для определения «нерегулярной» части поля, а также сопоставление распределения поля в плоскости экрана из метаматериала и его поля рассеяния с соответствующими полями сплошного металлического и сетчатого экранов

Для этого определим распределение поля в плоскости экрана для случая  $\varphi$  и  $\alpha = 0$ , т.е. когда регулярная часть поля  $U_0(P, Q)$ , имеет постоянную фазу в плоскости экрана, то в этом случае, определив период осцилляций и их амплитуду, могут быть определены амплитуды возбуждения и фазовые скорости волн, определяющих «нерегулярную» часть поля.

Для случаев сплошного и сетчатого экранов, следуя (4), также может быть определено эквивалентное значение поверхностного импеданса. Заметим, что в случае сплошного металлического экрана  $\frac{Z_m}{Z_0} = -iZ / Z_0 = 0$ , и поверхностная волна отсутствует, но при этом присутствуют краевые волны, которые могут быть определены в соответствии с методикой [6]. Как показано в [7], поле на поверхности сетчатого экрана может быть представлено в следующем виде:

$$\vec{E}_{\tau} = -\vec{E}_{\tau}^{cm} + i120\pi \frac{b}{\lambda} 1n \frac{b}{2\pi r_0} \left[ \vec{j}_{\tau} + \frac{1}{2k^2} \text{grad div } \vec{j}_{\tau} \right] \quad (8)$$

где  $r_0$  – радиус провода;  $b$  – размер ячейки (период);  $\lambda$  – длина волны.

### Результаты и их обсуждение

Эксперименты по определению поля рассеяния экраном в пространстве проводились как на фиксированных частотах, так и в частотной области при фиксированных углах возбуждения экрана плоской волной.

Численные исследования проводились методом решения интегрального уравнения и частичных областей, варьируя размеры элементарной ячейки, размеры экрана, рабочую частоту, толщину или периметр одиночного элемента. Результаты расчетов сравнивались с характеристиками металлического экрана таких же размеров, а также с характеристиками сетчатого экрана имеющего такую же суммарную длину проводников.

В результате численных расчетов и эксперимента получено около 120000 одномерных сечений трех компонент распределений поля в волновой и дальней зонах. Приведем некоторые типичные из них и рассмотрим пригодность изложенного метода к задаче по определению поля на поверхности нерезонансного сетчатого экрана.

На рис. 2 и 3 приведены распределения  $\vec{X}$  и  $\vec{Z}$  компонент поля в плоскости сетчатого нерезонансного экрана конечных размеров.

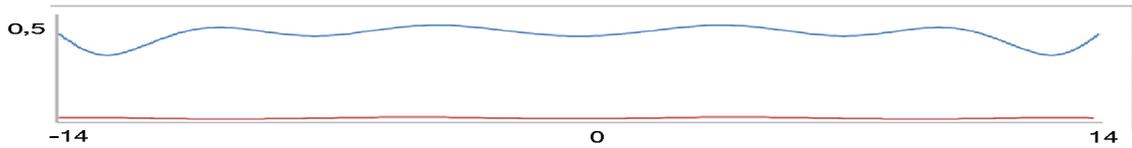


Рис. 2. Распределение поля по оси  $Y$  в плоскости сетчатого экран при  $k_a = 14$ ,  $\frac{b}{\lambda} = 0,128$ ,  $\frac{b}{r_0} = 10$

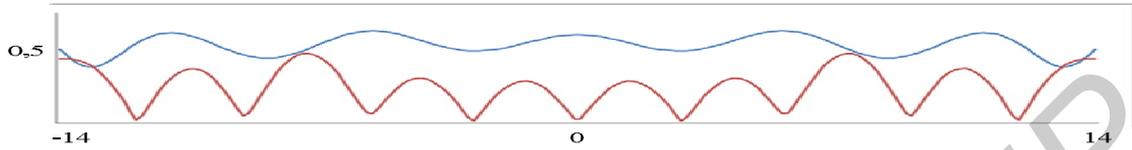


Рис. 3. Распределение поля по оси  $X$  в плоскости сетчатого экрана при  $k_a = 14$ ,  $\frac{b}{\lambda} = 0,128$ ,  $\frac{b}{r_0} = 10$

$\vec{Y}$  компонента поля имеет амплитуду на несколько порядков меньшую, чем  $\vec{X}$  и  $\vec{Z}$  компоненты и поэтому не приводится.  $\vec{X}$  и  $\vec{Z}$  компоненты имеют сравнимые амплитуды, что свидетельствует о значительной энергии поверхностных волн. Сравнив с ними результаты, полученные по формулам 8, 4, 6, 7, можно сделать вывод, что амплитуды и фазовые скорости поверхностных волн находятся в полном соответствии с результатами численных расчетов.

На рис. 4 и 5 приведены аналогичные распределения для метаматериального экрана с геометрией, показанной на рис. 1, которые проведены на частоте, расположенной справа от резонансной частоты метаматериала. Частота выбрана так, что коэффициент прохождения близок к коэффициенту прохождения сетчатого экрана.

На рис. 6 и 7 приведены распределения поля на резонансной частоте экрана.

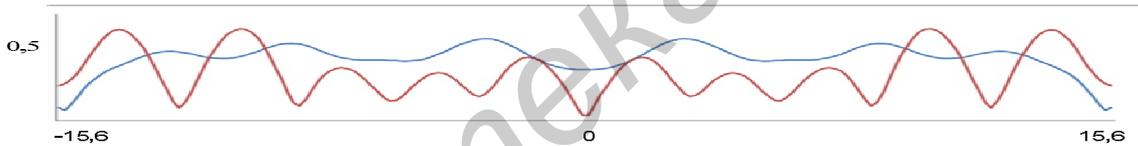


Рис. 4. Распределение поля по оси  $Y$  при  $k_a = 15,6$ ,  $\frac{b}{\lambda} = 0,35$ ,  $\frac{b}{r_0} = 20$

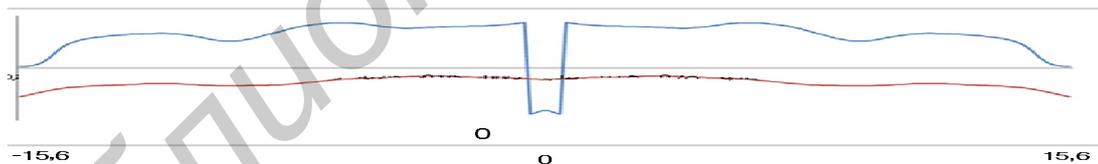


Рис. 5. Распределение поля по оси  $X$  экрана при  $k_a = 15,6$ ,  $\frac{b}{\lambda} = 0,35$ ,  $\frac{b}{r_0} = 20$

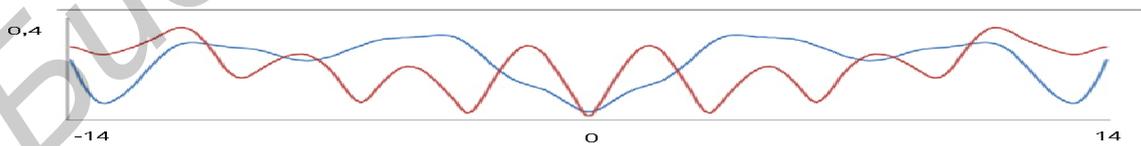


Рис. 6. Распределение поля по оси  $Y$  на резонансной частоте при  $k_a = 14$ ,  $\frac{b}{\lambda} = 0,4$ ,  $\frac{b}{r_0} = 20$

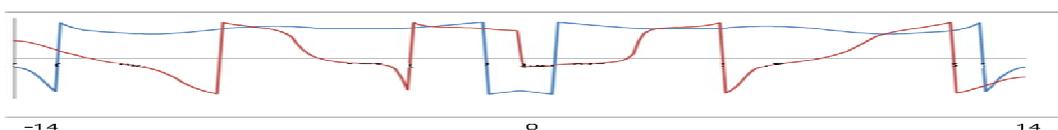


Рис. 7. Распределение фазы поля по оси  $X$  на резонансной частоте при  $k_a = 14$ ,  $\frac{b}{\lambda} = 0,4$ ,  $\frac{b}{r_0} = 20$

Видно, что вдали от резонансной частоты энергия поверхностных волн невысока, но при приближении к резонансной частоте метаматериала сильно возрастает, что полностью соответствует модели краевого возбуждения поверхностных волн в импедансной структуре. Это приводит к тому, что определяющими становятся краевые эффекты, которые обеспечивают большую энергию поверхностных волн. Это приводит к тому, что экранирующие свойства уменьшаются, в том числе и при экранах больших размеров. Так, для экрана с бесконечными размерами коэффициент прохождения равен нулю, а для экрана с размерами  $k_a = 14 - 15$  коэффициент прохождения близок к 0,25, потому что при росте поверхностного импеданса доля поверхностных волн в общем поле увеличивается. Поскольку это замедленные поверхностные волны, то они приводят к возникновению экстремумов излучения, в данном случае фазовая характеристика распределения поля на рис. 7 показывает, что главный экстремум совпадает с направлением падающей на экран волны и уменьшает экранирующие свойства, а также радиозаметность экрана в дальней зоне. Данное явление продемонстрировано на рис. 8, где приведена ДН экрана из метаматериала облучаемого сферической волной. Сплошной сетчатый экран аналогичных размеров не имеет такого большого излучения в направлении  $Z$ .

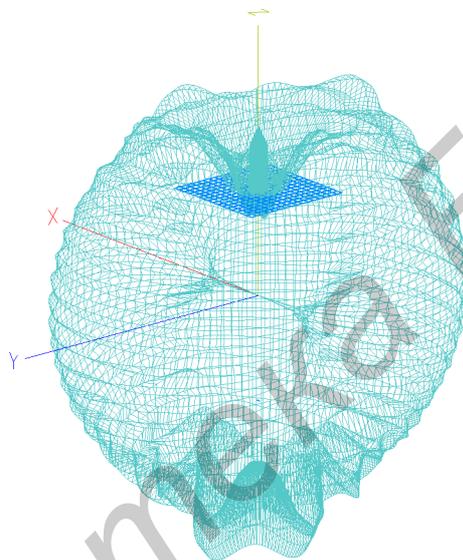


Рис. 8. Пространственная диаграмма рассеяния экрана  $k_a = 14$  в поле сферической волны с радиусом  $177 k_a$

Приведенный анализ возможности представления плоского слоя метаматериала импедансной поверхностью показывает, что при определении параметров ограниченного экрана из метаматериала нужно учитывать взаимодействия краев и поверхностных волн, которые не учитываются при рассмотрении экрана как безграничной структуры. Предложенный метод может служить ориентиром для выбора исходных данных для более строгого анализа устройств с экранами на основе метаматериалов.

### Заключение

Проведены численные и экспериментальные исследования экранов, образованных периодическими рамочными и кольцевыми структурами в виде проводящих элементов и щелей в проводящих экранах.

Сделана попытка создания аналитической модели для определения амплитуды и постоянных распространения волн вдоль поверхности экрана, имеющего конечные размеры путем введения эффективного поверхностных импеданса.

Показано, что в первом приближении амплитуды и постоянные распространения поверхностных волн могут быть выражены через значения поверхностного импеданса и амплитуды возбуждения краевых волн, вычисляемых через коэффициенты матрицы рассеяния метаматериального слоя бесконечных размеров. Показано также, что вклад поверхностных волн может быть определяющим при оценке экранирующих свойств экранов.

## RESEARCHES OF ELECTROMAGNETIC SCREENS

ALI SAAD FARHAT

### Abstract

The screens formed by artificial electromagnetic environments in the assumption of presence of regional effects, their sizes caused by limitation are considered. Results of calculations and measurements of amplitude and constants of distribution of regional waves depending on structure geometry are spent.

### Список литературы

1. Симовский К.Р., Сочава А.А., Мельчакова И.В. // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, №5. С. 527–536.
2. Brovenko A., Velezhik P., Poyedinchuk A. // Progress in Electromagnetics Research. 2006. PIER 63. P. 209–222.
3. Слюсар В. // Электроника: НТБ. 2009. №7. С. 70–79.
4. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Щеглов К.С. Теория излучения поверхностных антенн. М., 1969.
5. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М., 1957.
6. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М., 1962.
7. Конторович М.И. // Радиотехника и электроника. 1963. Т. 8, №9. С. 1506–1515.