

УДК 621.396

Т.В. Глотова

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРО- ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ПОДХОДА

*Воронежский институт высоких технологий*

*В работе рассматривается возможность использования параболического интегрального уравнения для моделирования процессов распространения электромагнитных волн в помещениях. Данный метод базируется на подходе, который способен обеспечить хорошее приближение электромагнитного поля и получить результаты, поскольку распространение лучей происходит по большим путям. Была проведена проверка компьютерного эксперимента для офисного помещения при частотах 1.1 ГГц и 2.5 ГГц. Точность аппроксимации лежала в ожидаемых пределах, в рассматриваемом способе сохраняются все преимущества волновых методов, также он имеет не очень высокие требования к вычислительным ресурсам.*

**Ключевые слова:** распространение электромагнитных волн, оптимизация, моделирование, параболическое уравнение.

### ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные системы и сети считаются неотъемлемой частью современных коммуникаций и их эффективное планирование должно наверняка соответствовать требованиям современной архитектуры для построения современных удобных зданий, помимо того что существуют требования для снижения себестоимости, систем безопасности и требования по соблюдению правил техники безопасности.

Установка беспроводной локальной сети (WLAN) иногда проходит в крайне сложных условиях и часто требует разработки расчетных моделей, которые должны быть в состоянии правдиво описать с геометрическую сложность здания и обеспечить точную оценку электромагнитной плотности мощности в любой точке. Тем не менее, точное описание материалов внутри комнат провести крайне сложно, так как реальные стены из кирпича или бетона, или сделанные из дерева или металла, оконные проемы, имеющие одинарное или двойное остеклением должны быть смоделированы адекватным образом.

В таких сложных структурах с разнородными параметрами возникновение многолучевых эффектов практически неизбежно. В ряде случаях стремятся к тому, чтобы избежать многократных отражений волн из различных геометрических элементов всей конструкции. Такие эффекты являются источником затухания сигнала, или даже он полностью может поменять свою структуру.

Таким образом, анализ характеристик распространения в помещениях необходимо корректным образом проводить, особенно в современных широкополосных приложениях. Моделирование

распространения радиоволн в помещениях может быть легко выполнено с помощью эмпирических моделей, основанных на сочетании приближенных вычислений и интерполяции измерений [1].

Вообще, успех моделей может включать основные механизмы распространения волн и некоторые виды геометрического описание распространения в канале, но в большинстве случаев такие подходы обычно обеспечивают только грубую оценку принимаемого сигнала. В этой связи требуется использовать другие подходы.

Такие методы обычно основываются на упрощенных моделях, в которых электромагнитная волна, претерпевает отражение, преломление и дифракцию (прибегают к подходам, таких как физическая оптика, геометрическая оптика или геометрическая теория дифракции), в них требуется рассмотрение большого числа лучей.

Число лучей может расти значительно для практических задач, связанных с распространением электромагнитных волн в помещениях. Определенные перспективы имеет использование параболического уравнения [1]. Этот метод основан на двумерном широкоугольном подходе [1,2], надлежащим образом используется формулировка интегрального уравнения для расчета электромагнитного поля внутри здания, принимая во внимание точную геометрическую форму в комплексе окружающего пространства [3-6].

На первом шаге, широкоугольный метод параболического уравнения расширяется с применением Паде-аппроксимации, используемой для расчета полей в стенах.

Подход является чрезвычайно удобным, поскольку двумерная задача сводится к последовательному решению одномерных задач методом конечных элементов на плоскости поперечно параксиальных направлений. При таком расчете, к сожалению, не соответствуют модели волн, которые отражаются или дифрагируют назад под большим углом по отношению к основному направлению распространения оси.

Для того, чтобы преодолеть указанную проблему, проводится соответствующая коррекция поля с помощью Функции Грина. Подход был введен, при использовании используя эквивалентных токов вблизи стен и других препятствий.

## МЕТОДИКА

Ниже рассматривается краткое описание предложенной формулировки, для решения параболического уравнения. В общем, параболическое уравнение является подходящим для решения задач, в которых лучи распространяются по большим путям, в предположении, что волна распространяется вдоль главного направления и под углами, которые существенно не отклоняются от этого главного направления.

Следовательно, электрическое поле может быть выражено в терминах медленно меняющихся амплитуд, который включает медленные вариации вокруг направления распространения, и изменения фазы вдоль главного направления, который, как предполагается, находится в направлении оси  $x$  [7-10],

$$E(x,y,z)=E(x,y,z)\exp(jk_{ref}x), \quad (1)$$

где  $k_{ref} = k0_{nref}$  это соответствующая постоянная распространения,  $K0$  является постоянной распространения в свободном пространстве,  $nref$  обозначает, что происходит преломление. Применяя уравнение Гельмгольца, которое аналогично соотношению полученному для медленно меняющихся амплитуд, получаем первого и второго порядка производные, по отношению к направлению распространения. Применяя параксиальную аппроксимацию второго порядка колебания, считаются незначительными в параболическом уравнении.

$$\frac{\partial E(x,y,z)}{\partial x} = j \frac{P}{2k_{ref}} E(x,y,z) \quad (2)$$

получается, когда дифференциальный оператор  $P$  в двух направлениях определяется как

$$P = k_0^2(n^2 - n_{ref}^2) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3)$$

и вариациями поля в направлении оси  $Z$  пренебрегаем. Поскольку в анализируемых помещениях, возбуждения обычно всенаправленные и все пути, по которым распространяется электромагнитная волна, идут от строительных конструкций, как стены, окна, т.д. необходимо учитывать широкий угол коррекции [11, 12], в которых вторым порядком вариаций изменение в волне не считать незначительными.

Эта схема расширяет возможности использования параболического уравнения для углов до почти 90 градусов. Полученное уравнение принимает форму

$$\frac{\partial E(x,y,z)}{\partial x} = j \frac{1}{2k_{ref}} \frac{\partial^2 E(x,y,z)}{\partial x^2} \quad (4)$$

Вторая производная должна быть переформулирована, чтобы сделать ее расчет на основе первой производной. Удобный способ сделать это заключается в записи (4) в записи оператора и просто решить ее в терминах первого порядка производных, т. е.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{j \frac{P}{2k_{ref}}}{1 - j \frac{P}{2k_{ref}} \frac{\partial}{\partial x}} \quad (5)$$

Для вычислительной реализации (5), дискретизация выполнена вдоль оси  $x$ , используя центральные разности,

$$D(E^{i+1} - E^i) = j \frac{\Delta x}{2} N(E^{i+1} + E^i) \quad (6)$$

Решение по поперечной составляющей увеличивается в сложности, при росте оператора  $P$ . Даже в случае Паде аппроксимации второго порядка  $P$  обуславливает производные четвертого порядка. Чтобы решить эту проблему, необходимо применять эффективный многоступенчатый метод для широкого угла распространения луча.

Уравнение переписывается следующим образом:

$$E^{i+1} = \frac{\sum_{i=0}^n \xi_i P^i}{\sum_{i=0}^n \xi_i^* P^i} E^i \quad (7)$$

где  $\xi_0 = P^0 = 1$  и все другие коэффициенты могут быть легко определены как коэффициенты  $N$  и  $D$ . То есть, происходит факторизация

$$E^{i+1} = \frac{(1+a_1 P)(1+a_2 P)\dots(1+a_n P)}{(1+a_1^* P)(1+a_2^* P)\dots(1+a_n^* P)} E^i \quad (8)$$

Применяя параксиальное приближение, получаем уравнение

$$\frac{\partial E}{\partial x} + j \frac{1}{2k_{ref}} \frac{\partial^2 E(x,y,z)}{\partial x^2} = -j \frac{P'}{2k_{ref}}, \quad (9)$$

$$\text{где } P' = k_0^2 (n^2 - n_{ref}^2) + \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y}. \quad (10)$$

Применяется стандартная процедура Галеркина

$$\int (1 + a_j^* P') E^{i+\frac{j}{n}} dy = \int (1 + a_j P') E^{i+\frac{j-1}{n}} dy. \quad (11)$$

Одной из самых сложных проблем в закрытых каналах моделирования - это точное представление электрических характеристик строительной конструкции компонентов, как стены, окна, и т. д. Для электрических характеристик таких компонентов, особенно проводимости, характерны значительные колебания по отношению к ширине, плотности, внутренней структуре и степени однородности. В литературе предпринята попытка

оценки эквивалентных электрических характеристики наиболее распространенных строительных материалов, основанных на измерениях, которые были использованы [13, 14]. Результаты, касающиеся диэлектрической проницаемости и проводимости часто противоречат и сильно варьируют, обычно для различных конструкций.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На Рисунке 1 приведена схема помещения.

Для решения рассматриваемого уравнения диффузионного типа в существующих условиях активным образом используется конечно-элементный метод Галёркина, имеющий разрывные базисные функции, для него характерно наличие высокого порядка точности получаемых решений. Для использования метода Галеркина происходит преобразование исходного уравнения второго порядка к системе дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. С этой целью происходит введение вспомогательных потоковых переменных. Исходя из традиционного подхода к методу Галеркина решения в каждой из ячеек в основной сетке представляем как линейную комбинацию базисных функций. Распределение электромагнитного поля ищем как линейную комбинацию базисных функций по ячейкам двойственной сетки. При этом двойственная сетка содержит медианные контрольные объемы, построенные относительно вершин базовой сетки. Проведение интегрирования по объемам и граням ячеек основывается на применении квадратурных формул Гаусса.

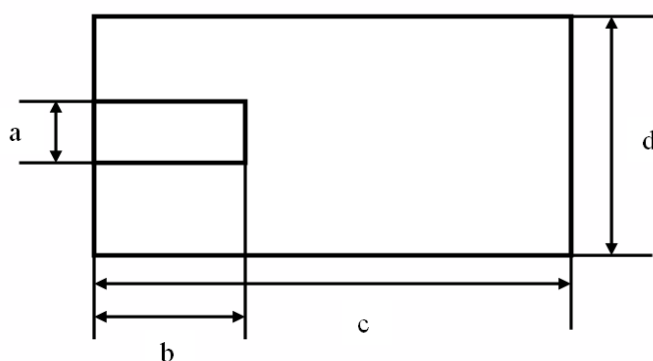


Рисунок 1– Схема помещения

На Рисунке 2 приведены результаты по затуханию электромагнитных волн внутри помещения на частоте 1.1 ГГц (кривая 1) и 2.5 ГГц (кривая 2). Размеры помещения такие:  $a=1\text{ м}$ ,  $b=2\text{ м}$ ,  $c=4\text{ м}$ ,  $d=3\text{ м}$ .

Из Рисунка 2 видно, что в области от 0 до 25° зависимость близка к линейной.

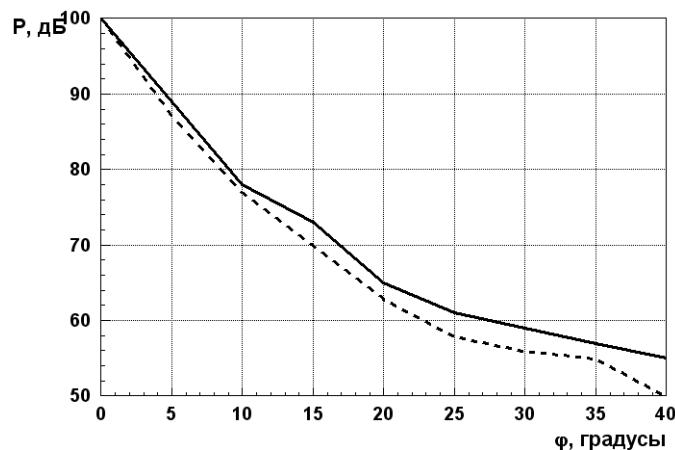


Рисунок 2– Результаты по затуханию волн

## ВЫВОДЫ

В данной работе было рассмотрено гибридное параболическое уравнение — интегральное уравнение для решения задачи о затухании электромагнитных волн в помещениях. Проанализированный подход может быть использован как один из способов при планировании электромагнитной обстановки внутри помещений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чопоров О.Н. Методы анализа значимости показателей при классификационном и прогностическом моделировании / О.Н.Чопоров, А.Н.Чупеев, С.Ю.Брегеда // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 9. С. 92-94.
2. Преображенский А.П. Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн / Преображенский А.П. // Воронеж, 2007. Издательство: Издательско-полиграфический центр "Научная книга" (Воронеж), 248 с.
3. Преображенский Ю.П. Оценка эффективности применения системы интеллектуальной поддержки принятия решений / Ю.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2009. № 5. С. 116-119.

4. Львович Я.Е. Решение задач оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн на дифракционных структурах при их проектировании / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2010. № 6. С. 255-256.
5. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
6. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов в диапазоне длин волн с использованием результатов измерения характеристик рассеяния на дискретных частотах / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2004. № 5. С. 32-35.
7. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
8. Преображенский А.П. САПР современных радиоэлектронных устройств и систем / А.П.Преображенский, Р.П.Юров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 3. С. 35-37.
9. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / О.В.Милошенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
10. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
11. Чопоров О.Н. Анализ затухания радиоволн беспроводной связи внутри зданий на основе сравнения теоретических и экспериментальных данных / О.Н.Чопоров, А.П.Преображенский, А.А.Хромых // Информация и безопасность. 2013. Т. 16. № 4. С. 584-587.
12. Душкин А.В. Декомпозиционная модель угроз безопасности информационно-телекоммуникационным системам / А.В.Душкин, О.Н.Чопоров // Информация и безопасность. 2007. Т. 10. № 1. С. 141-146.
13. Паневин Р.Ю., Реализация транслятора имитационно-семантического моделирования / Р.Ю.Паневин, Ю.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2009. № 5. С. 057-060.

14. Воронов А.А. Обеспечение системы управления рисками при возникновении угроз информационной безопасности / А.А.Воронов, И.Я.Львович, Ю.П.Преображенский, В.А.Воронов // Информация и безопасность. 2006. Т. 9. № 2. С. 8-11.

T.V. Glotova

**THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF SCATTERING OF  
ELECTROMAGNETIC WAVES INDOORS ON THE BASIS OF THE  
INTEGRO-PARABOLIC APPROACH**

*Voronezh Institute of High Technologies*

*This paper examines the possibility of using parabolic integral equation for modeling the propagation of electromagnetic waves in space. This method is based on parabolic equation that is able to provide a good approximation of the electromagnetic field and get the results because of the propagation of rays was on the long ways. The test was conducted for computer experiment office space at frequencies of 1.1 GHz and 2.5 GHz. The approximation accuracy was in the expected range, and in this way retains all the advantages of wave methods, and also it has very reasonable requirements to computing resources.*

**Keywords:** propagation of electromagnetic waves, optimization, modeling, parabolic equation.