

УДК 621.396

Д.Г.Панарин, А.В.Данилова
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
РАДИОСИГНАЛОВ В ПОМЕЩЕНИИ НА ОСНОВЕ
КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОГО МЕТОДА ВО ВРЕМЕННОЙ
ОБЛАСТИ**

*Воронежский институт высоких технологий
ОАО Концерн «Созвездие»*

В статье рассматриваются особенности решения уравнений Максвелла во временной области. Рассмотрено использование метода конечных разностей во временной области для оценки степени затухания сигнала при его распространении внутри помещения. Из-за того, что существуют ограничения на объем доступной памяти, нами осуществлялось моделирование для двумерных задач, в которых рассматривалась вертикальная поляризация электромагнитной волны. Приведены результаты численных расчетов, демонстрирующие работоспособность данного метода. Результаты, могут быть полезными при определении оптимального расположения антенны, чтобы обеспечить требуемый уровень сигнала на заданных расстояниях, а также для того, чтобы исследовать закономерности затухания сигнала при статистическом анализе.

Ключевые слова: метод конечных разностей во временной области, распространение радиоволн в помещениях, затухание сигналов.

В последнее время наблюдается увеличение числа исследований, связанных с разработкой беспроводных систем передачи внутри помещений и практическим применением радиосистем в локальных сетях [1-3]. Большинство усилий разработчиков было ориентировано на рассмотрение статистических характеристик сигналов или обобщение способов трассировки лучей для различных случаев, сложных с точки зрения вычислений, которые возникают при рассмотрении распространения электромагнитных волн в помещениях, тоннелях и т.д. [4-6]. Закономерности распространения электромагнитных волн в помещениях связаны со множеством труднопредсказуемых факторов, которые зависят, в частности, от характеристик строительных конструкций помещения и рабочих частот [7, 8]. Наличие множества препятствий и рассеивателей приводит к появлению переотраженных сигналов и явлению затухания полезного сигнала, таким образом, эффективность систем связи ограничивается, вследствие того, что уменьшается область покрытия для сигнала. С другой стороны, дисперсия, появляющаяся при задержке распространения сигналов, ведет к ограничению максимальной скорости передачи данных, которая может быть достигнута в беспроводном канале, который имеет определенные ограничения в пространстве. Требуется использование специальных подходов для оптимизации систем с большим числом параметров [9-11].

В данной работе исследуются возможности численного метода, который может использоваться для моделирования распространения электромагнитных волн в помещениях.

Путем преобразования уравнений Максвелла во временной области в систему дифференциальных уравнений при заданных параметрах электромагнитного поля на элементарную решетку, используется методика, базирующаяся на методе конечных разностей во временной области, что обеспечивает возможности простого и эффективного моделирования распределения поля внутри помещения.

Система дифференциальных уравнений затем решается с определенным временным шагом, поочередно проводится расчет электрического и магнитного полей черезстрочным образом в пространственных ячейках сетки. При задании расположения источника электромагнитных волн и полного описания окружающей среды с точки зрения ее диэлектрических параметров (диэлектрической проницаемости (ϵ), магнитной проницаемости (μ), электропроводности (σ)), этот метод обеспечивает возможности для оценки характеристик электрического и магнитного полей [12,13].

Следовательно, в рамках данного подхода, существуют возможности для прогнозирования области покрытия сигнала и предельных значений скоростей передачи данных на основе проведения оценок, как для случая стационарного распространения сигналов, так и для случаев импульсных откликов, соответственно.

Метод конечных разностей во временной области используется исследователями довольно давно, хотя существует множество публикаций, связанных попытками расширения его возможностей.

С появлением мощных компьютеров, которые имеют возможности по обработке и хранению больших объемов информации, наблюдается конкуренция его с более классическими методами, например с методом конечных элементов (МКЭ). Метод конечных разностей во временной области был введен Уее в 1966 году [14] и имеет два преимущества по сравнению с ранее использованными подходами.

Во-первых, это является самым главным, он прост в исполнении, неважно, насколько сложные структуры анализируются, какие электрические параметры структур (ϵ и σ) назначаются для каждой точки решетки. Во-вторых, требуемая память и время выполнения увеличиваться лишь линейным образом при увеличении общего количества компонентов поля.

Если мы будем рассматривать уравнения Максвелла, то записывается следующая система уравнений

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}, \nabla \cdot \vec{D} = \rho, \nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (1)$$

При записи уравнений в виде дифференциальных соотношений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right), \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right), \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right). \end{aligned} \quad (2)$$

В данной системе уравнений $\varepsilon = \varepsilon_k \varepsilon_0$, $\mu = \mu_k \mu_0$, если рассматривается свободное пространство, то $\varepsilon_k = 1$, $\mu_k = 1$, $\sigma = 0$. Для того, чтобы решить систему уравнений Максвелла численным образом Yee [14] предложил разбивать пространство на параллелепипеды с размерами δx , δy , δz .

Любая функция, зависящая от пространственных координат и времени, записывается следующим образом

$$F^n(i, j, k) = F(i\delta x, j\delta y, k\delta z, n\delta t), \quad (3)$$

а частные производные по пространственным координатам и времени вычисляются через аппроксимацию центральных разниц

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} &= \frac{F^n(i, j, k) - F^n(i, j, k)}{\delta x} + O(\delta x^2), \\ \frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} &= \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\delta t} + O(\delta t^2), \end{aligned} \quad (4)$$

где δt представляет собой интервал дискретизации по времени.

Для того, чтобы применить принцип эквивалентности в методе конечных разностей мы рассмотрим поверхность, которая имеет форму сфероида с радиусом, соответствующим условиям дальней зоны, внутри

нее находится источник электромагнитных волн. С целью перехода от сферических координат к декартовым вводятся фиктивные источники

$$\begin{bmatrix} j_{0,mx} \\ j_{0,my} \\ j_{0,mz} \end{bmatrix} = \frac{E_{\theta}(\theta, \varphi)}{\Delta L} \begin{bmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} j_{0,ex} \\ j_{0,ey} \\ j_{0,ez} \end{bmatrix} = \frac{H_{\theta}(\theta, \varphi)}{\Delta L} \begin{bmatrix} -\cos\theta\cos\varphi \\ -\cos\theta\sin\varphi \\ \sin\theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где ΔL является размером ячейки в направлении \hat{n} .

В результате полное поле на анализируемой поверхности определяется на основе следующих выражений

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(i_s, j_s, k_s) &= H_x^{n-1/2}(i_s, j_s, k_s) + \\ &+ HM_z (E_y^n(i_s, j_s, k_s) - E_y^n(i_s, j_s, k_s - 1)) + \\ &+ HM_y (E_z^n(i_s, j_s - 1, k_s) - E_z^n(i_s, j_s, k_s)) + \\ &+ \left(\frac{\delta t}{\mu_0}\right) j_{mx}^n(i_s, j_s, k_s), \quad (6) \\ E_x^{n+1}(i_s, j_s, k_s) &= E_x^n(i_s, j_s, k_s) + \\ &+ EM_y (H_y^{n+1/2}(i_s, j_s + 1, k_s) - H_y^{n+1/2}(i_s, j_s, k_s)) + \\ &+ EM_z (H_z^{n+1/2}(i_s, j_s, k_s) - H_z^{n+1/2}(i_s, j_s, k_s + 1)) - \\ &- \left(\frac{\delta t}{\varepsilon_0}\right) j_{ex}^{n+1/2}(i_s, j_s, k_s). \end{aligned}$$

Другие компоненты для полей получаются аналогичным образом при рассмотрении соответствующих фиктивных источников.

Выбор значений ΔL и δt влияет на стабильность работы алгоритма и точность вычислений, которые производятся на его основе. Для того, чтобы обеспечить необходимую точность вычисления производных электромагнитного поля, необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10}, \quad (7)$$

тогда ошибка в расчетах не должна быть более, чем 6%.

Значение ΔL должно быть достаточно малым, чтобы достичь требуемой точности решения задачи. Условие устойчивости решения требует, чтобы ошибки при численном решении задач не возрастали от одной итерации к другой.

Было продемонстрировано в работе [15], что ограничение для ΔL и δt определяется согласно следующему выражению

$$c \cdot \delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2}}}, \quad (8)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в данной среде.

Из-за того, что существуют ограничения на объем доступной памяти [16-18], нами осуществлялось моделирование для двумерных задач, в которых рассматривалась вертикальная поляризация электромагнитной волны. В данном случае не рассматривается зависимость от координаты Z на основе метода конечных разностей проводился расчет составляющих E_z , H_x и H_y . В таком случае поверхность Гюйгенса будет представлять собой круг вместо сферы.

При проведении моделирования мы полагали, что обеспечены условия, при которых вклад в рассеянное поле от потолка и пола является минимальным. В этой связи передатчик находится в центре помещения и высота антенны равна примерно половине высоты помещения, которая составляет около 3 метров. Размеры комнаты составляли 7м×4м.

Антенна является всенаправленным вертикальным четвертьволновым диполем, ширина облучающего импульса составляла 7 нс. Параметры бетона были следующими: $m=1$, $\varepsilon=1$, $\sigma=10^{-5}$ См/м. На Рисунке 1 приведены данные по затуханию сигнала в зависимости от расстояния.

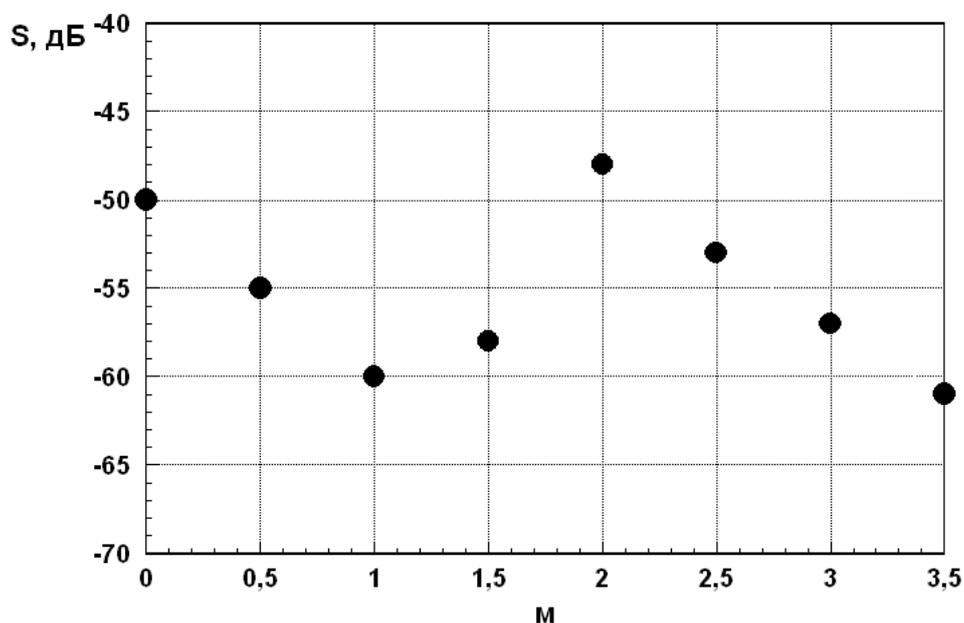


Рисунок 1 – Зависимость затухания сигнала от расстояния.

Выводы. Рассмотрено использование метода конечных разностей во временной области для оценки степени затухания сигнала при его распространении внутри помещения. Приведены результаты численных расчетов, демонстрирующие работоспособность данного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
2. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети wi-fi / Е.Н.Казаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1. С. 13.
3. 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.
4. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Я.А.Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
5. Косилов А.Т. Методы расчета радиолокационных характеристик объектов / А.Т.Косилов, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 68-71.
6. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
7. 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.
8. Львович Я.Е. Разработка системы автоматизированного проектирования беспроводных систем связи / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, С.О.Головинов // Телекоммуникации. 2010. № 11. С. 2-6.
9. Подвальный С.Л. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы / С.Л.Подвальный, Е.М.Васильев // Управление большими системами: сборник трудов. 2014. № 48. С. 6-58.
10. Подвальный С.Л. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации / С.Л.Подвальный, Е.М.Васильев // В сборнике: XII всероссийское

- совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 996-1007.
11. Подвальный С.Л. Многоальтернативное поведение в критических режимах как модель биологического процесса принятия решений / С.Л.Подвальный, Е.М.Васильев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2015. № 2. С. 105-113.
 12. http://fpribor.ru/uploadedFiles/files/FDTD_2D.pdf
 13. <http://www.rodnik.ru/upload/iblock/0fb/0fb0081b7703a1c831102ce5bd3769d5.pdf>
 14. Yee K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K.S.Yee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, May 1966, Vol. AP-14, pp.302-307.
 15. Taflove A. Review of FD-TD Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Scattering and Radar Cross Section / A.Taflove, K.R.Umashankar // Proceedings of IEEE, Vol. 5, May 1989, pp. 682-699.
 16. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн / С.С.Щербатых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1. С. 10.
 17. Лавлинская О. Ю. Технологии облачных вычислений и их применение в решении практических задач / О. Ю. Лавлинская, Т. М. Янкис // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 33-36.
 18. Часовской А. А. Оценка перспектив внедрения облачных вычислений на предприятиях и в государственном секторе на примере ФРГ / А. А. Часовской, Е. В. Алференко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 94-97.

D.G. Panarin, A.V. Danilova
**MODELING OF RADIO PROPAGATION IN INDOOR-BASED
FINITE-DIFFERENCE METHOD IN TIME DOMAIN**

*Voronezh Institute of high technologies
JSC Concern "Sozvezdie"*

The paper discusses the features of the solutions of Maxwell's equations in the time domain. The authors discussed the use of finite difference method in time domain to evaluate the extent of signal attenuation during its propagation inside the building. Due to the fact that there are restrictions on the amount of available memory, we carried out simulations for two-dimensional problems, which dealt with the vertical polarization of the electromagnetic wave. The results of numerical calculations demonstrating the efficiency of this method. The results can be useful in determining the optimal location of the antenna to provide required signal level at any distances, and also to explore the patterns of signal attenuation in a statistical analysis.

Keywords: finite difference time domain, the propagation of radio waves in space, the attenuation of the signals.

REFERENCES

1. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V. Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 49-50.
2. Kazakov E.N. Razrabotka i programmaya realizatsii algoritma otsenki urovnya signala v seti wi-fi / E.N. Kazakov // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No. 1. pp. 13.
3. Miloshenko O.V. Metody otsenki kharakteristik rasprostraneniya radiovoln v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi / O.V. Miloshenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 60-62.
4. Mishin Ya.A. O sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya v besprovodnykh setyakh / Ya.A. Mishin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No. 10. pp. 153-156.
5. Kosilov A.T. Metody rascheta radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov / A.T. Kosilov, A.P. Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 1. No. 8. pp. 68-71.
6. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi / S.O. Golovinov, A.A. Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 13-14.
7. Choporov O.N. Analiz zatukhaniya radiovoln besprovodnoy svyazi vnutri zdaniy na osnove sravneniya teoreticheskikh i eksperimental'nykh dannykh / O.N. Choporov, A.P. Preobrazhenskiy, A.A. Khromykh // Informatsiya i bezopasnost'. 2013. T. 16. No. 4. pp. 584-587.

8. L'vovich Ya.E. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya besprovodnykh sistem svyazi / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, S.O.Golovinov // Telekommunikatsii. 2010. No. 11. pp. 2-6.
9. Podval'nyy S.L. Mnogoal'ternativnoe upravlenie otkrytymi sistemami: kontseptsiya, sostoyanie i perspektivy / S.L.Podval'nyy, E.M.Vasil'ev // Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov. 2014. No. 48. pp. 6-58.
10. Podval'nyy S.L. Intellektual'nye sistemy mnogoal'ternativnogo upravleniya: printsipy postroeniya i puti realizatsii / S.L.Podval'nyy, E.M.Vasil'ev // V sbornike: XII vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014 Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2014. pp. 996-1007.
11. Podval'nyy S.L. Mnogoal'ternativnoe povedenie v kriticheskikh rezhimakh kak model' biologicheskogo protsessa prinyatiya resheniy / S.L.Podval'nyy, E.M.Vasil'ev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii. 2015. No. 2. pp. 105-113.
12. http://fpribor.ru/uploadedFiles/files/FDTD_2D.pdf
13. <http://www.rodnik.ru/upload/iblock/0fb/0fb0081b7703a1c831102ce5bd3769d5.pdf>
14. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K.S.Yee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, May 1966, Vol. AP-14, pp.302-307.
15. Taflove A. Review of FD-TD Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Scattering and Radar Cross Section / A.Taflove, K.R.Umashankar // Proceedings of IEEE, Vol. 5, May 1989, pp. 682-699.
16. Shcherbatykh S.S. Metod integral'nykh uravneniy kak osnovnoy sposob analiza v SAPR antenn / S.S.Shcherbatykh // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No. 1. pp. 10.
17. Lavlinskaya O. Yu. Tekhnologii oblachnykh vychisleniy i ikh primenenie v reshenii prakticheskikh zadach / O. Yu. Lavlinskaya, T. M. Yankis // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 33-36.
18. Chasovskoy A. A. Otsenka perspektiv vnedreniya oblachnykh vychisleniy na predpriyatiyakh i v gosudarstvennom sektore na primere FRG / A. A. Chasovskoy, E. V. Alferenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 94-97.