

УДК 621.396

В.Г.Панарин, А.Г.Юрочкин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ВОЛН В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ НА  
ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА**

*Воронежский институт высоких технологий*

*Воронежский филиал Российской Академии государственной службы при  
Президенте Российской Федерации*

*В работе рассматривается комбинированная модель дифракции электромагнитных волн на зданиях, находящихся в городской застройке, базирующаяся на основе однородной теории дифракции. Известно, что существуют проблемы при использовании однородной теории дифракции для областей, в которых находится большое число клиньев. При математическом моделировании авторами были учтены члены высокого порядка в дифрагированном поле, что дает возможности для получения более точных результатов, то есть, используется комбинированная модель, включающая в себя физическую оптику и однородную теорию дифракции. Подобные модели могут найти применение при разработке теоретических моделей для прогнозирования более точным образом потерь сигнала в городских условиях, при рассмотрении распространения радиоволн в нескольких зданиях.*

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, теория дифракции, электромагнитное поле, физическая оптика.

Разработка моделей распространения радиоволн играет важную роль при планировании, анализе и оптимизации беспроводных сетей. Наиболее существенное влияние на распространение сигнала в беспроводных сетях и степень его затухания можно наблюдать в пределах города [1-5].

В этой связи определение достаточно адекватных моделей при прогнозировании воздействия строений на распространение радиоволн является весьма важной задачей для разработчиков различных беспроводных сетей [6-10].

Кроме того, для того, чтобы разработать модель распространения радиоволн для городских беспроводных средств коммуникации, требуется провести расчеты по зданиям, которые дают разное затухание при дифракционных процессах [11].

Для этих целей многими исследователями рассматривается в модели падающая плоская волна для того, чтобы предсказать затухание радиоволн вследствие многократных дифракционных процессов.

Были введены различные модели, например, Окамуры, Хата, Cost-модель, бывают случаи, когда прямой численный метод применяется для оценки интеграл Гюйгенса - Кирхгофа[12]. Однако этот подход имеет некоторые ограничения, например, его нельзя использовать в тех случаях, когда антенна базовой станции находится ниже уровня крыши.

Такой вариант является важным с точки зрения предсказания пути, по которому распространяется электромагнитная волна, особенно когда речь идет о интерференции и многолучевых процессах, которые являются характерными для мобильной связи.

Кроме того, подобная методика не подходит для случаев, когда диапазон изменения пути радиоволны является небольшим. Считается также, что в модели рассматривается большое число строений, особенно при малых значениях угла падения, что ведет к проблемам при численном решении. Можно применять метод интегральных уравнений [13], кроме того, вычисления могут быть ускорены на основе специальных подходов [14, 15].

На Рисунке 1 приведена схема распространения падающей электромагнитной волны в городской застройке, в заданной точке наблюдения рассматривается рассеянное поле  $E$ .

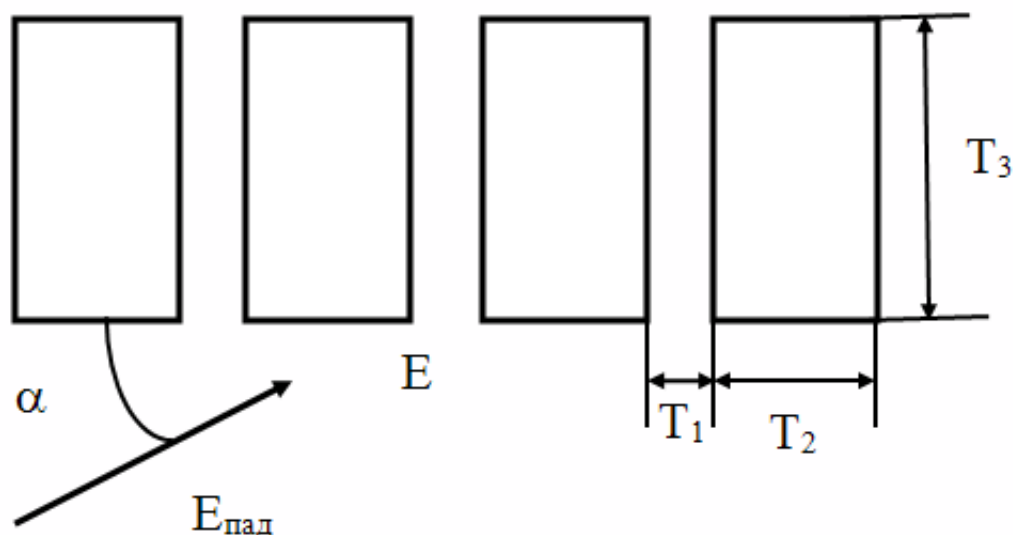


Рисунок 1 – Схема распространения падающей электромагнитной волны в городской застройке

Дифрагированное поле на краевой структуре рассчитывается на основе следующего выражения [16]:

$$E(r) = E_{nad}(r_p) Dk \sqrt{\frac{\rho_{nad}}{r(\rho_{nad}+r)}} \exp(-jkz). \quad (1)$$

$E_{nad}(r_p)$  – это падающее поле в точке  $r_p$ ,  $Dk$  – это дифракционная матрица,  $r$  – расстояние точкой наблюдения и точками дифракции,  $\rho_{nad}$  –

радиус падающей электромагнитной волны в плоскости падения. Когда фронт падающей электромагнитной волны является сферической, он совпадает с расстоянием между точкой дифракции и антенной передатчика. Для того, чтобы вычислить дифракционный коэффициент на клине, мы используем эвристические коэффициенты:

$$D(\theta, \theta', L, n, \alpha_0) = D_1 + D_2 + G(D_3 + D_4). \quad (2)$$

где

$$D_1 = \frac{-\exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right)}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi+(\theta-\theta')}{2n}\right) P(kLa^+(\theta-\theta')), \quad (2.1)$$

$$D_2 = \frac{-\exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right)}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi+(\theta-\theta')}{2n}\right) P(kLa^-(\theta-\theta')), \quad (2.2)$$

$$D_3 = \frac{-\exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right)}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi+(\theta+\theta')}{2n}\right) P(kLa^+(\theta-\theta')), \quad (2.3)$$

$$D_4 = \frac{-\exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right)}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi+(\theta+\theta')}{2n}\right) P(kLa^-(\theta-\theta')). \quad (2.4)$$

Функция перехода Френеля  $P(x)$  определяется на основе следующего выражения[17]:

$$P(x) = 2j\sqrt{x}\exp(jx) \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-j\vartheta^2) d\vartheta. \quad (3)$$

Расположение углов  $\theta$  и  $\theta'$  приведено на Рисунке 2. Волновое число – это  $k$ , число  $n$  задается таким образом:

$$n = \frac{2\pi-\alpha}{\pi}, \quad (4)$$

$\alpha$  – это внутренний угол клина.

В рассматриваемых выражениях  $L$  является параметром расстояния, рассчитывается так

$$L = \frac{r(\rho_{\text{пад},1}+r)\rho_{\text{пад},2}\rho_{\text{пад},3}}{\rho_{\text{пад},1}(\rho_{\text{пад},2}+r)(\rho_{\text{пад},3}+r)}, \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{пад},2}$  и  $\rho_{\text{пад},3}$  – радиус закругления фронта падающей электромагнитной волны в точке дифракции. Для сферического фронта падающей электромагнитной волны имеем

$$\rho_{\text{пад},1} = \rho_{\text{пад},2} = \rho_{\text{пад},3} = r', \quad (6)$$

при этом параметр расстояния рассчитывается на основе формулы:

$$L = \frac{rr'}{r+r'}, \quad (7)$$

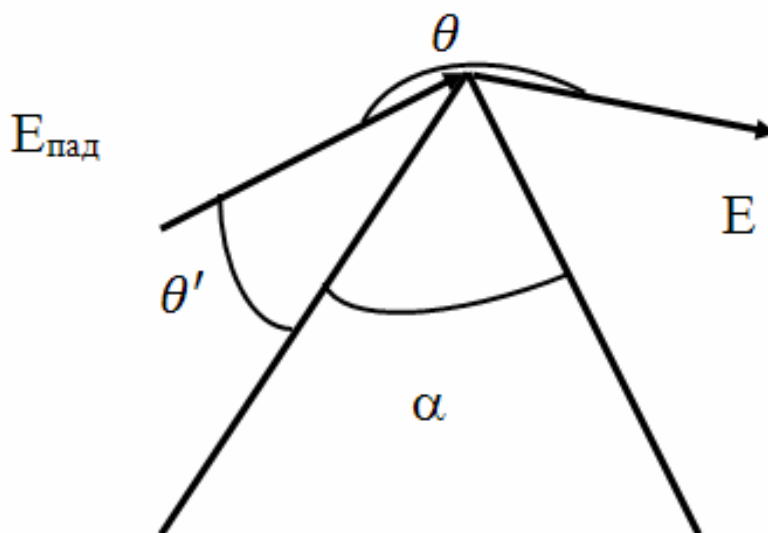


Рисунок 2 – Схема рассеяния электромагнитной волны на клине

Функцию  $a^{\mp}$  рассчитываем следующим образом:

$$a^{\mp} = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\mp} - \delta^{\mp}}{2}\right), \quad (8)$$

где  $\theta^{\mp} = \theta \mp \theta'$  и  $N^{\mp}$  – целые числа, которые удовлетворяют следующим выражениям:

$$2n\pi N^+ - \delta^{\mp} = \pi, \quad (9)$$

$$2n\pi N^- - \delta^{\mp} = -\pi a^{\mp} = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\mp} - \delta^{\mp}}{2}\right), \quad (10)$$

$G$  является коэффициентом отражения Френеля клина.

На основе рассмотренного выше подхода проводилось моделирование процессов дифракции. На Рисунке 3 Приведен пример расчета рассеянного поля в зависимости от числа зданий. При этом параметрами задачи были следующие:  $T_1=30\lambda$ ,  $T_2=50\lambda$ ,  $T_3=60\lambda$ .

Использовался комбинированный подход, в котором описание рассеяния на углах зданий проводилось на основе лучевого подхода, а описание рассеяния на плоских поверхностях проводилось на основе метода физической оптики.



Рисунок 3 – Зависимость рассеянного поля от числа зданий

Использование лучевого метода имеет определенные преимущества по сравнению с методом интегральных уравнений [18-22], поскольку требуется меньшие объемы оперативной памяти при расчетах.

Заключение. Рассмотрены основные соотношения, описывающие процессы дифракции электромагнитной волны на клиновидных структурах. На основе комбинированного алгоритма проведена оценка модуля рассеянного поля в зависимости от числа зданий в городской застройке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Львович Я.Е. Исследование метода трассировки лучей при проектировании беспроводных систем связи / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, С.О.Головинов // Информационные технологии. 2011. № 8. С. 40-42.
3. Головинов С.О. Моделирование распространения миллиметровых волн в городской застройке на основе комбинированного алгоритма / С.О.Головинов, А.П.Преображенский, И.Я.Львович // Телекоммуникации. 2010. № 7. С. 20-23.
4. Львович Я.Е. Исследование методов оптимизации при проектировании систем радиосвязи / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, С.О.Головинов // Теория и техника радиосвязи. 2011. № 1. С. 5-9.
5. Львович Я.Е. Исследование метода трассировки лучей для проектирования беспроводных систем связи / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, С.О.Головинов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. Т. 17. № 1. С. 32-35.
6. 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.
7. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Я.А.Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
8. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
9. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
10. 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(12). С. 13.
11. Zhang W. Fast two-dimensional diffraction modeling for site-specific propagation prediction in urban microcellular environments/ W. Zhang //

- IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Mar . 2000, Vol. 49, No. 2, pp.428-436.
12. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 53-56.
  13. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн / С.С.Щербатых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1(12). С. 10.
  14. 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. № 16. С. 94-97.
  15. 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. № 16. С. 33-36.
  16. Боровиков В. А. Геометрическая теория дифракции. / В. А. Боровиков, Б. Е. Кинбер //Москва, Связь, 1978, 247 с.
  17. [http://know.alnam.ru/book\\_dfr.php?id=170](http://know.alnam.ru/book_dfr.php?id=170).
  18. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - № 1. - С. 107-116.
  19. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov / Information Technology Applications. - 2016. - № 1. - С. 117-125.
  20. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния волн на полой структуре с поглощающим материалом / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 8.1 (68). - С. 523-526.
  21. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на несимметричном объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 8.1 (68). - С. 526-531.
  22. Преображенский А.П. Исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн для полой структуры в объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 4.1 (64). - С. 548-553.

V.G. Panarin, A.G.Yurochkin  
**MODELING OF ELECTROMAGNETIC WAVE SCATTERING  
BASED ON THE COMBINED METHOD IN URBAN AREAS**

*Voronezh Institute of high technologies  
Voronezh branch of the Russian Academy of state service under the  
President of the Russian Federation*

*The paper discusses a combined model of electromagnetic wave diffraction by buildings in urban areas, is based on the uniform theory of diffraction. It is known that there are problems when using the uniform theory of diffraction for areas in which there is a large number of wedges. In the present work is the consideration of the members of the high-order diffracted field, giving opportunities for more accurate results, that is, using a combined model with physical optics and uniform theory of diffraction. Such models may find applications in the development of theoretical models to predict more accurate way signal loss in urban environments when considering the propagation in several buildings.*

**Keywords:** radiowave propagation, diffraction theory, electromagnetic field, physical optics.

**REFERENCES**

1. 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.
2. L'vovich Ya.E. Issledovanie metoda trassirovki luchey pri proektirovanii besprovodnykh sistem svyazi / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Ppeobpazhenskiy, S.O.Golovinov // Informatsionnye tekhnologii. 2011. No.8. pp. 40-42.
3. Golovinov S.O. Modelirovanie rasprostraneniya millimetrovykh voln v gorodskoy zastroyke na osnove kombinirovannogo algoritma / S.O.Golovinov, A.P.Preobrazhenskiy, I.Ya.L'vovich // Telekommunikatsii. 2010. No.7. pp. 20-23.
4. L'vovich Ya.E. Issledovanie metodov optimizatsii pri proektirovanii sistem radiosvyazi / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, S.O.Golovinov // Teoriya i tekhnika radiosvyazi. 2011. No.1. pp. 5-9.
5. L'vovich Ya.E. Issledovanie metoda trassirovki luchey dlya proektirovaniya besprovodnykh sistem svyazi / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, S.O.Golovinov // Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2012. Vol. 17. No.1. pp. 32-35.
6. 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.
7. Mishin Ya.A. O sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya v besprovodnykh setyakh / Ya.A.Mishin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No.10. pp. 153-156.



8. 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.
9. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V.Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No.9. pp. 49-50.
10. 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(12). pp. 13.
11. Zhang W. Fast two-dimensional diffraction modeling for site-specific propagation prediction in urban microcellular environments/ W. Zhang // IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Mar . 2000, Vol. 49, No. 2, pp.428-436.
12. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.16. pp. 53-56.
13. 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(12). pp. 10.
14. 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.16. pp. 94-97.
15. 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.16. pp. 33-36.
16. Borovikov V. A. Geometricheskaya teoriya difraktsii. / V. A. Borovikov, B. E. Kinber //Moskva, Svyaz', 1978, 247 p.
17. [http://know.alnam.ru/book\\_dfr.php?id=170](http://know.alnam.ru/book_dfr.php?id=170).
18. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - No.1. - pp. 107-116.
19. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov / Information Technology Applications. - 2016. - No.1. - pp. 117-125.
20. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya voln na poloy strukture s pogloshchayushchim materialom / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.8.1 (68). - pp. 523-526.

21. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnykh voln na nesimmetrichnom ob"ekte / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.8.1 (68). - pp. 526-531.
22. Preobrazhenskiy A.P. Issledovanie kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln dlya poloy struktury v ob"ekte / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.4.1 (64). - pp. 548-553.