

УДК 621.396

А.Р.Алимбеков, Е.А.Авдеенко, В.В.Шевелев  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН СОТОВЫХ  
СИСТЕМ СВЯЗИ НА ЭЛЕМЕНТАХ ЗДАНИЙ**

*Воронежский институт высоких технологий  
ОАО концерн "Созвездие"  
Российский новый университет*

*В работе рассматривается задача рассеяния электромагнитных волн в сотовых системах связи на элементах зданий. В качестве базового метода предлагается использовать лучевой подход. Даны основные шаги алгоритма расчета суммарного затухания радиосигнала вызванного дифракцией на углах зданий. Потери, вызванные отражением радиосигнала от земли, рассчитываются на основе коэффициентов Френеля для плоской волны. Указаны входные параметры для расчета. Приведена схема модуля расчета полей, рассеянных на зданиях, в которой используется блок оптимизации. Дана классификация методов оптимизации, используемых при оптимизации систем связи. Методы, связанные с безусловной оптимизацией разделяются на: одномерный случай, многомерный случай. Методы условной оптимизации разделяются на такие: оптимизация при линейных ограничениях, оптимизация при нелинейных ограничениях.*

**Ключевые слова:** дифракция, электромагнитная волна, сотовая связь, рассеяние.

Моделирование процессов рассеяния электромагнитных волн на разных объектах со сложной формой представляет большой практический интерес, вследствие того, что требуется решать задачи, относящиеся к радиолокационному распознаванию, электромагнитной совместимости и др. [1, 2].

В ряде случаев, если рассматриваются объекты, имеющие простую форму, достаточно применять аналитические формулы, позволяющие давать довольно неплохие оценки значений характеристик рассеяния [3].

Методики, которые связаны с трассировкой лучей, по своей сути детерминированные, они применялись в области компьютерной графики, чтобы обеспечить визуализацию по реалистичным изображениям [1, 4]. В таких методах применяют разложение электромагнитных полей на лучи и идет поиск лучей, дающих соединение базовых и мобильных станций, при учете разных особенностей городской застройки [5].

Есть зависимость используемых алгоритмов от того, какие лучи выбирают. Отражение лучей от стен зданий при распространении их к мобильным станциям происходит на основе зеркального или диффузного способа.

Определим выражения для расчёта функций первой группы лучей (лучей прямого распространения, не испытывающих переотражений).

Функция распространения состоящей из группы лучей  $R-R$  между передающей и приёмной антеннами может быть записана в виде [6]

$$H_{V,H} = \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \right) \cdot \sum_{i=(m,S,n,u,g)} \left[ f_B(\theta_i, \phi_i) \cdot f_M(\Theta_i, \Phi_i) \cdot (\mathfrak{R}_{V,H}^i)^g \cdot (R_{H,V}^{in})^n \cdot (R_{H,V}^{im})^m \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_i}}{r_i} \right] \quad (1)$$

где  $i$ -му лучу соответствует набор из пяти целых чисел ( $m, S, n, u, g$ );  $m$  и  $n$  – количество отражений от стен вдоль главной и второстепенной улиц, соответственно;  $g = \{0, 1\}$  для отражения от земли;  $\lambda$  – длина волны;  $k$  – волновое число;  $\mathfrak{R}_{V,H}^i$ ,  $R_{H,V}^{im}$  и  $R_{H,V}^{in}$  – известные коэффициенты отражения Френеля от земли и стен на главной и второстепенной улицах, соответственно, с вертикальной и горизонтальной поляризации.

$f_B(\theta, \phi)$  и  $f_M(\Theta, \Phi)$  диаграммы направленности с учётом поляризации для БС и МС, соответственно. Углы  $(\theta, \Theta)$  и  $(\phi, \Phi)$  являются углами в вертикальной и горизонтальной плоскостях для БС и МС, соответственно [6].

Функция распространения, состоящая из лучей второй группы (испытывающих явления отражения-дифракции-отражения перед приёмной антенной), может быть вычислена [1]

$$H_{V,H} = \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \right) \cdot \sum_{i=(m,S,n,u,g,C)} \left[ f_B(\theta_i, \phi_i) \cdot f_M(\Theta_i, \Phi_i) \cdot (\mathfrak{R}_{V,H}^i)^g \cdot (R_{H,V}^{im})^m \times \right. \\ \left. \times \overline{D_{V,H}^i} \cdot (R_{H,V}^{in})^n \cdot \frac{1}{\sqrt{D_1 \cdot D_2 \cdot (D_1 + D_2)}} \cdot e^{-j \cdot k \cdot (D_1 + D_2)} \right] \quad (2)$$

где  $\overline{D_{H,V}^i}$  является коэффициентом дифракции на вертикальном краю угла здания,  $D_{1,2}$  – расстояния от БС и МС до места дифракции, соответственно. Остальные параметры (1) соответствуют параметрам, приведенным в (2).

Рассмотрим алгоритм расчета суммарного затухания радиосигнала вызванного дифракцией на углах зданий (1)-(2).

Шаг 1. Выбрать первый угол, на котором необходимо рассчитать затухание вызванное дифракцией.

Шаг 2. Расчет потерь при отражении от земли для  $i$ -го луча между БС и МС.

Шаг 3. Потери, вызванные отражением радиосигнала от земли, рассчитываются на основе коэффициентов Френеля для плоской волны. Шаг 3. Расчет потерь при отражении от стен зданий для  $i$ -го луча между БС и МС.

Шаг 4. Расчет расстояния от БС и МС до точки дифракции.

Для расчета расстояния от БС и МС до места дифракции ( $D_{1,2}$ ), с учетом высоты, необходимо воспользоваться выражением (2) [6].

$$D_{1,2} = \sqrt{d_{1,2}^2 + (h_{B,M} - H_{corner})^2} \quad (2.22)$$

Входными параметрами будут являться:

- высота базовой станции ( $h_B$ ) для расчета  $D_1$ .
- высота мобильной станции ( $h_M$ ) для расчета  $D_2$ ;
- $H_{corner}$  - высота места дифракции на углу здания;
- $d_1$  - расстояние в горизонтальной плоскости от БС до угла дифрагирования;
- $d_2$  - расстояние в горизонтальной плоскости от МС до угла дифрагирования.

Параметры  $H_{corner}$ ,  $d_1$  и  $d_2$  –определяются на основе выражений [6]. При этом в качестве входных параметров используются:

- расстояние вдоль главной улицы до МС ( $x$ );
- расстояние вдоль второстепенной улицы до МС ( $y$ );
- $x_1$  - координата МС;
- $y_1$  - координата БС;
- количество отражений вдоль главной улицы ( $m$ );
- количество отражений вдоль второстепенной улицы ( $n$ );
- ширина главной улицы ( $\omega_1$ );
- ширина второстепенной улицы ( $\omega_2$ );
- высота мобильной станции ( $h_M$ );
- высота базовой станции ( $h_B$ ).

$$d_1 = \sqrt{X_C^2 + \left( (-1)^s \cdot \left( (m + (-1)^s \cdot \Xi(m)) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^s \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - Y_C \right)^2} \quad (3)$$

$$d_2 = \sqrt{(y - Y_C)^2 + \left( (-1)^u \cdot \left( (n + (-1)^u \cdot \Xi(n)) \cdot \omega_2 + (-1)^u (x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1) \right) - X_C \right)^2} \quad (4)$$

$$H_{corner} = \begin{cases} \frac{d_2 \cdot h_B + (-1)^s \cdot d_1 \cdot h_M}{d_1 + d_2}, & \forall d_2 \cdot h_B > d_1 \cdot h_M \\ \frac{(-1)^s \cdot d_2 \cdot h_B + d_1 \cdot h_M}{d_1 + d_2}, & \forall d_2 \cdot h_B < d_1 \cdot h_M \end{cases} \quad (5)$$

Шаг 5. Расчет коэффициента дифракции.

Коэффициент дифракции необходим для определения амплитуды и фазы каждого луча, который приходит в точку приема.

Расчет коэффициента дифракции  $\overline{D_{H,V}^i}$  на вертикальном углу здания, выполняется на основе геометрической теории дифракции для клиньев [7-9].

Для расчета коэффициента дифракции в случае распространения нормальной плоской волны общая формула выглядит следующим образом:

$$\overline{D_{H,V}^i} = \Gamma_1 \cdot D^{(1)} + \Gamma_2 \cdot D^{(2)} + \Gamma_3 \cdot D^{(3)} + \Gamma_4 \cdot D^{(4)}. \quad (6)$$

Компоненты  $D^{(l)} (l = 1, 2, 3, 4)$  коэффициента дифракции входящих в (6) даны [10, 11] и определяются выражением (7).

$$D^{(l)} = \frac{-e^{-j \cdot \pi/4}}{2 \cdot n \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot k}} \cot \gamma^{(l)} \cdot F_0(2kLn^2 \sin^2 \gamma^{(l)}) \quad (7)$$

где  $n\pi$  - внешний угол клина;  $F_0$  - функция перехода,  $\gamma^{(1)} = [\pi - (\varphi - \varphi')] / 2n$ ,  $\gamma^{(2)} = [\pi + (\varphi - \varphi')] / 2n$ ,  $\gamma^{(3)} = [\pi - (\varphi + \varphi')] / 2n$ ,  $\gamma^{(4)} = [\pi + (\varphi + \varphi')] / 2n$ ,  $n$  - используется для связи фазы сигнала ( $\Psi$ ) и углов дифракции ( $\varphi'$  и  $\varphi$ ). Полное описание переменных, которые входят в (7), дано в [11-13]. Углы  $\varphi'$  и  $\varphi$ , необходимые для вычисления коэффициента дифракции, могут быть рассчитаны на основе углов луча в горизонтальной плоскости (8), (9).

$$\phi' = \begin{cases} \pi - \alpha_{ihp\_m}, & \text{для угла } C_1 \\ \alpha_{ihp\_m} - \pi, & \text{для угла } C_2 \\ \alpha_{ihp\_m} - 0.5 \cdot \pi, & \text{для угла } C_3 \\ 1.5 \cdot \pi - \alpha_{ihp\_m}, & \text{для угла } C_4 \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi = \begin{cases} \pi - (\text{sgn}(y) - 1) \cdot \pi - \alpha_{ihp\_s}, & \text{для угла } C_1 \\ \pi + (\text{sgn}(y) - 1) \cdot \pi + \alpha_{ihp\_s}, & \text{для угла } C_2 \\ \alpha_{ihp\_s} - 0.5 \cdot \pi, & \text{для угла } C_3 \\ 1.5 \cdot \pi - \alpha_{ihp\_s}, & \text{для угла } C_4 \end{cases} \quad (9)$$

Параметр  $\Gamma_i (i=1..4)$ , входящий в (6) рассчитывается в зависимости от коэффициента дифракции на основе [7].

После выполнения расчета, все данные сохраняются в структуре, представленной на Рисунке 1.

Шаг 6. Расчет затухания для текущего угла.

Шаг 7. Расчет затухания электромагнитных волн для текущего угла выполняется на основе выражения (1) и результат сохраняется.

Шаг 8. Если все углы не рассчитаны, то осуществляется выбор следующего угла в перекрестке и переход к шагу 2.

Шаг 9. Если все углы рассчитаны, то все лучи суммируются и результат сохраняется.

На рис. 1 приведена схема модуля расчета полей, рассеянных на зданиях.

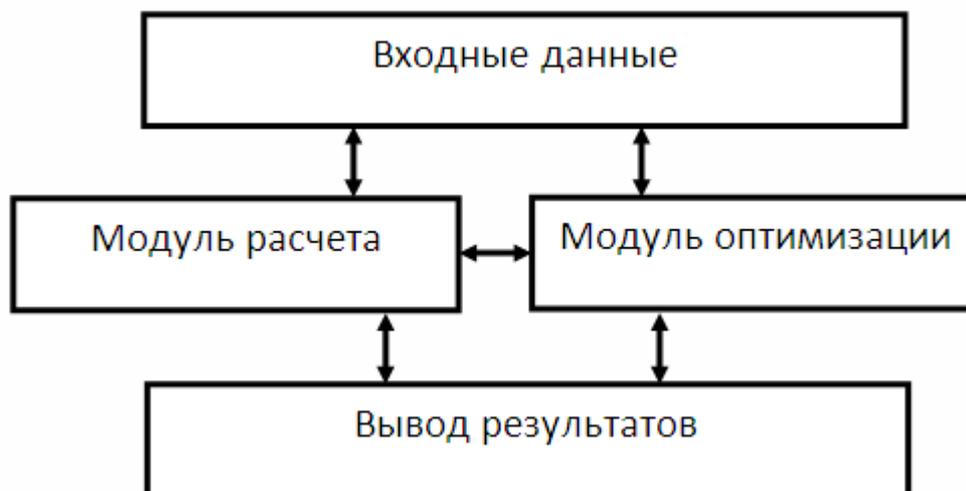


Рисунок 1 – Схема модуля расчета полей, рассеянных на зданиях.

Используются соответствующие методы оптимизации [14], при учете различных условий, влияющих на распространение радиоволн [15, 16].

В качестве недостатка метода проекции градиента можно указать требование по проведению операции проектирования, которая для общего случая является эквивалентной определенной задаче, связанной с поиском экстремума. Но, в тех случаях, когда совокупность решений представляет собой шар, параллелепипед, гиперплоскость, полупространство, задачи проектирования решаются довольно простым и явным образом.

Для того, чтобы решать задачи оптимизации, когда есть нелинейные ограничения, возможно использование метода возможных направлений, однако в практических случаях используют некоторые модифицированные варианты такого способа. Это связано с тем что, что для малых значениях шагов направления спуска, задаваемые векторами, которые находят, базируясь на решении задачи линейного программирования, хотя и являются допустимыми с теоретических точек зрения, могут быть неприемлемыми для практики, поскольку они могут быть почти ортогональными направлениям антиградиента целевой функции. Для значений антиградиента целевой функции и вектора направления спуска, которые близки к нулю сходимость процессов поиска минимума будет весьма медленной, а также алгоритм может зациклиться.

На практике метод штрафных функций может привести к разным

трудностям, которые связаны с топографией поверхностей уровней штрафных функций: если большие значения параметра штрафа, то графики таких функций будут приобретать овражные структуры. Это может вести к тому, что будут большие вычислительные затраты, когда решаются вспомогательные задачи безусловной минимизации и даже происходит прерывание процессов вычислений потому что теряется точность.

Исходя из указанного описания задачи, связанной с определением уровней сигналов и осуществленного анализа способов оптимизации, понятно, что для того, чтобы найти экстремум данных выше функции целесообразно применение нелинейных методов оптимизации при нелинейных ограничениях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуреев А.В. Компьютерные инструменты для автоматизированного проектирования беспроводных сетей / А.В. Гуреев, А.Г. Соколов // CNIP NEWS. 2003 г. №4 (EDA EXPERT 2003 г. №4) С.40-42.
2. 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.
3. 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.
4. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
5. 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.
6. El-Sallabi H. M. Radio wave propagation in perpendicular streets of urban street grid for microcellular communications / H. M. El-Sallabi, P. Vainikainen // Progress In Electromagnetics Research, PIER 40, 229-254, 2003.
7. Боровиков В.А. Геометрическая теория дифракции. / В.А.Боровиков, Б.Е.Кинбер // М.: Связь, 1978. 248 с.
8. Кравцов Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю.А.Кравцов, Ю.И.Орлов //, 1980.

9. Фелсен Л. Излучение и рассеяние волн / Л.Фелсен, Н.Маркувиц // т.1-2, 1978.
10. Боровиков В.А. Дифракция на прямоугольниках и многогранниках / В.А.Боровиков // 1966.
11. Ваганов Р.Б. Основы теории дифракции. Сер. Современные физико-технические проблемы. / Р.Б.Ваганов, Б.З.Кацеленбаум // М.: Наука, 1982.
12. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В.Никольский, Т. И.Никольская // М.: Наука, 1989. 453 с.
13. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции / П. Я.Уфимцев // М.: Сов. радио, 1962. 244 с.
14. Гилл Ф. Практическая оптимизация: Пер. с англ. / Ф.Гилл, У.Мюррей, М.Райт // М.: Мир, 1985. 509 с.
15. Кульнева Е.Ю. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Е.Ю.Кульнева, И.А.Гащенко // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
16. Калашников А.О. Атаки на информационно-технологическую инфраструктуру критически важных объектов: оценка и регулирование рисков / А.О.Калашников, Е.В.Ермилов, О.Н. Чопоров, К.А.Разинкин, Н.И.Баранников / монография / под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. Воронеж, Издательство: ООО "Издательство "Научная книга", 2013, 159 с.

A.A. Alimbekov, E.A. Avdeenko, V.V. Shevelev

## THE MODELING OF THE SCATTERING OF RADIO WAVES OF CELLULAR COMMUNICATION SYSTEMS ON THE ELEMENTS OF BUILDINGS

*Voronezh Institute of high technologies  
JSC concern "Sozvezdie"  
Russian new University*

*This paper considers the problem of scattering of electromagnetic waves in cellular communication systems, elements of buildings. As a basic method is proposed to use the radial approach. The main steps of the algorithm for the calculation of total attenuation of the signal caused by the diffraction at the corners of buildings. The loss caused by reflection of the radio signal from the earth, are calculated based on the Fresnel coefficients for a plane wave. Indicated input parameters for the calculation. A diagram of the module of calculation of fields scattered by buildings, which uses a block optimization. A classification of optimization techniques used in the optimization of communication systems. Methods associated with unconditional optimization are divided into: one-dimensional case multidimensional case. Optimization methods are divided into these: optimization under linear constraints, optimization under nonlinear constraints.*

**Keywords:** diffraction, building, link, beam, electromagnetic wave scattering.

## REFERENCES

1. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2010. No. 6. pp. 255-256.
2. 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.
3. 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. pp. 16. No. 4. pp. 584-587.
4. El-Sallabi H. M. Radio wave propagation in perpendicular streets of urban street grid for microcellular communications / H. M. El-Sallabi, P. Vainikainen // Progress In Electromagnetics Research, PIER 40, pp. 229-254, 2003.
5. Borovikov V.A. Geometricheskaya teoriya difraktsii. / V.A.Borovikov, B.E.Kinber // M.: Svyaz', 1978. p.248.
6. Kravtsov Yu.A. Geometricheskaya optika neodnorodnykh sred / Yu.A.Kravtsov, Yu.I.Orlov //, 1980.
7. Felsen L. Izluchenie i rasseyaniye voln / L.Felsen, N.Markuvits // Vol.1-2, 1978.
8. Borovikov V.A. Difraktsiya na pryamougol'nikakh i mnogogrannikakh / V.A.Borovikov // 1966.
9. Vaganov R.B. Osnovy teorii difraktsii. Ser. Sovremennyye fiziko-tekhnicheskie problemy. / R.B.Vaganov, B.Z.Katselenbaum // M.: Nauka,1982.
10. Nikol'skiy V. V. Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln / V. V.Nicol'skiy, T. I.Nicol'skaya // M.: Nauka, 1989. p. 453.
11. Ufimtsev P. Ya. Metod kraevykh voln v fizicheskoy teorii difraktsii / P. Ya.Ufimtsev // M.: Sov. radio, 1962. p.244 .
12. Gill F. Prakticheskaya optimizatsiya: Per. s angl. / F.Gill, U.Myurrey, M.Rayt // M.: Mir, 1985. p. 509 .
13. Kul'neva E.Yu. O kharakteristikakh, vliyayushchikh na modelirovaniye radiotekhnicheskikh ustroystv / E.Yu.Kul'neva, I.A.Gashchenko // Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. 2014. No. 5-2. pp. 50.
14. Kalashnikov A.O. Ataki na informatsionno-tekhnologicheskuyu infrastrukturu kriticheski vazhnykh ob"ektov: otsenka i regulirovaniye riskov / A.O.Kalashnikov, E.V.Ermilov, O.N. Choporov, K.A.Razinkin, N.I.Barannikov / monografiya / pod red. chl.-korr. RAN D.A. Novikova. Voronezh, Izdatel'stvo: OOO "Izdatel'stvo "Nauchnaya kniga", 2013, p.159 .