

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Львович Я.Е., Львович И.Я., Преображенский А.П., Головинов С.О.
Воронежский институт высоких технологий
E-mail: mendax@rambler.ru

В работе проведено исследование точности расчёта метода трассировки лучей для параллельно-перпендикулярной городской застройки.

Проектирование современных беспроводных систем связи невозможно представить без применения соответствующих систем автоматизированного проектирования. Методы, используемые в таких САПР, предназначенные для расчёта зон покрытия и уровня сигнала от базовых станций (БС), можно разделить на две категории:

- статистические;
- детерминированные.

Статистические методы основаны на применении эмпирических формул и позволяют проводить расчёты с большой скоростью, но при этом одним из основных недостатков является большая погрешность в вычислениях (порядка 10 дБ) ввиду того что ряд факторов, таких, как отражение сигнала от различных объектов (разного рода строений, земной поверхности и т.д.), дифракция радиоволн, для которой характерно преломление радиосигнала на пути распространения, рассеивание радиосигнала, вызванное наличием на местности большого числа объектов, размером меньше длины радиоволны (например, лиственные деревья) - учитываются усреднено, на основе статистической информации, которая собирается только для определённой планировки города. Если изменить тип застройки (высоту, тип размещения строений), количество лесопарковых зон, и т.п. необходимо заново собирать всю статистику.

Использование детерминированных методов позволяет ликвидировать приведённые неточности. Среди таких методов предназначенных для расчёта зоны покрытия в беспроводных системах связи, наиболее популярным можно назвать метод трассировки лучей.

В данной работе проведено исследование точности модели [1], основанной на указанном подходе.

Для моделирования передачи данных по беспроводным системам связи примем за $H(f, r)$ функцию распространения сигнала в канале, где f - частота, и r - длина пути. Тогда полной функцией среды распространения будет являться [1]:

$$H_t = H_{RR} + H_{RDR} \quad (1)$$

где H_{RR} и H_{RDR} - полные функции распространения $R-R$ и $R-D-R$ групп лучей соответственно. Далее определим выражения для расчёта функций распространения каждой группы.

Функция распространения состоящей из лучей $R-R$ между передающей и приёмной антеннами может быть вычислена [1]

$$H_{V,H} = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \right) \cdot \sum_{i \equiv (m, S, n, u, g)} \left[f_B(\theta_i, \varphi_i) \cdot f_M(\Theta_i, \Phi_i) \cdot (\mathfrak{R}_{V,H}^i)^g \cdot (R_{H,V}^{in})^n \cdot (R_{H,V}^{im})^m \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_i}}{r_i} \right] \quad (2)$$

где i -й луч представлен рядом пяти целых чисел (m, S, n, u, g) , m и n – количество отражении от стен вдоль главной и второстепенной улиц, соответственно, $g=0,1$ для отражения от земли, λ - 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 передачей сигнала при вертикальной и горизонтальной поляризации, соответственно.

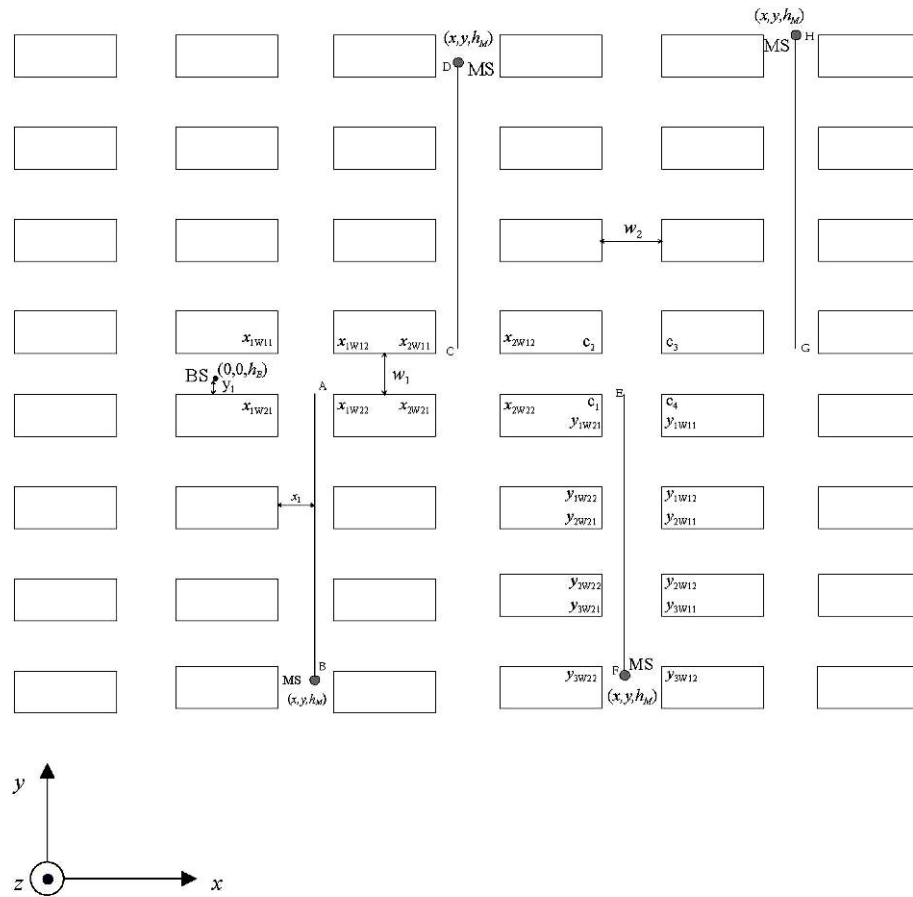


Рисунок 1 - Городская уличная застройка

$f_B(\theta, \varphi)$ и $f_M(\Theta, \Phi)$ диаграммы направленности с учётом поляризации для базовой станции (БС) и мобильной станции (МС), соответственно. Углы (θ, Θ) и (φ, Φ) являются углами в вертикальной и горизонтальной плоскостях для БС и МС, соответственно [1].

Для вычисления фазы и амплитуды HV, H необходимы длина пути лучей, явная форма которого, получена при использовании теории изображения. Использование теории изображения определяет точный зеркальный пункт отражения. Это позволяет идентифицировать, какие изображения поспособствовали бы полученному сигналу. Для мобильной станции, расположенной в (x, y, h_M) , длина пути луча i с m и n отражениями на основной и второстепенной улицах, соответственно, можно записать как [1]:

$$r_i = \sqrt{\left(\left(n + (-1)^u \cdot \Xi(n) \right) \cdot \omega_2 + (-1)^u \cdot \left(x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1 \right) \right)^2 + \left((-1)^s \cdot \left(\left(m + (-1)^s \cdot \Xi(m) \right) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^s \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - y \right)^2 + \left(h_B - (-1)^g \cdot h_M \right)^2} \quad (3)$$

$$\Xi(\chi) = \begin{cases} 0, & \forall \chi \text{ чет.} \\ 1, & \forall \chi \text{ нечет.} \end{cases} \quad (4)$$

где h_B и h_M – высота антенны БС и МС, соответственно, ω_1 и ω_2 – ширина главной и перпендикулярных улиц, x_1 и y_1 – расстояния, показанные на рисунке 1. Вертикальный угол луча i для БС и МС определяется как [1]

$$\theta_i = (1 - g) \cdot \pi \cdot (-1)^g \cdot \Theta_i = \frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{h_B - (-1)^g \cdot h_M}{r_i} \right). \quad (5)$$

Горизонтальный угол луча i для БС и МС определяется как [1]

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{(-1)^m \cdot \text{sgn}(y) \cdot \left((m - \text{sgn}(y) \cdot \Xi(m)) \cdot \omega_1 + 2 \cdot \text{sgn}(y) \cdot \Xi(m) \cdot y_1 + |y| \right)}{(-1)^u \cdot \left((n + (-1)^u \cdot \Xi(n)) \cdot \omega_2 + (-1)^u \cdot (x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1) \right)} \right) \quad (6)$$

$$\Phi_i = \arctan \left(\frac{(-1)^s \cdot \left((m + (-1)^s \cdot \Xi(m)) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^s \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - y}{(-1)^{n+1} \cdot \left((-1)^u \cdot \left((n + \Xi(n)) \cdot \omega_2 - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1 \right) + x \right)} \right) \quad (7)$$

Потери при отражении могут быть вычислены при помощи коэффициента отражения Френеля для плоской волны. Коэффициент отражения Френеля $\mathfrak{R}_{V,H}^i$ вертикально и горизонтально поляризованной волны для отражения от земли записывается как [1]

$$\mathfrak{R}_{V,H}^i = \frac{\cos \gamma_i - a_{V,H} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \gamma_i}}{\cos \gamma_i + a_{V,H} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \gamma_i}} \quad (8)$$

где $a_V = 1/\varepsilon$ и $a_H = 1$ соответствуют \mathfrak{R}_V^i и \mathfrak{R}_H^i , соответственно, $\varepsilon = \varepsilon_r - j \cdot 60 \cdot \lambda \cdot \sigma$.

Угол отражения γ_i необходимо вычислять отражение от земли $\mathfrak{R}_{V,H}^i$ дают [1]

$$\gamma_i = \arctan \left(\frac{\sqrt{\left(\left((n + (-1)^u \cdot \Xi(n)) \cdot \omega_2 + (-1)^u \cdot (x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1) \right)^2 + \left((-1)^s \cdot \left((m + (-1)^s \cdot \Xi(m)) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^s \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - y \right)^2 \right)}}{(h_B + h_M)} \right) \quad (9)$$

Для вертикально, горизонтально поляризованные антенны, электрическое поле было бы горизонтально, вертикально поляризовано относительно стены. В (2) $R_{H,V}^i$, коэффициент Френеля отражения от стены, может быть вычислен по формуле (8) при условии, что угол отражения от земли (γ_i) заменен углом отражения от стены (α_i). Угол отражения i -го луча на главной (α_{im})

улице и на перпендикулярной улице (air), должен был вычислить отражение от стен $R_{H,V}^i$ определяются как [1]

$$\alpha_{im} = \arctan \left(\frac{\sqrt{\left(\left(n + (-1)^u \cdot \Xi(n) \right) \cdot \omega_2 + (-1)^u \cdot \left(x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1 \right) \right)^2 + \left(h_B - (-1)^g \cdot h_M \right)^2}}{\left| (-1)^S \cdot \left(\left(m + (-1)^S \cdot \Xi(m) \right) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^S \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - y \right|} \right) \quad (10)$$

и

$$\alpha_{ip} = \arctan \left(\frac{\sqrt{\left((-1)^S \cdot \left(\left(m + (-1)^S \cdot \Xi(m) \right) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^S \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - y \right)^2 + \left(h_B - (-1)^g \cdot h_M \right)^2}}{\left| \left(n + (-1)^u \cdot \Xi(n) \right) \cdot \omega_2 + (-1)^u \cdot \left(x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1 \right) \right|} \right) \quad (11)$$

У углов зданий есть важная особенность в отклонении сигналов на второстепенные улицы. Дифракция в каждом углу уличного пересечения способствует полному полученному сигналу. Функция распространения лучей, которая соответствует дифракции на четырех углах здания [1]

$$H_{RDR} = H_{C1} + H_{C2} + H_{C3} + H_{C4} \quad (12)$$

где H_{C1} - функция распространения лучей, испытывающих дифракцию на угле 1. Электрическое поле для луча, полученного в процессе дифракции на углу здания, рассчитывается на основе геометрической теории дифракции (ГТД). Функция распространения из лучей, испытывающих явления отражения-дифракции-отражения перед приемной антенной, может быть вычислена [1]

$$H_{V,H} = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \right) \cdot \sum_{i \in (m,S,n,u,g,C)} \left[\frac{f_B(\theta_i, \varphi_i) \cdot f_M(\Theta_i, \Phi_i) \cdot \left(\mathfrak{R}_{V,H}^i \right)^g \cdot \left(R_{H,V}^{im} \right)^m \times \overline{D_{V,H}^i} \cdot \left(R_{iH,iV}^{in} \right)^n \cdot \frac{1}{\sqrt{D_1 \cdot D_2 \cdot (D_1 + D_2)}} \cdot e^{-j \cdot k \cdot (D_1 + D_2)}} \right] \quad (13)$$

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. Они определены следующим образом [1]:

$$D_{1,2} = \sqrt{d_{1,2}^2 + \left(h_{B,M} - H_{corner} \right)^2} \quad (14)$$

где H_{corner} - высота места дифракции на углу здания, d_1 и d_2 - расстояния горизонтальной плоскости от БС и МС до угла дифрагирования, соответственно, которые определены как [1]

$$H_{corner} = \begin{cases} \frac{d_2 \cdot h_B + (-1)^g \cdot d_1 \cdot h_M}{d_1 + d_2}, & \forall d_2 \cdot h_B > d_1 \cdot h_M \\ \frac{(-1)^g \cdot d_2 \cdot h_B + d_1 \cdot h_M}{d_1 + d_2}, & \forall d_2 \cdot h_B < d_1 \cdot h_M \end{cases} \quad (15)$$

$$d_1 = \sqrt{X_C^2 + \left((-1)^S \cdot \left(\left(m + (-1)^S \cdot \Xi(m) \right) \cdot \omega_1 - 2 \cdot (-1)^S \cdot \Xi(m) \cdot y_1 \right) - Y_C \right)^2} \quad (16)$$

$$d_2 = \sqrt{\left(y - Y_C \right)^2 + \left((-1)^u \cdot \left(\left(n + (-1)^u \cdot \Xi(n) \right) \cdot \omega_2 + (-1)^u \cdot \left(x - 2 \cdot \Xi(n) \cdot x_1 \right) \right) - X_C \right)^2} \quad (17)$$

На основе результатов экспериментов [2 - 4] для городской застройки приведённой на рисунке 1, проведём оценку адекватности приведённой модели, причём в качестве подвижного объекта возьмём МС.

Результаты сравнения с источником [2] приведено на рисунке 2, среднее значение ошибки $\Delta = 0,8$ дБ.

В результате проведённого сравнения с результатами эксперимента, можно видеть, что среднее значение погрешности не превышает значения в 1 дБ. При сравнении с результатами расчётов с применением моделей приведённых в [1-7], в которых погрешность составляет не менее 3,2 дБ, результаты приведённой модели можно считать вполне приемлемыми.

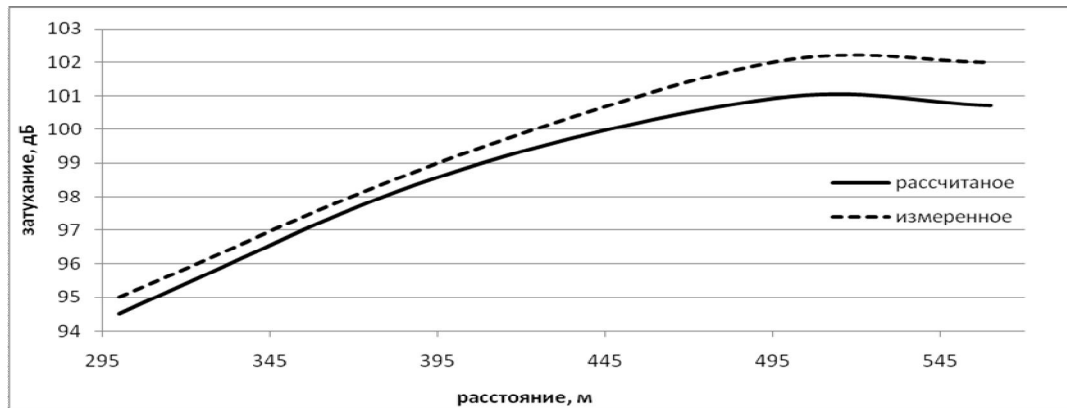


Рисунок 2 – Сравнение с результатами эксперимента

Результаты сравнения с источником [3] приведено на рисунке 3, среднее значение ошибки $\Delta = 0,47$ дБ.

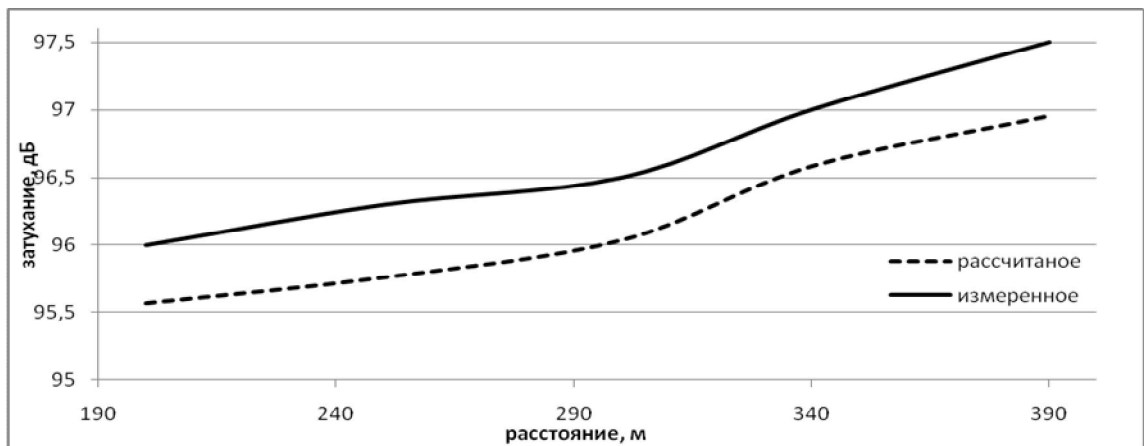


Рисунок 3 - Сравнение с результатами эксперимента

Результаты сравнения с источником [4] приведено на рисунке 4, среднее значение ошибки $\Delta = 0,42$ дБ.

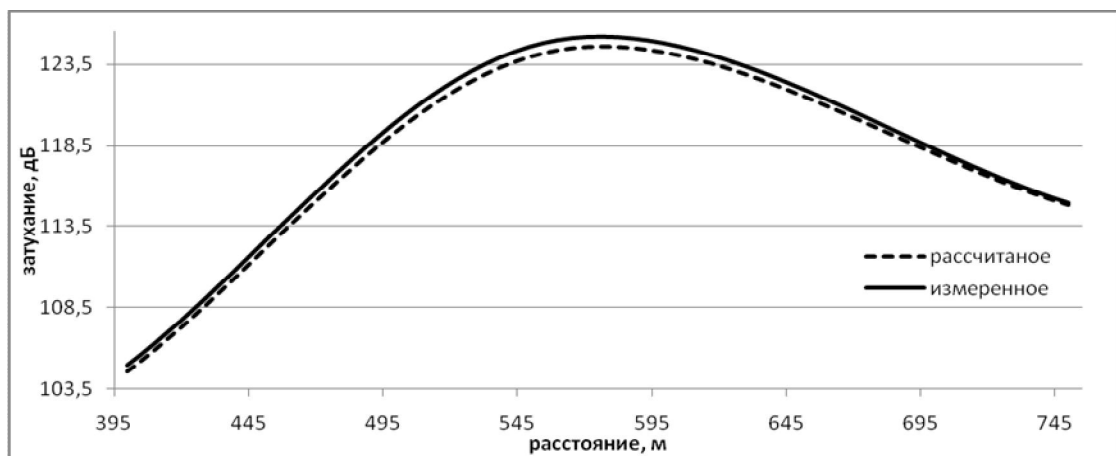


Рисунок 4 - Сравнение с результатами эксперимента

Литература:

1. H. M. El-Sallabi and P. Vainikainen Radio wave propagation in perpendicular streets of urban street grid for microcellular communications / Progress In Electromagnetics Research, PIER 40, 229–254, 2003
2. André Mendes Cavalcante, Marco José de Sousa, João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, Carlos Renato Lisboa Francês and Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante A New Computational Parallel Model Applied in 3D Ray-Tracing Techniques for Radio-Propagation Prediction Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2006
3. J. H. Whitteker, “Measurements of Path Loss at 910 MHz for Proposed Microcell Urban Mobile Systems,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 37, pp. 125–129, Aug. 1988.
4. Hae-Won Son and Noh-Hoon Myung A Deterministic Ray Tube Method for Microcellular Wave Propagation Prediction Model IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 47, NO. 8, AUGUST 1999
5. Son, H.-W. and N.-H. Myung A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model / IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 47, 1344–1350, Aug. 1999.
6. Tsoulos, G. V. and G. E. Athanasiadou On the application of adaptive antennas to microcellular environments: radio channel characteristics and system performance / IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 51, 1–16, Jan. 2002.
7. T. Rautiainen, G. Wolfle, and R. Hoppe: Verifying Path Loss and Delay Spread Predictions of a 3D Ray Tracing Propagation Model in Urban Environments, 56th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 2002 - Fall, Vancouver (British Columbia, Canada), Sept. 2002.