



The simulation of wave propagation of communication systems in urban areas

Моделирование распространения волн систем связи в городской застройке

Yakov Lvovich, Konstantin Razinkin, Juraj Štefanovič

Яков Львович, Константин Разинкин, Juraj Štefanovič

Abstract:

The paper considers the problem of calculating the level of electromagnetic fields wireless communication in urban environments to determine the areas with high signal strength. The analysis of the possible approaches – statistical and deterministic. To solve the problem is proposed to use the radial method. This method is based on decomposition of the electromagnetic field on the rays and finding the rays that connect the transmitting and receiving device, taking into account the diversity of the city. Depending on the algorithm, consideration is taken of the rays, which when reaching the receiver are reflected specularly or diffusely from the walls of buildings and giragira on corners of buildings. In the framework of the algorithm was restricted. The first limitation is that the rays get to the right of the intersection along the main street, the second limitation is due to the fact that the rays go on a minor street. The result of the calculation is represented by the first limiting plane (limitations of the terrain), how overlap of the bounding plane to the plane of the rays. In appearance the bounding planes can be noticed that changing the bounding plane depends only on the number of reflections along the main street. When interpolation is used the method of least squares. The results of calculations based on the developed algorithm and the experimental data taken from literature. The block diagram module calculation of the number of rays. The operation of the calculation module the number of rays is carried out in three stages: using the correlation coefficients, the polynomial is calculated based on the amount of rays, the distance from the transmitter to the receiver, using the correlation coefficients, the polynomial is calculated according to the total power of the power contributed by each beam, based on

the polynomial calculated the number of rays given the specified margin of error. The proposed approach using correlation coefficients and approximation based on the least squares method allows to reduce the number of iterations in the calculations of the signal level using the method of ray tracing in several times in comparison with the conventional ray-tracing.

Keywords:

Telecommunication system, electromagnetic wave, urban area.

ACM Computing Classification System:

Computer-communication networks-Distributed Systems
Computer-communication networks-Local and Wide-Area Networks
Information systems applications-Communications Applications

Abstract:

В статье рассматривается задача расчета уровня электромагнитных полей беспроводной связи в городских условиях для определения зон с высоким уровнем сигнала. Проводится анализ возможных подходов – статистических и детерминированных. Для решения задачи предлагается использовать лучевой метод. Данный метод основан на разложении электромагнитного поля на лучи и поиске лучей, которые соединяют передающее и приемное устройство, с учетом разнородности городской застройки. В зависимости от используемого алгоритма, в рассмотрение берутся лучи, которые при достижении приемника отражаются зеркально или диффузно от стен зданий и дифрагируют на углах зданий. В рамках алгоритма были наложены ограничения. Первое ограничение заключается в том, что лучи доходят до нужного перекрестка вдоль главной улицы, второе ограничение связано с тем, что лучи заходят на второстепенную улицу. В результате расчетов представлена первая ограничивающая плоскость (ограничения рельефа местности), также каким образом накладываются ограничивающие плоскости на плоскость лучей. По внешнему виду ограничивающих плоскостей можно заметить, что изменение ограничивающей плоскости зависит только от количества отражений вдоль главной улицы. При интерполяции использован метод наименьших квадратов. Приведены результаты расчетов на основе разработанного алгоритма и экспериментальных данных, взятых из литературы. Приведена структурная схема модуля расчета количества лучей. Функционирование модуля расчета количества лучей осуществляется в три этапа: с использованием коэффициентов корреляции, рассчитывается полином зависимости количества лучей от расстояния от передатчика к приемнику, с использованием коэффициентов корреляции, рассчитывается полином зависимости суммарной мощности от мощности, вносимой каждым лучом, на основе найденного полинома рассчитывается количество лучей с учетом заданной погрешности. Предложенный подход с использованием

коэффициентов корреляции и аппроксимации на основе метода наименьших квадратов позволяет сократить количество итераций при расчетах уровня сигнала с использованием метода трассировки лучей в несколько раз по сравнению с обычным методом трассировки лучей.

Keywords:

Распространение радиоволн, городская застройка, беспроводная связь.

■ Введение

В настоящее время наблюдается бурное развития сотовых систем связи в городах и пригородных зонах. В связи с этим особенно актуальным является создание специализированных программных средств используемых в САПР [1], позволяющих на основе электронных карт местности оценить характер распространения электромагнитных волн, а также определить зону покрытия от базовой станции.

Построение систем беспроводного доступа включает в себя ряд этапов, начиная от написания техзадания с указанием областей, в которых система будет использоваться, заканчивая вводом в эксплуатацию.

Моделирование является важным шагом, который включает в себя основные параметры систем беспроводного доступа, такие как зоны обслуживания, качество сигнала и т. д. Это связано с тем, что процесс проектирования является трудоемким и дорогим, поэтому использование разных видов моделирования исключает ошибки, которые могут возникнуть во время эксплуатации систем беспроводного доступа, а также оптимального расположения точек доступа.

■ 1 Анализ существующих подходов для оценки характеристик беспроводной связи

Для оценки применяется множество методов основанные на статистическом и детерминированном анализе характера распространения сигнала.

Среди статистических моделей анализа беспроводных сетей можно выделить следующие:

- 1) модель Окамуры [2];
- 2) модель Хата [3];
- 3) модель Juul-Nyholm [4];
- 4) модели Бардина-Дымовича и Трифонова [5];
- 5) модель Олсбрука – Парсонса [6];
- 6) модель Уолша-Икегами [7].

Если рассматривать с точки зрения истории, то первыми были эмпирические графические зависимости, которые получил Окамура и они давали возможности определения медианного значения сигналов для условий статистически однородного города, и позволяли проводить учет в какой-то мере тех или иных особенностей по определенному городу или по отдельным городским районам.

Наиболее точным является лучевой метод, который и рассмотрен в данной работе.

Целью данной работы является анализ процессов распространения электромагнитных волн в системах связи в условиях городской застройки.

2 Методика расчета

При распространении электромагнитных волн в городской застройке необходимо учитывать их затухание. С использованием математических соотношений нами был построен алгоритм оценки степени затухания радиоволн в городской застройке. Для расчета уровня поля в заданном секторе углов использовались следующие соотношения [8]:

$$L[dB] = 40 + 35\lg(R[km]), \quad (1)$$

$$L[dB] = 65 + 40\lg(R[km]) + 40\lg(f[MHz]) - 4G[dB] \quad (2)$$

где R – расстояние от базы до абонента, G – коэффициент усиления антенн, f – частота.

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 1.

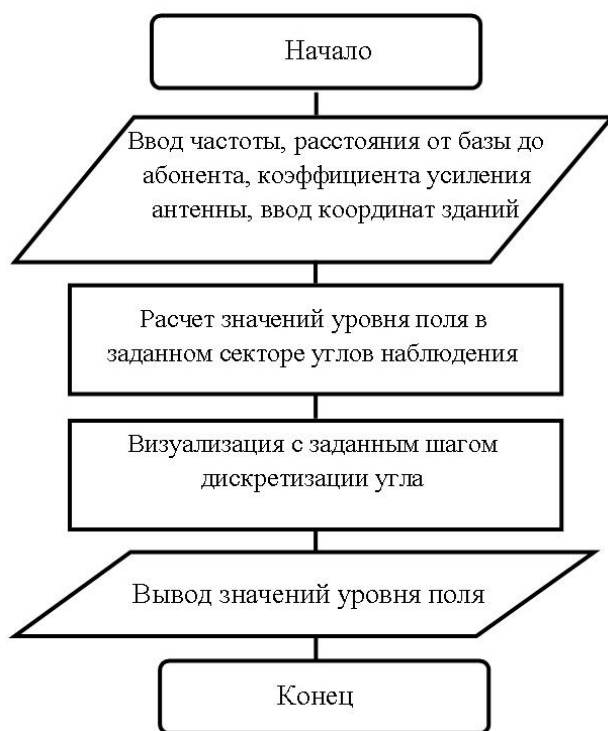


Рисунок 1. Алгоритм расчета затухания радиоволн в пределах городской застройки

В рамках этого алгоритма возможен учет нескольких базовых станций. В этом случае в результате интерференции радиоволн будет формироваться довольно

сложная картина распределения мощности распространяющихся электромагнитных волн. Алгоритм предназначен для учета явлений распространения электромагнитных волн именно в городских условиях, поскольку наблюдается большое число препятствий, обуславливающих затухание полезного сигнала. С увеличением частоты передаваемого сигнала затухание распространяющейся электромагнитной волны будет увеличиваться.

При распространении часть энергии радиоволн будет расходоваться на отражение. Большая часть лучей при этом пойдет мимо абонента, так как он находится в ограниченной области [9].

Точность позиционирования абонента с целью получения максимальной мощности, поступающей от базовой станции, определяется шагом дискретизации угла.

Рассмотренный алгоритм не учитывает естественных помех, возникающих при распространении электромагнитных волн (в том числе широкополосных).

Приведенный алгоритм является универсальным, в нем автоматически учитывается широкий диапазон возможных входных параметров.

Достоинством нашего подхода является то, что он позволяет проводить оценку («машинный эксперимент») характеристик в беспроводных системах связи без проведения реального «натурного» эксперимента.

Вообще говоря, алгоритм может быть уточнен с привлечением моделей распространения электромагнитных волн – дифракция краевых волн, ползущих волн, диффузное отражение, отражение от земной поверхности [10, 11]. Кроме того, могут быть уточнены многократные переотражения волн внутри здания, однако, по-видимому, их вклад в распространяющееся основное поле как минимум на 10 дБ меньше, чем волны имеющее однократное отражение. Все эти дополнительные уточнения в дальнейшем могут быть представлены как дополнительные модули с соответствующими характеристиками затухания электромагнитных волн.

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 [12]:

$$H_t = H_{RR} + H_{RDR}, \quad (3)$$

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

Функция распространения состоящей из лучей R-R между передающей и приемной антеннами может быть вычислена

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

где i -й луч представлен рядом 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, λ – длина волны, k – волновое число,

$\mathcal{R}_{V,H}^i$, $R_{H,V}^{in}$ и $R_{H,V}^{in}$ – известные коэффициенты отражения Френеля от земли и стен на главной и второстепенной улицах, соответственно, с вертикальной и горизонтальной поляризации, соответственно. В соответствии с описанным выше алгоритмом, найдем все возможные значения отражений, при распространении вдоль главной и второстепенной улиц (рис. 2).

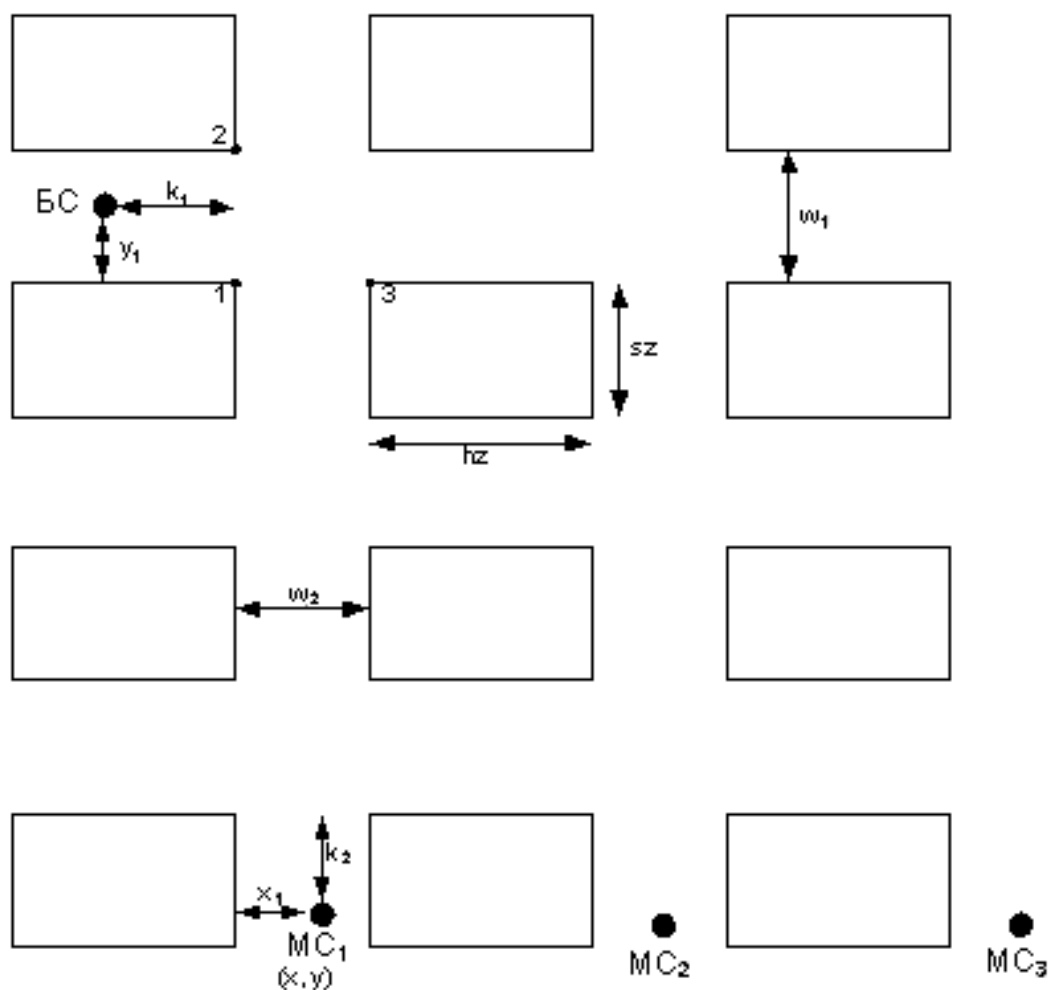


Рисунок 2. Городская уличная застройка

По рисунку 3 можно определить все возможные лучи, которые соединяют базовую (БС) и мобильную (МС) станции. На представленном рисунке по осям X и Y откладываются количество отражений луча при распространении вдоль главной и второстепенной улиц. По оси Z откладывается угол наклона луча [13].

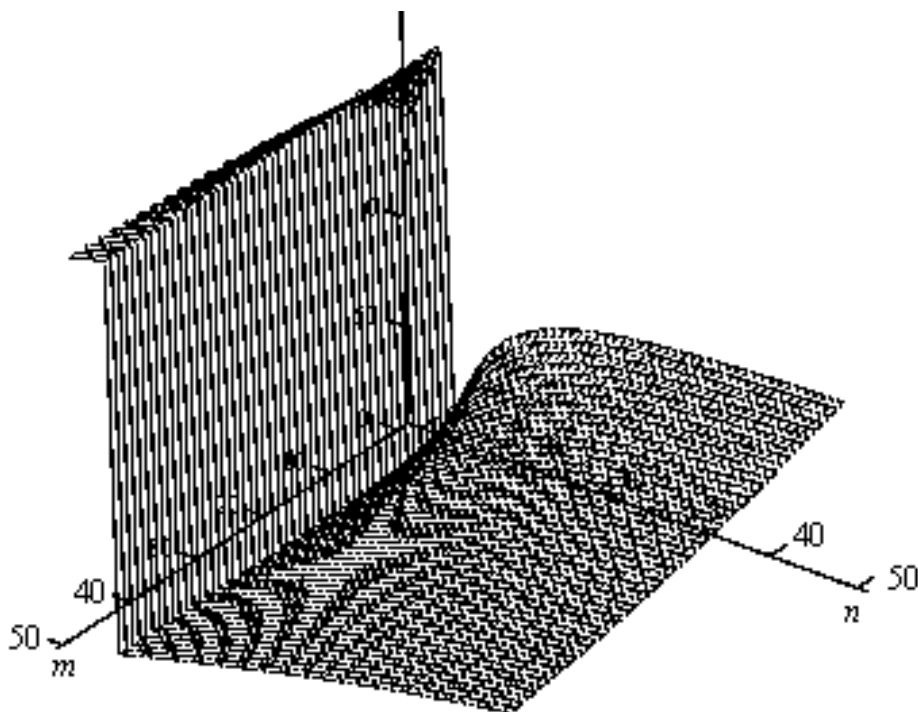


Рисунок 3. Плоскость распределения лучей

Результаты. В соответствии с указанным выше алгоритмом для нахождения лучей, которые соединяют БС и МС, необходимо наложить ограничения. При этом первое ограничение заключается в том, что лучи доходят до нужного перекрестка вдоль главной улицы, второе ограничение – лучи заходят на второстепенную улицу.

На рисунке 4 представлена первая ограничивающая плоскость (ограничения рельефа местности).

На рисунке 5 представлено наложение ограничивающих плоскостей на плоскость лучей. На рисунке 5 видны ограничивающие плоскости. По данному графику можно определить все возможные лучи, которые будут соединять БС и МС.

По внешнему виду ограничивающих плоскостей можно заметить, что изменение ограничивающей плоскости зависит только от одного значения (количества отражений вдоль главной улицы, рис. 2). Поэтому интерполяцию мы проводили в двумерной плоскости.

При интерполяции мы использовали метод наименьших квадратов (МНК). Порядок полинома равен 6, при этом погрешность аппроксимации ограничивающей плоскости равна 2 %.

Уровень сигнала в данной точке, при расчете с использованием данного подхода, определяется суммой лучей. При этом количество лучей и вносимый уровень сигнала каждым лучом может меняться в зависимости от положения МС, ширины улиц и т. п.

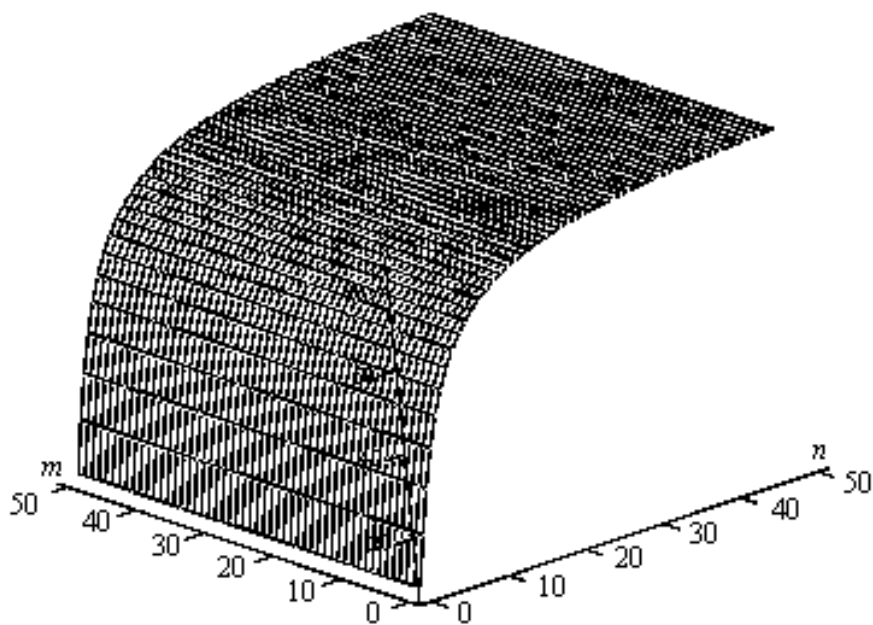


Рисунок 4. Ограничивающая плоскость

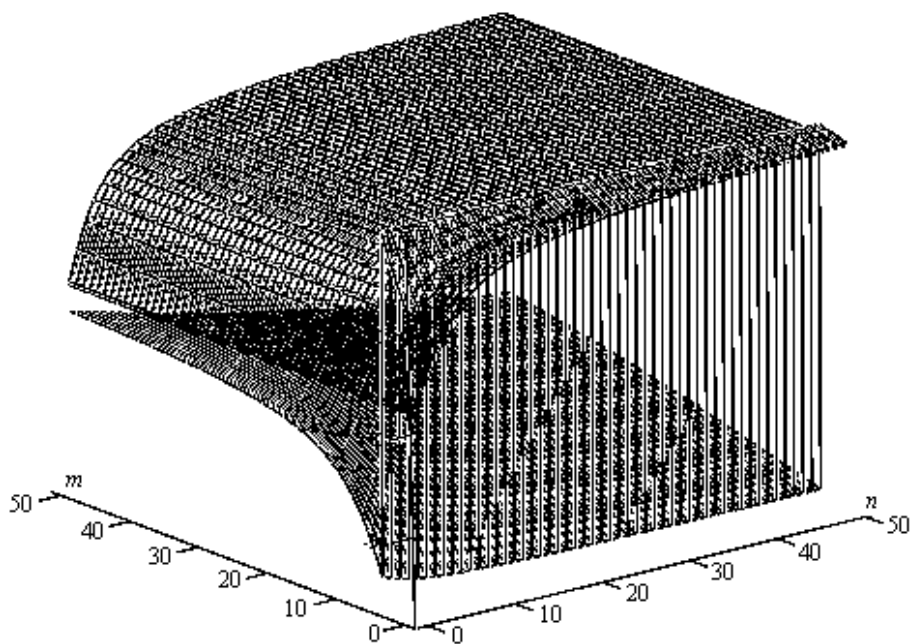


Рисунок 5. Наложение ограничивающих плоскостей

На основе результатов экспериментов для городской застройки, приведенной на рисунке 2, проведем оценку адекватности приведенной модели, причем в качестве подвижного объекта возьмем МС.

Результаты сравнения с источником приведены в таблице 1, среднее значение ошибки $\Delta = 0,8$ дБ.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета и эксперимента [7]

координата МС	затухание, дБ		Δ
	расчетное	измеренное	
300	94,532	95	0,468
395	98,593	99	0,407
495	100,938	102	1,062
560	100,727	102	1,273

Результаты сравнения с источником [12] приведено в таблице 2, среднее значение ошибки $\Delta = 0,47$ дБ.

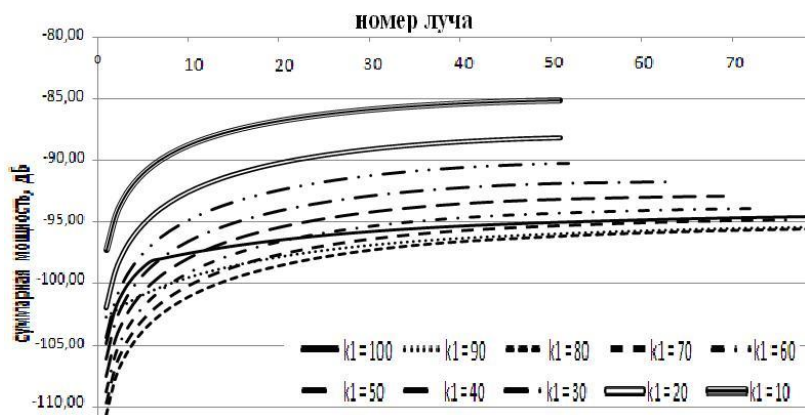
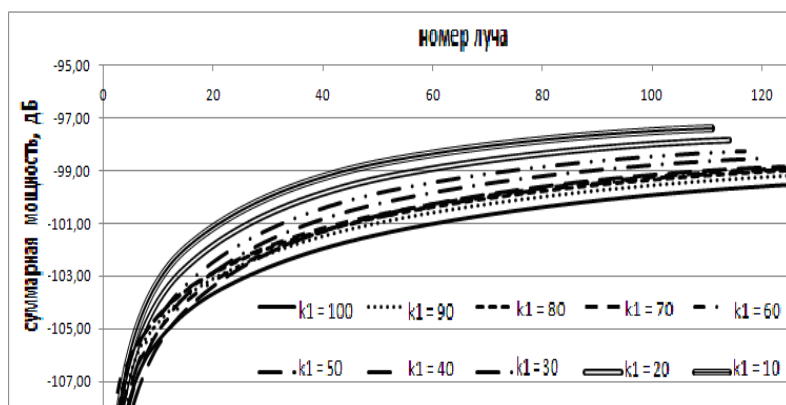
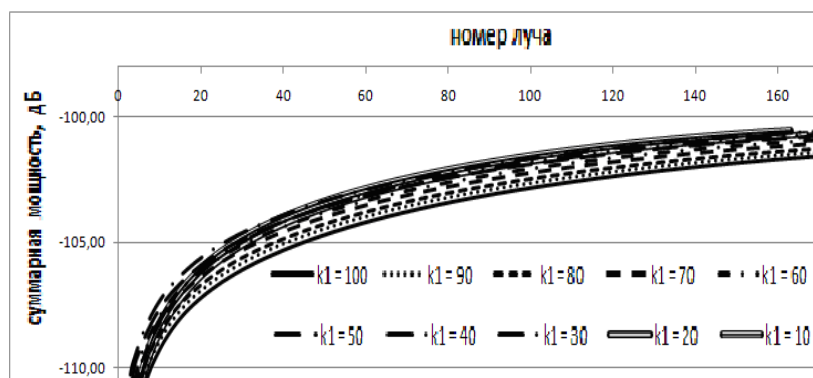
В результате проведенного сравнения с результатами эксперимента, можно видеть, что среднее значение погрешности не превышает значения в 1 дБ.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета и эксперимента

координата МС	затухание, дБ		Δ
	расчетное	измеренное	
200	95,567	96	0,433
250	95,757	96,3	0,543
300	96,038	96,5	0,462
340	96,586	97	0,414
390	96,958	97,5	0,542

Проведем исследование предложенной модели, для разных положений мобильной станции (МС₁, МС₂, МС₃, рис. 2) будем измерять суммарную мощность, состоящую из суммы мощностей вносимой каждым лучом в зависимости от удаления БС от первого перекрестка (параметр k_1 , рис. 2).

Результаты исследования приведены на рисунках 6-8, для МС₁, МС₂, МС₃, соответственно.

Рисунок 6. Результаты для MS_1 Рисунок 7. Результаты для MS_2 Рисунок 8. Результаты для MS_3

Если в приведенной модели учитывать лучи с наибольшим вносимым уровнем сигнала, то можно сократить количество итераций при расчетах. Модуль, приведенный на рисунке 9, реализует указанный подход, при этом необходимо найти количество лучей, при заданной погрешности Δ относительно максимального уровня сигнала в данной точке.



Рисунок 9. Структурная схема модуля расчета количества лучей

В качестве входных параметров модели расчета примем:

- положение БС на главной улице;
- ширина главной и второстепенной улиц;
- координаты углов перекрестка главной и второстепенной улиц;
- координаты МС;
- расстояние от БС до МС.

БД содержит результаты исследования модели в различных входных параметрах модели. Для уменьшения размерности БД распределение мощности по лучам приводится в виде полинома порядка N .

В качестве дополнительного входного параметра для модуля расчета количества лучей принимается Δ по мощности сигнала относительно максимального уровня.

Функционирование модуля расчета количества лучей осуществляется в три этапа [14-16]:

- с использованием коэффициентов корреляции, рассчитывается полином зависимости количества лучей от расстояния от БС до МС;
- с использованием коэффициентов корреляции, рассчитывается полином зависимости суммарной мощности от мощности, вносимой каждым лучом.
- на основе найденного полинома рассчитывается количество лучей с учетом заданной погрешности.

Предложенный подход позволяет сократить количество итераций при расчетах уровня сигнала с использованием метода трассировки лучей. При $\Delta=2$ дБ, количество итераций было сокращено в 2-3 раза (в зависимости от удаленности МС).

Применительно к поставленной задаче применение методов оптимизации обусловлено тем, что для нахождения лучей, которые соединяют БС и МС, требуется

выполнение большого количества монотонных операций. Так, например, для расчета плоскости, представленной на рисунке 2, которая показывает зависимость количества отражений вдоль главной и второстепенной улиц от «угла», понадобится выполнить порядка 2500 операций, при условии, что максимальное количество отражений вдоль главной и второстепенной улиц равно 50, соответственно.

После выполнения всех расчетов общее количество итераций будет более 10000, и это только при расчете только уровня сигнала в одной точке. При увеличении площади расчета, количество расчетов будет, соответственно, увеличиваться, и даже с применением современных средств вычислительной техники время расчета может несоизмеримо большим.

Таким образом, с применением методов оптимизации время расчета можно существенно сократить.

На основе приведенного описания поставленной задачи и анализа методов оптимизации [17], видно, что для нахождения экстремума зависимостей представленных на рис. 6-8, целесообразным будет использование нелинейных методов оптимизации с нелинейными ограничениями.

Для выбора конкретного метода решения задачи, необходимо изменить постановку задачи следующим образом – с учетом имеющихся ограничений (рис. 6-8), найти луч с минимальным расстоянием прохождения пути от БС до МС.

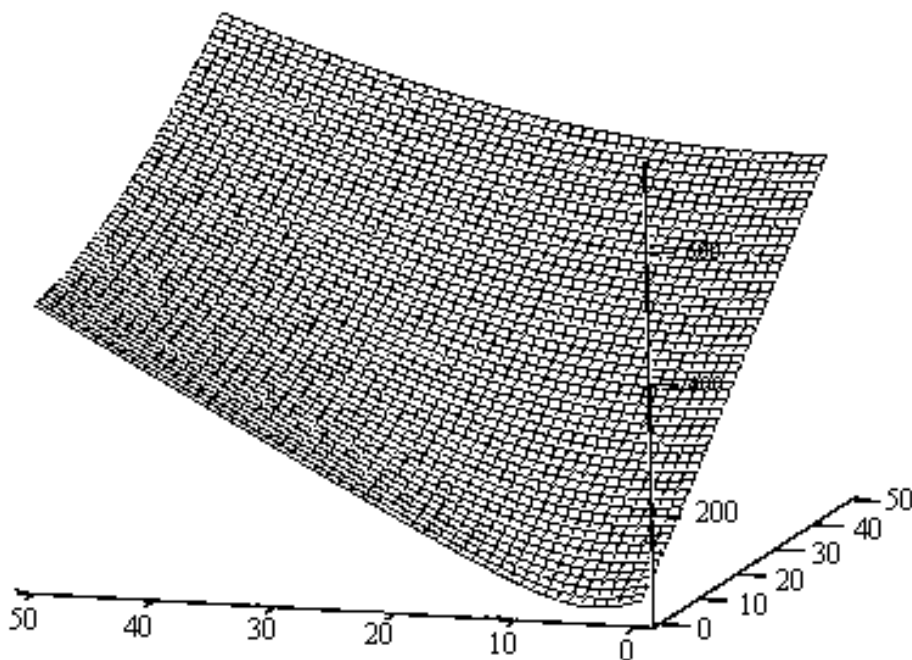


Рисунок 10. Зависимость длины луча от количества отражений вдоль главной и второстепенной улиц

Общая зависимость расстояния пройденного лучом от БС до МС (с учетом количества переотражений вдоль главной и второстепенной улиц), приведена на рисунке 10. На данном графике можно заметить, что имеется один глобальный минимум, следовательно, начальной точкой отсчета при использовании метода оптимизации будет точка (0; 0), которой будет соответствовать минимальное расстояние хода луча от базовой станции до мобильной станции.

Среди различных методов приемлемых для использования в поставленной задаче наиболее подходящим будет метод штрафных функций.

Использование методов оптимизации (метод штрафных функций) для расчета уровня сигнала в условиях городской застройки методом трассировки лучей, показало, что для расчета одного луча требуется 70 мкс. Для примера, возьмем, что в точку приема сигнала приходит порядка 100 лучей, тогда для расчета полного уровня сигнала потребуется 7 мс.

В [18] приводится разработанная модель, и результаты по времени расчета в условиях реальной городской застройки. Так, с использованием этой модели, общее время расчета уровня сигнала на предложенной местности составило 5304 с. (88,4 мин.). Для сравнения при расчете той же местности время расчета, методом трассировки лучей с применением оптимизации, составило 3780 с. (63 мин.). Из приведенных результатов видно, что выигрыш по времени, предложенной модели в комбинации с методами оптимизации, составляет порядка 30 %.

■ Выводы

В статье рассматривается задача расчета уровня электромагнитных полей беспроводной связи в городских условиях для определения зон с высоким уровнем сигнала. Для решения задачи предлагается использовать лучевой метод. Данный метод основан на разложении электромагнитного поля на лучи и поиске лучей, которые соединяют передающее и приемное устройство, с учетом разнородности городской застройки. Приведены результаты расчетов на основе разработанного алгоритма и экспериментальных данных, взятых из литературы. Предложенный подход с использованием коэффициентов корреляции и аппроксимации на основе метода наименьших квадратов позволяет сократить количество итераций при расчетах уровня сигнала с использованием метода трассировки лучей в 2-3 раза по сравнению с обычным методом трассировки лучей.

Литература

- [1] Гуреев А. В. Компьютерные инструменты для автоматизированного проектирования беспроводных сетей / А. В. Гуреев, А. Г. Соколов // CHIP NEWS. – 2003. – № 4. – (EDA EXPERT 2003 г. № 4) – С. 40-42.
- [2] Okumura Y. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service / Y. Okumura, et all. // Rev. Inst. Elec. Eng. – 1968. – V. 16. – № 9, 10.
- [3] Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / M. Hata // IEEE Trans. Vehicular Technology. – 1980. - V. 29. – № 3.
- [4] Lempiäinen J. Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS / J. Lempiäinen, M. Manninen. – 2002. – 293 с.
- [5] Гавриленко В. Г. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи / В. Г. Гавриленко, В. А. Яшнов // Нижний Новгород. – 2003. – 148 с.
- [6] Панченко В. Е. Сочетание статистических и детерминистских методов расчета радиополя в городских условиях / В. Е. Панченко, Т. А. Гайнутдинов, Г. А. Ерохин // Электросвязью – 1998. - № 4. – С. 31-33.
- [7] Бардин Н. И. Распространение УКВ-волн в условиях крупного города / Н. И. Бардин, Н. Д. Дымович // Электросвязь. – 1964. - № 7. - С. 15-18.
- [8] <http://telecomproject.tripod.com/mod.htm>
- [9] Ермолова В. В. Архитектура системы обмена сообщений в немаршрутизируемой сети / В. В. Ермолова, Ю. П. Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2010. – № 7. – С. 79-81.
- [10] Боровиков В. А. Геометрическая теория дифракции / В. А. Боровиков, Б. Е. Кинбер. – М.: Связь, 1978. – 248 с.
- [11] Уфимцев П. Я. Метод краевых волн физической теории дифракции / П. Я. Уфимцев. – М.: Сов. радио, 1962. – 243 с.
- [12] El-Sallabi H. M. and Vainikainen P. Radio wave propagation in perpendicular streets of urban street grid for microcellular communications / Progress In Electromagnetics Research, PIER 40, 229-254, 2003.
- [13] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М., Наука, 1965.
- [14] Whitteker J. H. Measurements of Path Loss at 910 MHz for Proposed Microcell Urban Mobile Systems, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 37, P. 125-129, Aug. 1988.
- [15] Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсон; Пер. с англ. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 499 с.
- [16] Афифи А. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ / А. Афифи, С. Эйзен; Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
- [17] Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
- [18] 18. 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.



.....

Prof. Yakov Lvovich

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Voronezh Institute of High Technologies
E-mail: ya-e-lvovich@vivt.ru

Konstantin Razinkin

Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,
Voronezh Institute of High Technologies
E-mail: kostyr@mail.ru

Juraj Štefanovič

Doctor of Sciences (Engineering),
Pan-European University, Bratislava, Slovakia
e-mail: juraj.stefanovic@paneurouni.com