

МОДЕЛЬ ГОРОДСКОГО МНОГОЛУЧЕВОГО РАДИОКАНАЛА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ О ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

А. А. Карпов

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

Получена 12 августа 2008 г., после доработки - 2 сентября 2008 г.

В работе предложена модель городского многолучевого радиоканала с предварительной обработкой данных о городской застройке. Предложенная модель основана на применении методов геометрической оптики и трехмерном детерминированном описании городской застройки. Предварительная обработка данных о городских сооружениях позволяет существенно повысить скорость расчета без существенных потерь в точности прогноза. Модель позволяет спрогнозировать основные характеристики городского радиоканала в диапазоне УВЧ/СВЧ.

Введение

Построение адекватной модели городского радиоканала является сложной, но в то же время интересной и перспективной задачей, решение которой может принести немалую выгоду операторам, предлагающие свои услуги в области радиосвязи. При моделировании влияния городских сооружений на распространение радиоволн в городе различают два типа методов: статистические и детерминированные. Статистические методы могут предсказать лишь некоторые средние характеристики сигналов, но при этом они не принимают во внимание особенности конкретных радиотрасс и основываются на предварительных экспериментальных данных, от числа которых зависит точность расчетов. В отличие от них, детерминированные методы учитывают конкретную городскую застройку, особенности стен зданий и, поэтому в целом дают более точные прогнозы. Среди детерминированных методов особое место занимают методы, основанные на приближении геометрической оптики, которые помимо расчета напряженности поля в точке приема позволяют предсказать направление прихода, а также характеристики лучей, формирующие данное поле. Способность давать подобные оценки делает эти методы особенно ценными, так как сейчас, в эпоху развития цифровой связи, помимо прогноза относительно такого важного параметра как напряженность поля, требуется знать еще и прогноз относительно других параметров, например, время задержки лучей. Основной недостаток методов геометрической оптики, заключается в том, что они предъявляют высокие требования к ресурсам компьютера, от вычислительной мощности которого зависит время расчета. Представленная в данной работе модель, путем предварительной обработки данных о городской застройке, значительно снижает эти требования, что дает существенный выигрыш во времени. Сама модель, основана на методах геометрической оптики, что позволяет достаточно точно моделировать механизмы распространения радиоволн в городской среде.

Методы геометрической оптики

Методы геометрической оптики основаны на приближении геометрической оптики и, поэтому главный критерий при их использовании заключается в том, чтобы длина

электромагнитной волны была много меньше размеров препятствий. В условиях города данное требование достаточно хорошо выполняется на частотах УВЧ/СВЧ диапазона. Основными алгоритмами в методах геометрической оптики являются: метод мнимых источников [1] и метод запуска лучей [2]. Остальные алгоритмы, как правило, являются модификациями этих двух.

Метод мнимых источников заключается в том, что рассчитываются координаты зеркального отображения передатчика относительно плоскости стены каждого здания и определяется, пересекает ли траектория зеркально отраженного луча стену данного здания. Следующий этап включает расчеты двукратно отраженных волн, при этом источниками излучения являются виртуальные источники 1-го порядка. Процедура расчета повторяется для отраженных волн двух-, трех- и большей кратности. После вычисления всех мнимых источников при заданной глубине расчета, каждый из них проверяется на факт «светимости» на приемник, то есть на проверку нахождения приемника в секторе обзора данного мнимого рефлектора. Если такая проверка находит подтверждение, то для данного мнимого источника строится луч в направлении обратном распространению (рис.1).

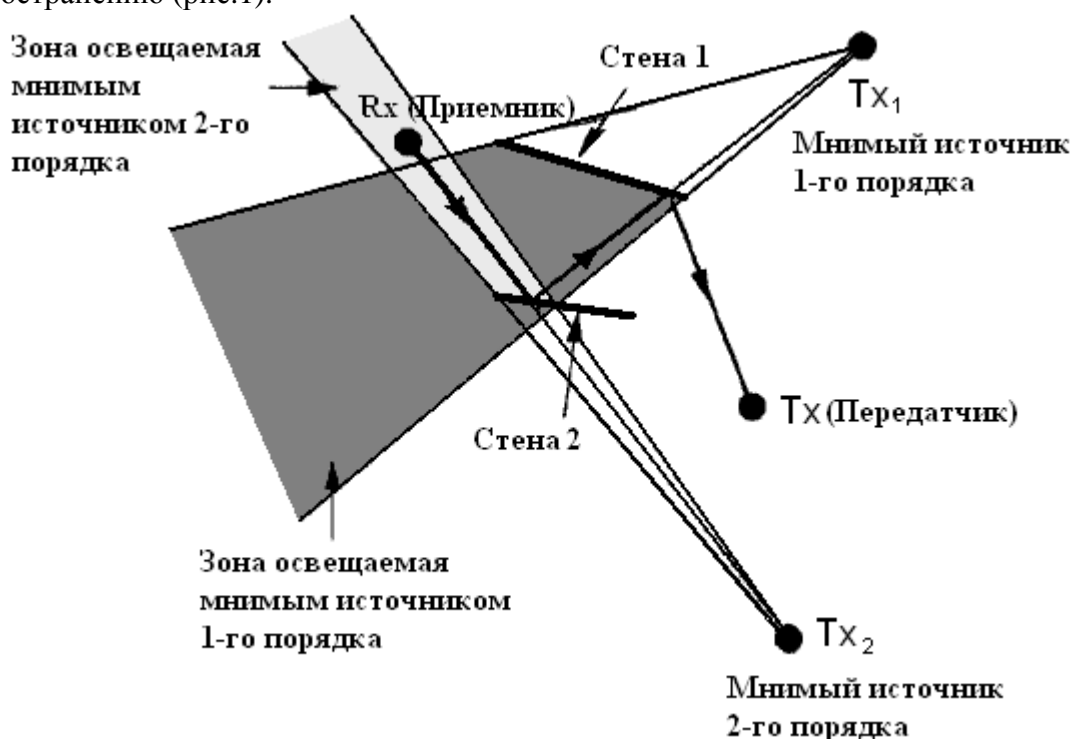


Рис 1. Метод мнимых источников.

Метод запуска лучей решает задачу «в лоб» - из точки расположения передатчика с определенным шагом по пространственному углу в окружающее пространство запускается большое количество тестовых лучей (рис. 2.). Количество лучей и максимальное количество взаимодействий лучей с препятствиями, как и в случае метода мнимых источников, задается пользователем. Тестовый луч представляет собой некий направленный поток излучения вокруг своего главного направления, чье нормальное поперечное сечение выбирается пользователем. Если точка приема лежит внутри потока данного луча то считается, что луч попадает в точку приема. Дифракция в этом методе играет роль вторичного источника, и поэтому нужно учитывать, что время расчета зависит от количества дифрагирующих краев.

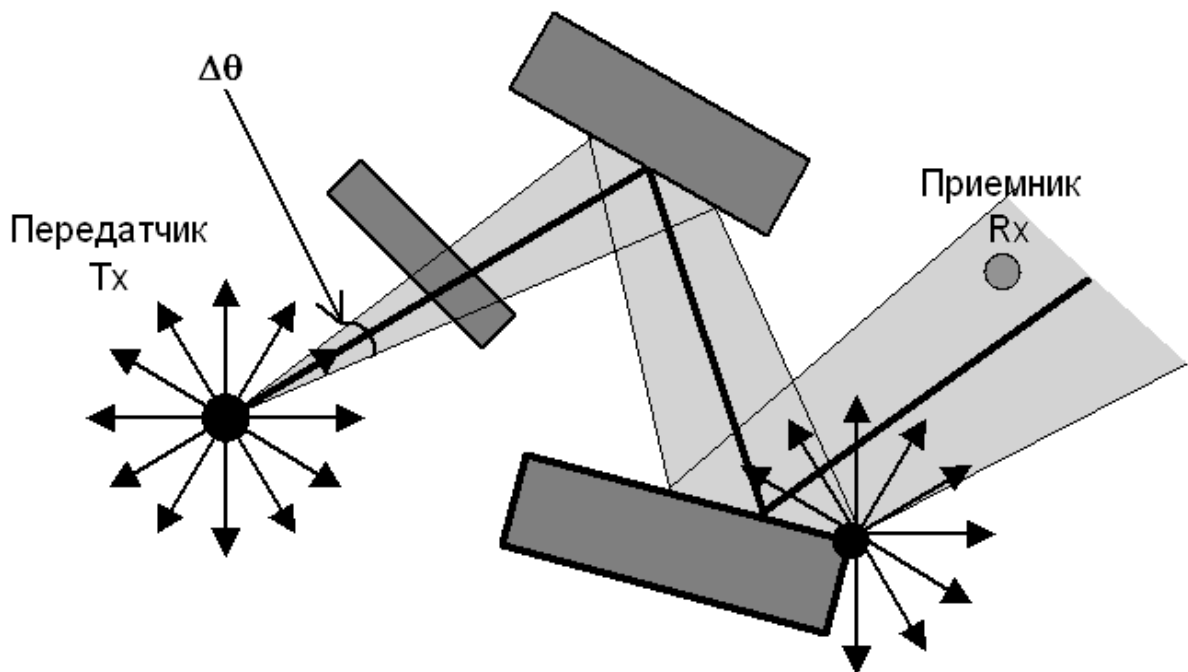


Рис 2. Метод запуска лучей.

Каждый из этих двух методов имеет свои преимущества и недостатки. Метод мнимых источников оказывается более точным, так как при заданной глубине расчета с его помощью можно определить все лучи попадающие на приемник, но с увеличением кратности переотражений, объем обчисляемого массива данных возрастает в геометрической прогрессии, что сильно сказывается на времени расчета. Метод запуска лучей в целом более прост и работает быстрее, но при недостаточно большом количестве тестовых лучей можно упустить из виду важные лучи, что приведет к большим ошибкам в прогнозе. Особенно заметными будут ошибки в точках, достаточно удаленных от передатчика. Предлагаемая модель городского многолучевого радиоканала содержит в себе преимущества обоих методов: по точности она не уступает методу мнимых источников, а по скорости сравнима с методом запуска лучей.

Модель городского многолучевого радиоканала

Модель городского многолучевого радиоканала основана на следующих предположениях:

- ✓ В точку приема приходит множество лучей, но только несколько из них приносят в точку приема основную часть электромагнитной энергии;
- ✓ Условия видимости между зданиями не зависят от места расположения передатчика и приемника;
- ✓ При малом изменении точки приема изменение поля также незначительно.

Используя данные предположения, модель позволяет существенно сократить время на поиски лучей, и достигается это путем предварительной обработки данных о городской застройке.

Препроцессорная обработка данных о городской застройке

Основой для построения базы данных городской застройки в памяти ЭВМ является топографический план города, который в векторном формате загружается в программу. На первом шаге, каждая стена разбивается на площадки, а ребра стены на отрезки, и

каждый из подобных сегментов заменяется центральной точкой, координаты и тип которой записывается в файл и сохраняется на жестком диске (рис 3.).

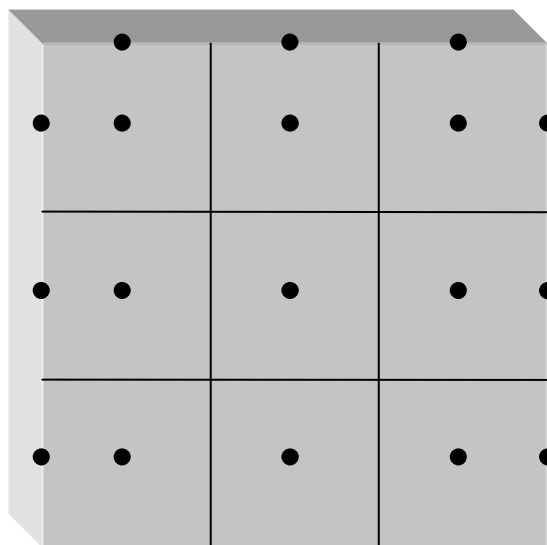


Рис 3. Дискретизация поверхности стены.

На втором шаге для каждого сегмента, для его центральной точки определяется набор центральных точек других сегментов, которые «видны» из данной. Найденные соотношения также записываются в отдельный файл.

И наконец, на последнем шаге, на территорию города накладывается расчетная сетка, шаг которой зависит от размеров зданий и плотности городской застройки (рис. 4). В узлы сетки последовательно помещается приемник, и также как на втором шаге определяется набор центральных точек сегментов, которые «видны» из точки приема. Полученные результаты в виде файла сохраняются на жестком диске.

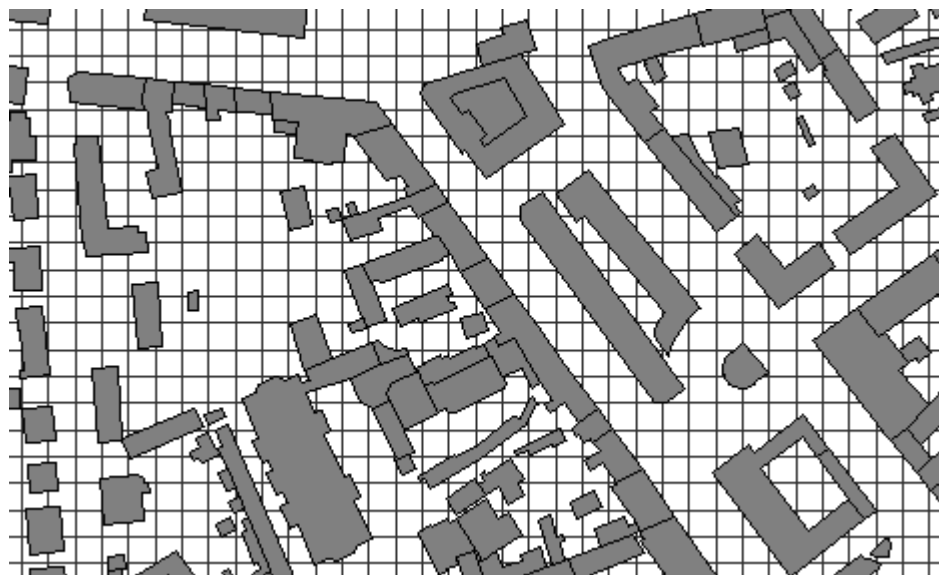


Рис 4. Построение расчетной сетки.

Время, потраченное на предварительную обработку, может быть достаточно большим – от нескольких минут до нескольких часов, в зависимости от площади города, числа домов, количества стен, размера настенных сегментов и т.д. Но данную процедуру нужно проводить только один раз и впоследствии, загружая данные из файлов, пользоваться ее результатами.

Моделирование

Алгоритм работы модели предусматривает следующую последовательность расчетов. Анализируется трехмерная геометрия задачи – массив зданий. Из них формируется область “наибольшего влияния” - выбираются здания, лежащие в прямоугольнике «приемник-передатчик». Ширина и длина прямоугольника выбираются исходя из требуемой точности расчета, плотности городской застройки, высоты приемника и передатчика, а также от расстояния между передатчиком и приемником (рис. 5). Подобная выборка зданий существенно сокращает время на прогнозирование без существенных потерь в оценке многолучевого радиоканала. Здания, лежащие вне выбранного участка, при расчетах не учитываются.

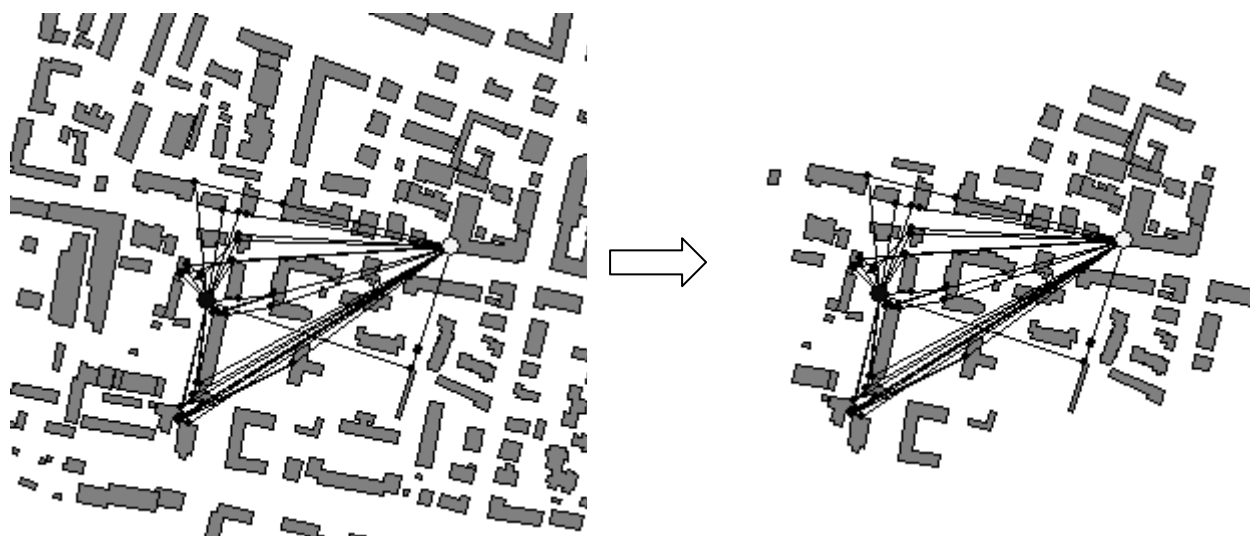


Рис 5. Формирование участка городской застройки, участвующего в расчетах.

Далее определяется наличие прямого луча между передатчиком и приемником, а также сегменты стен, которые видны из точки излучения. Так как каждый найденный сегмент связан соотношениями на прямую видимость с другими сегментами, то дальнейшие действия в поиске лучей по своему принципу схожи с методом запуска лучей. А именно, при выполнении соответствующих условий на дифракцию или отражение, строится дерево возможных вариантов распространения радиоволн в городе, причем в качестве точек, в которых луч отражается от зданий или дифрагирует на краях стен, берутся центральные точки сегментов. В случае если луч падает на сегмент, который «виден» из ближайшего к приемнику узла расчетной сетки, то он проверяется на факт попадания в точку приема (рис. 6).

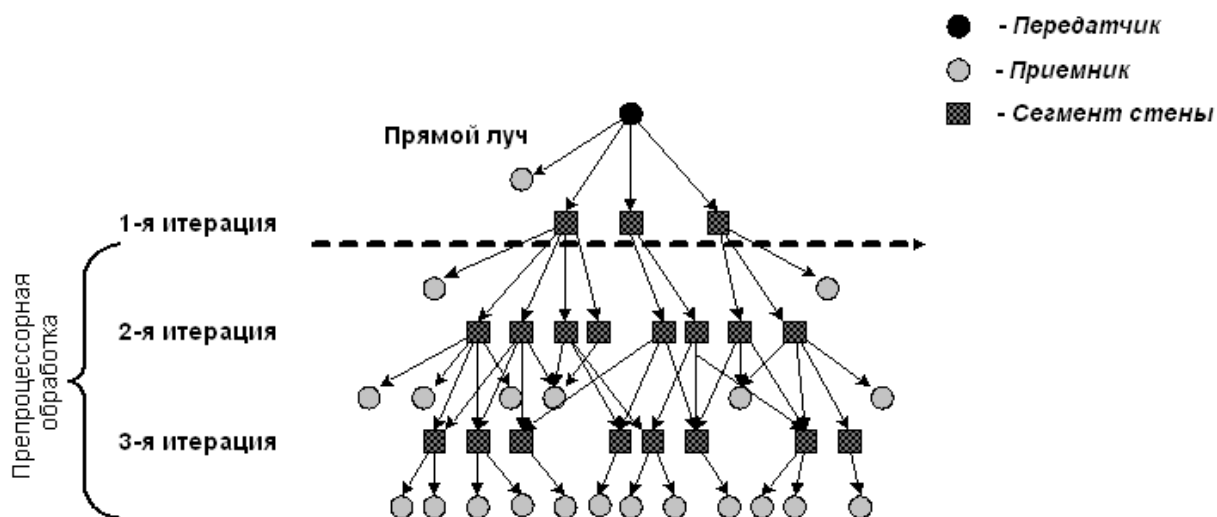


Рис 6. Построение «дерева рефлекторов».

Выигрыш во времени, который дает предварительная обработка данных о городской застройке, пропорционален отношению числа ответвлений дерева расчета, определенных на первом этапе, к общему числу ответвлений, найденных в последующих итерациях. Предварительная обработка обладает еще одним преимуществом: уже на этапе поиска лучей в зависимости от механизма их распространения можно дифференцировать лучи по группам, что также помогает уменьшить время расчета, не вызывая значительных ошибок в прогнозе. Поиск лучей осуществляется в порядке возрастания номеров групп (Табл. 1). И если первый найденный луч, попадающий в точку приема, принадлежит группе с номером X , то в дальнейших расчетах рассматриваются только лучи, принадлежащие группе с номером не большим $X+1$.

| № группы | Механизм распространения |
|----------|---------------------------------|
| 1. | Прямой луч |
| 2. | Однократное отражение |
| 3. | Однократная дифракция |
| 4. | Двукратное отражение |
| 5. | Одно отражение и одна дифракция |
| 6. | Двукратная дифракция |

Таблица 1. Дифференциация лучей по механизму их распространения при максимальной глубине поиска $N=2$.

Результаты моделирования

На основе математической модели городского многолучевого радиоканала была создана компьютерная модель (рис. 7). Полигоном для апробации компьютерного варианта модели стал трехмерный план г. Ярославля.

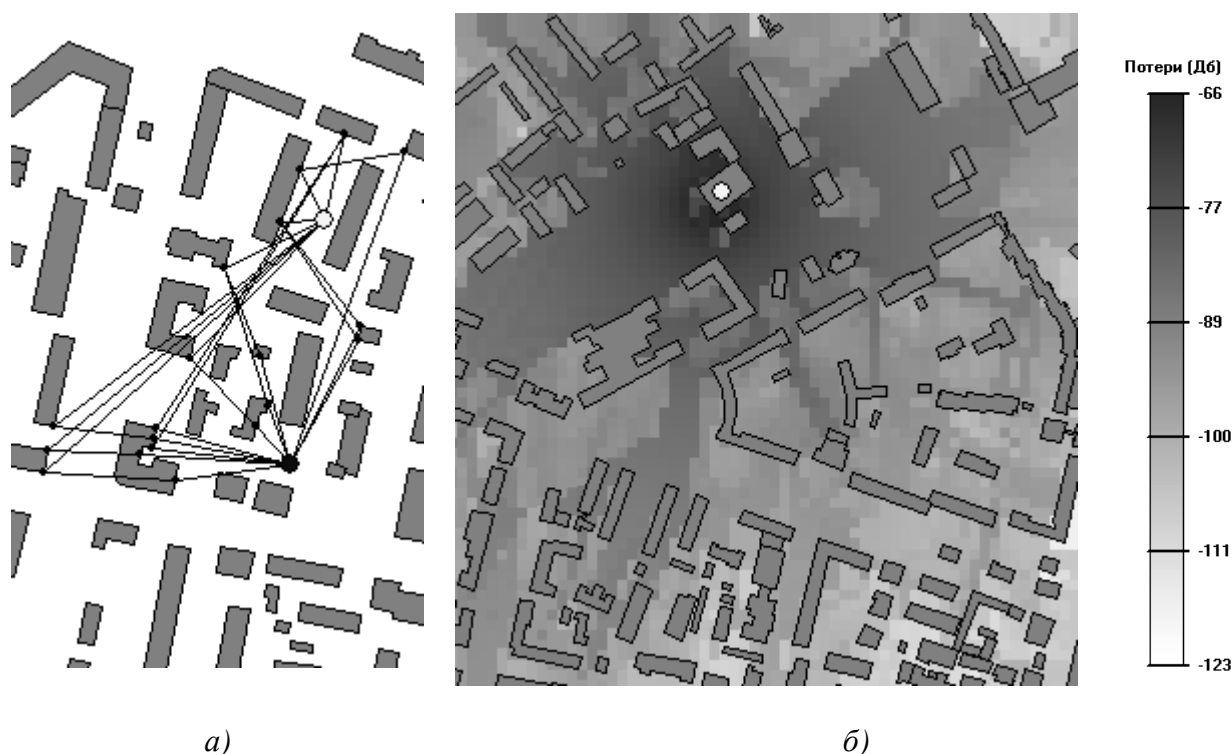


Рис 7. а) - компьютерная модель городского многолучевого радиоканала; б) - расчет напряженности поля на заданной площади.

В таблице 2 представлены результаты предварительной обработки данных о городской застройке при различных размерах области прогнозирования. Длина сегментов стен, как и шаг расчетной сетки, выбран $L = 10$ м. Время прогноза в зависимости от размера расчетной области показано в таблице 3, здесь же, для сравнения, дано время расчета методом мнимых источников. Вычисления проводились на компьютере, имеющем двухядерный процессор с тактовой частотой 1,83 ГГц.

| Размер расчетной области | $S = 500 \times 500$ м. | $S = 1000 \times 1000$ м. | $S = 2000 \times 2000$ м. |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Число зданий | 242 | 801 | 2155 |
| Время расчета, с | 1140 | 2825 | 8465 |
| Объем файлов, Мб | 11.7 | 101.4 | 217.1 |

Таблица 2. Результаты предварительной обработки данных о городской застройке г. Ярославля.

| Размер расчетной области | $S = 500 \times 500$ м. | $S = 1000 \times 1000$ м. | $S = 2000 \times 2000$ м. |
|---|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Модель городского многолучевого радиоканала | 4с | 19с | 67с |
| Метод мнимых источников | 302с | 2769с | 16471с |

Таблица 3. Время прогноза на модели и методом мнимых источников в зависимости от размера расчетной области.

Об адекватности разработанной модели можно судить путем сравнения расчетных данных с экспериментальными. Так как электромагнитное поле в точке приема формируется несколькими лучами, приходящими в данную точку, то сравнение результирующей напряженности поля, вычисленной по модели, с реальными данными, даст возможность говорить о правильности предположений, заложенных в модель, а также о точности расчетов характеристик отдельных лучей. Поэтому, в условиях города был проведен ряд измерений напряженности поля на частотах 950 МГц и 1880 МГц. Тестовый приемник с ненаправленной антенной находился на крыше автомобиля, на высоте около 1.7 м от уровня земли, а его местоположение определялись с помощью системы спутниковой навигации GPS. Среднее и среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибки моделирования – разность между расчетной и измеренной напряженностью поля - представлено в таблице 4. Для сравнения в таблице также приведены результаты расчетов по моделям COST 231 - Hata и COST 231 - Walfish-Ikegami[3].

| № трассы | Трасса №1 | | Трасса №2 | | Трасса №3 | |
|---|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| | 92 | | 349 | | 379 | |
| Параметры | Среднее | СКО | Среднее | СКО | Среднее | СКО |
| Модель городского многолучевого радиоканала | -2,54 дБ | 4,50 дБ | -0,86 дБ | 6,71 дБ | 0,56 дБ | 8,59 дБ |
| COST 231 – Hata | -4,02 дБ | 3,42 дБ | 4,89 дБ | 5,81 дБ | 3,51 дБ | 8,87 дБ |
| COST 231 – Walfish-Ikegami | -5,54 дБ | 3,52 дБ | -5,66 дБ | 5,53 дБ | -7,13 дБ | 8,65 дБ |

Таблица 4. Характеристики ошибки моделирования.

Выводы

В работе описана модель городского многолучевого радиоканала с предварительной обработкой данных о городской застройке. Разработанная модель позволяет определить с учетом конкретной городской застройки основные параметры канала радиосвязи в городе в диапазоне УВЧ/СВЧ, в том числе и такие как: напряженность поля; время задержки, величину ослабления и направление прихода каждого луча. Модель реализована в виде программного продукта, где в качестве городской застройки использован трехмерный план г. Ярославля. При сравнении расчетной напряженности поля с имеющимися экспериментальными данными можно увидеть, что среднее значение ошибки моделирования не превышает 3 дБ, а ее СКО колеблется в пределах 4-9 дБ. Для повышения точности расчетов на модели необходимо описывать городскую среду с большей детализацией: принимать во внимание движение автомобилей, людей; подробней описывать сами здания; более точно задавать физические свойства стен зданий; учитывать наличие киосков и т.д. Сопоставление результатов полученных на модели городского многолучевого радиоканала с результатами расчетов на моделях COST 231-Hata и COST 231-Walfish-Ikegami показало, что ее прогноз оказался точнее.

Литература

1. Лаврентьев Ю.В. Квазидетерминированная трехмерная модель многолучевого канала распространения миллиметровых радиоволн в городской застройке. “Журнал радиоэлектроники”, 2000, № 5.
2. G. D. Durgin, *Advanced site-specific propagation prediction techniques*, Blacksburg, Virginia, 1998.
3. Final report of COST 231, European Commission, Bruxelles, 1999, <http://www.cost.esf.org/>, <http://www.lx.it.pt/cost231/>.
4. C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York, Wiley, 1989.
5. S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, “Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communications system design,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, pp. 1058–1066, Nov. 1994.