УДК 621.396

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ

***© 2016 А. М. Агафонов, О. А. Кравцова, Н. В. Аксенова***

*Российский новый университет*
*ООО Поли-Пак Кейсинг*
*Воронежский институт высоких технологий*

*В статье рассматривается методика, позволяющая на основе лучевого метода проводить оценку характеристик распространения электромагнитных волн. Использование итерационных методов позволит ускорить процесс нахождения решения, а также позволит обойтись без нахождения кратности переотражения.*

*Ключевые слова: моделирование, распространение электромагнитных волн, лучевой метод.*

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

Целью работы является построение на основе методов геометрической оптики и геометрической теории дифракции модели предназначенной для расчёта распространения сигнала в условиях города.

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

Среди статистических методов можно выделить следующие:

1. Модель распространения в свободном пространстве.
2. Модель распространения сигнала в реальных условиях.
3. Модель Окамуры.
4. Модель Хата.

В реальных условиях распространения радиоволн для разных местностей величина затухания определяется комплексом параметров, которые задают особенности распространения радиоволн. Среди них можно отметить:

- процессы отражения радиосигналов от объектов, которые имеют размеры, больше, чем длина радиоволны;
- процессы дифракции радиоволн, для которых характерным является преломление радиосигналов на пути распространения;
- процессы рассеивания радиосигналов, которые происходят при наличии на местности большого количества объектов, у которых размер меньше, чем длина радиоволн (например, лиственные деревья);
- появление эффекта Доплера, имеющего место при перемещении подвижных объектов.

Модель, предложенная Окамурой, базируется на результатах экспериментов и, если сравнивать ее с двухлучевой моделью, то она дает возможности более точным образом предсказывать среднее значение затухания радиосигналов на довольно большом расстоянии между передатчиком и приемником.

Наиболее удачной и подробной является аналитическая модель, полученная М. Хатой как результат прямой аппроксимации кривых Окамуры. Модель Хаты не включает в себя всех результатов, которые получил Окамура, и она справедлива для квазиплоского города.

На основе статистических моделей строится весь алгоритм расчета. Т. е. производится разделение на участки, где производится расчет с помощью методов распространения волн в пределах прямой видимости (где учитываются также отражения от земли) и методов, учитывающих распространение электромагнитных волн в городских условиях.

Статистические методы не позволяют дать полное описание многолучевого канала распространения, в связи с этим широко применяются детерминированные модели.

Среди детерминированных моделей можно выделить следующие:

Агафонов Александр Михайлович – РосНОУ, студент, e-mail: ag000003rt@yandex.ru
Кравцова Оксана Александровна– ООО Поли-Пак Кейсинг, специалист, e-mail: polioksw67@yandex.ru
Кравцова Надежда Васильевна– ВИВТ АНОО ВО, студент, e-mail: zamolfil_14@yandex.ru

1. Волноводная модель каналов связи в плотной городской застройке.

2. Квазидетерминированная трехмерная модель распространения волн в плотной городской застройке.

Таким образом, алгоритм расчета распространения электромагнитных волн с учетом городской застройки, можно разделить на следующие этапы:

1. Определение областей прямого хода луча.
2. Определение областей переотражений.
3. Определение теневых зон.

Расчеты будем проводить в помощью метода лучей и пучков, которые относятся к геометрической оптики.

Поле вдали от поверхности тела вне переходных зон представляется в виде суммы лучевых полей (1).

$$\mathrm{u(P)} = \sum_{\mathrm{n}} \mathrm{u_n(P)} = \sum_{\mathrm{n}} \mathrm{A_n} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{ikS_n}} \quad (1)$$

Лучевым полем мы называем решение уравнения Гельмгольца (или для электромагнитной задачи — уравнений Максвелла), записываемое в форме лучевого разложения: $u = A\mathrm{e}^{\mathrm{ikS}}$, где S — эйконал, а амплитуда $A$ разлагается в асимптотический ряд по степеням $\mathrm{k}^{-1}$: $A = \sum \left(\frac{i}{k}\right)^p \cdot A_p(r)$. Эйконал s удовлетворяет, как известно, уравнению эйконала, коэффициенты $\mathrm{A_p}$ – системе дифференциальных уравнений (уравнений переноса). Первый член лучевого разложения имеет геометрооптический вид и (для однородной среды) равен $A_0 = f_0 \cdot J^{-1/2}$. Здесь $f_0$ постоянно на каждом луче и определяется начальным условием в точке выхода луча; $J$ - якобиан перехода к лучевым координатам, пропорциональный площади поперечного сечения лучевой трубки. Коэффициент $\mathrm{A_p}$ равен $A_p = f_p \cdot J^{-1/2} + B_p$, где первое слагаемое – решение однородного уравнения переноса, а $B_p$ зависит от $A_{p-1}, A_{p-2} \dots A_0$.

Для случая плоской волны, цилиндрической волны в двумерной задаче и сферической волны в трехмерной, выражающие $A_p$ через $f_0, f_1 \dots f_p$. Аналогичные результаты получены для тороидальных и веретенообразных волн, т. е. волн, для которых $s = \sqrt{z^2 + (r - r_0)^2}$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – (такие волны возникают, например, при дифракции сферической волны на клине и в осесимметричной задаче дифракции на диске и усеченном круговом конусе.) Это дало возможность найти полное лучевое разложение краевой волны, возникающей при дифракции на клине ненаправленной сферической волны. В получены явные формулы, выражающие $\mathrm{A_p}$ через $f_0, f_1 \dots f_p$ для зависящей от $z$ цилиндрической волны, у которой $A_p = A_p(x, y, z)$, а $s = r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Оказалось, что s по-прежнему удовлетворяет уравнению эйконала. В нулевом приближении амплитуды $|\boldsymbol{E}|, |\boldsymbol{H}|$ удовлетворяют законам геометрической оптики; $\boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}$ перпендикулярны лучу, а плоскость поляризации изменяется вдоль луча согласно уравнению эйконала $d\omega/d\sigma = 1/T$. Здесь $\omega$ — угол между этой плоскостью и главной нормалью к лучу, $d\sigma$ - элемент длины вдоль луча, $T$ - радиус кручения. Если луч – плоская кривая, то плоскость поляризации постоянна вдоль этого луча.

Лучевые разложения неприменимы в окрестностях каустик и фокальных линий, хотя справедливы и до, и после них. Известно, что в нулевом приближении прохождение лучом каустики дает добавочный скачок фазы - $\pi/2$. Аналогичные добавки к фазе были найдены для последующих приближений (для нестационарной постановки задачи).

Строились лучевые разложения для упругих волн, для головных волн, для волн, распространяющихся по поверхности упругого тела (волн Рэлея). Во всех этих работах также рассматривается нестационарная постановка.

При построении лучевых полей существенную трудность в случае неоднородной среды представляет уже вычисление эйконала, т. е. определение лучевой структуры решения. Во многих случаях для решения этой задачи выгодно применить теорию возмущений, взяв в качестве нулевого приближения известную систему лучей (для «близкой» среды). Аналогичный подход был использован для неоднородных слабо поглощающих сред. Оказалось, что лучи при прочих равных условиях отклоняются в сторону большего поглощения.

Полутеневые поля описывают решение в окрестности границ тени – свет, образующихся при дифракции лучевого поля на кромках и ребрах. Например, в окрестности границы тень – свет для первичного поля решение имеет вид:

$$u = \sum \left(\frac{i}{k}\right)^n A_n \cdot e^{iks_0} F\left(\sqrt{k(s_e - s_0)}\right) + \sum \left(\frac{i}{k}\right)^{n+1/2} B_n \cdot e^{iks_e} \quad (2)$$

где $F(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{is^2} ds$ – интеграл Френеля, коэффициент при этой функции – первичная волна; $s_e$ и $s_0$ – эйконалы краевой волны и первичного поля. На границе тень – свет $s_e - s_0$ имеет нуль второго порядка. Мы полагаем $\sqrt{s_e - s_0} > 0$ в освещенной области и $\sqrt{s_e - s_0} < 0$ в тени: так определенный $\sqrt{k(s_e - s_0)}$ – аналитическая функция в окрестности границы тень-свет. Коэффициенты $B_n$ регулярны в окрестности границы тень – свет; они зависят от формы граней в окрестности кромки и от краевых условий. Формула (2) была получена при решении задачи дифракции на плоском экране с криволинейным вырезом. Была сформулирована гипотеза, что (2) описывает поле в окрестности границы тень – свет в случае общей задачи дифракции произвольного лучевого поля на теле с криволинейными ребром и гранями.

Если лучевое поле падает на гладкую поверхность, не образуя тени, то, как известно, отраженные и преломленные поля также можно искать в форме лучевых разложений. Асимптотическое удовлетворение граничных условий дают начальные значения для эйконалов и коэффициентов лучевых разложений отраженных и преломленных волн. При решении задач такого рода удобно использовать явные формулы, связывающие кривизны фронтов первичной, отраженной и преломленной волн с кривизнами поверхности. Эти формулы получены для падающей плоской волны, для сферической волны, рассмотрена двумерная задача. Наиболее общий случай трехмерной задачи и произвольного фронта падающей волны.

Аналогичный подход применим, если падающее поле имеет вид каустического или полутеневого (2) разложения. Тогда отраженное поле записывается в виде такого же разложения. Начальные значения для аргументов специальных функций и амплитудных множителей снова определяются из условия, чтобы сумма первичного и отраженного полей асимптотически удовлетворяла краевым условиям.

Если ранее в (2) под $s_e$ понимался эйконал краевой волны, то после отражения возникает поле, имеющее вид (2) и характеризующееся новыми эйконалами $s_e^1$ и $s_e^2$. При этом эйконал $s_e$ уже не будет эйконалом какой-либо краевой волны, лучи которой выходят из фокальной линии – ребра. Рассматриваются полутеневые поля общего вида, записывающиеся в форме (2), где $s_e$ – произвольный эйконал: $s_e \geq s_0$, совпадающий на границе тень – свет с $s_0$.

Для решения задачи (2) необходимо построить матрицу, которая получается очень большого объема, для решения данной системы воспользуемся итерационными методами, широко применяющимися при решении задач оптимизации.

Для большинства задач нахождение аналитического решения уравнения вызывает существенные, а часто и непреодолимые трудности. Тогда используют итерационные (приближенные) методы поиска решения оптимизационной задачи на открытом множестве.

Итерация – многократное выполнение одного и того же действия. Итерационные методы решения оптимизационной задачи заключается в многократном применении одной и той же математической операции и получения последовательности точек, сходящейся к точному решению.

Таким образом, использование итерационных методов позволит ускорить процесс нахождения решения, а также позволит обойтись без нахождения кратности переотражения.

В работе был предложен на основе методов геометрической оптики и геометрической теории дифракции, алгоритм расчёта распространения сигнала в городских условиях, а также было предложено применение итерационных методов, что существенно сократит время расчета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А. В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А. В. Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2012. – № 9. – С. 49-50.

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. Преображенский А. П. Анализ распространения электромагнитных волн внутри помещения в рамках лучевого подхода / А. П. Преображенский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 2. – С. 12.

4. Рыженин П. С. Моделирование распространения радиоволн внутри помещения / П. С. Рыженин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 2. – С. 14.

5. Мишин Я. А. О системах автоматизированного проектирования в беспровод-

ных сетях / Я. А. Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2013. – № 10. – С. 153-156.

6. 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.

7. Косилов А. Т. Методы расчета радиолокационных характеристик объектов / А. Т. Косилов, А. П. Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2005. – Т. 1. – № 8. – С. 68-71.

8.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.

9. 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.

10. Головинов С. О. Проблемы управления системами мобильной связи / С. О. Головинов, А. А. Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2012. – № 9. – С. 13-14.

11. 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.

12. Преображенский А. П. Аппроксимация характеристик рассеяния электромагнитных волн элементов, входящих в состав объектов сложной формы / А. П. Преображенский, Ю. П. Хухрянский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2005. – Т. 1. – № 8. – С. 15-16.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Глотова Т. В. Решение задачи рассеяния электромагнитных волн внутри помещения на основе интегро-параболического подхода / Т. В. Глотова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1. С. 4.

17. 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. – С. 13.

18. Бокова О. И. Проектирование наземных радиосистем передачи информации с помощью специализированных программных комплексов / О. И. Бокова, С. В. Канавин, Н. С. Хохлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 2. – С. 6.

## MODELING OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION BASED ON RAY METHODS

***© 2016 A. M. Agafonov, O. A. Kravtsova, N. V. Aksenova***

*Russian New University*
*JSC Poli-Pak Keysing*
*Voronezh institute of high technologies*

*The technique, which allows on the basis of a ray-tracing method to evaluate the propagation characteristics of electromagnetic waves is considered. The use of iterative methods will speed up the process of finding solutions and will allow to do without finding the multiplicity of reflections is shown.*

*Keywords: modeling, electromagnetic wave propagation, radiation method.*