

УДК 621.391.812

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ЗОНАХ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. Ю. Михайлова, А. П. Борисов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Г. Барнаул

В статье рассматриваются методики вычисления дальности распространения радиосигнала сети мобильной связи в условиях сложного ландшафта.

Ключевые слова: распространение радиоволн, модель Окамура-Хаты, модель Ксиа-Бертони, модель Волфиш-Икегами, модель Ли.

На каждого жителя нашей планеты в среднем приходится несколько мобильных телефонов. Это весьма красноречиво демонстрирует уровень популярности сотовой связи. В условиях жесткой конкуренции между операторами обеспечение бесперебойной связи можно назвать определяющим фактором. Построение надежных сетей радиосвязи – трудоемкий процесс, который сопряжен с рядом проблем. Одна из наиболее сложных – расчет напряженности поля (и, соответственно, потерь мощности сигнала) в условиях открытой местности. Дело в том, что радиоволны (в том числе и ультра высокой частоты, применяемые для передачи данных в сетях стандарта GSM) ведут себя по-разному в зависимости от условий окружающей среды: рельефа местности, плотности городской застройки и т.д. Эта проблема осложняется тем, что сотовая связь используется по большей части в городах и населенных пунктах, а ландшафт такой местности имеет сложную и неоднородную структуру. Теоретически рассчитать поведение дециметровых волн (волн ультра высокой частоты) довольно сложно, поскольку приходится одновременно учитывать механизмы отражения, рассеяния и дифракции волн.

Однако такие расчеты выполнять необходимо для планирования и организации сетей сотовой связи (для оптимальной расстановки базовых станций), а также для формирования маскирующих помех с целью предотвращения несанкционированного доступа к информации по радиоканалу.

Созданные на сегодняшний день модели расчета зоны покрытия в радиосетях отличаются по сложности (по количеству факторов, которые они учитывают) и условно делятся на три группы (рисунок 1).

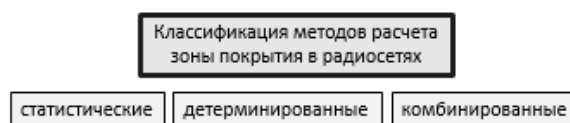


Рисунок 1 – Классификация методов расчета зоны покрытия

Детерминированные и комбинированные модели не получили широкого применения так как не могут учесть абсолютно все факторы, воздействующие на сигнал, а расчеты оказываются слишком сложными. Хотя статистические модели не лишены недостатков (однородность структуры модели, низкая точность, необходимость использовать модели не по-отдельности, а несколько моделей в комплексе при большом разбросе значений переменных), они наиболее активно используются для проведения расчетов в силу простоты расчетов.

К статистическим моделям расчета потерь радиосигнала относятся модели Кся-Бертони, Окамура-Хаты, Уолфиша Икегами, Ли и другие. Все эти модели базируются на экспериментальных исследованиях напряженности электромагнитного поля.

Самой простой моделью для вычисления потерь мощности радиосигнала является модель свободного пространства.

Уравнение для определения потерь может быть записано в двух формах:

– линейной (L_p раз):

$$L_p = \frac{\lambda^2}{4\pi d^2} \quad (1)$$

, где λ – длина волны сигнала,
 d – расстояние между передатчиком и приемником;

– и логарифмической (L_p дБ):

$$L_p = -32,4 - 20 \log(f) - 20 \log(d) \quad (2)$$

, где f – частота сигнала в мегагерцах,
 D – расстояние в километрах.

При заданной несущей в первой формуле длина волны, а во второй формуле первые два слагаемых – константы, и получается, что потери при распространении сигнала в обоих случаях зависят только от расстояния между базовой и мобильной станциями.

На рисунке 2 приведен график, отображающий зависимость уровня радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком сигнала.

График представлен в логарифмическом масштабе.

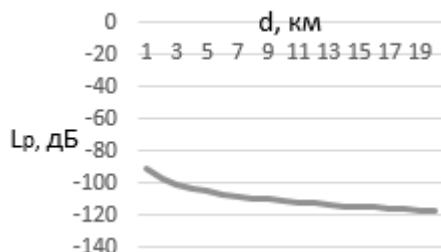


Рисунок 2 – Ослабление радиосигнала в свободном пространстве

Этот график является классическим, так как он отображает зависимость уровня потерь радиосигнала только от расстояния между приемником и передатчиком. Данный метод расчета в системах мобильной связи не используется, потому что расчетные значения верны только для свободного пространства (например, космос), однако он позволит понять, как влияет изменение характера местности на радиус действия базовой станции мобильной связи в сравнении со свободным пространством.

Модель Ли. В наземной связи распространение сопровождается большими потерями, чем в свободном пространстве за счет неоднородности ландшафта между передатчиком и приемником. Результативный

принятый сигнал складывается из сигналов, перемещающихся через прямые и не прямые пути. Поэтому степень потерь на трассе находится в более сильной зависимости от расстояния между передатчиком и приемником (базовой и мобильной станцией). Для иллюстрации этого утверждения ниже приведена одна из статических моделей – модель Ли в виде упрощенной формулы для частот, используемых в сотовой связи:

$$L_p = 1,14 \cdot 10^{-13} \frac{h^2}{d^{3.84}} \quad (3)$$

, где d – расстояние в километрах, h – высота антенны базовой станции в метрах (в качестве примера возьмем высоту в 50 м).

В логарифмической форме:

$$L_p = -129,45 - 38,4 \cdot \lg(d) - 20 \cdot \lg(h) \quad (4)$$

На рисунке 3 представлен график потерь радиосигнала, полученный по модели Ли и представленный в логарифмическом масштабе.

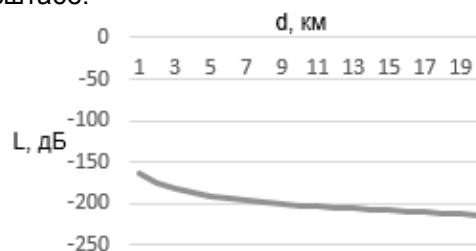


Рисунок 3 – Ослабление радиосигнала с увеличением расстояния согласно модели Ли

Модель Окамура-Хата и COST-231 Уолфиш-Икегами. Статистические модели базируются на результатах многочисленных экспериментов по исследованию напряженности электромагнитного поля. Первой исторически была модель Окамура-Хаты. Первоначально эмпирическая модель Окамура основывалась на измерениях, проведенных в нескольких районах Токио и представляла собой набор кривых для различных частот в разных местностях. Спустя 12 лет М. Хата аппроксимировал кривые распространения математическим выражением. Эта формула охватывала только диапазон частот $f = 150 \div 1000$ МГц. Но, как мы знаем, связь GSM использует полосу частот в районе 1800 МГц, и к данной полосе частот эта модель неприменима. Поэтому позднее Икегами были рассчитаны поправочные коэффициенты специально для частот $f = 1500 \div 2000$ МГц и эта модель

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ЗОНАХ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

получила название COST231 Уолфиш-Икегами. В рамках модели Окамура-Хаты и Уолфиш-Икегами потери рассчитываются следующим образом:

$$L_p = -K_1 - K_2 \cdot \lg(f) - 13,82 \lg(h_B) - [44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_B)] \cdot \lg(d) + a(h_M) - K_0 \quad (5)$$

где h_B – высота установки антенны

передатчика в диапазоне $30 \div 200$ м;

h_M – высота антенны приемника в диапазоне $1 \div 10$ (м);

d – расстояние между приемником и передатчиком в диапазоне $1 \div 20$ км;

f – несущая частота, МГц.

$a(h_M)$, K_0 – коэффициенты, определяемые для «городского» и «плотно городского» окружения.

K_1 , K_2 – коэффициенты для учета частотных диапазонов (чем собственно и отличаются две эти модели).

Для обычного города:

$$a(h_M) = [1,1 \cdot \lg(f) - 0,7] \cdot h_M - [1,56 \cdot \log(f) - 0,8] \quad , K_0 = 0$$

Для города с плотной застройкой:

$$a(h_M) = 3,2(\lg(11,75h_M))^2 - 4,97$$

$$K_0 = 3dB$$

Для диапазона $150 \div 1000$ МГц:

$$K_1 = 69,55 \quad K_2 = 26,16$$

Для диапазона $1500 \div 2000$ МГц:

$$K_1 = 46,3 \quad K_2 = 33,9$$

Тогда для модели, в которой $h_B = 50$ м, $h_M = 1$ м, $f = 900$ МГц, $d = 1 \div 20$ км формула приобретет вид:

$$L_p = -170,31 - 33,77 \cdot \lg(d) + a(1) - K_0$$

Графики потерь радиосигнала для обычного города и города с плотной городской застройкой приведены на частоте 900 МГц на рисунке 4, на частоте 1800 МГц – на рисунке 5.

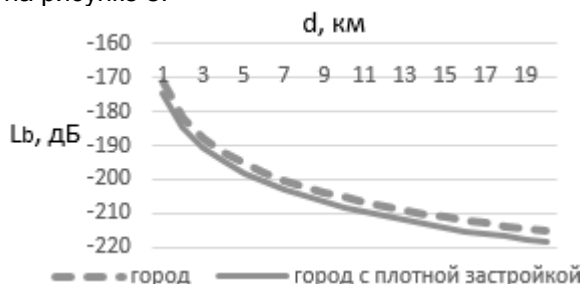


Рисунок 4 – Потери на трассе для модели Окамура-Хаты на частоте 900 МГц

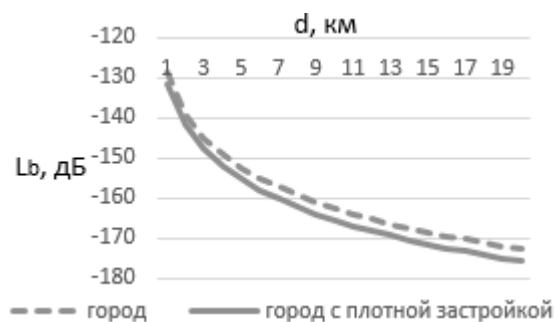


Рисунок 5 – Потери на трассе для модели Окамура-Хаты на частоте 1800 МГц

Также существуют модификации основной формулы с коэффициентами $a(h_M)$ для пригорода, сельской и открытой местности.

Для расчетов потерь радиосигнала модель Окамура-Хаты и Уолфиш-Икегами применяется часто. Более того, модель Уолфиш-Икегами используется Международным телекоммуникационным союзом. Однако эти две модели не учитывают особенности рельефа и дают приемлемую погрешность только при указанном выше диапазоне величин.

Модель Ксиа-Бертони. Модель Ксиа-Бертони была построена на основе уравнений волновой оптики и рассматривает механизмы распространения радиоволн в условиях городских застроек: распространение в свободном пространстве, отражение от стен зданий, дифракцию на кромках крыш (рисунок 6). Если антенна базовой станции расположена выше среднего уровня крыш зданий, на входе мобильной станции оказываются сигналы, распространяющиеся по двум лучам: в результате дифракции на кромке крыши здания и после отражения от противоположной стены здания. Эта модель является более точной в сравнении с моделью Окамура-Хаты, т.к. позволяет учесть некоторые дополнительные параметры.

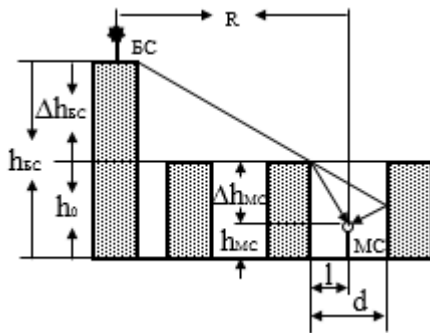


Рисунок 6 – Схема распространения радиоволны от базовой до мобильной станции для модели Ксиа-Бертони

В данном случае величина средних потерь рассчитывается по формуле:

$$L = -10 \cdot \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 - 10 \cdot \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 \cdot r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) \right] - 10 \cdot \lg \left[2,35^2 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right)^{1,8} \right]$$

, где λ – длина волны (м), R – расстояние между приемником и передатчиком ($R = 0,1 \div 1,5$ км с шагом 0,05 км), $\Delta h_b = h_{БС} - h_0$ (м) (разность высоты антенны и среднего уровня крыш), $\theta = \text{tg}^{-1}(\Delta h_M / x)$, где $\Delta h_M = h_0 - h_{АС}$ (м) – разность высот среднего уровня крыш и антенны мобильной станции; x – расстояние между антенной мобильной станции и кромкой крыши (на которой дифрагирует волна) по горизонтали. В большинстве случаев $x = \omega/2$, где ω – средняя ширина улиц (15 м); d – среднее расстояние между кварталами (40 м); $r = \sqrt{\Delta h_m^2 + x^2}$.

Модель Ксиа-Бертони позволяет рассчитать средний уровень потерь в случаях, когда базовая станция расположена выше, на уровне или ниже уровня крыш.

Пусть как и в предыдущем случае, $f = 900$ МГц, $h_{БС} = 50$ м, $h_{АС} = 1$ м, $R = 0,1 \div 1,5$ км, $h_0 = 45$ м, $\Delta h_b = 5$ м, $\Delta h_M = 44$ м.

Тогда потери сигнала выглядят следующим образом (рисунок 7):

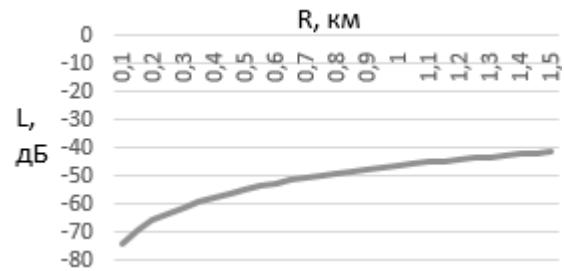


Рисунок 7 – Расчет потерь по методу Ксиа-Бертони

Несмотря на то, что модель не учитывает ряд важных параметров (вид строительных материалов, ориентацию улиц и т. п.), она дает простой и удобный способ получения предварительных оценок уровня средних потерь в канале связи. Как видно из ограничения на расстояние между мобильной и базовой станциями, более точные модели, учитывающие множество факторов, не позволяют предсказывать потери радиосигнала на большие расстояния.

График, изображенный на рисунке 8, наглядно показывает разницу в вычислениях потерь радиосигнала с помощью различных моделей (в нашем случае моделей Окамура-Хаты, Ли и Уолфиш-Икегами).

Как видно из рисунка вид графиков идентичен виду графика логарифмической функции, что позволяет сделать вывод: уровень сигнала сотовой связи уменьшается с расстоянием. Уровень сигнала зависит также от строительных конструкций и структуры ландшафта.

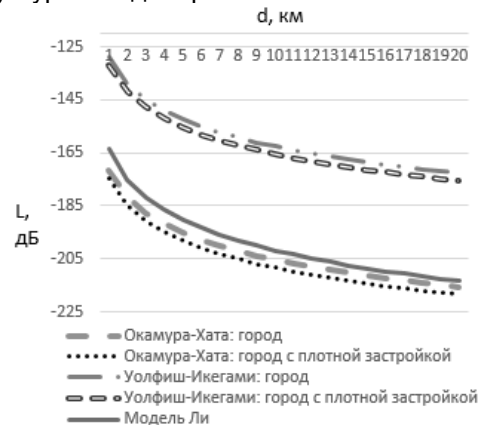


Рисунок 8 – Графики потери мощности радиосигнала для статистических моделей

Так как каждая модель имеет ограничения в применении (Таблица 1), для расчетов на местности не применяется одна модель, обычно их используется как минимум две. Например, при планировании структуры сети GSM используется модель Окамура-

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ЗОНАХ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Хаты для частот до 1,5 ГГц и модель Уолфиш-Икегами для диапазона частот 1,5–2 ГГц.

Таблица 1 – Характеристики моделей

Модель	Диапазон частот	Входные данные	Ограничения
Ли	До 2 ГГц	d, h	–
Окамура-Хата	150 ÷ 1000 МГц	h_b, h_m, d , коэффициенты для типа местности	h_b : 30-200 м, h_m 1-10 м, d: 1-20 км
Уолфиш-Икегами	1,5-2 ГГц		
Ксиа-Бертони	До 2 ГГц	$\lambda, R, h_{BC}, h_{AC}, h_0, x, d$	$R = 0,1 \div 1,5$ км

Таким образом, модели распространения радиосигнала на открытой местности используются для оптимального размещения базовых станций операторов сотовой связи. Кроме того, их применяют в других аспектах характеристики системы сотовой связи: оптимизации переадресации вызова, регулировке уровня мощности и местоположение антенны. Каждая модель имеет свои достоинства и недостатки, но важно использовать не отдельные модели, а модели в совокупности. Благодаря пониманию ограничений каждой модели можно получить хорошую и эффективную радиочастотную конструкцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абилов, А.В. Распространение радиоволн в сетях подвижной связи [Текст]: теоретический материал и задачи для практических занятий / А.В. Абилов. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2001. – 24 с.: ил.
- Банков, С.Е. Расчет и моделирование распространения радиоволн в городской среде и пересеченной местности с помощью программы Wireless InSite [Электронный ресурс] / С.Е. Банков, А.А. Крушин. – Режим доступа: <http://www.ipso.ioso.ru>
- Василенко, Г. Оценка ослабления сигналов сетей подвижной связи на коротких трассах прямой видимости / Г. Василенко // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – №4. – С. 72-74.
- Дружин, Г.И. Антенны и распространение радиоволн [Текст]: учебное пособие / Г.И. Дружин.

- Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003. – 56 с.
- Жулябин Д.Ю. Модели каналов беспроводных систем связи / Д.Ю. Жулябин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. – 2014. – №1.
- Макеева, М.М. Расчет энергетических параметров сотовых систем радиосвязи [Текст]: учебное пособие / А.М. Макеева. – М.: ЗАО "Информсвязьиздат". 1997. – 26 с.
- Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона [Текст] / Е.Р. Милютин [и др.]. – СПб.: Трида, 2003. – 159 с.
- Моделирование потерь распространения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sbi-telecom.ru/modelirovanie-poter-rasprostraneniya.html>
- Модель Окамура-Хата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/forum/post63846.html#p63846>
- Модель Окамуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://systemseti.com/CCPO/408.html>
- Попов, А.С. Применение методов Окамура-Хата и Введенского для расчета зон покрытия цифровых телевизионных передатчиков / А.С. Попов // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2010. – №22, часть 2. – С. 176-179.
- Распространение радиоволн [Текст]: учебник / Под ред. О.И.Яковлева. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
- Сомов, А.М. Распространение радиоволн [Текст]: учебное пособие / А.М. Сомов, В.В. Старостин. – М.: Гелиос, 2010. – 264 с.
- Распространение радиоволн в мобильной связи: Методические указания по курсу «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи» [Текст] / С. Н. Шабунин, Л. Л. Лесная. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 38 с.
- Расчет затухания сигнала от антенны в открытом пространстве [Электронный ресурс]: системы усиления сотовой связи. – Режим доступа: <http://www.picocell.ru/>
- Расчет УММС для квазигладкой поверхности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.informaticspoint.ru/forpois-811-1.html>
- Утц, В.А. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей / В.А. Утц // Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта. – 2011. – №5. – С. 44-49
- ITU-R Recommendations. 2001. P. 1546.

Михайлова Анастасия Юрьевна – студент, АлтГТУ им. И.И. Ползунова;
Борисов Алексей Павлович – доцент, к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова.