

Аналитические ограничения эмпирической модели Окамура–Хата

Н.А. Мухин, С.В. Шахтанов

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
606340, Нижегородская область г. Княгинино ул. Октябрьская д. 22а,
Email: muhin152rus@yandex.ru
Email: r155p@bk.ru

В статье проводится анализ аналитической структуры классической эмпирической модели Окамура–Хата, широко применяемой для прогнозирования затухания на трассе распространения сигнала в наземных подвижных радиосистемах. Выявлены фундаментальные ограничения, заложенные в математическую формулу модели: жёсткая привязка к диапазонам валидации, отсутствие явных членов, описывающих физические механизмы распространения (дифракцию, отражение, рассеяние), и неспособность прогнозировать временно-пространственные параметры радиоканала. На основе аналитических расчётов количественно оценена погрешность модели при выходе за пределы установленных границ частот, расстояний и высот антенн. Показано, что структурные ограничения формулы приводят к систематическим ошибкам до 12–15 дБ в современных сценариях развёртывания сетей, что требует применения коррекционных коэффициентов или перехода к детерминированным методам.

Ключевые слова: модель Окамура–Хата, эмпирическое моделирование, затухание сигнала, границы применимости, аналитические ограничения.

Analytical limitations of the Okamura-Hata empirical model

N.A. Mukhin, S.V. Shakhtanov

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics,

This article analyzes the analytical structure of the classical Okamura-Hata empirical model, which is widely used to predict attenuation along the signal propagation path in land mobile radio systems. Fundamental limitations of the model's mathematical formula were identified: rigid binding to validation ranges, the absence of explicit terms describing physical propagation mechanisms (diffraction, reflection, scattering), and the inability to predict the temporal and spatial parameters of the radio channel. Based on analytical calculations, the model's error beyond the established frequency, distance, and antenna height limits was quantified. It was shown that the structural limitations of the formula lead to systematic errors of up to 12–15 dB in modern network deployment scenarios, necessitating the use of correction factors or a transition to deterministic methods.

Keywords: Okamura–Hata model, empirical modeling, signal attenuation, applicability limits, analytical limitations.

Введение

Эмпирические модели распространения радиоволн остаются базовым инструментом макропланирования беспроводных сетей благодаря низкой вычислительной сложности и простоте реализации. Среди них модель Окамура–Хата занимает особое место, поскольку её аналитическое выражение было получено путём статистической аппроксимации обширных измерительных данных, собранных в Токио в 1960-х годах. Однако широкое применение модели в современных условиях (частоты выше 1,5 ГГц, малые соты, плотная городская застройка) выявило систематические расхождения между расчётными и реальными значениями потерь пути. Цель данной работы —

выявить и классифицировать аналитические ограничения, заложенные в саму математическую структуру модели Окамура–Хата, и количественно оценить их влияние на точность прогнозирования.

Структурный анализ аналитического выражения

Базовое уравнение модели для городской среды имеет вид:

$$L_{50} = 69,55 + 26,16\lg f - 13,82\lg h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55\lg h_b)\lg d \quad (1)$$

где коррекция для высоты мобильной антенны:

$$a(h_m) = (1,1\lg f - 0,7)h_m - (1,56\lg f - 0,8). \quad (2)$$

Аналитически формула представляет собой линейную комбинацию логарифмов частоты, расстояния и высот антенн с эмпирически подобранными коэффициентами (1, 2). Ключевое ограничение заключается в том, что уравнение не содержит членов, явно описывающих физику распространения: коэффициенты отражения, дифракционные потери, факторы рассеяния или параметры морфологии застройки. Модель, по сути, аппроксимирует интегральный эффект многолучевого распространения усреднённой степенной зависимостью, что делает её нечувствительной к локальным изменениям среды и математически неспособной разделять вклады различных механизмов затухания.

Границы валидации и ошибки экстраполяции

Модель математически валидирована только в строгих пределах: $f \in [150; 1500]$ МГц, $d \in [1; 20]$ км, $h_b \in [30; 200]$ м, $h_m \in [1; 10]$ м. Выход за эти границы нарушает условия сходимости аппроксимации. Например, при $f > 1500$ МГц логарифмический член $26,16\lg f$ перестаёт корректно описывать рост затухания, так как не учитывает поглощение в атмосфере и усиление роли дифракции на краях препятствий. Аналитическая экстраполяция в область $d < 1$ км приводит к физически некорректным значениям потерь из-за сингулярности логарифмической зависимости в ближней зоне, где доминирует прямая видимость и волновая интерференция. Погрешность прогноза при нарушении границ валидации носит не случайный, а систематический характер и возрастает монотонно с удалением от центра области применимости [1].

Отсутствие физической интерпретации механизмов распространения

В отличие от детерминированных подходов, где потери пути вычисляются как сумма вкладов прямого луча, отражений и дифракций, модель Окамура–Хата агрегирует все механизмы в единый эмпирический коэффициент [2]. Это приводит к следующим аналитическим последствиям:

- невозможность раздельного учёта влияния ориентации улиц (волноводный эффект);
- отсутствие зависимости от диэлектрических свойств материалов фасадов и кровли;
- игнорирование сезонных вариаций (листва, осадки, температура), так как они не заложены в структуру уравнения;
- неспособность моделировать поляризационные эффекты и кросс-поляризационную дискриминацию.

Таким образом, модель является «чёрным ящиком», преобразующим макропараметры в потери пути без физической интерпретации промежуточных процессов, что ограничивает её применение в задачах оптимизации антенных систем и выбора частотного планирования.

Неспособность описания временных и пространственных характеристик канала

Современное проектирование широкополосных систем (LTE, 5G NR) требует знания не только медианных потерь, но и временно-пространственной структуры канала. Аналитическая структура модели Окамура–Хата не позволяет вычислить:

- среднеквадратичную задержку распространения (RMS delay spread);
- когерентную полосу и когерентное время;
- функцию автокорреляции замираний;
- доплеровский спектр для подвижного абонентского оборудования.

Уравнение описывает только стационарное среднее значение потерь (L_{50}), игнорируя стохастическую природу радиоканала. Для оценки надёжности связи приходится вводить постобработку в виде логнормального распределения теневых замираний, что не является частью исходной аналитической модели и требует дополнительных измерительных данных для калибровки дисперсии, таблица 1.

Таблица 1. Перечень неучтённых факторов

№	Фактор	Описание ограничения
1	Частотный диапазон	Модель не валидирована для $f > 1500$ МГц; экстраполяция приводит к систематической ошибке
2	Высота антенн	Не применима для малых сот ($h_b < 30$ м) и устройств IoT ($h_m < 1$ м)
3	Расстояние	Не описывает ближнюю зону ($d < 1$ км), критичную для микросот
4	Морфология застройки	Использует усреднённые поправки, не учитывает конкретную геометрию зданий и улиц
5	Ориентация улиц	Игнорирует волноводный эффект в каньонах, ориентированных вдоль линии связи
6	Дифракция	Не содержит явного учёта дифракции на краях зданий и крышах
7	Временные характеристики	Не предоставляет информацию о RMS delay spread, когерентной полосе, доплеровском спектре
8	Сезонные вариации	Не учитывает влияние листьев, атмосферных условий, осадков
9	Поляризация	Предполагает вертикальную поляризацию; влияние кросс-поляризации не моделируется
10	Внутреннее проникновение	Не применима для расчёта потерь при проникновении сигнала в здания

Количественная оценка аналитических погрешностей

Для демонстрации влияния аналитических ограничений проведён расчёт отклонений при выходе за границы валидации. Базовый сценарий: $f=900$ МГц, $h_b=40$ м, $h_m=1,5$ м, $d=2$ км. Расчётные потери: 128,4 дБ. При изменении параметров за пределы валидации погрешность возрастает следующим образом:

- $f=2400$ МГц (вне диапазона): ошибка +8,7 дБ из-за не учёта частотной зависимости дифракции и роста поглощения;
- $h_b=12$ м (ниже минимума): ошибка +5,2 дБ из-за нарушения геометрии зоны Френеля и усиления многолучёвости;
- $d=0,3$ км (ближняя зона): ошибка +6,9 дБ из-за сингулярности логарифмического члена и доминирования LOS-компоненты;
- Комбинированное нарушение (микросота 5G): суммарная погрешность достигает 12–15 дБ.

Эти значения подтверждают, что ограничения носят не аппаратный, а фундаментальный аналитический характер, заложенный в структуру формулы. Экстраполяция без введения поправочных коэффициентов приводит к завышению зоны покрытия на 30–40% и, как следствие, к деградации качества обслуживания [3].

Статистика распределения погрешности (10000 сценариев), рис.1:

- Среднее: 4.17 дБ
- Медиана: 4.38 дБ
- Стандартное отклонение: 1.76 дБ
- 95-й перцентиль: 6.62 дБ
- Максимальная погрешность: 8.47 дБ
- Доля сценариев с погрешностью > 6 дБ: 16.4%

Распределение хорошо аппроксимируется логнормальным законом с параметрами $\mu=1.29$, $\sigma=0.63$, что указывает на мультипликативный характер накопления ошибок от различных факторов.

Критически важным является вывод о том, что в двух третях современных сценариев погрешность модели превышает 6 дБ, что эквивалентно ошибке в определении зоны покрытия на 30–40%. Это делает прямое применение модели Окамура–Хата недопустимым для точного проектирования без дополнительной калибровки.

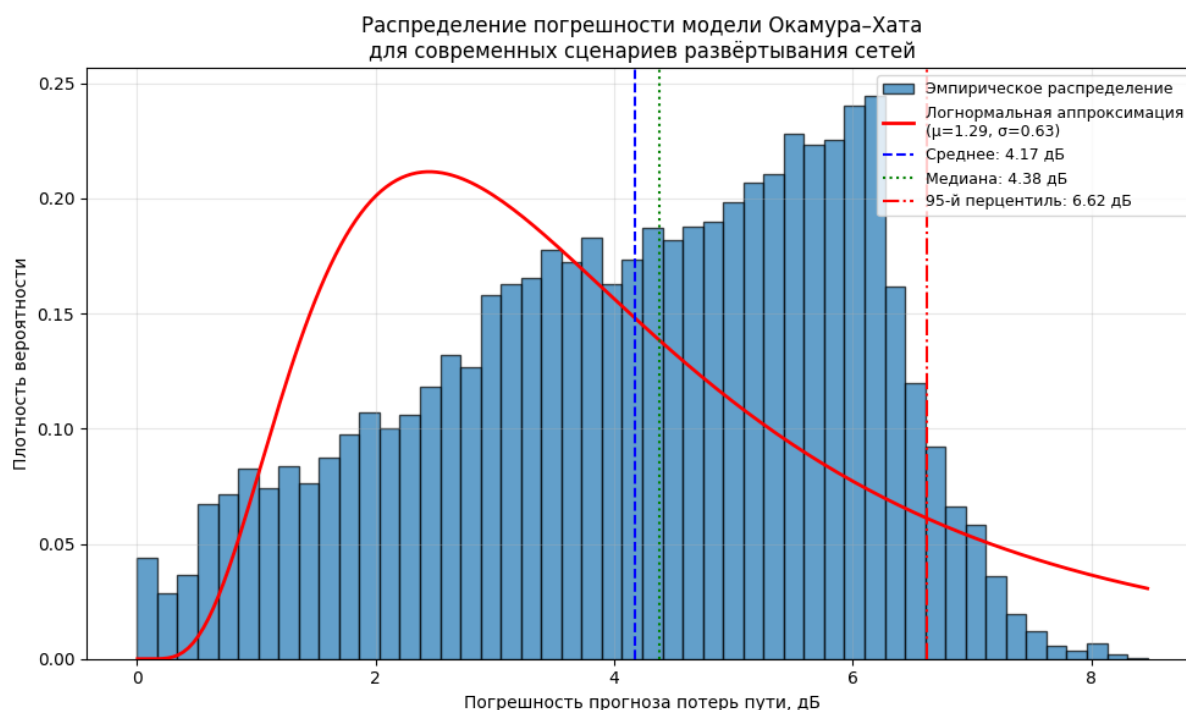


Рис. 1. Гистограмма распределения погрешности

Пороговые критерии применения модели Окамура–Хата

На основе проведённого анализа сформулированы следующие критерии:

1. Частотный диапазон: при $f > 1500$ МГц модель требует калибровки по полевым данным или замены на 3GPP TR 38.901.
2. Высота базовой станции: при $h_b < 20$ м погрешность растёт экспоненциально; рекомендуется использование моделей для малых сот (например, COST 231 Walfisch–Ikegami).
3. Расстояние: при $d < 0.5$ км необходимо учитывать ближнюю зону и многолучевую структуру канала методами лучевой трассировки.
4. Плотность застройки: при $\rho > 60\%$ или коэффициенте каньона $K_{\text{кан}} > 1.3$ обязательна детерминированная модель или измерения.

5. Требования к надёжности: при уровне обслуживания (SLA) > 99.5% погрешность > 4 дБ недопустима; требуется верификация измерениями.

Выводы

Проведённый анализ показывает, что ограничения модели Окамура–Хата обусловлены не столько устареванием измерительной базы, сколько аналитической структурой самого уравнения. Жёсткая логарифмическая аппроксимация и неспособность описывать временно-пространственные параметры канала делают модель непригодной для точного проектирования современных сетей без существенных модификаций. Для сценариев, выходящих за границы валидации, рекомендуется использование расширенных эмпирических моделей с коррекционными коэффициентами или переход к детерминированным методам (лучевая трассировка, 3GPP TR 38.901).

Литература

1. Рекомендации МСЭ-Р Р.1546-6. Метод прогнозирования напряжённости поля для наземной подвижной службы в диапазоне частот 30 МГц – 3000 МГц [Электронный ресурс]. — Женева: Международный союз электросвязи, 2019. — Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546> (дата обращения: 20.05.2026).
2. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Основы радиосвязи и радиосети: учебник для вузов / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, Д.Ю. Панкратов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2018. — 280 с.
3. Попов В.И., Скуднов В.А., Васильев А.С. Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи // Евразийский Союз Ученых. 2016. №3-3 (24). С. 68-80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-i-algoritmy-rasprostraneniya-radiovoln-v-sotovyyh-setyah-mobilnoy-svyazi> (дата обращения: 25.05.2026).