

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2025, №2 https://www.agequal.ru/pdf/2025/AGE_QUALITY_2_2025.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Лобеев Д.П., Билятдинов К.З. Научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD // Электронный научный журнал «Век качества». 2025. №2. С. 301-312. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/225014.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 654.164

**Научно-технические предложения по проектированию радиосетей
стандарта LTE-1800 TDD**

Лобеев Дмитрий Петрович,
*аспирант кафедры «Электрическая связь»
Петербургского государственного университета путей сообщения
Императора Александра I
190031, г. Санкт-Петербург, пр-т Московский, 9
lobeev1@mail.ru*

Билятдинов Камиль Закирович,
*доктор технических наук, кандидат военных наук,
и.о. заведующего кафедры, профессор кафедры
«Информатика и информационная безопасность»
Петербургского государственного университета путей сообщения
Императора Александра I
190031, г. Санкт-Петербург, пр-т Московский, 9
inib@pgups.ru*

Представлены научно-методологические основы выбора модели распространения радиоволн при проектировании современных цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи.

Выбор модели предлагается проводить на основе определения наиболее рациональных мест размещения приемопередающей аппаратуры, а также назначения режимов работы аппаратуры с учётом наличия радиопомех и требований по дальности радиосвязи.

На основе требований к проектируемым цифровым системам технологической радиосвязи и по результатам анализа перспективных и существующих способов прогнозирования составлен и систематизирован рекомендуемый перечень основных используемых моделей расчета распространения радиоволн. В перечне выбор необходимых моделей

распространения радиоволн рекомендуется осуществлять в зависимости от цели и специфики частотно-территориального планирования технологической сети связи.

Предложения могут быть применены для повышения эффективности использования частотного ресурса и совершенствования выделенных и технологических сетей связи.

Ключевые слова: проектирование сетей связи, модели распространения сигналов, LTE, технологические сети связи, радиосвязь.

Введение

Актуальность темы исследования основывается на объективной необходимости совершенствования проектирования радиосетей стандарта LTE-1800 TDD в интересах повышения качества связи на основе наиболее рационального выбора и применения моделей распространения радиоволн (табл. 1). Большинство моделей являются разработками Международного союза электросвязи (МСЭ) [1, 2, 3, 4].

Таблица 1

Технические характеристики моделей распространение радиоволн

Модель	Диапазон частот (f), МГц	Продолжительность трассы (d), км	Высота подъема антенн передатчика БС (Hb), м	Высота подъема антенн приемника АТ (Hm), м
Okumura-Hata	150-2000	1-20	30-200	1-10
COST231-Hata	150-1500	20-100	30-200	1-10
P.1546-4	30-3000	1-1000	До 3000	-
ECC-33	150-1920	1-100	30-100	1-10

Первыми моделями распространения сигнала были модели типа Okumura, Hata, SUI, COST231, Модель ECC-33 (Окамура-Хата) и др. Их удобство заключается в простой аналитической форме: данную форму можно широко исследовать в различных целях. Данные модели применимы в первую очередь для учебного процесса.

Существенным недостатком является «эмпиричность» данных моделей. В них не учитывается реальный рельеф проектируемой площадки. Можно задать

лишь тип рельефа: город, сельская местность, пригород. В соответствии с этими типами предлагаются поправочные коэффициенты модели.

На сегодняшний день идеальных типов местности не существует, и поэтому прогнозирование уровня сигнала по этим моделям вносит большую погрешность [1, 2, 4].

Исторически именно эти модели использовались при планировании радиопокрытия первых сетей цифровой подвижной радиосвязи (GSM и др.). Сегодня используется модель Okumura-Hata при планировании сетей стандарта GSM-R в Китае, но, как правило, эта модель калибруется, чтобы свести погрешности при планировании и расчетах к минимуму.

Применение этих моделей для планирования реальной подвижной железнодорожной радиосвязи не рекомендуется ввиду отсутствия возможности учёта реального рельефа местности и степени застройки места.

Таким образом, **постановка задачи исследования** будет заключаться в следующем: разработать научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD путём составления и систематизации рекомендуемого перечня основных применяемых моделей расчета распространения радиоволн на основе требований к проектируемым цифровым системам технологической радиосвязи и по результатам анализа перспективных и существующих способов прогнозирования.

Основная часть

Научно-технические предложения по проектированию радиосетей стандарта LTE-1800 TDD на основе применения 4 (четырёх) моделей расчета распространения радиоволн.

I. Модель согласно Рекомендации МСЭ-R P.1546

В 2001 г. выходит новая рекомендация МСЭ для планирования радиосетей - P.1546. В ней для расчета потерь передачи (потерь между приемником и передатчиком) используется набор кривых (зависимости

напряженности поля от дальности связи), построенных для некоторых табулированных значений частоты, высоты установки БС, условий приема (тип трассы: морская, сухопутная и др.) и надежности (1%, 10% и 50%) [1].

Данная модель уже могла учитывать реальный рельеф местности, хотя и обобщенно. Для этого высота подвеса антенны от уровня площадки преобразуется в высоту подвеса антенны над средним уровнем земли по азимутальному направлению.

Сегодня данная рекомендация является основной для расчета зон радиопокрытия передатчиков аналогового телевизионного вещания и при расчете помех на приграничных территориях (лимит напряженности поля на высоте 10 м от поверхности земли).

Модель является наиболее универсальной и широко применяемой как для подвижной службы, так и для фиксированной службы и радиовещания. Модель применима для трасс длиной от 1 км до 1000 км, для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц и эффективной высоты передающих антенн до 3000 м. В модели предусмотрено внесение поправок на характер рельефа местности и преград на пути распространения сигнала.

Используемые в моделях значения напряженности электрического поля E могут быть пересчитаны для практических задач в средние значения основных потерь на трассе L между двумя изотропными антеннами:

$$L(p_l, p_t) = 139.4 + 20 \log(f[\text{МГц}]) - E(f, d[\text{км}], h_1[\text{м}], env),$$

где $L()$ – средние потери на трассе в пределах процента p_l территории (площади), дБ;

p_l – 50% территории;

p_t – 50%, 10%, 5% или 1% времени;

$E(\cdot)$ – напряженность поля.

Отличительные особенности:

- 1) обозначение и различие антенн;
- 2) высота передающей/базовой антенны;

- 3) табулированная высота передающей/базовой антенны;
- 4) несколько значений параметра «процент времени»;
- 5) изменение размеров области для оценки;
- 6) высота приемной/мобильной антенны;
- 7) коррекция оценки за счет угла возвышения над рельефом местности;
- 8) эквивалентность основных потерь передачи;
- 9) оценка смешанных трасс.

Для систем LTE (1800 и 2100 МГц) определяется одна рабочая модель для одной полосы частот, и далее вводятся поправки, которые учитывали бы потери для реальной частоты.

II. Модель согласно Рекомендации МСЭ-R P.1812

В 2007 г. вышла Рекомендация P.1812. В этот момент стали доступны карты всего мира в форматах GTOPO30 и SRTM03 (цифровые карты местности с разрешением 30 угловых секунд и 3 угловых секунды) [2].

Рекомендация P.1812-7 обеспечивает детальный прогноз потерь передачи при построении зон радиопокрытия при любых типовых высотах антенн, настроенных на передачу и прием. В данной модели предполагается получение профиля интервала между двумя точками в составе зоны. Профиль обрабатывается, и после этого прогнозируются дифракционные и другие составляющие суммарных потерь. Таким образом, в этой рекомендации уже полностью учитывается реальный рельеф местности.

Исходя из вышесказанного, при планировании цифровых и аналоговых сетей технологической железнодорожной радиосвязи оптимальным является использование Рекомендации МСЭ-R P.1812.

Рассмотренные рекомендации предназначены для расчета сетей типа «точка-зона», т.е. для расчета зон радиопокрытия. Для расчета сетей «точка-точка» (расчет линий радиосвязи) используются другие рекомендации (ITU-R.530, ITU-R.2001).

Также существует и универсальная модель P.2001, которая может быть

использована как для расчета «точка-зона», так и для расчета «точка-точка». В этой модели описывается метод прогнозирования распространения сигнала, пригодный для наземных служб связи «из точки в зону» в диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц. Метод прогнозирует среднее значение уровней сигнала при многолучевом распространении, превышаемое в течение заданного процента времени $p\%$, лежащего в пределах от 1% до 99%. Данный метод предусматривает подробный анализ трассы на основе профиля земной поверхности.

Согласно Рекомендации МСЭ-R P.1812, данный метод пригоден для прогнозирования работы систем радиосвязи, использующих наземные сети с длиной трасс от 0,25 км до примерно 3000 км, когда оба терминала находятся на высоте не более 3 км над уровнем земли.

Приведенные далее значения следует оценить как для трасс прямой видимости (LoS), так и для загоризонтных трасс (NLOS).

Основные потери передачи в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92.45 + 2 \cdot \log f + 20 \log d, \text{ дБ.}$$

Корректировка, учитывающая влияние многолучевости и фокусировки в течение p и β_0 процентов времени, соответственно, описывается выражениями:

$$E_{sp} = 2.6 \left[1 - \exp \left(-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10} \right) \right] \log \left(\frac{p}{50} \right) \text{ дБ,}$$

$$E_{s\beta} = 2.6 \left[1 - \exp \left(-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10} \right) \right] \log \left(\frac{\beta_0}{50} \right) \text{ дБ.}$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS), которые не превышаются в течение $p\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \text{ дБ.}$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS),

которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \text{ дБ},$$

где d – расстояние по дуге большого круга (км);

d_{lt}, d_{lr} – расстояние от приемной и передающей антенн до горизонтальных им линий.

III. Модель Okumura-Nata

Данная модель широко используется для расчетов в условиях городской постройки. Okumura предложил сетку кривых для расчета среднего ослабления сигнала в городских условиях с почти гладким профилем при изотропно передающей антенне базовой станции, поднятой на эффективную высоту 200 м, и антенной мобильной станции с высотой 3 м, по сравнению с ослаблением в свободном пространстве [3].

В данной модели есть зависимость, в соответствии с которой степень эффективного усиления передающей и приемной антенн ($G(h_{Tx})$ и $G(h_{Rx})$ соответственно) изменяется от высоты их подъема h_{Tx} и h_{Rx} следующим образом:

$$G(h_{Tx}) = 20 \log \left(\frac{h_{Tx}}{200} \right), 1000\text{м} > h_{Tx} > 10\text{м};$$

$$G(h_{Rx}) = 10 \log \left(\frac{h_{Rx}}{3} \right), h_{Rx} < 3\text{м};$$

$$G(h_{Rx}) = 20 \log \left(\frac{h_{Rx}}{3} \right), 10\text{м} > h_{Rx} > 3\text{м}.$$

Для определения потерь в радиолинии рассчитывается ослабление сигнала в свободном пространстве, затем по кривым определяется поправка, зависящая от степени неровности профиля трассы. Модель Okumura полностью построена на экспериментальных точках для расчета потерь в сотовых системах связи. В основном модель используется для расчета радиолиний в густонаселенных районах. Главные недостатки модели: работа с графиками и невозможность полноценно учесть быстроизменяющиеся условия в профиле трассы.

Формула для расчета средних потерь мощности на трассе распространения сигнала продолжительностью до 100 км:

$$Pl = f_{propag}(f, h_1, h_2, d, env) = L + T(G(\delta)),$$

где L – средние потери на трассе, дБ;

δ – среднеквадратическое отклонение потерь, дБ;

f – частота, МГц;

d – протяженность трассы, км;

env – характер среды.

Средние потери L зависят от следующих продолжительностей трасс:

1. $d \leq 0,04$ км

На таком коротком расстоянии условия распространения сигнала могут отождествляться с условиями свободного пространства, но при учете высоты подъема антенн:

$$L_{(0,04)} = 32,4 + 20 \log(f) + 10 \log(d^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6 [\text{дБ}]}).$$

2. $0,04 < d < 0,1$ км

$$L = L_{(0,04)} + \frac{[\log(d) - \log(0,04)]}{\log(0,1) - \log(0,04)} * [L_{(0,1)} - L_{(0,04)}] [\text{дБ}]$$

3. $d \geq 0,1$ км

$$1500 \text{ МГц} < f < 2000 \text{ МГц}$$

$$L_{(\text{город})} = 46,3 + 33,98 \log(f) - 13,82 \log(\max\{30, H_b\}) + [44,9 - 6,55 \log(\max\{30, H_b\})] \log(d)^\alpha - a(H_m) - b(H_b) [\text{дБ}],$$

где $a(H_m), b(H_b)$ – поправочные коэффициенты для эффективной высоты антенн, которые являются функцией от размера зоны обслуживания.

IV. Модель ECC-33

Данная модель основана на экстраполяции кривых Okumura с целью их адаптации для систем фиксированного беспроводного доступа FWA:

$$Pl = A_{fs} + A_{bm} - G(h_{Tx}) - G(h_{Rx}) [\text{дБ}],$$

где A_{fs} – потери в свободном пространстве;

A_{bm} – основные медианные потери;

$G(h_{Tx}), G(h_{Rx})$ – выигрыш от высоты подъема передающей антенны базовой станции h_{Tx} и приемной антенны мобильной станции h_{Rx} .

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \log(d) + \log(f) \text{ [дБ]},$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,38 \log(d) + 7,894 \log(f) + 9,56[\log(f)]^2 \text{ [дБ]}$$

$$G(h_{Tx}) = \log\left(\frac{h_b}{200}\right) * [13,958 + 5,8 \log(d)]^2 \text{ [дБ]}$$

$$G(h_{Rx}) = [42,57 + 13,7 \log(f)] * [\log(h_{Rx}) - 0,585] \text{ [дБ]}.$$

Сравнение моделей представлено в таблице 2, из которой видны значения потерь для каждой модели.

Таблица 2

Зависимости потерь от длины трассы для разных моделей

Длина трассы, км	Значение потерь, дБ		
	COST-231	Hata	ECC-33
0,5	104,7	105,1	130,7
1	115,2	115,5	139,3
1,5	121,3	121,7	144,7
2	125,6	126,0	148,6
2,5	129,0	129,4	151,8
3	131,7	132,1	154,5
3,5	134,1	134,5	156,8
4	136,1	136,5	158,8

Из данных таблицы можно сделать вывод, что наиболее предпочтительно использовать модели Okumura-Hata, либо COST231-Hata. Модель ECC-33 непригодна ввиду большего количества потерь (более чем в 20 дБ по сравнению с другими моделями).

Модель COST231-Hata по своей сути является новой версией модели Hata, расширенной по диапазону частот до 2 ГГц. Поэтому можно сделать вывод, что для планирования сетей в диапазоне 1800 МГц наиболее предпочтительна модель Okumura-Hata [4].

Примечание: каждую модель нужно рассматривать исходя из конкретных условий применения. В качестве примера можно рассмотреть учет быстрых замираний сигнала. Эта составляющая в разных условиях приема и на разных частотах может иметь значение от 12 до 25 дБ (в некоторых условиях – более 25 дБ). Из этого следует, что в модели ЕСС-33, которая дает более жесткий результат, учтен дополнительный запас на быстрые замирания.

Также следует отметить, что технологические сети радиосвязи должны обеспечивать, чтобы уровень сигнала и уровень помех не отличались от тех уровней, которые были спрогнозированы при частотно-территориальном планировании. Поэтому модели, обладающие более строгими требованиями, выглядят более предпочтительными для применения в исследуемой предметной области.

Заключение

При планировании цифровой сети технологической железнодорожной радиосвязи важно учитывать специфику конкретного участка (климатические условия, тип трассы и др.). С учетом этой специфики должна выбираться правильная модель распространения радиоволн и потерь на трассе. Ранее при проектировании систем GSM-R на железнодорожном транспорте использовалась модель Okumura-Nata. При проектировании радиосетей LTE рекомендуется применять модель P.1812, так как она учитывает все немаловажные факторы при планировании сети, такие как реальный рельеф местности, напряженность поля и др.

Список литературы

1. Рекомендация МСЭ-R P.1546-3. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. – Женева, 2020. – 58 с.

2. Рекомендация МСЭ-R P.1812. Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ. – Женева, 2020. – 30 с.
3. Модели распространения радиоволн // Телекомпроект: сайт. – URL: <https://telecomproject.tripod.com/mod.htm> (дата обращения 25.01.2025).
4. О выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте: Решение ГКРЧ №18-46-02 от 11.09.2018 г. – URL: <https://base.garant.ru/72061770/> (дата обращения 25.01.2025).

Scientific and technical proposals for designing radio networks of the LTE-1800 TDD standard

Lobeev Dmitry Petrovich,

*Postgraduate student of the Department of Electrical Communications
Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering
190031, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 9
lobeev1@mail.ru*

Bilyatdinov Kamil Zakirovich,

*Doctor of Technical Sciences, Candidate of Military Sciences,
Acting Head of Department, Professor of the Department of Computer Science
and Information Security
Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering
190031, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 9
inib@pgups.ru*

The article presents scientific and methodological principles for selecting a radio wave propagation model when designing modern digital systems of technological railway radio communication.

It is proposed to select a model based on determining the most rational locations for the transceiver equipment, as well as the assignment of equipment operating modes taking into account the presence of radio interference and requirements for the radio communication range.

Based on the requirements for the designed digital systems of technological radio communication and the results of the analysis of promising and existing forecasting methods, a recommended list of the main models used to calculate radio wave propagation has been compiled and systematized. In the list, it is recommended to select the necessary radio wave propagation models depending on the purpose and specifics of frequency-territorial planning of the technological communication network.

The proposals can be applied to improve the efficiency of frequency resource use and improve dedicated and technological communication networks.

Keywords: communication network design, signal propagation models, LTE, technological communication networks, radio communication.