

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ И СРАВНЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ LoRa

А.А. Прасолов, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, prasolov.alex@gmail.com;

А.С. Федоров, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, as.fdrv@bk.ru.

УДК 621.391.81

Аннотация. Работа посвящена сравнению результатов радиоизмерений технологии *LoRa* с известными моделями распространения радиоволн. Измерения проводились в Санкт-Петербурге в различных диапазонах частот с учетом действующей на территории России нормативной базы. Приведены результаты радиоизмерений и их сравнение с расчетами, полученными с помощью моделей распространения радиоволн. Для каждой из рассматриваемых моделей приведено описание, их ограничения и математические выражения для расчета потерь в городской среде.

Ключевые слова: *LoRa*; радиоизмерения; покрытие; уровень принимаемого сигнала; отношение сигнал-шум; показатель потери пакетов; дальность связи; модели распространения радиоволн.

APPLICABILITY ANALYSIS AND COMPARISON OF KNOWN RADIO PROPAGATION MODELS WITH LoRa TECHNOLOGY RADIO MEASUREMENTS RESULTS

A.A. Prasolov, Ph.D. of Engineering Sciences, St. Petersburg State University of Telecommunications n/a prof. M.A. Bonch-Bruevich;

A.S. Fedorov, St. Petersburg State University of Telecommunications n/a prof. M.A. Bonch-Bruevich.

Annotation. The work is devoted to comparing the results of radio measurements of *LoRa* technology with known radio propagation models. Measurements were carried out in St. Petersburg in various frequency bands taking into account the Russian regulatory framework. The results of measurements are given and compared with calculations by radio propagation models. For each of the models under consideration, a description is given, their limitations and mathematical expressions for calculating losses in an urban environment.

Keywords: *LoRa*; radio measurements; coverage; received signal strength indicator; signal-to-noise ratio; packet loss ratio; communication range; radio propagation models.

Введение

Технология *LoRa* является одной из рекомендуемых технологий для построения узкополосных беспроводных сетей связи Интернета вещей на территории Российской Федерации¹. Для работы данная технология использует

¹Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 29 марта 2019 года № 113 «Об утверждении Концепции построения и развития узкополосных беспроводных сетей связи «Интернета вещей» на территории Российской Федерации».

нелицензируемые участки спектра, определяемые и регулирующиеся на основе региональных ограничений (для стран Европы, как правило, это диапазоны 433 и 868 МГц). В России технология *LoRa* может эксплуатироваться в частотных диапазонах 864-865, 866-868, 868,7-869,2 МГц². *LoRa Alliance* также выпустила документ с указанием региональных параметров, в том числе отдельный раздел «RU864-870», описывающий ограничения, действующие на территории России, в котором ширина канала технологии *LoRa* ограничена 125 кГц, а мощность излучения в восходящей и нисходящей линии не должна превышать 14 дБм [1].

Целью данной работы является проведение радиоизмерений технологии *LoRa* в условиях одного из районов города Санкт-Петербурга с учетом региональных ограничений, а также сравнение полученных результатов с теоретически рассчитанными показателями потерь и дальности связи по известным моделям распространения радиоволн (далее – *PPB*) с последующим анализом их применимости. Измерения и расчеты проводились как для диапазона 868 МГц, так и для диапазона 433 МГц.

Вопросы, связанные с радиоизмерениями технологии *LoRa*, на сегодняшний день являются актуальными и встречаются в отечественной и зарубежной научно-технической литературе. К примеру, в работах [2-13] представлены результаты радиоизмерений параметров технологии *LoRa*, проведенных как в России (Санкт-Петербург, Ленинградская область, Омск, Ижевск), так и в странах Европы (Финляндия, Италия, Франция, Германия), Южной Америки (Бразилия), Азии (Индонезия). В некоторых из указанных работ также рассматривается вопрос анализа применимости известных моделей распространения радиоволн и сравнение теоретических результатов расчетов дальности связи с полученными результатами радиоизмерений. На основании приведенных работ выделяется следующий набор параметров, необходимых для проведения измерений: уровень принимаемого сигнала (англ. *Received Signal Strength Indicator, RSSI*), отношение сигнал-шум (англ. *Signal-to-Noise Ratio, SNR*), а также показатель потери пакетов (англ. *Packet Loss Ratio, PLR*), либо показатель доставленных пакетов (англ. *Packet Delivery Ratio, PDR*). Также стоит отметить, что разработчик технологии *LoRa* (*Semtech Corporation*) предлагает использовать такой же набор параметров при проведении радиоизмерений, проводимых на базе специальных комплектов [14].

Модели распространения радиоволн, их применение и особенности

Модели распространения радиоволн (*PPB*) применяются при решении разнообразных задач, среди примеров которых можно назвать планирование сетей радиосвязи в системах автоматизированного проектирования (САПР) [15-16] и с помощью алгоритмов автоматического планирования [17], разработки методик модернизации сетей для повышения качества покрытия [18], оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) [19] и электромагнитной безопасности [20].

Модели *PPB* позволяют оценить потери мощности сигнала в зависимости от расстояния между базовой и абонентской станциями (далее – БС и АС соответственно), типа среды распространения (в данной работе рассматривается только городская среда), рабочей частоты, высот расположения антенн БС и АС. Также, обладая информацией о параметрах передатчика (мощность излучения, потери в АФТ, коэффициент усиления антенны) и приемника (коэффициент усиления антенны, потери в АФТ, чувствительность) и используя модели *PPB*

² Решение Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) от 7 мая 2007 года № 07-20.

можно рассчитать, в том числе, теоретическую дальность связи и зону покрытия БС, исходя из соотношения (1):

$$P_{Tx} - L_{АФТ_{Tx}} + G_{Tx} - PL + G_{Rx} - L_{АФТ_{Rx}} = P_{Rx} \quad (1)$$

Выражение (1) включает в себя следующие параметры: мощность передатчика P_{Tx} , дБм; потери в антенно-фидерном тракте (далее – АФТ) передатчика $L_{АФТ_{Tx}}$ и приемника $L_{АФТ_{Rx}}$, дБ; коэффициенты усиления (далее – КУ) антенн передатчика G_{Tx} и приемника G_{Rx} , дБ; потери при распространении PL (от англ. *Path Loss*), дБ; уровень принимаемого сигнала P_{Rx} . Теоретическая дальность связи определяется расстоянием, при котором величина P_{Rx} становится равна чувствительности приемника.

Основными входными параметрами для расчета потерь при *PPB* служат рабочая частота f , расстояние между БС и АС R , высоты подвеса антенн БС и АС $h_{БС}$ и $h_{АС}$ соответственно. Далее при описании рассматриваемых моделей *PPB* в математических выражениях будем пользоваться введенными обозначениями. Размерности входных параметров в моделях могут различаться, поэтому укажем их в квадратных скобках в качестве нижнего индекса у соответствующего коэффициента. Значения и размерности прочих коэффициентов, используемых в рассматриваемых моделях, будут указаны после соответствующих математических выражений. Кроме того, каждая из моделей имеет ограничения по использованию, связанные с упомянутыми выше входными параметрами, что объясняется происхождением и разработкой данных моделей на основе множества проведенных измерений при различных условиях и статистической обработке их результатов.

В данной работе расчеты проводились в нисходящей линии связи (англ. *Downlink, DL*), соответственно, передатчиком выступала БС, антенна которого располагалась на высоте 30 м, приемником – АС, антенна которого располагалась на высоте 1,5 м. Мощность излучения БС для расчетов примем равной 14 дБм, чувствительность приемника – минус 136 дБм. КУ антенн передатчика и приемника примем равными 0 дБи, что соответствует случаю использования всенаправленных антенн.

Параметры подобраны таким образом, чтобы результаты расчетов можно было сравнить с результатами радиоизмерений, процесс и результаты которых будут описаны и приведены в данной статье. Стоит отметить, что потерями в АФТ в рассматриваемом случае можно пренебречь, поскольку при проведении измерений мощность, подводимая к антенне передатчика, составляла 14 дБм, что соответствовало выбранной мощности передатчика. Спектры сигналов передатчика в диапазонах 868 МГц и 433 МГц, полученные с помощью спектроанализатора, представлены на рис. 1а и 1б соответственно.

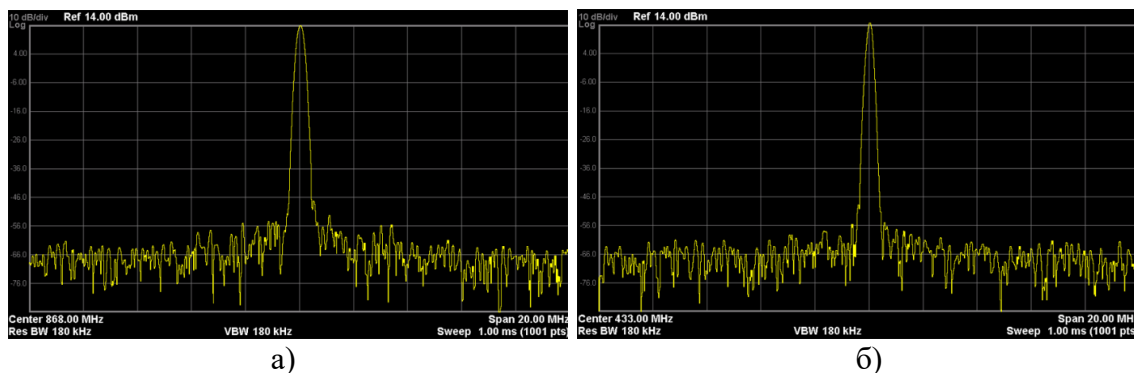


Рисунок 1

Далее будут приведены описания известных моделей *PPB*, их ограничения по использованию и математические выражения, описывающие потери при распространении.

Модель Окамура

Модель Окамура основана на серии проведенных в городе Токио (Япония) измерений [21] и справедлива для диапазона частот от 150 до 1920 МГц, расстояния между БС и АС от 1 до 100 км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 100 м и от 1 до 3 м соответственно. Потери при распространении определяются согласно выражению (2):

$$PL_{\text{Окамура}} = FSPL + A(f, R) - X_{\text{БС}} - X_{\text{АС}} - C \quad (2)$$

В выражении (2): *FSPL* – потери при распространении в свободном пространстве (англ. *Free-Space Path Loss*), определяется согласно выражению (3) [22], дБ:

$$FSPL = 10 \cdot \lg \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_{[\text{м}]}}{\lambda} \right)^2 = 20 \cdot \lg \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_{[\text{м}]} \cdot f_{[\text{Гц}]}}{c} \right) \quad (3)$$

В выражении (3): λ – длина волны, м; c – скорость света, равная $3 \cdot 10^8$ м/с.

Медианное затухание $A(f, R)$ и поправочный коэффициент местности C в выражении (2) определяются в соответствии с графическими зависимостями, представленными в первоисточнике модели [21]. Поправочные коэффициенты, учитывающие высоты расположения антенн БС и АС (в случае, если антенна АС расположена ниже высоты в 3 м), определяются согласно выражениям (4) и (5) соответственно:

$$X_{\text{БС}} = 20 \cdot \lg \left(\frac{h_{\text{БС}[\text{м}]}}{200} \right) \quad (4)$$

$$X_{\text{АС}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{h_{\text{АС}[\text{м}]}}{3} \right) \quad (5)$$

Модель Окамура-Хата

Модель Окамура-Хата (она же модель Хата в ряде источников [23]) основана на модели Окамуры, являясь ее адаптацией, представляющей графические зависимости поправочных коэффициентов в виде эмпирических выражений [24], и справедлива для диапазона частот от 150 МГц до 1,5 ГГц, расстояния между БС и АС от 1 до 100 км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 200 м и от 1 до 10 м соответственно. Потери при распространении в городской среде определяются согласно выражению (6):

$$PL_{\text{Окамура-Хата}} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,82 \cdot \lg(h_{\text{БС}[\text{м}]}) - a_{\text{АС}} + \left(44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{\text{БС}[\text{м}]}) \right) \cdot \lg(R_{[\text{км}]}) \quad (6)$$

В выражении (2): α_{AC} – поправочный коэффициент, учитывающий высоту расположения антенны AC, для городской среды и диапазона частот свыше 400 МГц определяется согласно выражению (7):

$$a_{AC} = 3,2 \cdot \left(\lg \left(11,75 \cdot h_{AC[M]} \right) \right)^2 - 4,97 \quad (7)$$

Модель COST-231-Хата

Модель COST-231-Хата (англ. *Cooperation for Scientific and Technical Research*) основана на модели Окамура-Хата, являясь ее расширением для частотного диапазона от 1,5 ГГц до 2 ГГц [25], однако в научно-технической литературе (например, в работе [26]) под расширением частотного диапазона иногда понимается расширение верхней границы и, соответственно, применение модели для частотного диапазона от 150 МГц до 2 ГГц. Модель справедлива для расстояния между БС и АС от 1 до 20 км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 200 м и от 1 до 10 м соответственно. Потери при распространении определяются согласно выражению (8):

$$PL_{COST-231-Хата} = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(f_{[МГц]}) - 13,82 \cdot \lg(h_{БС[M]}) - a_{AC} + \\ + \left(44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{БС[M]}) \right) \cdot \lg(R_{[км]}) + C \quad (8)$$

В выражении (8): α_{AC} – поправочный коэффициент, определяемый согласно выражению (7); C – поправочный коэффициент, учитывающий застройку местности (для города принимается равным 3), дБ.

Модель Ирбид

Модель Ирбид основана на модели COST-231-Хата и является ее адаптацией, основанной на измерениях, проведенных в г. Ирбид (Иордания) [27]. Измерения проводились вблизи частоты 1800 МГц. В первоисточнике не приведены ограничения, противоречащие ограничениям оригинальной модели COST-231-Хата, поэтому их можно считать теми же. Потери при распространении определяются согласно выражению (9):

$$PL_{Ирбид} = 54,27 + 33,9 \cdot \lg(f_{[МГц]}) - 13,82 \cdot \lg(h_{БС[M]}) - a_{AC} \\ + \left(44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{БС[M]}) \right) \cdot \lg(R_{[км]}) \quad (9)$$

В выражении (9): α_{AC} – поправочный коэффициент, определяется согласно выражению (7).

Также стоит отметить, что в научно-технической литературе описан ряд других вариантов адаптации модели COST-231-Хата (например, в работах [28] и [29]), однако в данной работе они не рассматриваются по причине несоответствия условиям их применимости, а именно по частотному диапазону.

Модель CCIR

Модель CCIR (англ. *Consultative Committee of International Radio*) основана на модели Окамура-Хата, однако ее отличительной особенностью является наличие поправочного коэффициента учета застройки местности [30]. Модель справедлива для диапазона частот от 150 МГц до 1 ГГц, расстояния между БС и АС от 1 до 20

км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 200 м и от 1 до 10 м соответственно. Потери при распространении определяются согласно выражению (10):

$$PL_{CCIR} = PL_{\text{Окамура-Хата}} - 30 + 25 \cdot \lg(B) \quad (10)$$

В выражении (10): $PL_{\text{Окамура-Хата}}$ – потери при РРВ, рассчитанные в соответствии с выражением (6), дБ; B – коэффициент, представляющий собой отношение площади местности, застроенной зданиями, к общей площади рассматриваемой местности (для расчетов было выбрано усредненное значение коэффициента, равное 50), %.

Модель *Ericsson 9999*

Модель *Ericsson 9999* основана на модели Окамура-Хата, являясь ее расширением для частотного диапазона от 150 МГц до 3 ГГц [31] и справедлива для расстояния между БС и АС от 1 до 100 км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 200 м и от 1 до 10 м соответственно. Потери при распространении в городской среде определяются согласно выражению (11):

$$PL_{\text{Ericsson 9999}} = a_0 + a_1 \cdot \lg(R_{[\text{км}]}) + a_2 \cdot \lg(h_{\text{БС}[\text{м}]}) + a_3 \cdot \lg(h_{\text{БС}[\text{м}]}) \cdot \lg(R_{[\text{км}]}) - 3,2 \cdot \lg(11,75 \cdot h_{\text{АС}[\text{м}]})^2 + 44,49 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 4,78 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]})^2 \quad (11)$$

В выражении (11): a_0, a_1, a_2, a_3 – набор поправочных коэффициентов, зависящих от типа местности (для городской среды принимаются равными 36,2; 30,2; 12; 0,1 соответственно [32]).

Модель Хата-Дэвидсон

Модель Хата-Дэвидсон [33] основана на модели Окамура-Хата и справедлива для частотного диапазона от 30 МГц до 1,5 ГГц, расстояния между БС и АС от 1 до 300 км, высот подвеса антенн БС и АС от 20 до 2500 м и от 1 до 10 м соответственно. Потери при распространении в городской среде определяются согласно выражению (12) [34]:

$$PL_{\text{Хата-Дэвидсон}} = PL_{\text{Окамура-Хата}} + A - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 \quad (12)$$

В выражении (11): $PL_{\text{Окамура-Хата}}$ – потери при РРВ, рассчитанные в соответствии с выражением (6), дБ; A – поправочный коэффициент, учитывающий расстояние между БС и АС, а также высоту подвеса антенны БС (при расстоянии менее 20 км принимается равным нулю); S_1 – поправочный коэффициент, учитывающий расстояние между БС и АС (при расстоянии менее 20 км принимается равным нулю); S_2 – поправочный коэффициент, учитывающий расстояние между БС и АС, а также высоту подвеса антенны БС (при высоте подвеса антенны БС менее 300 м принимается равным нулю); S_3 – поправочный коэффициент, учитывающий частоту, определяется в соответствии с выражением (13); S_4 – поправочный коэффициент, учитывающий частоту и расстояние между БС и АС (при расстоянии менее 64,38 км принимается равным нулю) [35].

$$S_3 = \frac{f}{250} \cdot \lg\left(\frac{1500}{f}\right) \quad (13)$$

Модель Илорин

Модель Илорин основана на модели Хата-Дэвидсон и является ее адаптацией, основанной на измерениях, проведенных в г. Илорин (Нигерия) [36]. В первоисточнике не приведены ограничения, противоречащие ограничениям оригинальной модели Хата-Дэвидсон, поэтому их можно считать теми же. Потери при распространении определяются согласно выражению (14) [37]:

$$PL_{\text{Илорин}} = 73,56 + 26,16 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,82 \cdot \lg(h_{\text{БС}_{[\text{М}]}}) - a_{\text{АС}} + \\ + 30,5 \cdot \lg(R_{[\text{км}]}) + A - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 \quad (14)$$

В выражении (14): $a_{\text{АС}}$ – поправочный коэффициент, определяется согласно выражению (6); A, S_1, S_2, S_3, S_4 – набор поправочных коэффициентов, определяемых согласно модели Хата-Дэвидсон, в том числе и выражением (12).

Модель ECC-33

Модель ECC-33 (англ. *Electronic Communications Committee*) (она же расширенная или модифицированная модель Окамура-Хата в ряде источников [38]) является адаптацией модели Окамура-Хата для Европы и справедлива для частотного диапазона от 30 МГц до 3 ГГц, расстояния между БС и АС от 40 м до 100 км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 200 м и от 1 до 3 м соответственно. Потери при распространении в городской среде определяются согласно выражению (15) [39]:

$$PL_{\text{ECC-33}} = FSPL + 20,41 + 9,83 \cdot \lg(R_{[\text{км}]}) + 7,89 \cdot \lg(f_{[\text{ГГц}]}) + 9,56 \\ \cdot (\lg(f_{[\text{ГГц}]}))^2 - X_{\text{БС}} - X_{\text{АС}} \quad (15)$$

В выражении (16): $FSPL$ – потери при распространении в свободном пространстве, определяются согласно выражению (2), дБ; $X_{\text{БС}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий высоту подвеса антенны БС и расстояние между БС и АС, определяется согласно выражению (16), дБ; $X_{\text{АС}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий высоту подвеса антенны АС и для городской среды, определяется согласно выражению (17), дБ.

$$X_{\text{БС}} = \lg\left(\frac{h_{\text{БС}_{[\text{М}]}}}{200}\right) \cdot (13,958 + 5,8 \cdot \lg(R_{[\text{км}]})^2) \quad (16)$$

$$X_{\text{АС}} = 0,759 \cdot h_{\text{АС}_{[\text{М}]}} - 1,862 \quad (17)$$

Модель SUI

Модель SUI (англ. *Stanford University Interim*) основана на серии измерений, проведенных на частоте 1,9 ГГц [40], и справедлива для частотного диапазона вплоть до 3,5 ГГц и расстояния между БС и АС от 100 м до 8 км, высот подвеса антенн БС и АС от 10 до 80 м и от 2 до 10 м соответственно [41]. Потери при распространении в городской среде определяются согласно выражению (18) [33]:

$$PL_{\text{SUI}} = FSPL + 10 \cdot \gamma \cdot \lg\left(\frac{R_{[\text{М}]}}{d_0}\right) + X_f + X_{\text{АС}} + X_\sigma \quad (18)$$

В выражении (18): $FSPL$ – потери при распространении в свободном пространстве, определяются согласно выражению (3), с той разницей, что определяются на расстоянии d_0 , дБ; d_0 – нормирующее расстояние, равное 100 метров; γ – поправочный коэффициент, учитывающий тип местности и высоту подвеса антенны БС, определяется согласно выражению (19); X_f – поправочный коэффициент, учитывающий частоту, определяется в соответствии с выражением (20); X_{AC} – поправочный коэффициент, учитывающий высоту подвеса антенны АС, определяется в соответствии с выражением (21); X_σ – поправочный коэффициент, учитывающий тип местности (для городской среды, указанной в модели как местность типа А, принимается равным 10,6 дБ [33]).

$$\gamma = a - b \cdot h_{\text{БС}[\text{м}]} + \frac{c}{h_{\text{БС}[\text{м}]}} \quad (19)$$

В выражении (19): a, b, c – набор поправочных коэффициентов, зависящих от типа местности (для городской среды принимаются равными 4,6; 0,0065; 12,6 соответственно [33]).

$$X_f = 6 \cdot \lg\left(\frac{f_{[\text{ГГц}]}}{2000}\right) \quad (20)$$

$$X_{AC} = -10,8 \cdot \lg\left(\frac{h_{AC[\text{м}]}}{2}\right) \quad (21)$$

Модель Ли

Модель Ли основана на серии проведенных в США измерений на частоте 900 МГц [43]. Модель справедлива для диапазона частот от 30 МГц до 2 ГГц, расстояния между БС и АС от 2 до 30 км. Потери при распространении определяются согласно выражению (22) [44]:

$$PL_{\text{Ли}} = L_0 + \gamma \cdot \lg(R_{[\text{км}]}) - 10 \cdot \lg(F_0) \quad (22)$$

В выражении (23): L_0 и γ – экспериментально полученные на основе серии измерений эталонные потери и затухание на декаду (в данной работе для расчетов приняты равными 124 и 30,5, что соответствует г. Токио (Япония), застройка которого взята для примера [44]), дБ; F_0 – набор поправочных коэффициентов, определяется в соответствии с выражением (23):

$$F_0 = \prod_{i=1}^5 F_i = \left(\frac{h_{\text{БС}[\text{м}]}}{30,48}\right)^2 \cdot \left(\frac{G_{\text{БС}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{h_{\text{АС}[\text{м}]}}{3}\right)^{\nu} \cdot \left(\frac{f_{[\text{МГц}]}}{900}\right)^{-n} \cdot G_{\text{АС}} \quad (23)$$

В выражении (23): ν – показатель степени, учитывающий высоту подвеса антенны АС (для высоты антенны АС менее 3 м принимается равным 1); n – показатель степени, учитывающий частотный диапазон (принимается равным 2 или 3 при рабочей частоте ниже и выше 450 МГц соответственно); $G_{\text{БС}}$ и $G_{\text{АС}}$ – КУ антенн БС и АС соответственно (поскольку использовались ненаправленные антенны, то они имеют КУ, равные -2,15 дБд, что соответствует 0 дБи в логарифмическом масштабе и 0,61 в линейном).

Модель Эгли

Модель Эгли основана на серии проведенных в США измерений [45] и справедлива для частотного диапазона от 40 МГц до 1 ГГц [38]. Потери при распространении определяются согласно выражению (24) [45]:

$$PL_{\text{Эгли}} = -10 \cdot \lg \left(0,345 \cdot \left(\frac{40 \cdot h_{\text{БС}[\text{М}]} \cdot h_{\text{АС}[\text{М}]}}{f_{[\text{МГц}]} \cdot R_{[\text{М}]}} \right)^2 \right) \quad (24)$$

Модель Ибрагим-Парсонс

Модель Ибрагим-Парсонс основана на серии проведенных в г. Лондон (Великобритания) измерений [46] и справедлива для частотного диапазона от 150 МГц до 1 ГГц, расстояния между БС и АС до 10 км, высот подвеса антенн БС и АС от 30 до 300 м и до 3 м соответственно [47]. Потери при распространении представлены в двух вариантах и определяются согласно выражениям (25) и (26) [46]:

$$\begin{aligned} PL_{\text{Ибрагим-Парсонс (вариант 1)}} &= -20 \cdot \lg(0,7 \cdot h_{\text{БС}[\text{М}]}) - 8 \cdot \lg(h_{\text{АС}[\text{М}]}) + \frac{f_{[\text{МГц}]}}{40} + \\ &+ 26 \cdot \lg\left(\frac{f_{[\text{МГц}]}}{40}\right) - 86 \cdot \lg\left(\frac{f_{[\text{МГц}]} + 100}{156}\right) \\ &+ \left(40 + 14,15 \cdot \lg\left(\frac{f_{[\text{МГц}]} + 100}{156}\right)\right) \cdot \\ &\cdot \lg(R_{[\text{М}]}) + 0,265 \cdot L - 0,37 \cdot H + 0,087 \cdot U - 5,5 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} PL_{\text{Ибрагим-Парсонс (вариант 2)}} &= 40 \cdot \lg(R_{[\text{М}]}) - 20 \cdot \lg(h_{\text{БС}[\text{М}]} \cdot h_{\text{АС}[\text{М}]}) + 20 + \frac{f_{[\text{МГц}]}}{40} + \\ &+ 0,18 \cdot L - 0,34 \cdot H + 0,094 \cdot U - 5,9 \end{aligned} \quad (26)$$

В выражениях (25) и (26): L – коэффициент застройки местности (для типичной городской застройки принимается равным 50), %; U – коэффициент, учитывающий долю зданий этажностью выше 3 (для типичной городской застройки принимается равным 63,2 [48]), %; H – разница высот подвеса антенн БС и АС, м.

Радиоизмерения параметров технологии *LoRa*

Измерения проводились с помощью платформы *HelTec Automation LoRa 32 v2*, построенной на базе системы на кристалле *ESP32* и приемопередатчиков стандарта *LoRa* семейства *SX127x* (*SX1276* и *SX1278* для диапазонов 868 МГц и 433 МГц соответственно) [49]. Данные приемопередатчики поддерживают рассматриваемые в данной работе частотные диапазоны (868 МГц и 433 МГц), SF от 7 до 12, мощность излучения до 20 дБм, ширину канала до 500 кГц, а также уровень чувствительности вплоть до минус 148 дБм [50]. Один модуль использовался в качестве передатчика, второй – в качестве приемника. Внешний вид описанных выше модулей с подключенной ненаправленной антенной представлен на рис. 2.



Рисунок 2

Измерения проводились в Санкт-Петербурге в окрестностях СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича в точках, пронумерованных от «Rx1» до «Rx35» и отмеченных на рис. 3.

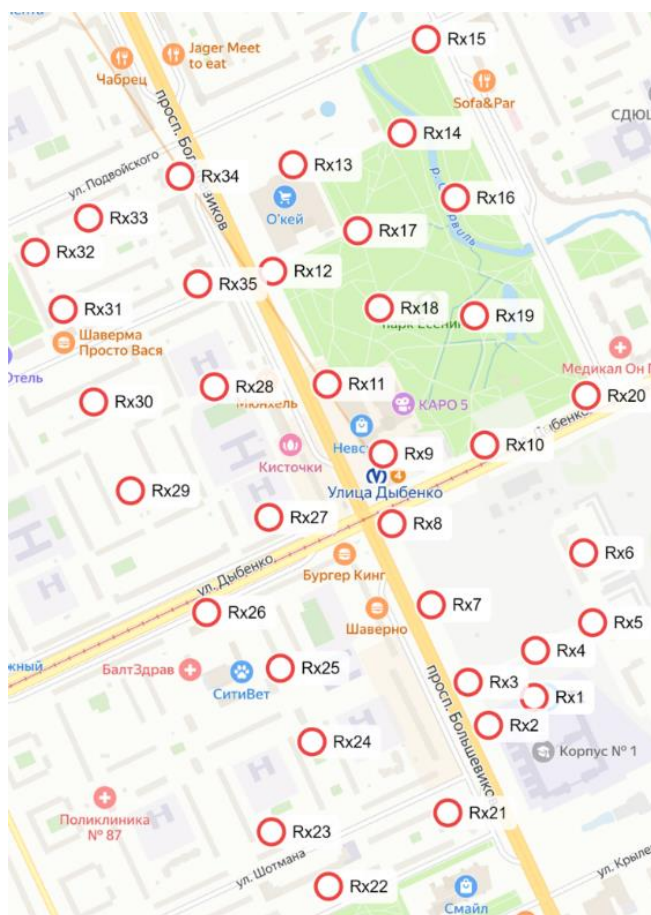


Рисунок 3

В данных точках располагался приемник, ненаправленная антенна которого располагалась на высоте 1,5 м. Ненаправленная антенна передатчика (отмечен на рисунке 3, как «Tx», практически совпадает с точкой «Rx1») была расположена на высоте 30 м. Мощность передатчика составляла 14 дБм, ширина канала – 125 кГц, что соответствует упомянутым выше региональным ограничениям. Скорость кода и SF были установлены равными 4/8 и 12 соответственно, и подобраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную помехоустойчивость (в теории обеспечивается максимальная дальность связи и минимальная скорость передачи данных).

Измерения проводились следующим образом. Со стороны передатчика с указанными выше параметрами циклически передавались пакеты данных, полезной нагрузкой которых служили номера этих пакетов (от 1 до 100). Для каждого пришедшего пакета оценивался уровень принимаемого сигнала (англ. *Received Signal Strength Indicator, RSSI*), дБм, и отношение сигнал-шум (англ. *Signal-to-Noise Ratio, SNR*), дБ. В каждой из точек маршрута данные показатели усреднялись по итогу приема переданных пакетов. Кроме того, оценивался показатель потери пакетов (англ. *Packet Loss Ratio, PLR*), %, представляющий из себя отношение числа потерянных пакетов к общему числу переданных пакетов. Оценивался данный показатель с помощью алгоритма, реализованного в программном обеспечении передатчика. При приеме очередного пакета данных алгоритм сравнивает его номер (заложенный в полезной нагрузке) с ожидаемым номером пакета. Ожидаемый номер пакета определяется исходя из предыдущего успешно принятого пакета. В случае, если номер принятого пакета не равен номеру ожидаемого пакета (что отражает случай, когда один или несколько пакетов не были доставлены), показатель потери пакетов инкрементируется до тех пор, пока ожидаемый номер пакета и номер принятого пакета не совпадут.

Результаты проведенных радиоизмерений в точках, отмеченных на рисунке 3, а также расстояния до этих точек приведены в табл. 1. Знаком «×» обозначены точки, в которых отсутствовал прием сигнала, и, соответственно, показатель потери пакетов в данных точках принимается равным 100 процентов.

Таблица 1.

Точка	Расстояние до точки, км	Диапазон 868 МГц			Диапазон 433 МГц		
		<i>RSSI</i> , дБм	<i>SNR</i> , дБ	<i>PLR</i> , %	<i>RSSI</i> , дБм	<i>SNR</i> , дБ	<i>PLR</i> , %
Rx1	0,023	-92	9	0	-86	11	0
Rx2	0,122	-110	7	2	-110	3	1
Rx3	0,150	-104	8	0	-106	6	1
Rx4	0,090	-108	9	0	-104	8	0
Rx5	0,166	-115	6	0	-100	9	0
Rx6	0,282	-125	-5	16	-115	-2	2
Rx7	0,280	-113	4	0	-106	7	1
Rx8	0,440	-118	0	0	-118	-6	6
Rx9	0,555	-120	0	0	-122	-9	2
Rx10	0,490	-113	7	3	-110	3	1
Rx11	0,720	-118	0	7	-126	-15	24
Rx12	0,956	-123	-4	7	-123	-10	0
Rx13	1,120	-130	-10	6	-126	-14	9
Rx14	1,100	-126	-6	0	-127	-19	86
Rx15	1,270	-135	-14	19	-129	-16	68
Rx16	0,960	-137	-15	52	-121	-8	0
Rx17	0,950	-125	-5	0	-128	-15	40
Rx18	0,800	-115	5	0	-120	-7	0
Rx19	0,730	-118	5	0	-126	-13	33
Rx20	0,573	-124	-4	0	-116	-4	0
Rx21	0,287	-132	-18	93	-129	-16	91
Rx22	0,546	×	×	100	×	×	100
Rx23	0,560	×	×	100	×	×	100
Rx24	0,450	-139	-17	98	-130	-17	94
Rx25	0,504	-128	-8	6	-129	-16	95
Rx26	0,660	-129	-8	17	-129	-16	87
Rx27	0,625	-125	-4	7	-125	-12	3
Rx28	0,860	×	×	100	-130	-16	70
Rx29	0,878	×	×	100	×	×	100
Rx30	1,020	-137	-13	16	-123	-18	99
Rx31	1,170	×	×	100	×	×	100
Rx32	1,280	×	×	100	×	×	100
Rx33	1,250	×	×	100	×	×	100
Rx34	1,200	-124	-5	0	-126	-13	1
Rx35	1,020	-119	-1	9	-125	-12	1

По итогу измерений в диапазоне 868 МГц сигнал отсутствовал в семи точках, в диапазоне 433 МГц – в шести точках. Максимальная дальность связи для обоих диапазонов составила приблизительно 1,3 км.

Сравнение результатов расчетов и результатов измерений

На рис. 4 представлены результаты расчетов по описанным выше моделям *PPV*, а также нанесенные в виде маркеров результаты радиоизмерений и чувствительность приемника, что позволяет сравнить теоретические и практические результаты.

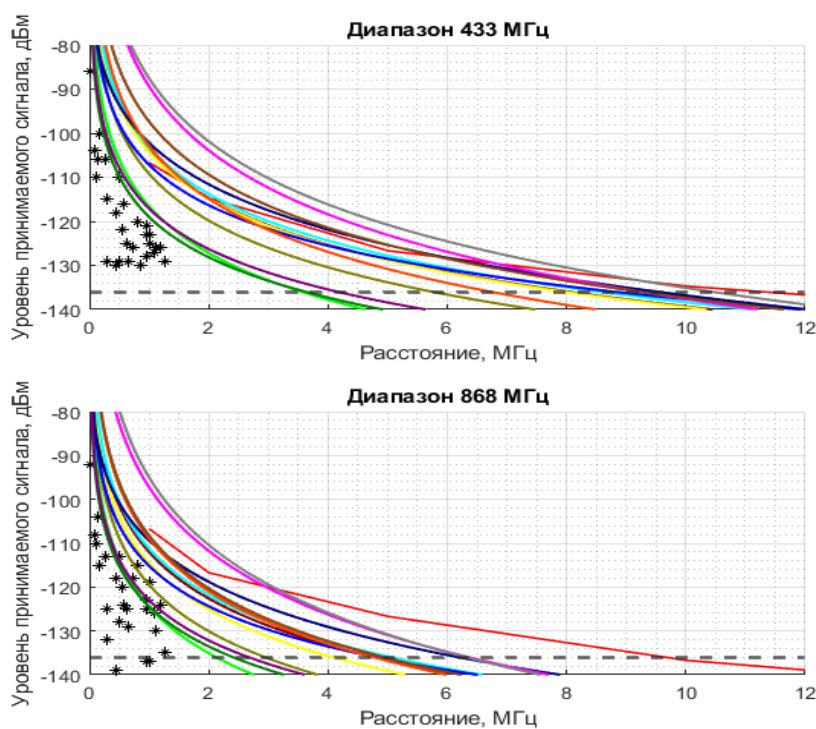


Рисунок 4

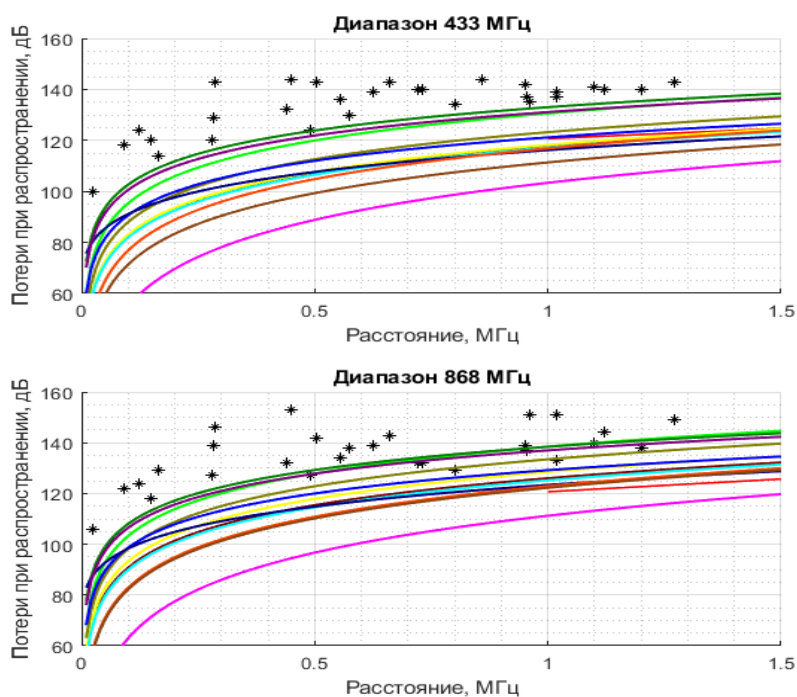


Рисунок 5

Используемая на рис. 4 и 5 легенда приведена на рис. 6.

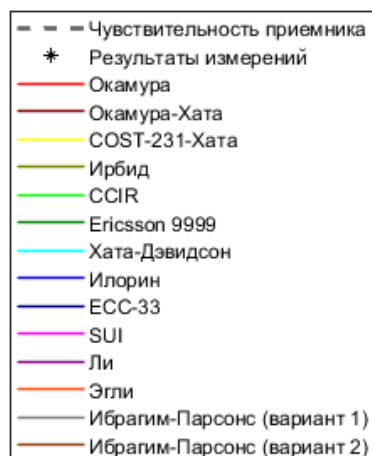


Рисунок 6

Заключение

Таким образом, наиболее близкие результаты расчета дальности связи по сравнению с проведенными измерениями для диапазона 868 МГц показали модели *CCIR* (2,1 км), *Ericsson 9999* (2,4 км), Ли (2,7 км). Данные модели, а также модель Ирбид в меньшей степени, частично совпали с результатами измерений на меньших расстояниях, что можно заметить на рис. 3. Для диапазона 433 МГц результаты расчета дальности связи значительно превысили практический результат (по наиболее близким моделям *CCIR* и *Ericsson 9999* дальность связи составила 3,5 км), однако на меньших расстояниях наиболее близкими по характеру зависимостей можно назвать те же модели *CCIR*, *Ericsson 9999* и Ли.

Расхождения рассмотренных моделей с результатами измерений могут быть вызваны разными типами застройки городов и ландшафтными условиями, в которых проводились измерения при разработке моделей, устаревшими поправочными коэффициентами, поскольку большая часть моделей была разработана во второй половине XX века и начале XXI века. Кроме того, рассмотренные модели не учитывают помеховую обстановку, что может влиять на зону покрытия, в особенности для систем связи, работающих при отрицательном отношении сигнал-шум, которой *LoRa* и является, а также многолучевое распространение сигнала.

Дальнейшим направлением исследований может стать разработка собственной модели *PPB*, которая может быть, как гибридной моделью (например, на базе моделей *CCIR*, *Ericsson 9999* и Ли, подобная модель описана в работе [51]), так и моделью, учитывающей больше количество параметров конкретной системы связи (в случае с технологией *LoRa* можно также учитывать такие параметры, как SF, скорость кода, ширина канала).

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 в ЕГИСУ НИОКТР.

Литература

1. RP002-1.0.3 LoRaWAN Regional Parameters // LoRa Alliance. URL: <https://loralliance.org/resourcehub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/> (дата обращения: 26.03.2024).

2. Андреев Р.А., Прасолов А.А., Федоров А.С. Исследование дальности связи технологии LoRa в условиях мегаполиса // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Юбилейная Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т, 2021. – Т. 3. – С. 21-27.
3. Андреев Р.А., Прасолов А.А., Федоров А.С. Анализ применимости известных моделей распространения радиоволн для технологии LoRa // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т, 2022. – Т. 3. – С. 13-17.
4. Седунов Д.П., Жунусова А.С., Зырянова Ю.О. Расчет параметров системы беспроводного сбора данных сети LoRaWAN // Техника радиосвязи, 2021. – № 2. – С. 31-41.
5. Суслов К.Н., Варнаков С.А. Исследование применимости технологии LoRa с учетом особенностей помеховой обстановки // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-22), 2022. – С. 45-49.
6. Сенаторов Л.А., Зиятдинов С.Ф. Исследование максимального расстояния передачи модуля LoRa SX1278 // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании, 2021. – С. 255-260.
7. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. M. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things // Sensors, 2016. – Т. 16. – № 9. – С. 1466.
8. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology // 2015 14th international conference on its telecommunications (itst). – IEEE, 2015. – С. 55-59.
9. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios // IEEE Wireless Communications, 2016. – Т. 23. – № 5. – С. 60-67.
10. Dieng O., Pham C., Thiare O. Comparing and Adapting Propagation Models for LoRa Networks // 2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – IEEE, 2020. – С. 1-7.
11. Lima W. G., Lopes A. V. R., Cardoso C. M. M., Araujo J. P. L., Neto M. C. A., Tostes M. E. L., Nascimento A. A., Rodriguez M., Barros F. J. B. LoRa Technology Propagation Models for IoT Network Planning in the Amazon Regions // Sensors, 2024. – Т. 24. – № 5.
12. Suharjono A., Mukhlisin M., Wardihani E. D., Novitasari M., Khusna E., Feryando D.A., Adi W.T, Pramono S., Apriantoro R., Mujahidin I. Performance Evaluation of LoRa 915 MHz for IoT Communication System on Indonesian Railway Tracks with Environmental Factor Propagation Analysis // 2023 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT). – IEEE, 2023. – С. 264-270.
13. Aref M., Sikora A. Free space range measurements with Semtech Lora™ technology // 2014 2nd international symposium on wireless systems within the conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems. – IEEE, 2014. – С. 19-23.
14. SX1276 Development Kit User Guide // Semtech. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276dvk1jas> (дата обращения: 26.03.2024).
15. ОНЕПЛАН РПЛС // ИнфоТел. URL: <https://www.rpls.ru/ru/oneplan-rpls/> (дата обращения: 26.03.2024).
16. RadioPlanner 3.0 // Центр телекоммуникационных технологий. URL: <https://www.ctt-group.ru/radioplanner> (дата обращения: 26.03.2024).

17. Иванов В.С., Увайсов С.У., Иванов И.А. Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи // Труды учебных заведений связи, 2023. – Т. 9. – № 5. – С. 25-34.
18. Бабаев Н.В., Симонина О.А. Методика модернизации сети транкинговой связи стандарта TETRA // Труды учебных заведений связи, 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 36-43.
19. Методика расчетов электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы с радиоэлектронными средствами гражданского назначения за исключением радиовещательной службы (решение ГКРЧ № 20-57-05 от 28 декабря 2020 г.).
20. Мордачев В.И. Электромагнитная безопасность широкополосных систем мобильной связи новых поколений // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, 2018. – № 3 (113). – С. 39-46.
21. Okumura Y. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service // Review of the Electrical communication Laboratory, 1968. – Т. 16. – № 9. – С. 825-873.
22. Recommendation ITU-R P.525-2 «Calculation of free-space attenuation» // The International Telecommunication Union (ITU). URL: <https://www.itu.int/md/R15-SG03-C-0009> (дата обращения: 24.04.2024).
23. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006.
24. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // IEEE transactions on Vehicular Technology, 1980. – Т. 29. – № 3. – С. 317-325.
25. Mogensen P.E., Eggers P., Jensen C., Andersen J. B. Urban area radio propagation measurements at 955 and 1845 MHz for small and micro cells // IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM'91: Countdown to the New Millennium. Conference Record. – IEEE, 1991. – С. 1297-1302.
26. 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.
27. Banimelhem O., Al-Zubi M., Al Salameh M.S. Hata Path Loss Model Tuning for Cellular Networks in Irbid City // 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing. – IEEE, 2015. – С. 1646-1650.
28. Jaghavi A.N., Kale S.S. Suburban Area Path loss Propagation Prediction and Optimisation Using Hata Model at 2375MHz // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2014. – Т. 3. – № 1. – С. 5004-5008.
29. Chen Y.H., Hsieh K.L. A Dual Least-Square Approach of Tuning Optimal Propagation Model for Existing 3G Radio Network // 2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, 2006. – С. 2942-2946.
30. Recommendations and Reports of the CCIR, XVIth Plenary Assembly (Dubrovnik, 1986), Vol. V «Propagation in non-ionized media» // The International Telecommunication Union (ITU). URL: <https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/4.282.43.en.1006.pdf> (дата обращения: 25.04.2023).
31. Zreikat A., Djordjevic M. Performance analysis of path loss prediction models in wireless mobile networks in different propagation environments // Proceedings of the 3rd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'17), Rome, Italy, 2017.

32. Milanovic J., Rimac-Drlje S., Bejuk K. Comparison of propagation models accuracy for WiMAX on 3.5 GHz // 2007 14th IEEE international conference on electronics, circuits and systems, 2007. – С. 111-114.
33. Hata/Davidson. A Report on Technology Independent Methodology for the Modeling, Simulation and Empirical Verification of Wireless Communications System Performance in Noise and Interference Limited Systems Operating on Frequencies between 30 and 1500MHz // TIA TR8 Working Group, IEEE Vehicular Technology Society Propagation Committee, 1997.
34. Kasampalis S., Lazaridis P. I., Zaharis Z. D., Bizopoulos A., Zettas S., Cosmas, J. Comparison of Longley-Rice, ITU-R P. 1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction // BMSB, 2014. – С. 1-4.
35. Kasampalis S. Modelling and coverage improvement of DVB-T networks: дис. // Brunel University London. – 2018.
36. Faruk N., Adediran Y. A., Ayeni A. A. Error Bounds of Empirical Path Loss Models at VHF/UHF Bands in Kwara State, Nigeria // Eurocon 2013, 2013. – С. 602-607.
37. Faruk, N., Bello, O. W., Ayeni, A. A., Surajudeen-Bakinde, N. T. Profiling of Radio Propagation in VHF Band // Ilorin Journal of Science, 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 80-94.
38. Антипин Б. М., Виноградов Е. М. Анализ моделей для оценки потерь распространения сигналов при расчетах электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК, 2021. – № 1. – С. 233-235.
39. Shahajahan M. Analysis of propagation models for WiMAX at 3.5 GHz // Blekinge Institute of Technology, 2009.
40. Channel Models for Fixed Wireless Applications // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.
41. Khan I., Eng T. C., Kamboh S. A. Performance analysis of various path loss models for wireless network in different environments // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 161-165.
42. Erceg, V., Greenstein, L. J., Tjandra, S. Y., Parkoff, S. R., Gupta, A., Kulic, B., Julius A. A., Bianchi R. Erceg V. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments // IEEE Journal on selected areas in communications, 1999. – Т. 17. – № 7. – С. 1205-1211.
43. Lee W.C.Y. Mobile Communications Design Fundamentals, 2nd Edition // John Wiley & Sons, 1993.
44. Dobrilovic, D., Malic, M., Malic, D., Sladojevic, S. Analyses and optimization of Lee propagation model for LoRa 868 MHz network deployments in urban areas // Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC), 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 55-62.
45. Egli J. J. Radio propagation above 40 MC over irregular terrain // Proceedings of the IRE, 1957. – Т. 45. – № 10. – С. 1383-1391.
46. Ibrahim M. F., Parsons J. D. Signal strength prediction in built-up areas. Part 1: Median signal strength // IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing). – IET Digital Library, 1983. – Т. 130. – № 5. – С. 377-384.
47. Свистунов А. С. Эмпирические модели распространения радиоволн для анализа внутрисистемной электромагнитной совместимости и безопасности сетей сотовой связи с микросотовой структурой // Журнал Белорусского государственного университета. Физика, 2018. – № 2. – С. 107-116.
48. Siwiak K., Bahreini Y. Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications. Third Edition // Artech House, 2007.
49. WiFi LoRa 32 (V2.1) Datasheet // HelTec Automation. URL: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32> (дата обращения: 26.03.2024).

50. Semtech SX1276-7-8-9 Datasheet // Semtech. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276> (дата обращения: 26.03.2024).
51. Мамченко М. В., Зорин В. А., Романова М. А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2022. – № 1 (105). – С. 59-73.