Методика измерений и оценка компромисса параметров передачи данных телеметрии IoT-устройств в помещениях по радиоканалу LoRa

Денис Кочетков, Богдан Бондарев, Андрей Никитин, Данила Посевин

Аннотация
В статье рассматриваются теоретические основы измерений и методология оценки качества передачи данных телеметрии по радиоканалу LoRa в помещении со сложной топологией. Основное внимание уделяется методологии проведения эксперимента на базе доступных электронных компонентов, обеспечивающих обмен информацией в туннелях и коридорах зданий. Предложена реализация измерительного стенда, описаны способы измерения дальности и достоверности передачи информации на основе существующих подходов. Приведён сравнительный анализ экспериментальных данных.

Ключевые слова:
LoRa, беспроводные компьютерные сети, измерения, оценка качества радиоканала, Интернет вещей

LoRa (англ. Long Range) — современная технология модуляции радиосигнала, которая позволяет передавать данные на значительные расстояния при мощности сигнала, значительно меньшей уровня шума, сохраняя при этом энергоэффективность. Выигрыш в мощности и, соответственно, в дальности радиосвязи достигается за счёт уменьшения пропускной способности радиоканала до нескольких кбит/с, что недостаточно для проектирования стабильной мультимедийной связи, но оказывается достаточной для передачи коротких текстовых сообщений или данных телеметрии. Поэтому LoRa-модуляция получила особую популярность для реализации устройств Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT), особенно для стационарных датчиков [5].

Применение LoRa-модуляции на практике связано с трудностями при определении возможности радиосвязи в более сложных условиях, чем на открытой местности: внутри зданий, на лесных территориях, в сельской и городской местности, а также в тоннелях [5]. Поэтому в качестве цели данной работы было выбрано исследование возможности применения LoRa-модуляции в сложных условиях радиосвязи для передачи различных видов информации. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить общий обзор технологии LoRa-модуляции, исследовать существующие методы определения дальности радиопередачи в различных условиях, сконструировать экспериментальный стенд на основе выполненного теоретического анализа, определить план испытаний, провести эксперименты и проанализировать полученные результаты.

Основные параметры LoRa-модуляции

LoRa-модуляция является одной из частных реализаций модуляции Chirp Spread Spectrum (далее — CSS). CSS-модуляция использует M ортогональных «чирпов» — сигналов, частота которых меняется плавно по определённой форме [4]. Значение M определяет число уникальных сигналов и часто выражается по формуле M»\=» 2^SF, где SF (англ. Spreading Factor) — число бит на сигнал. Кроме того, CSS-модуляция определяется несущей частотой f_0 и шириной полосы радиопередачи BW (англ. Bandwidth). В LoRa реализуется CSS со строго линейными «чирпами»; в общем случае форма сигнала CSS не фиксирована.

Для передачи данных на практике поверх LoRa-модуляции используется помехоустойчивое кодирование, например, циклический код Хэмминга [2], поэтому во многих LoRa-ра-

диопередатчиках кроме уже описанных параметров модуляции также используется значение степени кодирования CR (англ. Code Rate). Использование помехоустойчивого кодирования значительно увеличивает расстояние передачи данных с помощью механизма восстановления потерь, а также позволяет уменьшить число ложных приёмов данных из-за радиошума, но линейно увеличивает количество передаваемых данных.

Основными критериями качества радиоканала являются доля ошибок в доставленных данных и скорость передачи данных. Для LoRa-радиоканала доля ошибок может быть описана в терминах вероятности битовой ошибки и вероятности пакетной ошибки.

Вероятность битовой ошибки описывает вероятность инвертирования бита в принятом сообщении. При вероятности битовой ошибки, равной 0, гарантируется, что сообщение дойдёт без изменений; при вероятности 0,5 нельзя определить, какое сообщение было изначально. Для определения доли битовой ошибки существует большое количество моделей, но в значительной степени эти модели опираются на отношение сигнал/шум на приёмнике и на характер шума в среде. Однако битовая ошибка обладает малой наглядностью для реального LoRa-радиопередатчика, так как реальные модули используют помехоустойчивое кодирование, а также систему отбрасывания пакетов данных при невозможности восстановления исходного пакета.

Более наглядной является вероятность пакетной ошибки. Вероятность пакетной ошибки характеризует долю пакетов, потерянных при передаче данных из-за высокой степени ошибок. Вероятность пакетной ошибки определяется по величине битовой ошибки и зависит от режима кодирования [1]. В силу невозможности непосредственного измерения битовой ошибки на реальном устройстве в работе будет рассмотрена величина пакетной ошибки.

Скорость передачи данных ADR либо определяется производителем модуля и указывается в документации, либо рассчитывается через параметры передачи данных:

$$ADR = \frac{CR \cdot BW \cdot SF}{2^{SF}}$$

Описание идеи измерения потерь

Задача эксперимента — количественно оценить надёжность канала связи LoRa в условиях закрытого помещения. Измеряются две величины: доля пакетов, не дошедших до приёмника (вероятность пакетной ошибки), и мощность, с которой приняты дошедшие пакеты (уровень сигнала). Стенд состоит из двух одинаковых узлов: микроконтроллер ESP8266 и радиомодуль E220-900T22D [3]. Модуляцию, помехоустойчивое кодирование и контроль целостности данных в эфире реализует радиомодуль; микроконтроллер отвечает за его настройку и обмен данными по последовательному интерфейсу (UART).

Описание тестового кадра

Тестовым кадром в настоящей работе называется служебное сообщение фиксированной длины (64 байта), которое передатчик формирует и отправляет с периодом 1 с для оценки качества канала. Модуль разделяет на пакеты данных сообщения длиннее 200 байт, поэтому кадр всегда передаётся одним пакетом и его потеря тождественна потере пакета. Длина всех кадров выбрана одинаковой, поскольку она определяет время нахождения пакета в эфире и вероятность его искажения. Содержимое кадра не влияет на результаты измерений: байты кадра передаются в эфир последовательно. Структура кадра приведена в таблице 1.

Таблица 1. Структура тестового кадра

Поле	Байт	Назначение
magic	2	Сигнатура 0x544C («LT»)
version	1	Версия формата кадра
config_hash	1	Хеш настроек (должен совпадать на обеих платах)
boot_id	2	Случайный идентификатор включения передатчика
air_rate	2	Скорость передачи в эфире, бит/с
seq	4	Сквозной номер кадра с момента включения
block	4	Номер блока
pos	2	Номер слота внутри блока (0…29)
send_offset_ms	4	Момент отправки от начала блока, мс
prev_tx_busy_ms	2	Служебное: время передачи кадра в модуль, мс
payload	38	Заполнитель: фрагмент строки, состоящей из последовательности чисел вида «012345678…997998999» без разделителей
crc	2	Контрольная сумма CRC-16/CCITT
Итого	**64**	

Временная структура передачи кадров

Передача кадров осуществляется по фиксированному расписанию, отсчёт которого ведётся от момента включения передатчика. Время передачи разделено на последовательные блоки по 32 секунды: 2 секунды паузы, во время

которой приёмник измеряет фоновый шум, и 30 слотов по 1 секунде, в каждом — ровно один кадр. Скорость передачи в течение опыта постоянна (допустимы значения от 2400 до 62 500 бит/с). Мощность передатчика во всех опытах постоянна — 22 дБм, частота — 850,125 МГц. Главное свойство расписания: приёмник заранее знает, сколько кадров должно прийти, и учитывает потери, даже когда не пришло ничего.

Синхронизация приёмника и проверка кадров

Приёмнику заранее неизвестен момент включения передатчика, однако он восстанавливается по первому принятому кадру: по номеру блока, смещению момента отправки и моменту приёма t_пр приёмник вычисляет начало расписания передатчика по своим часам:

$$t_0 = t_{\text{пр}} - (n \cdot T_{\text{бл}} + \Delta t_{\text{отп}}), \qquad (1)$$

где n — номер блока (поле block); $T_{бл}$ = 32 000 мс — длительность блока; $\Delta t_{отп}$ — смещение момента отправки кадра относительно начала блока, мс (поле send_offset_ms).

Далее оценка t_0 уточняется по каждому вновь принятому кадру. После паузы длительностью более 15 мс принятый пакет передаётся на микроконтроллер единой посылкой в 65 байт — кадр и байт уровня сигнала. Затем кадр проходит проверки:

- сигнатура и CRC-16 — ошибка означает сбой на проводах между модулем и платой (испорченные в эфире пакеты отбрасывает сам LoRa); такие случаи считаются отдельно (bad);
- версия и хеш настроек — при несовпадении кадр игнорируется;
- boot_id — если он изменился, передатчик перезагружался, и приёмник синхронизируется заново.

Методика расчёта потерь

Для каждого блока приёмник ведёт битовую карту из 30 ячеек — по одной на слот — и отмечает принятые кадры по полю pos, не учитывая повторы; потери соответствуют незаполненным ячейкам, и по завершении блока их доля равна

$$P_{\text{пот}} = \frac{N_{\text{ож}} - N_{\text{пр}}}{N_{\text{ож}}} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

где $N_{ож}$ — число ожидаемых кадров (30 для полного блока), $N_{пр}$ — число уникальных принятых кадров. Дополнительно фиксируется самая длинная серия подряд потерянных кадров (max_burst).

Для исключения ложных потерь в статистику не включаются блоки, приём которых начат с середины, а завершённый блок засчитывается лишь после повторного приёма того же передатчика (с тем же boot_id): так, пустой блок считается 100% потерь, только если передатчик заведомо работал. При отсутствии кадров дольше трёх блоков синхронизация сбрасывается. Итоговая доля потерь для каждой скорости передачи вычисляется по совокупности полных блоков.

Метод измерения мощности сигнала

Мощность принятого сигнала оценивается по показателю RSSI (англ. Received Signal Strength Indicator). Модуль E220 вычисляет его самостоятельно и добавляет одним байтом к каждому принятому пакету; в децибел-милливатты значение пересчитывается по формуле

$$RSSI = v - 256, \text{ дБм}, \qquad (3)$$

где v — значение байта уровня сигнала (от 0 до 255), передаваемого модулем вместе с кадром.

Помимо сигнала, приёмник измеряет фоновый шум — мощность, регистрируемую на входе приёмника в отсутствие полезной передачи. Для этого он запрашивает у модуля значение регистра шума в моменты, заведомо свободные от передачи: через 20 мс после приёма кадра и в начале паузы каждого блока. Разность

$$\text{Запас} = RSSI - \text{Шум}, \text{ дБ} \qquad (4)$$

показывает, насколько сигнал превышает фон, — это грубая оценка отношения сигнал/шум. Благодаря использованию модуляции с расширением спектра технология LoRa обеспечивает приём пакетов при уровне сигнала ниже уровня шума.

Методика измерений

С использованием описанного программно-аппаратного комплекса 23 сентября 2026 года с 13:20 до 16:20 были проведены испытания в главном корпусе МГТУ им. Н.Э. Баумана. Передатчик был размещён в одной из аудиторий южного крыла университета. Такое расположение позволило оценить ослабление сигнала на максимальном расстоянии в пределах корпуса — между его противоположными крыльями, — а также передачу на большое расстояние по открытому пространству между окнами закруглённых крыльев здания («циркулей»).

В ходе испытаний передатчик оставался неподвижным и автоматически передавал пакеты данных, а приёмник был подключён к ноутбуку, на котором велась непрерывная запись принятых пакетов с точными отметками времени.

Для каждой из трёх выбранных скоростей передачи был проведён отдельный эксперимент. В ходе каждого эксперимента приёмник перемещался по маршруту, охва-

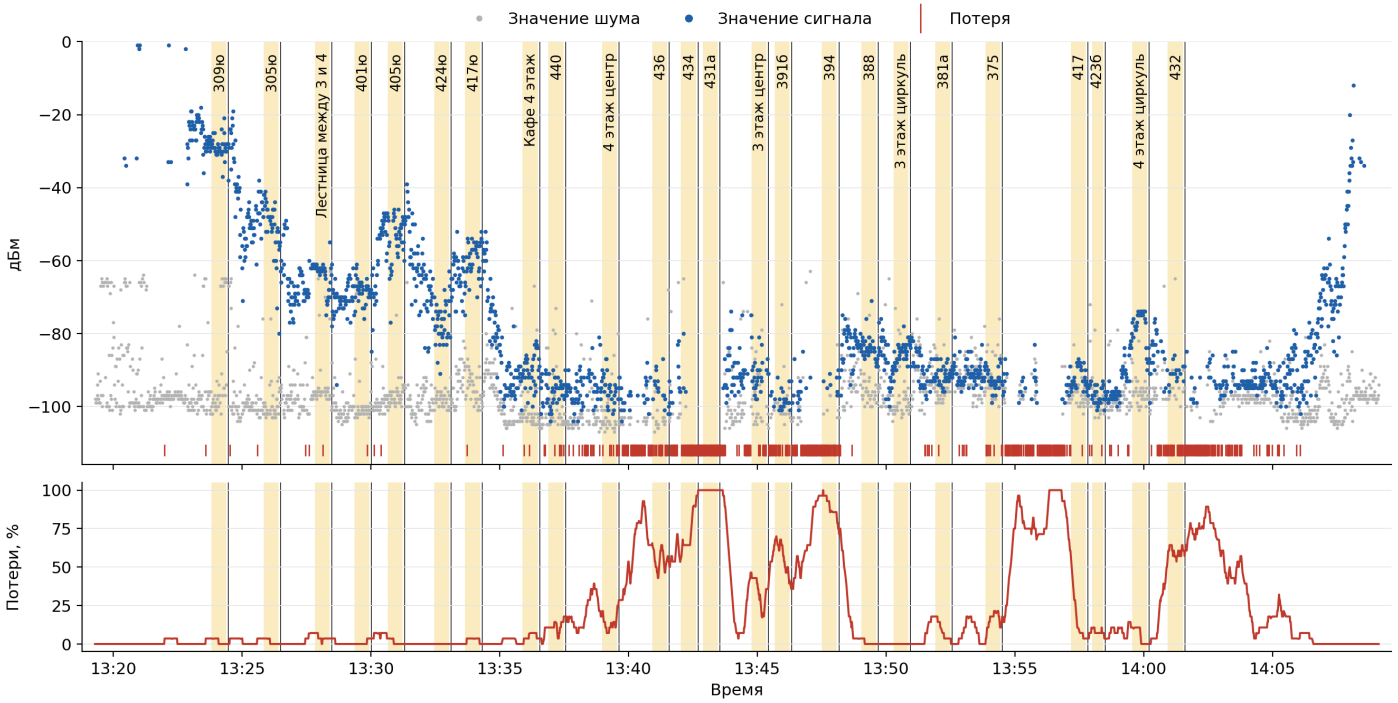


Рис. 1. Уровни сигнала и шума, потери пакетов и доля потерь во времени (эксперимент на скорости 2,4 кбит/с); закрашенными полосами отмечены точки измерений.

тывающему бо льшую часть помещений университета, в которых принимался сигнал. Пример данных, записанных в ходе эксперимента на скорости 2,4 кбит/с, приведён на рисунке 1.

Для привязки записанных данных к местоположению приёмника параллельно вёлся протокол испытаний, в который вручную заносились приближённые результаты измерений с привязкой к аудиториям и другим ориентирам в здании университета. В точках, где уровень сигнала, уровень шума или доля доставленных пакетов заметно отличались от значений в предыдущей точке, приёмник фиксировался на некоторое время, а в протокол заносились ориентир (аудитория), точное время и оценочные значения показателей. По этим записям из общего массива выделялись данные для точек с известным местоположением. В точках, где сигнал не принимался вовсе, опыты, как правило, не проводились; этим объясняется меньшее количество опытов на более высоких скоростях передачи. В качестве основных точек измерений были выбраны аудитории центральной части, южного и северного крыльев и центральной «башни» университета (последнее только для скорости 2,4 кбит/с).

Диаграммы визуального распределения качества сигнала и доли потерь для всех скоростей представлены на рисунках 2–4.

По полученным результатам наблюдается снижение качества сигнала с увеличением расстояния до передатчика и количества стен на пути распространения сигнала, причём на более высоких скоростях передачи это снижение происходит быстрее. На минимальной скорости пакеты принимались практически во всех частях университета, тогда как на максимальной скорости потери возникали уже при выходе из прямой видимости или при переходе на другой этаж. Существенное влияние количества стен между передатчиком и приёмником подтверждается тем, что сигнал стабильно принимался в северном «циркуле», связь с которым осуществляется через открытое пространство, но не во всех точках центральной части здания, хотя она расположена ближе к передатчику. Кроме того, с увеличением высоты расположения приёмника в башне качество сигнала улучшалось: при переходе с 5-го на 12-й этаж медианный уровень сигнала увеличился на 20 дБ.

Зависимость доли доставленных пакетов от расстояния до передатчика и от медианного уровня сигнала приведена на рисунке 5. При уровне сигнала выше −85 дБм доля доставленных пакетов составляет в среднем 94,5%, тогда как при более слабом сигнале она резко снижается (рисунок 5, б): медианная доля доставленных пакетов для скоростей 19,2 и 62,5 кбит/с составляет 24–25%, для скорости 2,4 кбит/с — 82%. Аналогичная закономерность наблюдается и для расстояния (рисунок 5, а): на расстояниях более 85 м стабильный приём обеспечивается только на скорости 2,4 кбит/с, для которой медианная доля доставленных пакетов составляет 88% против 24–25% для остальных скоростей.

Аппроксимация зависимости медианного уровня сигнала от расстояния (рисунок 6) логарифмической моделью даёт убывание, пропорциональное третьей степени расстояния, а не второй (последнее присуще свободному пространству), что объясняется дополнительным затуханием в стенах и на поворотах коридоров здания.

Преимущество минимальной скорости при передаче на большие расстояния проявляется и в статистике приёма пакетов с низким уровнем сигнала (рисунок 7). На ско-

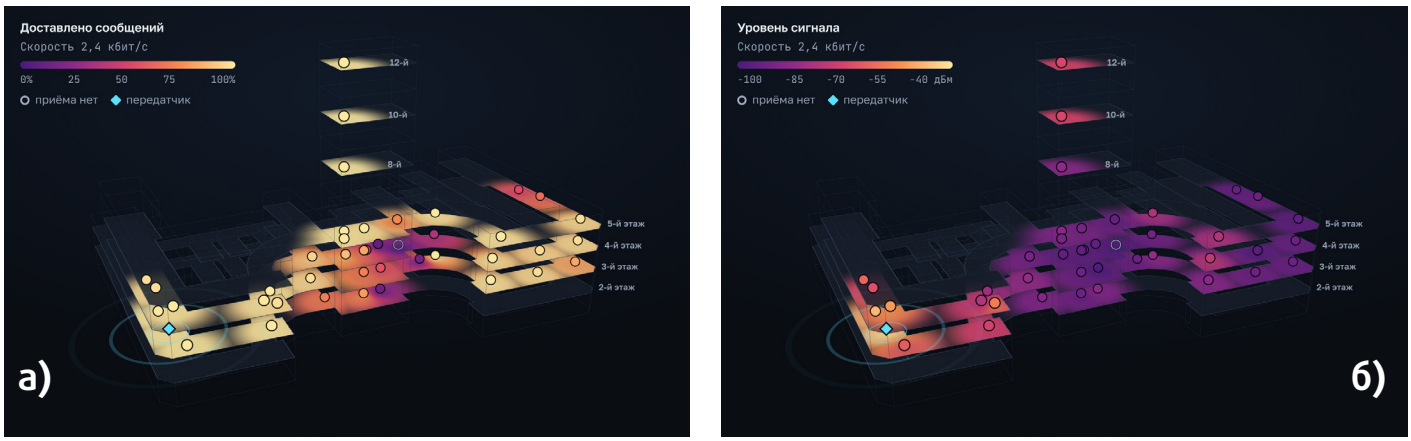


Рис. 2. Распределение показателей приёма по точкам университета при скорости 2,4 кбит/с: а) доля доставленных пакетов; б) уровень сигнала.

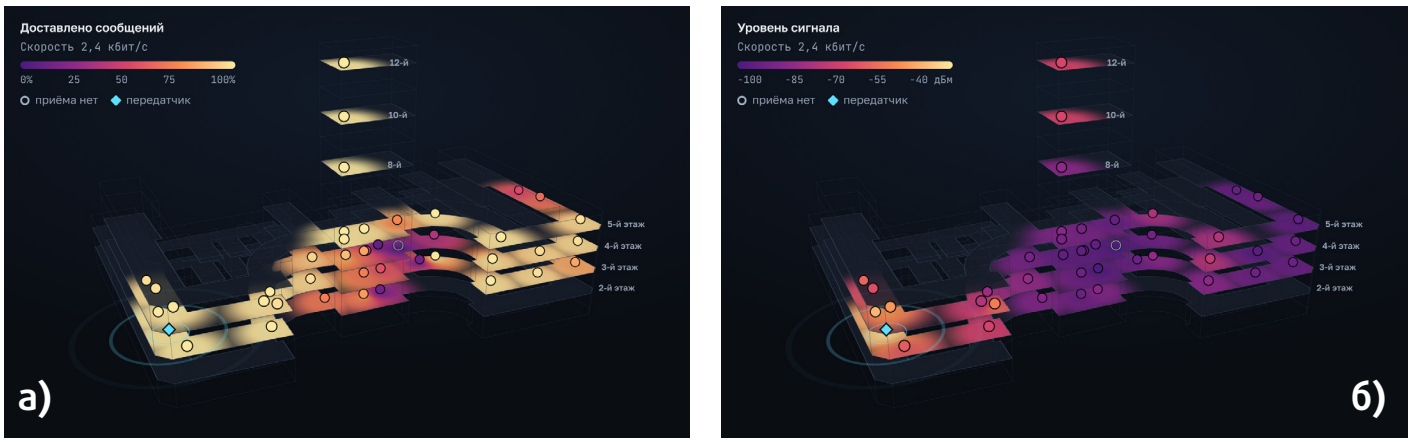


Рис. 3. Распределение показателей приёма по точкам университета при скорости 19,2 кбит/с: а) доля доставленных пакетов; б) уровень сигнала.

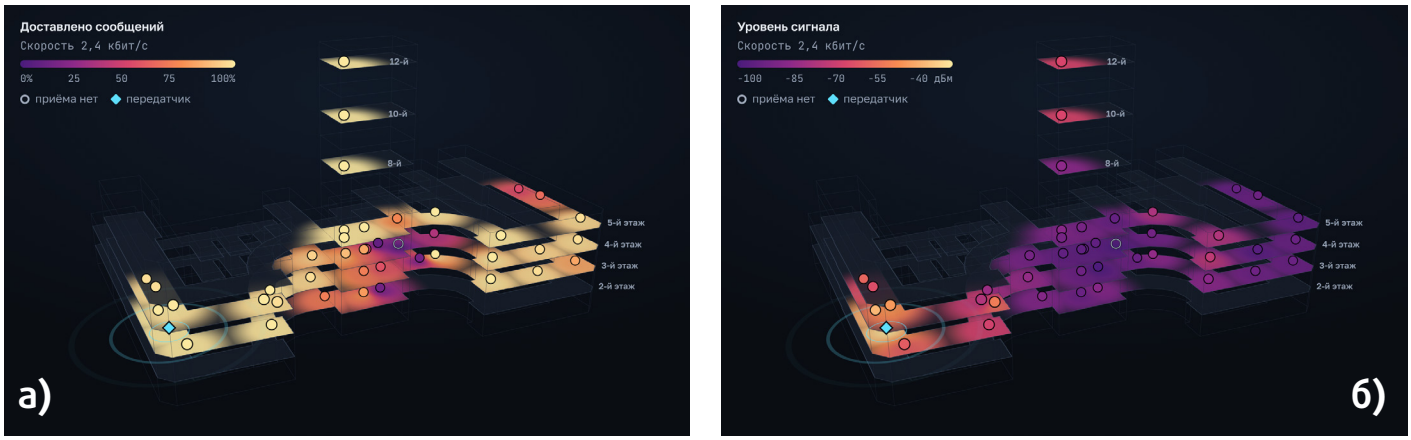


Рис. 4. Распределение показателей приёма по точкам университета при скорости 62,5 кбит/с: а) доля доставленных пакетов; б) уровень сигнала.

рости 2,4 кбит/с приёмник чаще принимал такие пакеты (рисунок 7, а): минимальный уровень сигнала принятого пакета составил −104 дБм против −102 дБм для скорости 19,2 кбит/с и −98 дБм для скорости 62,5 кбит/с. Кроме того, на этой скорости чаще принимались пакеты с уровнем сигнала ниже уровня шума (рисунок 7, б): 8,5% всех принятых пакетов против 2,3% для скорости 19,2 кбит/с и 1,9% для скорости 62,5 кбит/с.

Заключение

В ходе работы были проанализированы методы и параметры оценки качества радиоканала и существующие модели выделенных параметров радиоканала LoRa. Был спроектирован и разработан испытательный стенд для проверки данных параметров на практике.

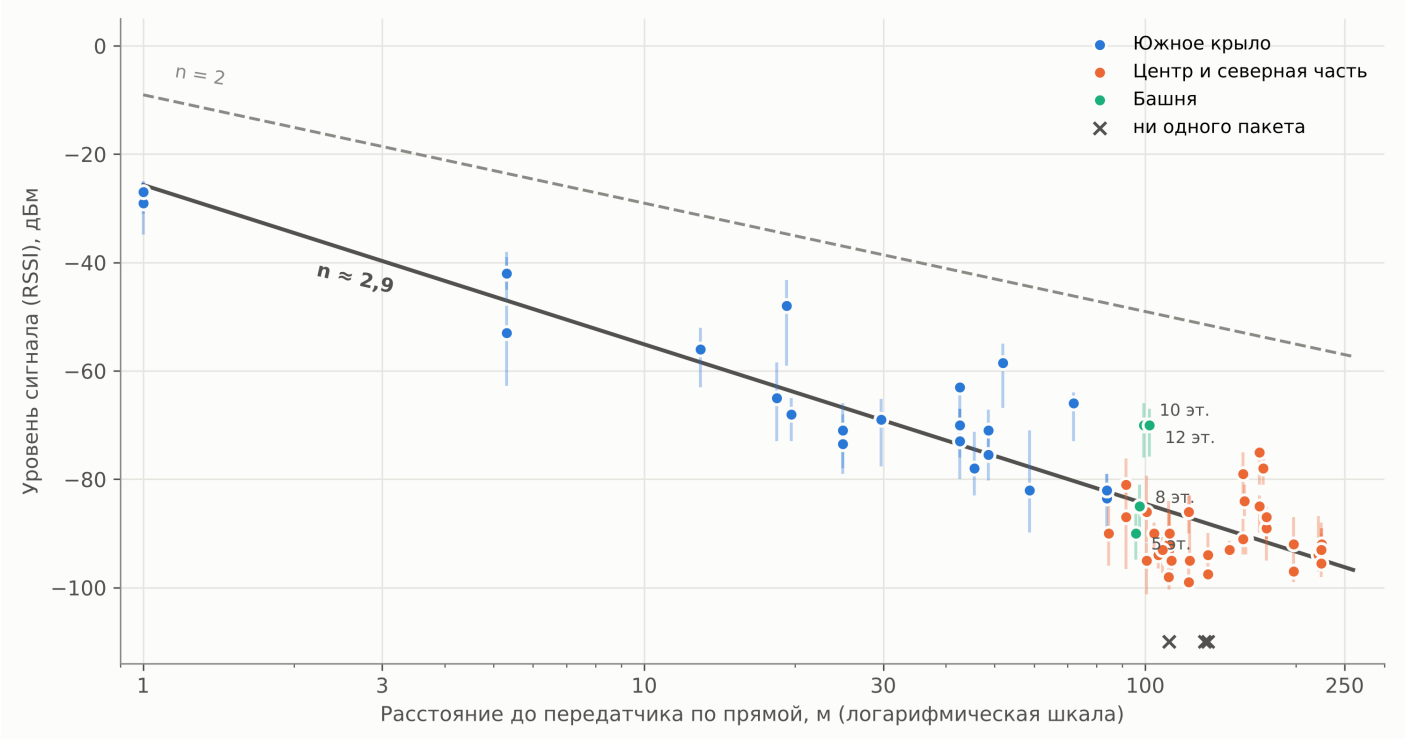


Рис. 5. Доля доставленных пакетов в зависимости: а) от расстояния до передатчика; б) от медианного уровня сигнала принятых пакетов.

Была проведена серия экспериментов для оценки качества радиоканала внутри зданий на примере главного корпуса МГТУ им. Н.Э. Баумана. По результатам проведения испытаний была доказана возможность использования LoRa-радиоканалов для передачи данных от автономных IoT-датчиков на примере главного корпуса МГТУ им. Н.Э. Баумана. Но были доказаны значительные ограничения модуляции LoRa по скорости передачи данных. Экспериментально было показано, что при передаче данных со скоростью, превышающей минимальную для модуля E220-900T22D, потери сигнала фиксировались при нахождении любой преграды на прямой радиоканала.

В дальнейших планах рассматривается оценка возможности передачи по LoRa сжатых изображений и звуковых сигналов при автономном питании.

Рис. 6. Зависимость медианного уровня сигнала от расстояния до передатчика (вертикальные отрезки — разброс значений между 10-м и 90-м процентилями).



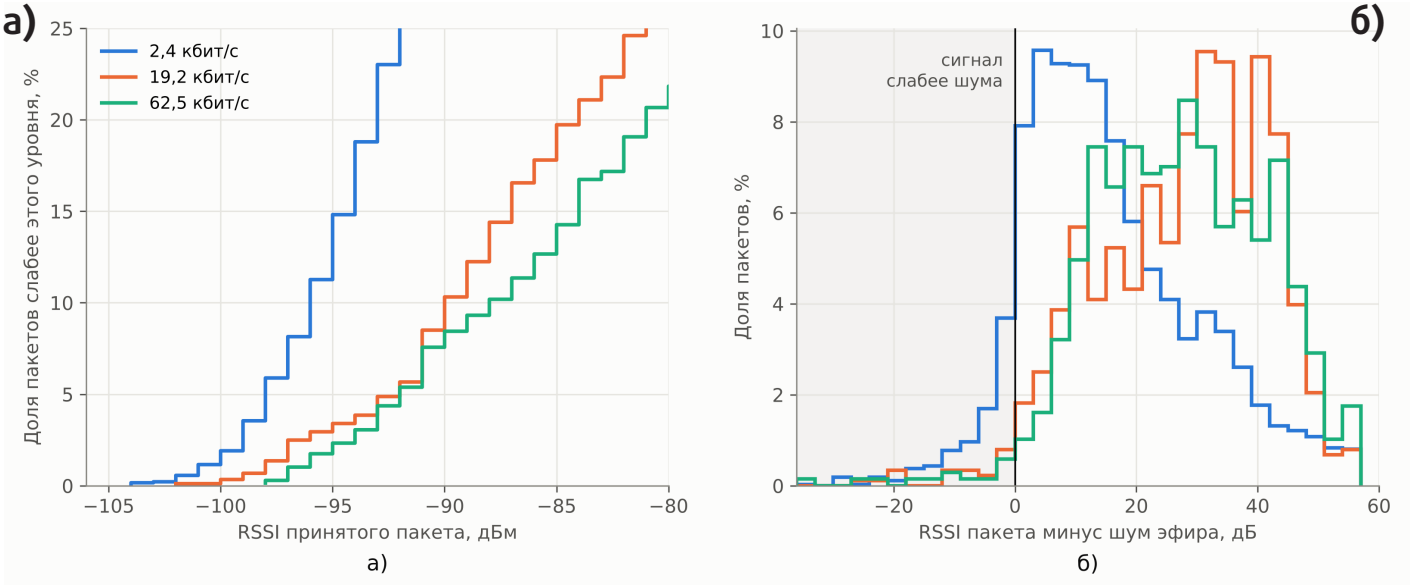


Рис. 7. Статистика приёма пакетов с низким уровнем сигнала: а) интегральное распределение уровня сигнала принятых пакетов; б) распределение превышения уровня сигнала над уровнем шума.

Список литературы:

[1] Afisiadis, O. Coded LoRa frame error rate analysis [Текст] / O. Afisiadis, A. Burg, A. Balatsoukas-Stimming // ICC 2020 – 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). – Piscataway: IEEE, 2020.

[2] Baruffa, G. Error probability performance of chirp modulation in uncoded and coded LoRa systems [Текст] / G. Baruffa [et al.] // Digital Signal Processing. – 2020. – Vol. 106. – Art. 102828.

[3] E220-900T22D User Manual: 868/915MHz 22dBm LoRa Wireless Module. – Version 1.0. – Chengdu: Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd., 2020. – 22 p. – URL: https://www.cdebyte.com/products/E220-900T22D (дата обращения: 01.10.2026) – Текст: электронный.

[4] Maleki, A. A tutorial on chirp spread spectrum modulation for LoRaWAN: Basics and key advances [Текст] / A. Maleki, H. H. Nguyen, E. Bedeer, R. Barton // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2024. – Vol. 5. – P. 4578–4612.

[5] Pramanik, J. A comprehensive systematic review of progressive applications of LoRa and LoRaWAN networks in the Internet of Things [Текст] / J. Pramanik [et al.] // International Journal of Internet Manufacturing and Services. – 2025. – Vol. 11, no. 1. – P. 1–22.

Об авторах:

Кочетков Денис Игоревич, бакалавр, 4074-5575, инженер, НУК «Информатика и системы управления», РУНЦ «Безопасность», лаборатория «Мультиспектральных информационных систем», МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Бондарев Богдан Андреевич, студент учебной группы ИУ9-51Б, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Никитин Андрей Владимирович, студент учебной группы ИУ9-51Б, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Посевин Данила Павлович, к. т. н., доцент кафедры ИУ-9, МГТУ им. Н.Э. Баумана.