

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ LORAWAN ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АВТОНОМНЫХ ОКОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-9-14-22

Manuscript received 07 June 2025;
Accepted 20 August 2025

Михайлов Валентин Юрьевич,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия,
valyamih98@mail.ru

Тюрликов Андрей Михайлович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия,
turlikov@k36.org

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003,
"Фундаментальные основы построения
помехозащищённых систем космической и спутниковой
связи, относительной навигации, технического зрения и
аэрокосмического мониторинга".*

Ключевые слова: интернет вещей; LoRaWAN;
устройства класса A; энергоэффективность;
случайный множественный доступ

Широкое распространение в сфере Интернета Вещей (Internet of Things, IoT) получили технологии глобальных сетей с малым потреблением электроэнергии (Low Power Wide Area Network, LPWAN). Наиболее популярной и доступной сетью среди них является LoRaWAN. При использовании данной технологии важное место занимает автономность оконечных устройств, поэтому в данной работе мы фокусируемся на самых энергоэффективных устройствах LoRaWAN - класса A. Основная особенность данного класса состоит в том, что они работают на прием только в ограниченные интервалы времени, после каждой передачи. Тем самым с одной стороны, значительно снижается потребление энергии приемной частью устройства. Но с другой стороны, возникает проблема с организацией процесса передачи данных, что может в ряде случаев привести к увеличению затрат энергии на работу устройства в целом. Целью данной работы является систематизация подходов к решению данной и других проблем систем LoRaWAN сетей, с учетом специфических особенностей устройств класса A. В данной работе мы предлагаем классификации сценариев использования LoRaWAN сетей. Рассматриваются проблемы, возникающие в таких сетях. Также проведен обзор современных работ, использующих как описанные сценарии, так и подходы к решению проблем, возникающих в подобных сценариях. Предложенные результаты могут быть использованы в научных и промышленных целях: для выбора направления исследований и систематизации их результатов; учитывать описанные проблемы при построении систем и выбирать подходящие пути их решения.

Информация об авторах:

Михайлов Валентин Юрьевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0009-0002-9190-0030

Тюрликов Андрей Михайлович, Заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи, профессор, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0001-7132-094X

Для цитирования:

Михайлов В.Ю., Тюрликов А.М. Проблемы построения сетей по технологии LoRaWAN при использовании автономных оконечных устройств // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №9. С. 14-22.

For citation:

V.Yu. Mikhailov, A.M. Tyurlikov, "Challenges of building LoRaWAN networks with autonomous end devices," T-Comm, 2025, vol. 19, no.9, pp. 14-22. (in Russian)

Введение

В настоящее время широко распространены технологии Интернета вещей (Internet of Things, IoT). Такие технологии могут применяться в промышленности, сельском хозяйстве, ЖКХ, медицине, научных исследованиях, концепциях «Умный Дом» и «Умный Город». В рамках Интернета вещей существует множество протоколов связи, которые могут применяться в различных областях и их выбор зависит от нужд конкретных сценариев использования.

В данной работе мы фокусируемся на протоколе беспроводной передачи данных LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), предложенный LoRa Alliance [1], который является представителем семейства технологий LPWAN (Low Power Wide Area Network) – глобальных сетей с малым потреблением электроэнергии. Прямой перевод термина LoRaWAN – глобальная сеть дальнего действия, но в дальнейшем мы будем использовать только LoRaWAN, поскольку даже в стандарте ГОСТ Р 71168-2023 «Спецификация LoRaWAN RU» используется этот термин. Зачастую под протоколом LoRaWAN подразумевают стек технологий физического (PHY) и канального (MAC) уровня модели OSI. Физический уровень представлен закрытым протоколом LoRa (Long Range), который использует вариант Линейной Частотной Модуляции под названием Chirp Spread Spectrum. Это обеспечивает большую дальность и чувствительность приёмника, по сравнению с традиционной частотной модуляцией (FSK).

Протоколом LoRa владеет производитель чипов Semtech. Канальный уровень представлен открытым протоколом LoRaWAN, за его разработку отвечает т.н. LoRa Alliance. LoRa работает на нелицензируемых частотах 868-869 МГц [2]. Эти частоты входят в частотный диапазон, который в англоязычных работах называется ISM (Industrial, Science, Medical), что обычно напрямую переводят как «диапазон для промышленных, научных и медицинских целей». Однако в Российской Федерации, Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) определяет данные частоты в перечень, который называется «перечень радиочастот, рекомендуемых для устройств малого радиуса действия различных типов (назначения)» [3].

На первый взгляд, возникает противоречие в формулировке от ГКРЧ и названием технологии LoRaWAN. Это объясняется тем, что требованиями ГКРЧ ограничивается мощность передачи устройств в данном перечне – не более 25 мВт для устройств в рассматриваемом диапазоне. Однако модуляция LoRa позволяет работать при этой мощности на достаточно больших расстояниях.

Беспроводная сеть передачи данных на основе LoRaWAN состоит из нескольких элементов:

- оконечных устройств – небольших автономных приемопередающих модулей, которые отправляют целевые данные на базовые станции по восходящему каналу связи;
- шлюзов/базовых станций – мощные приемопередающие устройства с постоянным питанием и дальнейшим доступом в сеть, они принимают и обрабатывают данные со всех оконечных устройств в зоне действия базовой станции. Также имеют возможность изменять настройки оконечных устройств, отправляя инструкции по нисходящему каналу связи;

- программных компонентов – сетевого сервера и сервера приложений. Зачастую расположены на высокопроизводительных ЭВМ, предназначены для обработки и представления целевых данных пользователям системы.

Оконечные устройства LoRaWAN подразделяются на три класса:

- оконечные устройства класса А (end-devices, Class A), используемые в случаях минимальной потребляемой мощности при приоритете передачи данных к серверу. Имеют два небольших временных интервала для приема информации от базовой станции;

- оконечные устройства класса В (Class B), обладающие дополнительным временным интервалом приема данных по расписанию в определенное время;

- оконечные устройства класса С (Class C) с максимально возможным временным интервалом приема данных. Зачастую требуется постоянный источник питания.

В Российской Федерации принят ГОСТ Р 71168-2023 по LoRaWAN, в котором описываются правила организации связи и описываются особенности работы устройств классов А и С.

В большинстве случаев реальных применений систем на основе LoRaWAN технологии, важна автономность конечных устройств, что приводит к выбору устройств класса А. В дополнении к этому факту, спецификации LoRa Alliance и ГОСТ РФ требуют, чтобы все устройства, независимо от их класса, поддерживали функционал класса А. Поэтому в дальнейшем мы будем фокусироваться на данном классе устройств.

Для экономии потребления энергии, у устройств класса А ограничено время отправки и приема данных и почти всё время эти устройства выключены. Включаются они при появлении сообщения или по внутреннему расписанию, далее происходит сбор данных и их передача. После передачи устройства имеют два небольших временных окна для приема подтверждений успешных передач. Поскольку перед передачей устройства никаким образом не анализируют текущий канал связи, может возникнуть ситуация, когда передача данных произошла в один и тот же момент времени с другими устройствами. Такая ситуация приводит к конфликту радиосигналов, и невозможности их приема и/или расшифровки на стороне базовой станции.

Существует также отдельная проблема: если появляются устройства, которые изготовлены не по стандарту, или в процессе эксплуатации их параметры изменяются. Эту проблему можно решать организационным путем – созданием центров сертификации или выявлять такие устройства в процессе их работы.

Возможны различные подходы к решению этих проблем. Например, обширный обзор 2022 года [4] предлагает классификацию подходов к оптимизации технологии LoRaWAN. Однако авторы не фокусируются на устройствах класса А, и поэтому некоторые рассмотренные подходы не учитывают требования к энергоэффективности. В настоящее время появились новые подходы, которые не были рассмотрены в работе [4].

Цель данной работы – предложить классификацию этих подходов с учетом специфических особенностей устройств класса А и в соответствии с классификацией, провести обзор существующих работ.

Остальная часть работы построена следующим образом: сначала описаны специфические особенности стандарта, и сетевых настроек LoRaWAN; далее описаны сценарии использования систем на основе LoRaWAN технологии и даны краткие описания работ, в которых исследуются соответствующие сценарии; затем обсуждаются проблемы, которые могут возникнуть при работе систем, и предлагается классификация решений этих проблем, также приводится обзор статей, в которых используются данные решения; далее приводится предложенная классификация в виде таблицы и представлены выводы работы.

Специфические особенности стандарта LoRaWAN

В стандарте LoRaWAN есть несколько специфических особенностей, которые позволяют подстроить параметры устройств и канала таким образом, чтобы передавать данные на достаточно большие расстояния и с небольшими затратами энергии по сравнению с другими LPWAN технологиями.

Далее приведем краткое описание особенностей стандарта:

- SF (Spreading factor) – Коэффициент расширения спектра. В каждом элементарном символе можно передать разное количество бит данных – чем больше SF, тем больше длительность символа, больше бит в одном символе, и тем меньше спектральная эффективность сигнала. Данная особенность позволяет осуществлять разделение каналов, то есть при прочих равных параметрах, сигналы с разными SF не будут интерферировать в канале.

- BW (Bandwidth) – Полоса частот пропускания сигнала. В РФ это 125 кГц и 250 кГц.

- TP (Transmission Power) – Мощность передачи оконечного устройства. В РФ мощность ограничена 25 мВт.

- CF (Central Frequency) – Центральная частота передачи. Зависит от региональных параметров разрешенных диапазонов частот.

- CR (Code Rate) – Скорость помехоустойчивого кода. Это отношение количества символов в кодовом слове на выходе помехоустойчивого кодера к количеству символов в кодовом слове на входе кодера.

- DC (Duty cycle) – Рабочий цикл устройства, величина обратная скважности, измеряется в процентах. Отображает соотношение времени активного состояния устройства к общему времени. Обычно определяется требованиями разрешающих органов.

- ADR (Adaptive Data Rate) – Адаптивная схема выбора скорости передачи данных. Механизм ADR позволяет базовым станциям своевременно подстраивать параметры оконечных устройств (SF, BW, TP), на основе анализа ситуации в радиоканале.

В русскоязычных работах при описании стандарта часто приводится описанная выше терминология, которая является прямым переводом соответствующих англоязычных терминов, что в многих случаях искажает смысл русскоязычных текстов. Этот факт отмечается в работе [5] и предлагается достаточно удачная на наш взгляд русскоязычная терминология. В [5] отмечается, что использование термина Chirp для обозначения элементарного сигнала LoRa, при переводе на русский язык не имеет технического смысла. Поэтому, в [5]

было предложено использовать термин Линейно Возрастающий Частотно Модулированный (ЛВЧМ) символ для обозначения элементарного сигнала LoRa. Далее в [5] предлагается следующая трактовка для термина Spreading Factor: «...термин SF (Spreading Factor) не следует переводить на русский язык как коэффициент расширения спектра, т.к. ЛВЧМ-символы с разными значениями SF занимают одинаковую полосу частот, но имеют разную длительность. Трактовать термин SF следует как параметр характеризующий вид ЛВЧМ-символа равный числу бит, которое можно передать в одном ЛВЧМ-символе». Данную терминологию мы будем использовать в дальнейшем.

Сценарии использования и их проблемы

В обзорной работе [6] есть общие сценарии использования, но они не конкретизированы. В данной работе предлагается ввести следующую систематизацию:

Централизованные:

- 1) Одна базовая станция (БС) обслуживает множество абонентов в зоне действия данной БС.

- 2) Множество БС, объединенных в одну сеть, обслуживают множество абонентов в объединенной зоне покрытия всех БС.

Децентрализованные:

- 1) MESH-сети (сети с ячеистой топологией).

- 2) Пары устройств, которые общаются друг с другом с использованием протокола LoRa, без участия БС. Может обозначаться термином Multi hop.

Также возможно использование различных протоколов связи совместно с LoRaWAN, в том числе и связь космос-земля с использованием спутников. Данный вариант использования возможен как в централизованном варианте, так и в децентрализованном.

Классификация сценариев использования представлена в виде дерева на рисунке 1.

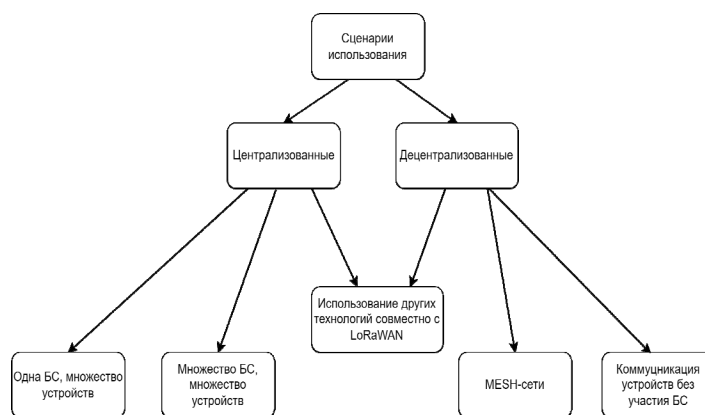


Рис. 1. Классификация сценариев использования LoRaWAN

Опишем сценарии использования более подробно.

Централизованные сценарии используют стандартные элементы сети LoRaWAN, в особенности шлюзы (базовые станции) – устройства, которые передают сетевые настройки на оконечные устройства, собирают полезные данные с оконечных устройств, обрабатывают их и передают на уровень выше.

В случае компактной сетевой архитектуры, достаточно использовать одну базовую станцию, которая способна обрабатывать данные с порядка 1000 оконечных устройств.

При усложнении сетевой архитектуры следует использовать несколько базовых станций, объединенных в одну сеть, то есть сетевой сервер и сервер приложений будет один для всех базовых станций. Описание перечисленных сценариев и иллюстрации к ним можно найти в обзорных работах [6-7].

В децентрализованных сценариях не используют базовые станции LoRaWAN, а коммуникация происходит напрямую между оконечными устройствами.

Например, в работах [8, 9] для этого используются микроконтроллеры в качестве оконечных устройств. С помощью них можно организовать прием, передачу и обработку данных. Однако такой подход не учитывает энергопотребление данных микроконтроллеров, поэтому не соответствует выбранному нами классу А оконечных устройств. В работе [10] представлено сравнение работы LoRaWAN сети с и без использования базовой станции, в условиях густо лесистой местности. При передаче от одного устройства к другому, максимальное расстояние стабильной передачи данных достигает 1500 м, в то время как при использовании БС, оно достигает 3000 м.

Логичным развитием предыдущего пункта является построение MESH-сетей, то есть сетей, где узлы оказываются равнозначны. Авторы [11] приводят обзор таких решений и предлагают специфичные для LoRaWAN топологии построения MESH сетей.

При всех достоинствах LoRaWAN, этот протокол не может покрыть все возможные сценарии использования интернета вещей. Однако при возникновении потребности передачи данных на большие расстояния, зачастую совместно с LoRaWAN используют другие протоколы передачи данных. Например, в работе [12] рассматривается совместное использование LoRaWAN и Zigbee (протокол для систем интернета вещей, более подходящий для построения MESH-сетей, однако имеющий меньшее расстояние передачи данных). В статье [13] предлагается для передачи данных от оконечных устройств на базовую станцию использовать дополнительный путь передачи данных – через Bluetooth MESH сеть. Такая система позволяет с высокой надежностью доставлять важные сообщения, даже если возникли проблемы с передачей через LoRaWAN. В работах [14-15] обсуждается использование протокола LoRaWAN для связи с космическими спутниками, находящимися на низкой околоземной орбите.

Как было отмечено выше, специфика устройств класса А – отсутствие возможности включить приемник в любой момент времени, он включается только на короткое время после передачи с одной стороны это позволяет экономить потребление энергии, а с другой не позволяет включить передачу данных по запросу от базовой станции. В связи с этим, на канальном уровне передачи данных фактически используется только алгоритм АЛОХА. Поскольку между устройствами нет синхронизации, алгоритм АЛОХА является асинхронным.

Таким образом, вне зависимости от сценариев использования взаимодействие устройств происходит по алгоритму асинхронный АЛОХА, который как известно [16] не позволяет эффективно использовать канал связи. Это особенно проявляется в том, что при увеличении числа устройств увеличивается вероятность конфликта и как следствие это может

привести к увеличению затрат энергии за счет множественных попыток передачи.

Приведем классификацию проблем, возникающих в системах LoRaWAN с устройствами класса А в таблице 1.

Таблица 1

Сценарии использования/ постановка проблем	Централизованные	Децентрализованные
Проблемы, возникающие при масштабируемости систем. В основном связаны с интерференцией сигналов большого количества устройств, или недостаточным отношением сигнал-шум (I)	[17]	[17]
Проблема ограниченного времени работы устройства от автономного источника (II)	[18-20]	[18-20]
Проблема возможных конфликтов с устройствами других систем, работающих в том же диапазоне (III)	[21]	-
Ограниченные возможности передачи данных от базовой станции к оконечным устройствам (IV)	[22-23]	-
Проблемы, касающиеся информационной безопасности сети (V)	[24, 44]	-
Возможное появление устройств, которые изготовлены не по стандарту, или в процессе работы перестают ему соответствовать (VI)	<i>В настоящее время таких работ не найдено</i>	

Классификация подходов к решению проблем:

- 1) Подходы с изменением протокола LoRa/LoRaWAN
 - a. Добавление возможности синхронизации между устройствами, то есть переход от алгоритма асинхронная АЛОХА к алгоритму синхронная АЛОХА
 - b. Введение механизмов прослушивания канала перед передачей данных.
 - c. Изменение на физическом уровне, например, в помехоустойчивом кодировании.
 - 2) Подходы без изменения протокола LoRa/LoRaWAN
 - a. Планирование настроек оконечных устройств без использования ADR
 - b. Улучшение алгоритмов ADR
 - c. Энергетический менеджмент
 - d. Методы машинного обучения
- Классификацию мы даем в виде дерева на рисунке 2.

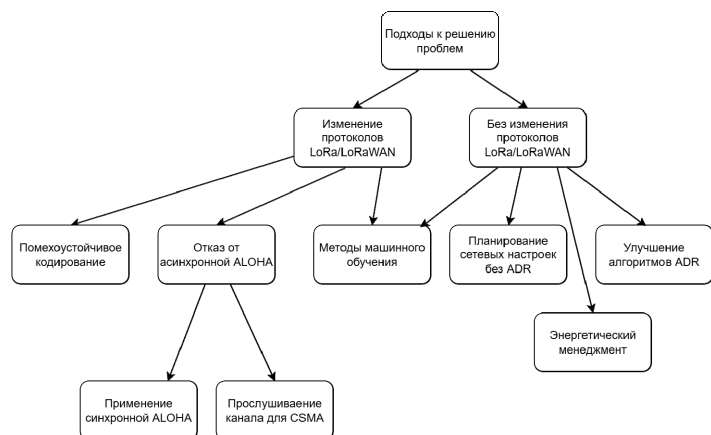


Рис. 2. Классификация подходов к решению проблем

Опишем подходы к решению проблем более подробно.

Возможным вариантом значительно улучшить характеристики сетей LoRaWAN является внесение изменений в протокол физического (LoRa) или канального (LoRaWAN) уровня.

Поскольку протокол LoRa закрытый, во множестве работ предпринимаются попытки повторить и улучшить его. Например, исследователи обращают внимание на способы помехоустойчивого кодирования или особенности ЛВЧМ-символов и приема сигналов. Так, в [25] авторы предлагают метод кодирования, который основан на 4 новых особенностях ЛВЧМ-символов. Результаты тестирования говорят о трехкратном увеличении количества успешных одновременных передач в сети и почти четырехкратном снижении потребления энергии. В работе [26] предлагается вместо типичного для протокола LoRa кода Хэмминга использовать код Рида-Соломона, который позволяет исправлять большее количество ошибок в кодовом слове. Тем самым снижается вероятность ошибки на бит и повышается количество полезной передаваемой информации в пакетах LoRa.

Авторы предлагают использовать данные о передачах пакетов, такие как отношение ошибок на бит и отношение сигнал-шум для адаптивной настройки CR в зависимости от ситуации в канале, позволяя добиться лучших результатов передачи на физическом уровне. Также результаты работы могут быть использованы для внедрения более современных LDPC кодов для использования в протоколе LoRa. В работе [27] авторы представляют алгоритм детектирования, который способен расшифровать сообщения от двух устройств, которые были отправлены в одно время и с одним SF.

Данное решение использует технологию физического уровня – последовательное погашение интерференции. Авторы указывают, что несмотря на максимальную способность данной системы расшифровывать коллизии только двух пакетов данных, она показывает значительное увеличение количества успешно принятых сообщений в сети LoRaWAN, что в итоге приводит к возможности увеличения в 4.7 раз количества оконечных устройств для обслуживания одной базовой станцией.

Говоря о канальном уровне, главным узким местом работы сети с устройствами класса А является асинхронный алгоритм случайного множественного доступа АЛОХА, в большом количестве научных работ предлагается его изменить. Так, в [28] проведен сравнительный анализ различных вариантов множественного доступа, в применении к LoRaWAN. Далее, рассмотрим варианты более подробно.

Статья [29] описывает идею синхронизации устройств и сети по времени, с помощью двойного запроса времени от оконечного устройства. Данный подход позволяет учитывать сдвиг во времени самого устройства и задержки на передачу сообщений. В [30] предлагается более эффективный с точки зрения цикла работы алгоритм, позволяющий периодически синхронизировать время оконечных устройств с сервером сети (предполагается что сервер сети имеет точное время).

При передаче подтверждения о получении сообщения, сервер может дополнительно сообщить о рассинхронизации времени устройства и передать требуемую корректировку. В статье [31] обсуждается влияние точности кварцевых часов на среднюю задержку при синхронизации устройств LoRaWAN. В работе [32] проведен обзор исследований доступа к радио-ресурсу на основе расписания.

Авторы также предлагают новый алгоритм, который использует разбиение большого количества устройств на группы не более 4 устройств, у каждого из которых будет различный SF внутри группы.

Далее все устройства переходят на класс В и используют технологию маяка, специфичную для данного класса устройств, для синхронизации будущих передач группы. Хотя данный подход и требует использования устройств, поддерживающих работу в классах А и В, авторы заявляют, что предложенный алгоритм синхронизации позволяет добиться большей энергоэффективности чем использование только устройств класса А.

Другая стратегия улучшения канального уровня – отказ от алгоритма АЛОХА как такового и переход к методам прослушивания и анализа состояния канала перед отправкой сообщения. Этот подход называется множественный доступ с контролем несущей (Carrier-Sense Multiple Access, CSMA). В статье [33] рассматривается использование нового механизма стандарта LoRa физического уровня – детектирование активности канала (Channel Activity Detection, CAD) для перехода к CSMA на канальном уровне. В LoRa Alliance обратили внимание на данную работу и на основе алгоритма, предложенного авторами, сделали официальное руководство для использования CSMA в LoRaWAN [34]. Хотя данная технология немного повышает энергозатраты на передачу каждого пакета, она помогает значительно уменьшить количество коллизий. Возможное улучшение CAD представлено в работе [35].

Поскольку изменение протоколов LoRa или LoRaWAN требует больших организационных и временных затрат, и согласование обсуждаемых изменений не гарантировано, многие исследователи решают разрабатывать решения в рамках данных протоколов. Далее рассмотрим такие решения.

Планирование настроек оконечных устройств без использования ADR применяется в случаях, когда специфический сценарий использования требует определенных настроек оконечных устройств, или при улучшении устоявшихся алгоритмов их выбора. В [36] описывается сценарий использования оконечных устройств, различающихся по требованиям задержки и надежности передачи данных и приводится анализ использования различных SF для таких групп устройств. В работе [37] рассматривается оптимизационная задача максимизации средней вероятности доставки сообщений:

$$\begin{cases} \sum_{i=7}^{12} \frac{m_i e^{-\lambda t_i m_i}}{N} \rightarrow \max \\ \sum_{i=7}^{12} m_i = N \\ m_7 \leq n_7 \\ m_8 \leq n_8 + n_7 - m_7 \\ \vdots \\ m_{12} \leq n_{12} + n_1 - m_1 \end{cases} \quad (1)$$

где N – общее число устройств в сети, t_i – время передачи сообщений на SF_i , λ – интенсивность потока сообщений от одного устройства, n_i , m_i – число устройств, использующие SF_i .

Результат данной оптимизационной задачи может быть применен для статического назначения параметров устройств.

Для ситуаций, в которых статическое назначение параметров неприменимо в силу изменяющихся условий в канале

связи, в [38] предлагается адаптивный алгоритм выбора количества повторных передач. Он зависит от двух параметров: коэффициента доставки отдельных пакетов и возможного количества повторных передач, которые не повлияют на передачу следующих пакетов по расписанию. Авторы [39] предлагают использовать универсальную для многих сценариев структуру подстройки параметров сети. В работе [40] проводится экспериментальное исследование с реальными устройствами. Предлагается алгоритм, который будет следить за данными, специфичными для устройств интернета вещей и уменьшать частоту передачи пакетов, если данные изменяются незначительно. Тем самым авторы достигают уменьшения числа передаваемых пакетов на 76,11%.

Другой возможный подход без изменения протоколов – улучшение алгоритмов ADR и подстройка их под определенные сценарии. Так, в [41] авторы предлагают новый алгоритм, называемый Mobile ADR, специально разработанный для использования LoRaWAN в рамках сельского хозяйства и мобильных датчиков. Данный алгоритм позволяет снизить частоту коллизий на 45% за счет обработки и использования данных о движении оконечных устройств. В работе [42] разработан специализированный алгоритм ADR для использования в децентрализованной сети, в которой устройства общаются напрямую друг с другом. Все описанные подходы могут быть улучшены или дополнены в случае применения машинного обучения, как показано в обзорной работе [43] и статьях [44-45].

Разбиение публикаций в соответствии с данной выше классификацией представлены в таблице 2, где колонкам и строкам будут соответствовать вершины деревьев из рисунков 1 и 2. Также каждой публикации будет соответствовать проблема из таблицы 1, которую решает данная работа. Для удобства, в таблице приведены только номера соответствующих проблем (римскими цифрами).

Таблица 2

Классификация публикаций

Сценарий использования/Подход к решению проблемы	Централизованные	Децентрализованные
Планирование сетевых настроек без ADR	[37] – I, II; [38] – I, II; [39] – I; [43] – I, II	[42] – I, II
Улучшение алгоритмов ADR	[4] – I, II; [41] – I, II	Данные подходы не применимы к децентрализованным сетям (устройства взаимодействуют по топологии точка-точка)
Применение синхронной АЛОХА	[30] – I, II; [32] – I	
Прослушивание канала	[33] – I; [34] – I; [35] – I	В настоящее время не найдены работы, в которых рассматриваются данные подходы к решению проблем
Помехоустойчивое кодирование	[25] – I, II; [26] – I; [27] – I	
Энергетический менеджмент	[18] – I, [19] – II, [20] – II	[18] – I, [19] – II, [20] – II
Методы машинного обучения	[43] – I; [44] – I; [45] – I	[46] – I
Другие (оптимизация нисходящей связи, информационная безопасность и т.д.)	[21] – III; [22] – IV; [23] – IV; [24] – VI; [29] – I; [31] – I, II; [36] – I; [40] – I	[12] – I, II; [13] – I; [14] – I; [15] – I; [8] – I, II; [11] – I, II; [9] – I, II; [10] – I

Анализируя таблицу 2, можно сделать вывод, что некоторые решения не применяются в определенных сценариях. Некоторые такие совокупности сценариев и проблем подходят для дальнейших исследований и разработок. Например, почти не рассматриваются алгоритмы улучшения канала связи при совместном использовании LoRaWAN и других технологий. Также, мало изучены возможности применения перечисленных подходов к децентрализованным сценариям.

Заключение

В работе рассмотрены проблемы построения сетей LoRaWAN при использовании автономных устройств класса А. Отмечено, что из-за особенностей стандарта, устройства класса А могут принимать данные от базовой станции только в короткие промежутки времени после передачи. В связи с этим возникает противоречие – устройство экономит заряд батареи за счет выключенного приемника, но из-за отсутствия информации о состоянии канала связи, могут возникать повторные передачи, что приводит к увеличению потребления энергии устройства в целом.

Отмечено, что наличие этого противоречия приводит к проблемам при масштабировании сети и ряду других взаимосвязанных проблем. В работе предложены обзор и классификация подходов к решению этих проблем. Основой этой классификации являются сценарии использования систем. Материалы статьи могут быть использованы при построении сетей LoRaWAN следующим образом. На основе предполагаемого сценария использования, находится наиболее похожий сценарий из статьи и прогнозируются возможные проблемы, а затем выбираются пути их решения. Также материалы статьи могут быть использованы для выбора направлений научных исследований в области LPWAN сетей и систематизации результатов этих исследований.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищённых систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".

Литература

- LoRaWAN 1.1 Specification, Oct.2017 <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1>
- LoRaWAN RP002-1.0.4 Regional Parameters, Sep 2022 <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>
- Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации, Постановление Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2019 г., № 1203-47.
- Almuhaya M.A., Jabbar W.A., Sulaiman N., Abdulmalek S. A survey on LoRawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions // Electronics. 2022 Jan 5, no. 11(1), p.164.
- Степанов Н.В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. №11. С. 11-26.
- Milarokostas C., Tsoikas D., Passas N., Merakos L. A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022 Dec 16, no.25(1), pp. 825-67.

7. *Jouhari M., Saeed N., Alouini M.S., Amhoud E.M.* A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023 May 10, no. 25(3), pp. 1841-76.
8. *Berto R., Napoletano P., Savi M.* A LoRa-based mesh network for peer-to-peer long-range communication // *Sensors*. 2021 Jun 24, no. 21(13), p. 4314.
9. *Triwidayastuti Y.* Performance analysis of point-to-point LoRa end device communication // *Lontar Komputer: Jurnal Ilmiah Teknologi Informatika*. 2019, no. 10(3), pp. 140-9.
10. *Richardson Ansah M., Sowah R.A., Melià-Seguí J., Katsriku F.A., Vilajosana X., Owusu Banahene W.* Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment // *IET Wireless Sensor Systems*. 2020 Oct, no. 10(5), pp. 198-207.
11. *Cotrim J.R., Kleinschmidt J.H.* LoRaWAN mesh networks: A review and classification of multihop communication // *Sensors*. 2020 Jul 31, no. 20(15), p. 4273.
12. *Ali A., Irshad R.R., Alattaab A.A., Fatahayab A.* Data Reliability and Sensors Lifetime in Bridge Health Monitoring using LoRaWAN-Zigbee // *Computers, Materials & Continua*. 2022 Nov 1, no. 73(2).
13. *Sisinni E., Depari A., Flammini A., Rinaldi S., Ferrari P.* Evaluating the joint use of LoRaWAN and Bluetooth mesh to improve survivability for critical sensor applications // *IEEE Sensors Journal*. 2024 May 30.
14. *Ullah M.A., Mikhaylov K., Alves H.* Enabling mMTC in remote areas: LoRaWAN and LEO satellite integration for offshore wind farm monitoring // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021 Sep 14, no. 18(6), pp. 3744-53.
15. *Capez G.M., Henn S., Fraire J.A., Garello R.* Sparse satellite constellation design for global and regional direct-to-satellite IoT services // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022 Jun 24, no. 58(5), pp. 3786-801.
16. *Acik S., Kosunalp S., Tabakcioglu M.B.* On the Throughput of Pure ALOHA with Different Power Levels for Wireless Sensor Networks // *TIEM 2022*. 2022:98.
17. *Georgiou O., Raza U.* Low power wide area network analysis: Can LoRa scale? // *IEEE Wireless Communications Letters*. 2017 Jan 2, no. 6(2), pp. 162-5.
18. *Tiurlikova A., Stepanov N., Mikhaylov K.* Improving the Energy Efficiency of a LoRaWAN by a UAV-based Gateway // *11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) 2019 Oct 28 (pp. 1-6)*. IEEE.
19. *Tiurlikova A., Stepanov N., Mikhaylov K.* Wireless power transfer from unmanned aerial vehicle to low-power wide area network nodes: Performance and business prospects for LoRaWAN // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2019 Nov, no. 15(11): 1550147719888165.
20. *Sosa M.E., Romeo M.E., Sosa E.O.* Harnessing low-power IoT sensor potential: the synergy of LoRaWAN, energy harvesting and supercapacitors // *Revista de Ciencia y Tecnología*. 2024 Jun(41):6.
21. *Kozłowski S., Kurek K.* Channel Occupancy Measurements in 868 MHz ISM Band in Residential Areas // *Sensors*. 2021 Nov 24, no. 21(23):7805.
22. *Caillouet C., Guitton A., Iova O., Valois F.* The Impact of Downlink Scheduling Policy on the Capacity of LoRaWAN // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) 2024 Dec 8*.
23. *Zorbas D.* Improving LoRaWAN downlink performance in the EU868 spectrum // *Computer Communications*. 2022 Nov 1, no. 195, pp. 303-14.
24. *Yang X., Karampatzakis E., Doerr C., Kuipers F.* Security vulnerabilities in LoRaWAN // *IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI) 2018 Apr 17*, pp. 129-140.
25. *Li C., Ren Y., Tong S., Siam S.I., Zhang M., Wang J., Liu Y., Cao Z.* ChirpTransformer: Versatile LoRa Encoding for Low-power Wide-area IoT // *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services 2024 Jun 3*, pp. 479-491.
26. *Chache F.M., Maxon S., Narayanan R.M., Bharadwaj R.* Effects on Age of Information from Forward Error Correction in LoRa Transmissions // *IEEE Sensors Journal*. 2024 Aug 19.
27. *Tapparel J., Xhonneux M., Bol D., Louveaux J., Burg A.* Enhancing the reliability of dense LoRaWAN networks with multi-user receivers // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021 Dec 9, no. 2, pp. 2725-38.
28. *Beltramelli L., Mahmood A., Österberg P., Gidlund M.* LoRa beyond ALOHA: An investigation of alternative random access protocols // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020 Feb 28, no. 17(5), pp. 3544-54.
29. *Ramirez C.G., Sergeev A., Dyussenova A., Iannucci B.* Long-ShoT: Long-range synchronization of time // *Proceedings of the 18th International Conference on Information Processing in Sensor Networks 2019 Apr 16*, pp. 289-300.
30. *Dossa A., Amhoud E.M.* A Duty-Cycle-Efficient Synchronization Protocol for Slotted-Aloha in LoRaWAN // *arXiv preprint arXiv:2405.14740*. 2024 May 23.
31. *Борисовская А.В., Чудаков М.И., Шалагинова В.Я.* Исследование влияния точности кварца на среднюю задержку при синхронизации устройств в сетях lorawan // *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы*. 2024, no.2, pp. 33-37.
32. *El Fehri C., Baccour N., Kammoun I.* A New Schedule-Based Scheme for Uplink Communications in LoRaWAN // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2023 Oct 12.
33. *Game A., Liando J., Gu C., Tan R., Li M., Seller O.* LMAC: Efficient carrier-sense multiple access for LoRa // *ACM Transactions on Sensor Networks*. 2023 Feb 4, no. 19(2), pp. 1-27.
34. *LoRaWAN® CSMA Technical Recommendation TR013-1.0.0*
35. *Vangelista L., Calvagno G.* On the Channel Activity Detection in LoRaWAN networks // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024 Aug 29.
36. *Agbolade O.A., Dahunsi F.M., Oyetunji S.A.* Heterogeneous LoRaWAN deployment for application dependent IOT networks // *ITEGAM-JETIA*. 2022 Apr 30, no. 8(34), pp. 4-11.
37. *Gusev O., Turlikov A., Kuzmichev S., Stepanov N.* Data delivery efficient spreading factor allocation in dense lorawan deployments // *XVI International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems"(REDUNDANCY) 2019 Oct 21*, pp. 199-204. IEEE.
38. *Javed S., Zorbas D.* A LoRaWAN Adaptive Retransmission Mechanism // *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN) 2023 Nov 6*, pp. 324-327.
39. *Paul B., Assi C., Kaddoum G.* LoRaWAN network planning // *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2024 Apr 8.
40. *Usmonov M.M., Asretdinova L.J., Qodirov A.S.* // Critical review of lorawan security architectures in industrial IoT applications // *Журнал академических исследований нового Узбекистана*. 2025. Т. 2. № 1. С. 124-129.
41. *Wang H., Zhang X., Liao J., Zhang Y., Li H.* An improved adaptive data rate algorithm of LoRaWAN for agricultural mobile sensor nodes // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024 Apr 1, no. 219, p. 108773.
42. *Louati R., Thaalbi M., Tabbane N.* An Adaptive Data Rate scheme for multi-hop forwarding in LoRaWAN networks // *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC) 2024 May 27*, pp. 1791-1796. IEEE.
43. *Maurya P., Hazra A., Kumari P., Sørensen T.B., Das S.K.* A Comprehensive Survey of Data-Driven Solutions for LoRaWAN: Challenges & Future Directions // *Authorea Preprints*. 2024 Jan 29.
44. *Al-Sammak K.A., Al-Ghuri S.H., Marghescu I., Drăgulescu A.M.C., Marghescu C., Martian A., ... & Alheeti K.M.A.* // Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart Meters with LoRaWAN and NB-IoT // *Energies*, no. 18(4), p. 987. 2025.
45. *Alkhayyal Maram A., Almetwally M. Mostafa.* // Enhancing LoRaWAN Performance Using Boosting Machine Learning Algorithms Under Environmental Variations // *Sensors* 25.13. 2025, p. 4101.
46. *Chen Yu, et al.* // On the scalability and coverage of LoRa mesh for monitoring linear infrastructure // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2025.

CHALLENGES OF BUILDING LORAWAN NETWORKS WITH AUTONOMOUS END DEVICES

Valentin Yu. Mikhailov, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, khya.khk@sut.ru

Andrey M. Tyurlikov, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, fokin.ga@sut.ru

Abstract

Technologies of Low Power Wide Area Network (LPWAN) have become widespread in the field of the Internet of Things (IoT). The most popular and accessible network among them is LoRaWAN. The autonomy of end devices is crucial when implementing this technology. Therefore, in this paper we focus on the most energy-efficient LoRaWAN class A devices. The main feature of this device class is that their receiving capability is limited to two short time slots after each transmission. Thus, on the one hand, the energy consumption of the receiving part of the device is significantly reduced. On the other hand, there is a problem with the organization of the data transfer process, which in some cases can lead to an increase in overall energy consumption. The purpose of this paper is to systematize approaches to solving this and other problems of LoRaWAN network systems, taking into account the specific features of Class A devices. In this paper, we propose classifications for the use cases of LoRaWAN networks. The problems arising in such use cases are considered. We give a review of modern research papers that describe use cases and approaches to solve arising problems. The proposed results could be used for scientific and industrial applications. It could help choose a research area and systematize subsequent results. It could also be used to take into account the described problems when building actual systems, and choose appropriate ways to solve them.

Keywords: IoT, LoRaWAN, class A devices, energy efficiency, random multiple access

References

- [1] LoRaWAN 1.1 Specification, Oct.2017 <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1>
- [2] LoRaWAN RP002-1.0.4 Regional Parameters, Sep 2022 <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>
- [3] Table of Radio Frequency Band Allocations between Radio Services of the Russian Federation, RF Government Resolution of 18.09.2019, No.1203-47.
- [4] M.A. Almuahy, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, S. Abdulmalek, "A survey on Lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions," *Electronics*. 2022 Jan 5, no. 11(1), p. 164.
- [5] N.V. Stepanov, "A systematic overview of the features of the implementation of the physical layer of the LoRa protocol," *T-Comm*, 2023, vol. 17, no.11, pp. 11-26. (in Russian)
- [6] C. Milarokostas, D. Tsolkas, N. Passas, L. Merakos, "A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022 Dec 16, no. 25(1), pp. 825-67.
- [7] M. Jouhari, N. Saeed, M.S. Alouini, E.M. Amhoud, "A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023 May 10, no. 25(3), pp. 1841-76.
- [8] R. Berto, P. Napoletano, M. Savi, "A LoRa-based mesh network for peer-to-peer long-range communication," *Sensors*. 2021 Jun 24, no. 21(13), p. 4314.
- [9] Y. Triwidayastuti, "Performance analysis of point-to-point LoRa end device communication," *Lontar Komputer: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*. 2019, no. 10(3), pp. 140-9.
- [10] M. Richardson Anshah, R.A. Sowah, J. Melia-Segui, F.A. Katsriku, X. Vilajosana, W. Owusu Banahene, "Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment," *IET Wireless Sensor Systems*. 2020 Oct, no. 10(5), pp. 198-207.
- [11] J.R. Cotrim, J.H. Kleinschmidt, "LoRaWAN mesh networks: A review and classification of multihop communication," *Sensors*. 2020 Jul 31, no. 20(15), p. 4273.
- [12] A. Ali, R.R. Irshad, A.A. Alattaab, A. Fatahayab, "Data Reliability and Sensors Lifetime in Bridge Health Monitoring using LoRaWAN-Zigbee," *Computers, Materials & Continua*. 2022 Nov 1, no. 73(2).
- [13] E. Sisinni, A. Depari, A. Flammini, S. Rinaldi, P. Ferrari, "Evaluating the joint use of LoRaWAN and Bluetooth mesh to improve survivability for critical sensor applications," *IEEE Sensors Journal*. 2024 May 30.
- [14] M.A. Ullah, K. Mikhaylov, H. Alves, "Enabling mMTC in remote areas: LoRaWAN and LEO satellite integration for offshore wind farm monitoring," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021 Sep 14, no. 18(6), pp. 3744-53.
- [15] G.M. Capez, S. Henn, J.A. Fraire, R. Garelo, "Sparse satellite constellation design for global and regional direct-to-satellite IoT services," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022 Jun 24, no. 58(5), pp. 3786-801.
- [16] S. Acik, S. Kosunalp, M.B. Tabakcioglu, "On the Throughput of Pure ALOHA with Different Power Levels for Wireless Sensor Networks," *TIEM* 2022. 2022:98.
- [17] O. Georgiou, U. Raza, "Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?" *IEEE Wireless Communications Letters*. 2017 Jan 2, no. 6(2), pp. 162-5.
- [18] A. Tyurlikova, N. Stepanov, K. Mikhaylov, "Improving the Energy Efficiency of a LoRaWAN by a UAV-based Gateway," *11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2019 Oct 28, pp. 1-6. IEEE.

- [19] A. Tiurlikova, N. Stepanov, K. Mikhaylov, "Wireless power transfer from unmanned aerial vehicle to low-power wide area network nodes: Performance and business prospects for LoRaWAN," *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2019 Nov, no. 15(11), pp. 1550147719888165.
- [20] M.E. Sosa, M.E. Romeo, E.O. Sosa, "Harnessing low-power IoT sensor potential: the synergy of LoRaWAN, energy harvesting and super-capacitors," *Revista de Ciencia y Tecnologia*. 2024 Jun(41), 6.
- [21] S. Kozłowski, K. Kurek, "Channel Occupancy Measurements in 868 MHz ISM Band in Residential Areas," *Sensors*. 2021 Nov 24, no. 21(23), p. 7805.
- [22] C. Caillouet, A. Guillon, O. Iova, F. Valois, "The Impact of Downlink Scheduling Policy on the Capacity of LoRaWAN," *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2024 Dec 8.
- [23] D. Zorbas, "Improving LoRaWAN downlink performance in the EU868 spectrum," *Computer Communications*. 2022 Nov 1, no. 195, pp. 303-14.
- [24] X. Yan, E. Karampatzakis, C. Doerr, F. Kuipers, "Security vulnerabilities in LoRaWAN," *IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, 2018 Apr 17, pp. 129-140.
- [25] C. Li, Y. Ren, S. Tong, S.I. Siam, M. Zhang, J. Wang, Y. Liu, Z. Cao, "ChirpTransformer: Versatile LoRa Encoding for Low-power Wide-area IoT," *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, 2024 Jun 3, pp. 479-491.
- [26] F.M. Chache, S. Maxon, R.M. Narayanan, R. Bharadwaj, "Effects on Age of Information from Forward Error Correction in LoRa Transmissions," *IEEE Sensors Journal*. 2024 Aug 19.
- [27] J. Tapparel, M. Xhonneux, D. Bol, J. Louveaux, A. Burg, "Enhancing the reliability of dense LoRaWAN networks with multi-user receivers," *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021 Dec 9, no. 2, pp. 2725-38.
- [28] L. Beltramelli, A. Mahmood, P. Osterberg, M. Gidlund, "LoRa beyond ALOHA: An investigation of alternative random access protocols," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020 Feb 28, no. 17(5), pp. 3544-54.
- [29] C.G. Ramirez, A. Sergeev, A. Dyussenova, B. Iannucci, "LongShoT: Long-range synchronization of time," *Proceedings of the 18th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2019 Apr 16, pp. 289-300.
- [30] A. Dossa, E.M. Amhoud, "A Duty-Cycle-Efficient Synchronization Protocol for Slotted-Aloha in LoRaWAN," arXiv preprint arXiv:2405.14740. 2024 May 23.
- [31] A.V. Borisovskaya, M.I. Chudakov, V.I. Shalaginova, Investigation of the effect of quartz accuracy on the average delay in device synchronization in LoRaWAN," *Wave electronics and infocommunication systems*. 2024 (2), pp. 33-37.
- [32] C. El Fehri, N. Baccour, I. Kammoun, "A New Schedule-Based Scheme for Uplink Communications in LoRaWAN," *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2023 Oct 12.
- [33] A. Gamage, J. Liando, C. Gu, R. Tan, M. Li, O. Seller, "LMAC: Efficient carrier-sense multiple access for LoRa," *ACM Transactions on Sensor Networks*. 2023 Feb 4, no. 19(2), pp. 1-27.
- [34] LoRaWAN® CSMA Technical Recommendation TR013-1.0.0
- [35] L. Vangelista, G. Calvagno, "On the Channel Activity Detection in LoRaWAN networks," *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024 Aug 29.
- [36] O.A. Agbolade, F.M. Dahunsi, S.A. Oyetunji, "Heterogeneous LoRaWAN deployment for application dependent IOT networks," *ITEGAM-JETIA*. 2022 Apr 30, no. 8(34), pp. 4-11.
- [37] O. Gusev, A. Turlikov, S. Kuzmichev, N. Stepanov, "Data delivery efficient spreading factor allocation in dense lorawan deployments," *XVI International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems"(REDUNDANCY)*, 2019 Oct 21, pp. 199-204. IEEE.
- [38] S. Javed, D. Zorbas, "A LoRaWAN Adaptive Retransmission Mechanism," *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2023 Nov 6, pp. 324-327.
- [39] B. Paul, C. Assi, G. Kaddoum, "LoRaWAN network planning," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2024 Apr 8.
- [40] M.M. Usmonov, L.J. Asretdinova, A.S. Qodirov, "Critical review of LoRaWAN security architectures in industrial IoT applications," *Yangi O'zbekiston ilmutadqiqotlar journal*. 2025. Vol. 2. No. 1, pp. 124-129.
- [41] H. Wang, X. Zhang, J. Liao, Y. Zhang, H. Li, "An improved adaptive data rate algorithm of LoRaWAN for agricultural mobile sensor nodes," *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024 Apr 1, no. 219, p. 108773.
- [42] R. Louati, M. Thaalbi, N. Tabbane, "An Adaptive Data Rate scheme for multi-hop forwarding in LoRaWAN networks," *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2024 May 27, pp. 1791-1796. IEEE.
- [43] P. Maurya, A. Hazra, P. Kumari, T.B. Sorensen, S.K. Das, "A Comprehensive Survey of Data-Driven Solutions for LoRaWAN: Challenges & Future Directions," *Authorea Preprints*. 2024 Jan 29.
- [44] K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.M.C. Dragulinescu, C. Marghescu, A. Martian, ... & K. M. A.Alheeti, "Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart Meters with LoRaWAN and NB-IoT," *Energies*, no. 18(4), 987. 2025
- [45] Maram A.v Alkhayyal, M. Mostafa Almetwally, "Enhancing LoRaWAN Performance Using Boosting Machine Learning Algorithms Under ," *Sensors*, no. 25.13 (2025): 4101.
- [46] Yu, Chen, et al., "On the scalability and coverage of LoRa mesh for monitoring linear infrastructure," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2025.