

Гончаров Роман Игоревич, Григоренко Роман Олегович,
студенты гр. ЭВТ-25-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

Мазур Владимир Геннадьевич,
к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: systems-ntfs@mail.ru

Пудалов Алексей Дмитриевич,
к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: puddim@yandex.ru

АРХИТЕКТУРА ТЕХНОЛОГИИ LORAWAN И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Goncharov R.I., Grigorenko R.O., Mazur V.G., Poudalov A.D.

ARCHITECTURE OF LORAWAN TECHNOLOGY AND APPLICATION PROSPECTS

Аннотация. В статье рассматриваются архитектурные особенности технологии LoRaWAN как одной из наиболее динамично развивающихся низкоскоростных сетей дальнего радиуса действия (LPWAN). Приведено сравнение с альтернативными протоколами (NB-IoT, Sigfox). Детально проанализированы топология сети, классы устройств (A, B, C), механизмы адаптации скорости передачи данных (ADR) и методы обеспечения кибербезопасности (AES-128). Отдельное внимание уделено перспективным направлениям внедрения: «умное сельское хозяйство», мониторинг промышленного оборудования, «зелёная» энергетика и городская инфраструктура. В заключении обозначены текущие ограничения технологии и пути их преодоления.

Ключевые слова: LoRaWAN, LPWAN, интернет вещей (IoT), архитектура сети, ADR, «умный город», промышленный мониторинг, безопасность IoT.

Abstract. The article discusses the architectural features of LoRaWAN technology as one of the most rapidly developing low-speed long-range networks (LPWAN). A comparison with alternative protocols (NB-IoT, Sigfox) is provided. The network topology, device classes (A, B, C), adaptive data rate (ADR) mechanisms, and cybersecurity methods (AES-128) are analyzed in detail. Special attention is paid to promising implementation areas: smart agriculture, industrial equipment monitoring, green energy, and urban infrastructure. The conclusion outlines the current limitations of the technology and ways to overcome them.

Keywords: LoRaWAN, LPWAN, Internet of Things (IoT), network architecture, ADR, smart city, industrial monitoring, IoT security.

Стремительный рост числа устройств, работающих в концепции Интернета вещей (IoT – Internet of Things), предъявляет новые требования к телекоммуникационным протоколам. Традиционные сотовые сети (2G/3G/4G) обеспечивают высокую скорость, но энергопотребление терминалов и стоимость абонентского доступа остаются неприемлемо высокими для датчиков с автономным питанием, работающих несколько лет. Коротковолновые технологии (ZigBee, Z-Wave, BLE) не удовлетворяют потребностям в дальности связи (сотни метров против требуемых километров) [1].

В данном контексте класс технологий LPWAN (Low Power Wide Area Network) занял свою нишу. Среди них особое место принадлежит открытому стеку LoRaWAN, разработанному альянсом LoRa Alliance. В отличие от

проприетарного Sigfox или лицензируемого NB-IoT, LoRaWAN сочетает гибкость настройки, низкую стоимость конечных узлов и возможность развёртывания как в публичных, так и в частных сетях [2].

Физический уровень технологии основан на линейной частотной модуляции с расширением спектра (Chirp Spread Spectrum, CSS). Ключевая особенность CSS – использование чирпов (сигналов с мгновенной частотой, линейно изменяющейся во времени). Принимающая сторона демодулирует сигнал путём корреляции с эталонным чирпом, что позволяет восстанавливать данные даже при отношении сигнал/шум до -20 дБ [3].

Основные параметры модуляции:

- Фактор расширения (SF – Spreading Factor) от 7 до 12. Чем выше SF, тем больше дальность и устойчивость к помехам, но ниже скорость передачи данных (от 250 бит/с до 5,5 кбит/с на полосе 125 кГц).
- Полоса пропускания (BW – Bandwidth) 125, 250 или 500 кГц.
- Кодовая скорость (CR – Coding Rate) от 1 до 4, определяющая избыточность помехоустойчивого кодирования.

Микроконтроллерные платформы (например, на микросхемах SX1276 от Semtech) потребляют в режиме передачи порядка 20...120 мА, а в режиме сна – менее 1 мкА, что обеспечивает срок службы одного элемента питания CR2032 до 5...10 лет при частоте сеансов связи 1 раз в час [4].

Стандарт LoRaWAN определяет архитектуру типа «звезда» с промежуточными шлюзами (gateways). В отличие от классических ячеистых (mesh) сетей, это снижает задержки и упрощает маршрутизацию. Пример архитектуры сети приведён на рисунке 1.

Архитектура сети LoRaWAN включает следующие элементы:

- Конечные устройства – датчики, исполнительные механизмы, трекеры.
- Шлюзы – концентраторы, работающие на нескольких частотах и SF одновременно, осуществляющие прозрачный мост между радиоканалом и IP-сетью.
- Сетевой сервер – интеллектуальный центр сети, отвечающий за дедупликацию пакетов, управление ADR (механизм адаптивного регулирования скоростью передачи данных, позволяющий динамически изменять параметры радиосвязи (в первую очередь фактор расширения SF и, опционально, полосу пропускания BW) для каждого конечного устройства индивидуально), аутентификацию и маршрутизацию.
- Сервер приложений (Application Server) – обрабатывает полезные данные конечных пользователей.

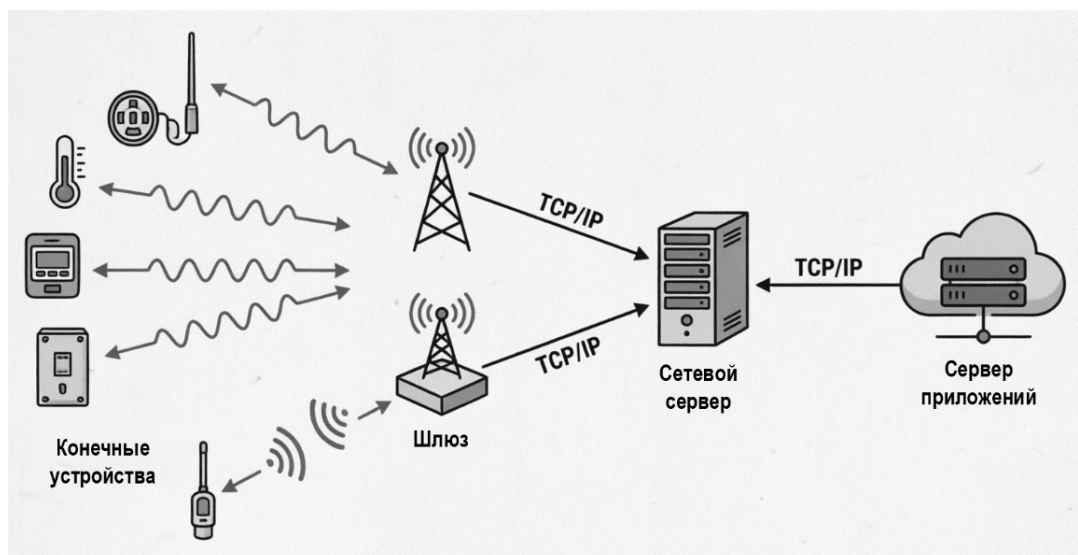


Рисунок 1 – Архитектура сети LoRaWAN

Стандарт определяет три класса устройств для баланса между энергопотреблением и доступностью линии «вниз», которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Классы устройств сети LoRaWAN

Класс	Характеристика	Типовое применение	Энергопотребление
А	Асинхронный. Связь «вверх» инициируется устройством. Два коротких окна приёма после каждой передачи.	Счётчики воды/газа, датчики почвы, трекеры	Минимальное
В	Синхронный. Устройство периодически открывает окна приёма по расписанию.	Умные замки, системы полива по требованию	Среднее
С	Постоянно открытый приём. Максимальная задержка ответа.	Актуаторы, освещение, промышленные контроллеры	Высокое

Класс А является обязательным для всех устройств. Переключение между классами осуществляется командами MAC-уровня.

В LoRaWAN реализована двухуровневая криптография согласно принципам NIST. Управление ключами разделено:

- NwkSKey (Network Session Key) – для проверки целостности MAC-команд и дешифрования MAC-сообщений на сетевом сервере.

– AppSKey (Application Session Key) – для сквозного шифрования полезной нагрузки между устройством и сервером приложений.

Все ключи генерируются на основе 128-битного мастер-ключа (AppKey) по алгоритму AES-128. Длина полей MIC (Message Integrity Code) – 32 бита. Важно отметить, что шлюзы не имеют доступа к открытым данным, что исключает утечку конфиденциальной информации даже при компрометации канального оборудования [5].

Механизм ADR (Adaptive Data Rate) – ключевой инструмент повышения пропускной способности и энергоэффективности для стационарных устройств. Сетевой сервер анализирует последние 20...40 пакетов от узла, оценивая качество сигнала (RSSI, SNR). При хорошем SNR сервер командует устройству уменьшить SF (увеличивая скорость), при ухудшении – повысить SF. Для мобильных узлов ADR автоматически отключается.

В таблице 2 приведён сравнительный анализ технологии LoRaWAN с ближайшими конкурентами.

Таблица 2

Сравнительный анализ технологий близких к LoRaWAN

Параметр	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox
Частотный диапазон	ISM (868 МГц в РФ)	Лицензируемый (LTE)	ISM (868/915 МГц)
Тип модуляции	CSS (Chirp)	SC-FDMA (вверх), OFDMA (вниз)	BPSK с UNB
Макс. сообщений в день	Неограниченно (при низкой нагрузке)	Ограничено тарифом	140 (вверх) / 4 (вниз)
Размер полезной нагрузки	До 243 байт	До 1600 байт	12 байт
Стоимость развёртывания	Низкая (частные сети)	Высокая (инфраструктура оператора)	Средняя (зависимость)

Таким образом, LoRaWAN занимает золотую середину: не требует лицензирования частот (как NB-IoT), не накладывает жёстких ограничений на частоту сеансов (как Sigfox), гарантирует доставку подтверждённых кадров.

Перспективы применения LoRaWAN значительны. Например, в сельском хозяйстве можно организовать мониторинг микроклимата (влажность почвы, температура, освещённость) на полях площадью до 15...20 км². Использование класса A с SF10–12 обеспечивает проникновение сигнала через растительность. В городской инфраструктуре можно применять технологию для: управления освещением, что снижает энергопотребление на 50...70 % за счёт диммирования по графику и датчикам движения (класс C), мониторинга парковочных мест,

применяя магнитные датчики в асфальте (класс А, один пакет в минуту), осуществления контроля заполняемости контейнеров ТБО, что способствует оптимизации маршрутов мусоровозов.

Несмотря на достоинства, технология сталкивается с рядом вызовов:

- Низкая скорость передачи. Решается применением частичной фильтрации данных на узле.
- Интерференция в нелицензируемом диапазоне. Использование LBT и адаптивных радиочастотных планов.
- Ограниченный линк «вниз» для класса А. Компенсируется гибридными схемами с классами В/С для критичных по задержке приложений.
- Проблема роуминга между шлюзами разных провайдеров. Решается развитием стандарта LoRaWAN v1.1 с поддержкой передачи данных на уровне сетевого сервера.

Проведённый анализ показывает, что LoRaWAN представляет собой зрелую, открытую и технологически гибкую платформу для создания территориально распределённых систем мониторинга и управления. Ключевые конкурентные преимущества – независимость от мобильных операторов, сверхнизкое энергопотребление и масштабируемость сети за счёт добавления недорогих шлюзов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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. 1841-1846.
2. **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.
3. Semtech Corporation. SX1276/77/78/79 Datasheet: Low Power Long Range Transceiver. Rev. 4, 2020. – 132 p.
4. LoRa Alliance. LoRaWAN™ Link Layer Specification v1.1. TS001-1.0.2, 2020. – 138 p.
5. **Гребешков, А.Ю.** Сети LoRaWAN: построение, расчёт и безопасность: учебное пособие / А. Ю. Гребешков ; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. – Самара : ПГУТИ, 2024. – 158 с. – Текст : непосредственный.