

Анализ беспроводных протоколов передачи данных для систем интеллектуального освещения

Абдуллаев Т.М.,

Доктор философии (PhD) по техническим наукам
Ферганского Государственного
Технического Университета
temurbekm84@gmail.com

Лазарева М.В.,

доцент кафедры «Информационные системы и
технологии» Ферганского Государственного
Технического Университета laza2006@gmail.com

Козлов А.П.,

магистрант 2 курса факультета «Информационные
технологии и телекоммуникации» Ферганского
Государственного Технического Университета
alex_p4rker@mail.ru

Аннотация: Рынок «умного» освещения постоянно растет и расширяется в последние годы. Это происходит из-за развития «умных» домов и «умных» городов. Системы «умного» освещения работают на таких протоколах как ZigBee, LoRaWAN, BLE, Thread. Цель данной статьи сделать анализ и сравнить эти протоколы. Это позволит определить оптимальные сферы применения каждого из них в задачах интеллектуального освещения. В работе рассматриваются такие параметры, как энергопотребление, дальность передачи, безопасность, задержка и т.п. На основе проведенного анализа формулируются рекомендации по выбору оптимального протокола в зависимости от области применения. Полученные выводы могут помочь в проектировании эффективных и экономических решений в области интеллектуального освещения.

Ключевые слова: интеллектуальное освещение, протоколы, энергопотребление, масштабируемость, беспроводная связь, IoT-решение

Введение. Рост технологического прогресса, повышенное внимание и интерес к энергоэффективности, внедрение интеллектуализации во все сферы обеспечивает интерес и устойчивый рост к энергоэффективности и развитию «умных» домов и городов. Так Бурматова О.П. в статье "Концепция устойчивого развития умного города: экологический аспект" предлагает актуальные направления внедрения принципов «умного» города, основанного на рациональном подходе [1]. Автор подчеркивает, что создание отлаженного механизма IoT избавляет от необходимости иметь большое количество различных аналитических служб и улучшает экологическую обстановку. "«Умная» урбанизация является ключом к созданию более

безопасных, здоровых городов завтрашнего дня" - делают выводы авторы в статье "Устойчивые «умные» города: от концепции до реализации" [2].

«Умное» освещение все чаще становится неотделимой частью как современных жилых зданий, так и городской инфраструктуры. Основным элементом таких систем выступают беспроводные технологии передачи данных, обеспечивающие гибкость, масштабируемость и интеграцию с другими IoT-устройствами. Авторы статьи «Энергоэффективность и развитие умных сетей в регионах России» рассматривают уровень развития интеллектуальных энергосетей в российских регионах и его влияние на повышение энергоэффективности [3]. В исследовании проводится комплексная оценка на основе



официальной статистики и доказывается целесообразность применения таких сетей.

Среди множества доступных протоколов связи наибольшее распространение в задачах интеллектуализации освещения получили ZigBee, LoRaWAN, BLE, Thread. Каждый из этих протоколов обладает своими собственными характерными особенностями, на основе которых можно определить конкретное применение каждого из протоколов. Это может быть как группа светильников в квартире, так и мониторинг и контроль уличного освещения в масштабах целого города. Существенные различия в характеристиках требуют обоснованного выбора технологии.

Методы решения. Объем мирового рынка «умного» освещения оценивался в 15,8 млрд \$ в 2024 году и, по оценкам специалистов, будет расти на 19,3% в год с 2025 по 2034 год (рис.1). Этот рост обеспечивается востребованными технологиям «умного» дома и технологическими инновациями в решениях для «умного» освещения.

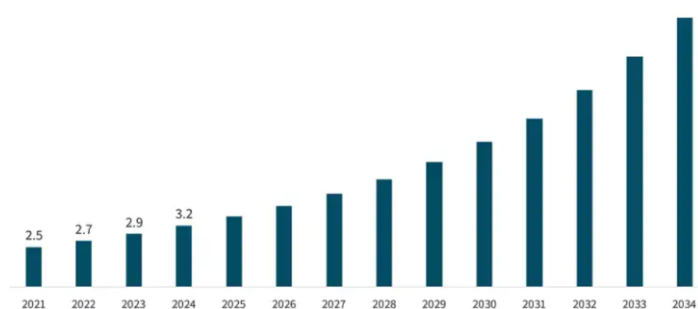


Рис. 1 Объем рынка интеллектуального освещения 2021-2034 гг. (млрд долл. США)

(используются данные из аналитического отчета *Smart Lighting Market Size* аналитического агентства *Grand View Research*)

Существует множество протоколов связи, но нет однозначного универсального решения. Неправильный выбор протокола может привести к задержкам, высокому энергопотреблению и плохой масштабируемости. Рассмотрим основные используемые протоколы интеллектуального освещения и проведем их сравнительный анализ по разным показателям.

Zigbee основная технология для Интернета вещей. Главное преимущество протокола *Zigbee* заключается в минимальном расходе энергии, что позволяет устройствам IoT работать от одной батарейки в течение нескольких лет [4]. *LoRaWAN* (*Long Range Wide Area Network*) — технология беспроводной связи для Интернета вещей, передающая данные на большие расстояния с очень низким энергопотреблением, работающая в нелицензируемых диапазонах частот. Главная особенность *BLE* (*Bluetooth Low Energy*) - низкое энергопотребление и быстрое установление соединения. *Thread* — протокол беспроводной связи, в который добавлена поддержка IP-протокола.

На рис. 2 показаны различные системы беспроводной связи. Для Wi-Fi и Bluetooth сетевое взаимодействие идет через центральный шлюз, в случае выхода его из строя обмен данными станет невозможным. Для ZigBee и Thread возникновение помехи или преграды не является критичным за счет наличия избыточных связей.

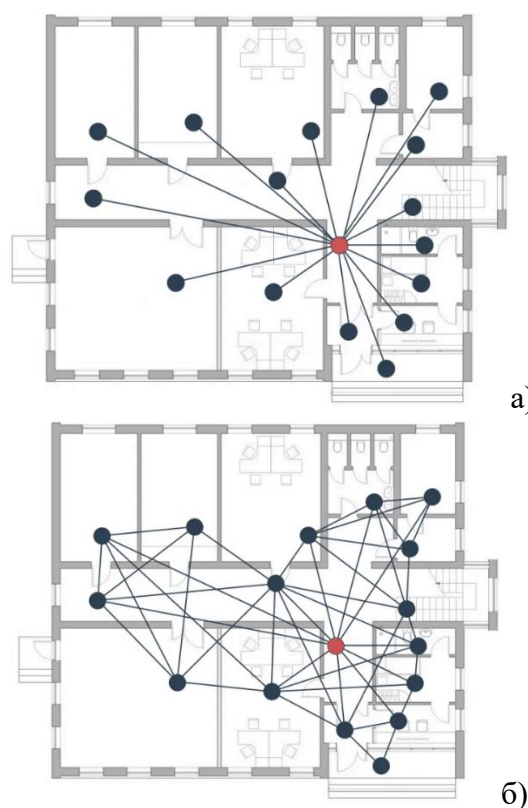


Рис. 2 Системы беспроводной связи:
а) Wi-Fi и Bluetooth, б) ZigBee и Thread



ZigBee создает ячеистую сеть с низкоскоростной, но надежной связью через шлюз. Он обеспечивает создание больших, самовосстанавливающихся сетей с низкой задержкой и высокой надежностью. Этот протокол часто используют (рис.3) для «умного» освещения из-за низкого энергопотребления, надежной топологией Mesh-сети (каждое устройство может ретранслировать сигнал и расширять покрытие [5]. В таблице 1 приводится сравнительный анализ протокола *ZigBee* с другими протоколами.



Рис.3 Динамика роста *ZigBee* устройств (основано на отчётах Connectivity Standards Alliance <https://csa-iot.org>)

Таблица 1. Сравнительная таблица протокола *Zigbee* с *Wi-Fi* и *Bluetooth*

Характеристика	<i>Zigbee</i>	<i>Wi-Fi</i>	<i>Bluetooth</i>
Энергопотребление	Минимальное	Среднее / Высокое	Среднее
Дальность действия	До 100 м	До нескольких сотен метров	До 100 м
Пропускная способность	Низкая (до нескольких десятков Кбит/с)	Высокая (до сотен Мбит/с)	Умеренная (до нескольких Мбит/с)
Стоимость оборудования	Низкая	Средняя	Низкая
Топология сети	Ячеистая (mesh)	Звезда	Точка-Точка
Масштабируемость	Поддержка сотен устройств в одной сети	Ограничена пропускной способностью роутера	До 7–8 активных устройств
Безопасность	Высокая (шифрование AES-128)	Зависит от настроек (WPA2/WPA3)	Средняя (улучшена в новых версиях)
Применение	«Умный» дом - датчики, освещение, замки	Интернет, видео, высокоскоростная передача данных	Аудиоустройства, краткосрочное сопряжение

LoRaWAN создает сети с низким энергопотреблением и большим радиусом действия, отличается высокой проникающей способностью и безопасностью. Устройства могут работать годами от одной батареи (до 10 лет), так

как потребление энергии минимально, а передача данных происходит редко и небольшими пакетами [6]. Подходит для «умного» уличного освещения, позволяя объединить уличное освещение в единую сеть, которой можно централизованно управлять и мониторить в режиме реального времени [7]. В таблице 2 приводится количество *LoRaWAN*-устройств по годам. В таблице 3 приводится сравнение протоколов *Zigbee* и *LoRaWAN*.

Таблица 2. Оценка количества *LoRaWAN*-устройств по годам (млн шт.)

Год	Устройства <i>LoRaWAN</i> (млн)	Источник / Примечание
2018	~30 млн	Ранние развертывания
2019	~70 млн	Рост в «умных» городах (счётчики, парковки)
2020	~120 млн	Расширение инфраструктуры
2021	~180 млн	Рост IoT в логистике и сельском хозяйстве
2022	~250 млн	По данным LoRa Alliance (2023 г.)
2023	~350 млн	IoT Analytics
2024	~480 млн	Прогноз (Statista, LoRa Alliance)
2025 (прогноз)	~620 млн	Основан на среднегодовом росте ~35%

Таблица 3. Сравнительная таблица протоколов *Zigbee* и *LoRaWAN*

Характеристика	<i>Zigbee</i>	<i>LoRaWAN</i>
Тип сети	Локальная сеть (LAN)	Региональная/глобальная сеть (LPWAN)
Частота	2,4 ГГц (глобально)	Суб-ГГц (например, 868 МГц в Европе, 915 МГц в США)
Дальность действия	До 10–100 м	До 2–15 км (в городе), до 30+ км (на местности)
Скорость передачи данных	До 250 Кбит/с	От 0,3 до 50 Кбит/с (очень низкая)
Энергопотребление	Очень низкое (годы работы от батареи)	Очень низкое (10+ лет от одной батареи)
Топология сети	Ячеистая	Звезда



Масштабируемость	До сотен устройств в одной локальной сети	Тысячи устройств на один шлюз (городской масштаб)
Задержка	Низкая (мс) — подходит для управления в реальном времени	Высокая (сек) — не подходит для мгновенных реакций
Применение	«Умный» дом - освещение, замки, датчики движения	«Умный» город - счётчики воды/газа, парковки, сельское хозяйство
Стоимость модуля	Низкая	Низкая
Безопасность	AES-128	AES-128 двухуровневое шифрование +

BLE энергоэффективная технология беспроводной связи для передачи данных на короткие расстояния. Позволяет устройствам работать месяцы и даже годы без заряда. BLE устройства соединяются только для обмена информацией, а затем быстро отключаются, что и обеспечивает экономию энергии. Передает данные небольшими порциями, а затем переходит в спящий режим. Позволяет намного быстрее устанавливать соединение с другим устройствами [8]. Рис. 4 демонстрирует рост числа устройств в мире начиная с 2018 года.

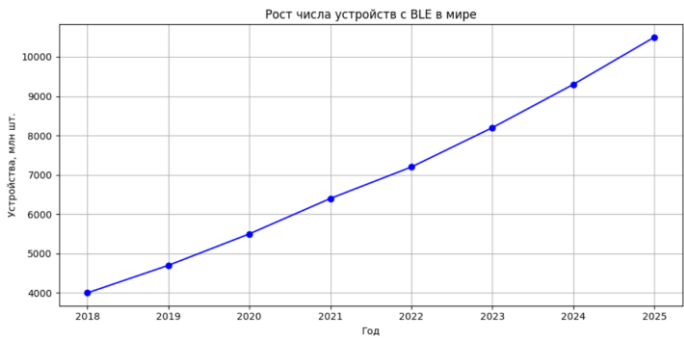


Рис.4 Динамика роста устройств с BLE (млн шт.)
(основано на Number of Bluetooth-enabled devices worldwide from 2018 to 2025 [9])

BLE применяется в IoT, так как низкое потребление энергии позволяет поддерживать связь с устройствами в течение длительного

периода времени. Протокол BLE не предназначен для непрерывного сетевого соединения, он задействуется для периодической передачи небольших пакетов данных. Таблица 4 показывает количество устройств с беспроводными протоколами в мире на конец 2025 года.

Таблица 4. Сравнение количества устройств в мире по протоколам (оценка на конец 2025 года)

Протокол	Примерное число устройств в мире	Основные сферы применения	Источник данных
Wi-Fi	~25 млрд	Смартфоны, ноутбуки, ТВ, камеры, «умные» колонки, IoT	Wi-Fi Alliance, Statista (2025)
Bluetooth / BLE	~10,5 млрд	Наушники, часы, фитнес-маячки, «умные» замки	Bluetooth SIG (2024–2025)
Zigbee	~2 млрд	«Умный» дом - освещение, датчики, термостаты, замки	Connectivity Standards Alliance (2023–2025)

Протокол Thread современный беспроводной стандарт для Интернета вещей и «умного» дома, который создает надежные, энергоэффективные и самовосстанавливающиеся ячеистые сети. Устройства в сети действуют как маршрутизаторы, пересылая данные, что делает сеть надежной и устойчивой к сбоям [10]. Преимуществами данного протокола являются повышенная надежность и масштабируемость «умного» дома, возможность работать даже без Интернета и совместимость со многими устройствами. Таблица 5 показывает количество Thread-устройств в мире по годам, начиная с 2020 года. Thread почти всегда используется вместе со стандартом Matter, и большинство новых «умных» вещей поддерживают Thread. Этот стандарт позволяет устройствам от разных производителей



в «умном» доме легко взаимодействовать друг с другом.

Таблица 5. Оценка числа Thread-устройств в мире (млн шт.)

Год	Устройства с Thread (млн)	Примечание
2020	<1 млн	Экспериментальные и первые коммерческие устройства
2021	~5 млн	Появление первых «умных» колонок
2022	~30 млн	Запуск стандарта Matter 1.0 (октябрь 2022)
2023	~100 млн	Массовое внедрение в устройства Apple Home, Google Nest, Amazon Echo
2024	~220 млн	Thread становится обязательным для многих Matter-устройств
2025 (прогноз)	~400 млн	Рост за счёт совместимости с Zigbee через Matter

Преимуществами применения Thread в интеллектуальном освещении являются «умные» лампы и «умные» выключатели, устойчивость к сбоям: при выходе из строя одного устройства сеть продолжает работать, автоматическое включение света при входе в комнату, синхронизация с другими «умными» устройствами. Таблица 6 показывает сравнение использования протоколов Thread и Zigbee в интеллектуальном освещении.

Таблица 6. Использование протоколов Thread и Zigbee в интеллектуальном освещении

Критерий	Thread	Zigbee
Подключение	Не нужен отдельный хаб	Требуется Zigbee-хаб (координатор)
Масштабируемость	До ~250 устройств	До ~200–300 устройств

Будущее развитие	Активно поддерживается Apple, Google, Amazon	Поддерживается, но медленнее развивается
Локальное управление	Полностью локальное (без облака)	Зависит от хаба (иногда требуют облако)

Результаты. Проведённый анализ показал, что выбор беспроводного протокола должен основываться на характере задачи и требованиях к энергопотреблению, задержке и частоте передачи данных и пр.

Zigbee оптимален для локальных систем с низкой задержкой, таких как «умный» дом. Он обеспечивает мгновенную реакцию устройств — лампочка включается сразу при открытии двери. Благодаря своей топологии, энергоэффективности и совместимости устройств разных производителей, протокол лидирует в устройствах «умного» дома. По состоянию на 2025 год, в мире эксплуатируется около 2 млрд Zigbee-устройств.

LoRaWAN предназначен для распределённых систем с минимальным энергопотреблением и редкой передачей данных. Протокол не подходит для «умного» дома, но широко применяется в промышленном IoT, «умных» городах, сельском хозяйстве. В 2025 году количество LoRaWAN-устройств оценивается в 0,62 млрд. LoRaWAN активно используется в системах уличного интеллектуального освещения.

BLE является самым массовым короткодиапазонным протоколом. Он занимает второе место по количеству устройств — около 10,5 млрд в 2025 году. Протокол подходит для персональных IoT-устройств и краткосрочного сопряжения, но уступает Zigbee в масштабируемости «умного» дома.

Thread — самый молодой протокол, активно развивающийся со стандартом Matter при поддержке Apple, Google и Amazon. Несмотря на небольшую базу — около 0,4 млрд устройств в 2025 году, протокол быстро развивается и



рассматривается как будущая основа «умного» дома.

Выводы исследования:

Для «умного» дома предпочтительнее протоколы Zigbee и Thread.

Для промышленного IoT и городской инфраструктуры — протокол LoRaWAN.

Для персональных и потребительских устройств — протокол BLE.

Заключение. Проведённый сравнительный анализ показал, что выбор беспроводного протокола для систем интеллектуального освещения должен основываться на масштабе и задачах.

Zigbee и Thread обеспечивают низкую задержку и надёжность для «умного» дома, LoRaWAN — энергоэффективность и дальность для уличного освещения в «умных» городах, а BLE подходит для локального управления персональными светильниками. Обоснованный выбор технологий позволяет создавать экономичные, масштабируемые и надежные решения, отвечающие требованиям как жилых, так и городских проектов интеллектуального освещения.

Использованная литература

1. Бурматова О.П. "Концепция устойчивого развития «умного» города: экологический аспект" Всероссийский экономический журнал ЭКО, №. 6 (564), 2021, с. 139-160.

2. Климкович Н.И., Климкович П.И. "Устойчивые «умные» города: от концепции до реализации" Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами, №. 9, 2022, с. 114-118. DOI:10.24411/9999-026A-2020-00024

3. Матюшок В. М., Балашова С.А., Ревина С.Ю., Гомонов К.Г., Энергоэффективность и развитие умных сетей в регионах России// Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. ISSN 1999-2645. — №1 (57). Номер статьи: 5702. Дата публикации: 2024-01-23. Режим доступа: <https://eee-region.ru/article/5702/>

4. Ковалёва А.А., Ковалёв Д.А., Дроздов А.В., Ковалёв М.А. «Протокол ZigBee беспроводной

передачи данных» Международный журнал гуманитарных и естественных наук, №. 5-1, 2022, с. 206-210.

5. Что такое Zigbee и почему стоит выбрать эту технологию для умного дома? [Электронный ресурс] // Rusmarta.ru. — URL: <https://rusmarta.ru/reviews/chto-takoe-zigbee-i-pochemu-stoit-vybrat-etu-tekhnologiyu-dlya-umnogo-doma/> (дата обращения: 10.12.2025).

6. Что такое LoRaWAN [Электронный ресурс] // lar.tech — URL: <https://lar.tech/blog/chto-takoe-lorawan/> (дата обращения: 11.12.2025).

7. Порубай О. В., Лазарева М. В. Алгоритмизация решения задачи управления режимами региональной электроэнергетической системы //Universum: технические науки. – 2024. – Т. 7. – №. 12 (129). – С. 35-39.

8. Технология Bluetooth Low Energy: возможности использования [Электронный ресурс] // rossinno.net — URL: <https://rossinno.net/bluetooth-low-energy> (дата обращения: 11.12.2025).

9. Number of Bluetooth-enabled devices worldwide from 2018 to 2025 [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.statista.com/statistics/1151190/bluetooth-device-shipments-worldwide/> (дата обращения: 10.12.2025).

10. Протокол передачи данных Thread — что это? [Электронный ресурс] // club.dns — URL: <https://club.dns-shop.ru/wiki/t-232-komplektyi-umnogo-doma/139370-protokol-peredachi-dannyih> (дата обращения: 12.12.2025).

