АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе (серия статей) на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ЖОЛАМАНОВ БАТЫРБЕК НҰРЫЛЛАҰЛЫ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ УЗЛОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Общая характеристика работы

Диссертационная работа (серия статей) посвящена повышению точности локализации узлов в беспроводных сенсорных сетях (БСС) на основе технологии Long Range (LoRa) с использованием методов машинного обучения и численного моделирования, а также повышению эффективности передачи данных в сетях Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) за счёт метода обучения с подкреплением для оптимизации параметров передачи в условиях высокой плотности узлов.

Актуальность темы

Современное развитие технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT), «Умных городов» и «Умных зданий» приводит к широкому внедрению БСС, которые используются для мониторинга, контроля и управления объектами в реальном времени. Эффективность функционирования БСС во многом определяется совокупностью факторов, среди которых особенно важными являются точность локализации сенсорных узлов, надёжность передачи данных и энергоэффективность работы устройств. От этих факторов напрямую зависит качество функционирования систем мониторинга и управления в таких областях, как промышленность, транспорт, медицина, логистика и инфраструктура «умных зданий».

Одной из наиболее сложных и востребованных задач в области БСС является определение местоположения узлов в помещениях. Существующие традиционные методы локализации имеют ряд существенных ограничений. Геометрические методы, основанные на временных и угловых характеристиках сигнала, требуют дорогостоящего оборудования, сложной синхронизации и высокоточных измерительных систем, что ограничивает их использование в масштабных проектах. Кроме того, широко используемые в наружных условиях спутниковые навигационные системы, такие как GPS, внутри зданий оказываются малопригодными: сигналы сильно ослабляются стенами, перекрытиями и инженерными конструкциями, что делает определение координат невозможным или крайне неточным. В отличие от них, метод отпечатков пальцев на основе индикатора уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator, RSSI) является более практичным и точным, так как опирается на экспериментально собранные радиокарты,

которые учитывают реальные условия среды: планировку помещений, строительные материалы, наличие перегородок и помех. За счёт этого данный метод позволяет существенно повысить достоверность локализации. Однако применение метода отпечатков пальцев сопряжено с высокой трудоёмкостью построения радиокарт, необходимостью регулярного обновления базы данных и чувствительностью к изменениям среды, что снижает его масштабируемость и универсальность. В связи с этим возникает необходимость в новых подходах, которые позволили бы одновременно повысить точность локализации и сократить затраты на сбор данных.

Особое значение имеет задача повышения энергоэффективности и устойчивости передачи данных в LoRaWAN-сетях, которые в последние годы рассматриваются как одна из наиболее перспективных технологий для построения крупномасштабных сенсорных систем. Однако в условиях городской среды, характеризующейся плотной застройкой, помехами и большим количеством узлов, эффективность стандартного механизма адаптивной передачи данных (Adaptive Data Rate, ADR) снижается. Это приводит к снижению коэффициента доставки пакетов, росту вероятности потерь данных и увеличению энергопотребления узлов из-за повторных передач. В результате страдает не только надёжность функционирования сети, но и её масштабируемость, поскольку при росте числа устройств производительность значительно ухудшается. В результате формируется практическая необходимость внедрения продвинутых методов оптимизации параметров передачи, которые позволят повысить устойчивость и энергоэффективность LoRaWAN-сетей в реальных условиях городской инфраструктуры.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью разработки и применения новых подходов, объединяющих методы машинного обучения, численного моделирования и алгоритмов обучения с подкреплением, которые позволяют повысить точность локализации узлов в помещениях и эффективность передачи данных в БСС в условиях городской среды. Решение этих задач имеет важное значение для дальнейшего развития технологий IoT, «умных городов» и современных телекоммуникационных систем.

Цель исследования. Повышение точности локализации с использованием методов машинного обучения и повышение эффективности передачи данных за счёт применения алгоритмов обучения с подкреплением, основанных на оптимальном выборе параметров передачи в сети LoRaWAN.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- смоделировать распространение сигнала и исследовать влияние параметров, полученных из численного моделирования, на точность модели построения радиокарты;
- исследовать применение метода трансферного обучения для построения радиокарты RSSI в новых помещениях при уменьшенном объёме

экспериментальных данных и оценить влияние этого подхода на точность локализации;

- исследовать методы оптимального выбора параметров передачи LoRaWAN на основе алгоритмов обучения с подкреплением и сравнить его эффективность с другими алгоритмами обучения с подкреплением и со стандартным механизмом ADR по показателям коэффициента доставки пакетов и энергопотребления.

Методы исследования:

- моделирование распространения сигнала в среде COMSOL Multiphysics с последующим анализом параметров, полученных из моделирования, и оценкой их влияния на точность модели построение радиокарты.
- применение методов машинного обучения (GRU, LSTM, RBFN, XGBoost и 1D CNN) и трансферного обучения для построения радиокарт и определения местоположения узлов в среде Python;
- имитационное моделирование работы LoRaWAN в среде NS-3 с применением алгоритмов обучения с подкреплением для оптимизации параметров передачи и последующим сравнением их эффективности со стандартным механизмом ADR и альтернативными алгоритмами обучения с подкреплением.

Объект исследования. Беспроводные сенсорные сети на основе технологии LoRa.

Предмет исследования. Точность локализации узлов LoRa, методы машинного обучения, алгоритмы обучения с подкреплением, эффективность передачи данных в беспроводных сенсорных сетях и параметры передачи в LoRaWAN.

Научная новизна работы заключается в том, что в настоящей работе впервые:

1. было установлено, что использование параметра расчетной дистанции между передающим и принимающим устройствами повышает точность построение радиокарты LoRa-узлов по сравнению с моделями, основанными исключительно на RSSI-данных;
2. был использован метод трансферного обучения для формирования радиокарты RSSI LoRa-узлов при масштабировании в условиях сокращённого объёма данных без существенных потерь точности локализации;
3. был применен алгоритм обучения с подкреплением Double Deep Q-Network with Prioritized Experience Replay (DDQN-PER) для оптимального выбора параметров передачи LoRaWAN с целью повышения коэффициента доставки пакетов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование расчётной дистанции между передатчиком и приёмником, полученный на основе моделирования распространения сигнала, в машинном обучении для построения радиокарты увеличивает точность модели на 3,7%.
2. Метод трансферного обучения формирует полную радиокарту RSSI при использовании всего 20% экспериментальных данных, сохраняя точность локализации выше 91%.

3. Алгоритм Double Deep Q-Network with Prioritized Experience Replay (DDQN-PER) для выбора оптимальных параметров передачи в LoRaWAN обеспечивает повышение коэффициента доставки пакетов на 17,2% по сравнению со стандартным механизмом Adaptive Data Rate (ADR).

Научно-практическая значимость работы. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и развёртывании систем внутреннего позиционирования и беспроводных сенсорных сетей в современных IoT-решениях. Предложенные подходы построения радиокарт с использованием трансферного обучения позволяют существенно снизить трудоёмкость сбора данных и уменьшить зависимость локализационных систем от особенностей помещения, обеспечивая более простое масштабирование и перенос технологий в новые здания и инфраструктурные объекты. Алгоритм оптимизации параметров передачи LoRaWAN на основе обучения с подкреплением повышает устойчивость сети при высокой плотности узлов за счёт уменьшения потерь пакетов и снижения энергопотребления устройств. Полученные результаты могут быть востребованы при разработке интеллектуальных систем управления зданиями, промышленных мониторинговых платформ и логистических решений, а также способствовать уменьшению эксплуатационных затрат и увеличению срока службы сенсорных устройств.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена публикациями в зарубежных научных журналах, индексируемых в международных базах данных с высоким импакт-фактором.

Личный вклад автора. Постановка исследовательских задач, корректировка методологических подходов и обсуждение научных результатов осуществлялись совместно с научными руководителями. Автор выполнил все этапы исследования, включая разработку и моделирование радиокарт на основе RSSI, реализацию подхода трансферного обучения, а также численное моделирование распространения сигнала в среде COMSOL Multiphysics. Обработка данных и реализация алгоритмов машинного обучения для оценки точности локализации были выполнены автором в среде Python. Имитационное моделирование работы LoRaWAN-сетей при высокой плотности узлов проведено в среде NS-3, а алгоритм обучения с подкреплением применён для оптимизации параметров передачи. Автор выполнил анализ полученных результатов, их сопоставление с существующими методами и подготовку выводов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы (серия статей) были опубликованы в следующих источниках:

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в международные научные базы данных Thomson Reuters и Scopus:

1. **Zholamanov B.,** Saymbetov A., Nurgaliyev M., Orynbassar S., Dosymbetova G., Kapparova A., Kuttybay N., Koshkarbay N., Yershov E., Bolatbek A., Kopbay K. Indoor localization of LoRa wireless modules based on RSSI fingerprint method using transfer learning // Results in Engineering – 2025. – T. 28.

– С. 108383. **Web of Science: Impact Factor 7.9, Q1. Scopus: CiteScore 8.2, Процентиль 86%.** https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108383

2. **Zholamanov B.,** Bolatbek A., Saymbetov A., Nurgaliyev M., Yershov E., Kopbay K., Orynbassar S., Dosymbetova G., Kapparova A., Kuttybay N., Koshkarbay N. Enhanced Reinforcement Learning Algorithm Based-Transmission Parameter Selection for Optimization of Energy Consumption and Packet Delivery Ratio in LoRa Wireless Networks // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2024. – Т. 13. – № 6. – С. 89. **Web of Science: Impact Factor 4.2, Q2; Scopus: CiteScore 9.7, Процентиль 95%.** https://doi.org/10.3390/jsan13060089

3. **Zholamanov B.,** Saymbetov A., Nurgaliyev M., Bolatbek A., Dosymbetova G., Kuttybay N., Orynbassar S., Kapparova A., Koshkarbay N., Beyca Ö. F. RSSI Fingerprint-Based Indoor Localization Solutions Using Machine Learning Algorithms: A Comprehensive Review // Smart Cities. – 2025. – Т. 8. – № 5. – С. 153. **Web of Science: Impact Factor 5.5, Q1. Scopus: CiteScore 14.7, Процентиль 95%.** https://doi.org/10.3390/smartcities8050153

Научные статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования:

1. Bolatbek A.B., **Zholamanov B.N.,** Nurgaliyev M.K., Saymbetov A.K., Abzhanova G.M. Energy efficient algorithm for transmission parameter selection in LoRa wireless networks // Bulletin of D. Serikbayev EKTU. – 2025. – Т. 1. – №3. – С. 157. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_3_157

Авторское свидетельство

Жоламанов Б.Н., Саймбетов А.К., Нұрғалиев М.К., Болатбек А.Б. Система внутреннего позиционирования LoRa-узлов на основе метода отпечатка пальцев RSSI с использованием трансферного обучения. Республики Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», 2025 г., Свидетельство об авторском праве № 64965 от «4» декабря 2025 года.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских программ

Диссертация (серия статей) частично выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской работы (НИР) «Повышение энергоэффективности мобильных и статических беспроводных сенсорных узлов в открытом и закрытом пространстве» на 2023–2025 годы, индивидуальный регистрационный номер (ИРН) AP19678552.