АННОТАЦИЯ

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

БОЛАТБЕК АСХАТ БАУЫРЖАНҰЛЫ

СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ УЗЛОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ОТКРЫТОМ И ЗАКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Общая характеристика работы

Диссертационная работа направлена на повышение точности прогнозирования местоположения мобильных узлов беспроводных сенсорных сетей в открытом и закрытом пространстве. В ходе исследования предложены методы машинного обучения на основе секторизации данных отпечатков RSSI в помещении, восстановление радиокарты на основе локально взвешенной регрессии (Locally Weighted Regression, LWR), а также гибридные методы локализации, дополненные машинным обучением, для сетей Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) в открытом пространстве, основанные на взвешенной центроидной локализации (Weighted Centroid Localization, WCL).

Актуальность темы

В настоящее время, в связи с развитием интернета вещей, умных зданий, систем умного города, промышленного мониторинга и мобильной робототехники, задача точного определения местоположения узлов в беспроводных сенсорных сетях приобретает особую значимость. Поскольку ценность сенсорных данных во многом зависит от их точного пространственного положения, качество локализации напрямую влияет на эффективность управления, навигации, безопасности и распределения ресурсов. Поэтому повышение точности прогнозирования местоположения беспроводных узлов в открытом и закрытом пространстве является актуальной научной и прикладной задачей.

В закрытом пространстве эта задача усложняется из-за многолучевого распространения сигнала, влияния препятствий и нестабильности индикатора мощности полученного сигнала (Received Signal Strength Indicator, RSSI). Несмотря на широкое применение методов локализации на основе уровня принимаемого сигнала, они требуют значительных затрат времени и труда на сбор большого объема измерений и построение радиокарты. Кроме того, адаптация готовых моделей к новым траекториям и изменяющимся условиям среды не всегда остается на высоком уровне. Также важной задачей является разработка методов, позволяющих сократить объем измерений, восстанавливать радиокарту на основе ограниченных данных и учитывать пространственные особенности. В этой связи разработка новых методов эффективной обработки данных, восстановления радиокарты по

ограниченным измерениям и повышения точности локализации является актуальной.

Аналогичные трудности наблюдаются и в сетях LoRaWAN в открытом пространстве. Данная технология обеспечивает широкую зону покрытия и низкое энергопотребление, однако условия непрямой видимости (Non Line Of Sight, NLoS) в городской среде и неравномерное расположение шлюзов ограничивают точность прогнозирования местоположения узлов БСС. Кроме того, в реальной сетевой инфраструктуре прием сообщений различными шлюзами и зависимость RSSI от условий среды влияют на точность методов локализации. По этой причине особый интерес представляют гибридные методы, объединенные с машинным обучением. Такое объединение позволяет уточнять начальную оценку координат, снижать ошибку в сложных условиях распространения и улучшать обобщающую способность модели.

Таким образом, предложенные в диссертационной работе методы повышения точности локализации в открытом и закрытом пространстве обладают научной новизной и высокой практической значимостью.

Цель исследования. Повышение точности определения местоположения мобильных узлов беспроводных сенсорных сетей в открытых и закрытых пространствах и снижение средней ошибки RSSI при восстановлении радиокарты внутри здания на основе ограниченных измерений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

• повысить точность определения местоположения мобильных узлов в закрытом пространстве LoRaWAN с использованием методов предварительной обработки данных RSSI, секторизации и моделей машинного обучения;

• снизить среднюю ошибку восстановления RSSI при построении радиокарты в закрытом пространстве с использованием ограниченных измерений и метода локально взвешенной регрессии, а также сравнить его с альтернативными алгоритмами восстановления радиокарты;

• уменьшить ошибку определения местоположения узлов LoRaWAN в открытом пространстве с использованием метода взвешенной центроидной локализации и моделей машинного обучения.

Методы исследования:

• предварительная обработка данных RSSI, секторизация и построение моделей машинного обучения kNN, SVR, GRU, RF и MLP в среде Python для определения местоположения мобильных узлов в закрытом пространстве;

• методы восстановления радиокарты в закрытом пространстве на основе ограниченных измерений данных RSSI, включая интерполяцию, локально взвешенную регрессию и альтернативные методы, с последующим сравнительным анализом;

• методы определения местоположения узлов LoRaWAN в открытом пространстве, включая взвешенную центроидную локализацию и моделей машинного обучения MLP, XGBoost, LightGBM и kNN в среде Python.

Объект исследования. Беспроводные сенсорные сети на основе технологий LoRa и ZigBee.

Предмет исследования. Методы восстановления радиокарты, методы определения местоположения мобильных узлов на основе машинного обучения, а также гибридные модели, предназначенные для повышения точности локализации в сетях LoRaWAN в открытом пространстве.

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

• был использован метод секторизации для повышения точности прогнозирования местоположения мобильных узлов в закрытом пространстве в беспроводных сенсорных сетях LoRaWAN для предварительной обработки данных RSSI совместно с моделями машинного обучения;

• было установлено, что применение метода локально взвешенной регрессии (Locally Weighted Regression, LWR) при восстановлении радиокарты на основе ограниченных измерений в закрытом пространстве снижает среднюю ошибку RSSI по сравнению с традиционным методом интерполяции;

• было установлено, что применение метода взвешенной центроидной локализации (Weighted Centroid Localization, WCL) при прогнозировании местоположения узлов сети LoRaWAN в открытом пространстве снижает среднюю ошибку локализации по сравнению с методами прямого прогнозирования, основанными только на машинном обучении.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод секторизации в беспроводных сенсорных сетях LoRaWAN повышает точность определения местоположения мобильных узлов в закрытом пространстве до 19% в зависимости от сложности траектории движения.

2. Применение локально взвешенной регрессии (Locally Weighted Regression, LWR) для восстановления радиокарты в закрытом пространстве уменьшает среднюю ошибку индикатора мощности полученного сигнала (Received Signal Strength Indicator, RSSI) на 32% по сравнению с традиционным методом интерполяции.

3. Применение метода взвешенной центроидной локализации (Weighted Centroid Localization, WCL) снижает среднюю ошибку определения местоположения узлов сети LoRaWAN в открытом пространстве на 29%.

Теоретическая значимость исследования. Обработка данных RSSI, применение локально взвешенной регрессии и построение гибридных моделей расширяют научные подходы к повышению точности локализации. Кроме того, полученные результаты формируют новые подходы к интеграции методов машинного обучения с физическими моделями и позволяют глубже понять закономерности распространения радиосигналов. Результаты исследования могут служить теоретической основой для разработки

алгоритмов локализации, обеспечивающих высокую точность даже в условиях ограниченных данных.

Практическая значимость исследования. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и внедрении систем локализации в беспроводных сенсорных сетях в открытых и закрытых пространствах. Предложенные методы позволяют не только повысить точность локализации, но и снизить объём измерений при построении радиокарты, а также обеспечить устойчивость моделей в сложных условиях. Системы локализации внутри зданий, мобильная робототехника, умные здания, складская и производственная логистика, а также системы мониторинга на основе городской инфраструктуры LoRaWAN могут быть разработаны с использованием полученных результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается наличием публикаций в зарубежных журналах с ненулевым импакт-фактором.

Личный вклад автора. Теоретический анализ, разработка структуры исследования, организация экспериментальной системы в закрытом пространстве, сбор и предварительная обработка данных, разработка алгоритмов локализации и восстановления радиокарты, обучение и настройка моделей машинного обучения, анализ и сравнение результатов, а также подготовка основного текста работы выполнены при непосредственном личном участии автора. Постановка задач исследования и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы опубликованы в следующих источниках:

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

1. Nurgaliyev M., **Bolatbek A.,** Zholamanov B., Saymbetov A., Kopbay K., Yershov E., Orynbassar S., Dosymbetova G., Kapparova A., Kuttybay N., Koshkarbay N. Machine learning based localization of lora mobile wireless nodes using a novel sectorization method //Future Internet. – 2024. – Vol. 16. – No. 12. – P. 450. **Web of Science: Impact Factor 3.6, Q2. Scopus: CiteScore 9.6, Процентиль 84%**

2. **Bolatbek A.,** Beyca Ö. F., Zholamanov B., Nurgaliyev M., Dosymbetova G., Almen D., Saymbetov A., Yertaikyzy B., Orynbassar S., Kapparova A. A Physically-Aware Residual Learning Framework for Outdoor Localization in LoRaWAN Networks //Future Internet. – 2026. – Vol. 18. – No. 4. – P. 216. **Web of Science: Impact Factor 3.6, Q2. Scopus: CiteScore 9.6, Процентиль 84%**

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

1. Nurgaliyev M., **Bolatbek A.**, Dosymbetova., Kapparova A., Yertaikyzy B. LoRaWAN – Based Indoor Localization for Mobile Nodes Using Machine Learning Technique // "Universitet Enbekteri – University Proceedings". - 2025. - Vol. 100 – No. 3. - P. 449-455.

2. **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. – Vol.. 1. – No. 3. – P. 157.

Публикации в сборниках тезисов международных конференций:

1. **Bolatbek A.**, Orynbassar S., Saymbetov A., Nurgaliyev M., Zholamanov B., Dosymbetova G., Kuttybay N., Kapparova A. ZigBee Based Indoor Localization via RSSI-Based Fingerprinting with Adaptive Path Loss Estimation //2025 10th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK). – IEEE, 2025. – P. 1449-1454.
2. **Bolatbek A.,** Zholamanov B., Seitzhanova A. // Fingerprint-based localization in lorawan using machine learning «FARABI ALEMI», 2025. – P.152

Авторское свидетельство

Болатбек А.Б., Саймбетов А.К., Нұрғалиев М.К., Жоламанов Б.Н. Восстановление радиокарты в помещении на основе локально-взвешенного метода. Республики Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», 2026 г., Свидетельство об авторском праве № 69347 от «31» марта 2026 года.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников из 107 наименований. Общий объем работы составляет 102 страницу, включает 68 рисунков и 18 таблиц.

В первом разделе диссертации рассмотрено современное состояние проблемы определения местоположения мобильных узлов в беспроводных сенсорных сетях, представлен обзор используемых технологий и методов.

Во втором разделе диссертации рассмотрены результаты определения местоположения мобильных узлов в закрытом пространстве на основе предварительной обработки данных методом секторизации и применения моделей машинного обучения.

Третий раздел диссертации посвящен задаче восстановления радиокарты, в котором исследованы методы на основе статических и мобильных измерений.

Четвертый раздел диссертации посвящен предложенному гибридному методу для определения местоположения узлов LoRaWAN в открытом пространстве, этапам обработки данных и настройке моделей машинного обучения.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских программ

Диссертация 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.