

**Лебедев Алексей Сергеевич**

магистрант, ФГБОУВО «МИРЭА — Российский технологический университет», Российская Федерация, г. Москва

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH ДЛЯ НАВИГАЦИИ АВТОБУСОВ**

**Аннотация.** Растущая сложность городских транспортных систем требует инновационных технологических решений для повышения точности навигации, оптимизации маршрутов и предоставления информации пассажирам. Локализация на основе Bluetooth представляет собой недорогую и масштабируемую альтернативу традиционным системам определения местоположения GPS и Wi-Fi. В этой статье рассматривается интеграция технологии Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE) в автобусные навигационные системы, подчеркивается ее роль в отслеживании транспортных средств в режиме реального времени, определении местоположения внутри помещений (в терминалах и депо), а также в инфраструктуре "умного города". В исследовании представлена модель автобусной навигационной системы с поддержкой Bluetooth, оценивается ее производительность с помощью моделирования и экспериментальных данных, а также обсуждаются проблемы, связанные с развертыванием, помехами и конфиденциальностью.

**Ключевые слова:** Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE), автобусная навигация, интеллектуальные транспортные системы (ITS), локализация, отслеживание в режиме реального времени, умный город, транспортная инфраструктура.

## **USING BLUETOOTH TECHNOLOGY FOR BUS NAVIGATION**

Lebedev Alexey Sergeevich

Master's Student, MIREA — Russian Technological University, Moscow,  
Russian Federation  
[leha.lebedev.02@list.ru](mailto:leha.lebedev.02@list.ru)

**Abstract.** The increasing complexity of urban transportation systems requires innovative technological solutions to enhance navigation accuracy, route optimization, and passenger information services. Bluetooth-based localization offers a low-cost, scalable alternative to traditional GPS and Wi-Fi positioning systems. This paper explores the integration of Bluetooth Low Energy (BLE) technology into bus navigation systems, emphasizing its role in real-time vehicle tracking, indoor and semi-indoor positioning (in terminals and depots), and smart city infrastructure. The research presents a model of a Bluetooth-assisted bus navigation system, evaluates its performance through simulation and experimental data, and discusses challenges related to deployment, interference, and privacy.

**Keywords:** Bluetooth Low Energy (BLE), bus navigation, intelligent transportation systems (ITS), localization, real-time tracking, smart city, transport infrastructure.

Динамичный рост городского населения значительно повысил спрос на эффективные и интеллектуальные системы общественного транспорта. Точная и надежная навигация в городских автобусах имеет жизненно важное значение не только для управления маршрутами, но и для повышения удобства пассажиров и обеспечения эксплуатационной эффективности.

Традиционные навигационные системы в основном полагаются на GPS (глобальную систему позиционирования) и, в меньшей степени, на определение местоположения на основе Wi-Fi. Однако эти методы сталкиваются с ограничениями в условиях плотной городской застройки, туннелях и закрытых автобусных терминалах, где ухудшение или недоступность сигнала часто приводит к ненадежному отслеживанию. Технология Bluetooth, в частности

Bluetooth Low Energy (BLE), стала многообещающим кандидатом для дополнения или замены традиционных навигационных систем в определенных условиях.

Маяки BLE обладают такими преимуществами, как низкое энергопотребление, низкая стоимость инфраструктуры и совместимость с широкодоступными мобильными устройствами и встроенными системами. При развертывании в хорошо структурированной сети BLE может обеспечить точную локализацию на основе приближения, что делает его подходящим для динамичных сред, таких как системы общественного транспорта. В этом исследовании рассматривается, как технология BLE может быть интегрирована в автобусные навигационные системы для повышения точности и надежности данных о местоположении, особенно в тех случаях, когда покрытие GPS ограничено или недоступно. Кроме того, обсуждается разработка и внедрение навигационной модели на основе BLE, учитывающей как технологические, так и эксплуатационные аспекты.

В последние годы наблюдается всплеск интереса к альтернативным технологиям локализации в качестве усовершенствований или дополнений к GPS. В ходе многочисленных исследований были изучены системы определения местоположения внутри помещений на основе Bluetooth для применения в музеях, больницах, аэропортах и торговых центрах. Эти системы обычно основаны на сетях радиомаяков BLE, которые передают уникальные идентификаторы, которые улавливаются мобильными устройствами для оценки близости и определения местоположения. В транспортном секторе BLE нашел применение в основном в системах информирования пассажиров и продаже билетов, а не в навигации транспортных средств. Тем не менее, несколько пилотных проектов и академических прототипов продемонстрировали, что BLE можно эффективно использовать для связи между транспортными средствами и инфраструктурой и отслеживания на малых расстояниях. Примечательно, что интеграция BLE в интеллектуальные транспортные системы (ITS) была

исследована в работах Иланга Ли, где узлы BLE были развернуты на перекрестках для отслеживания транспортных средств и оценки времени в пути [1, с. 1748]. Аналогичным образом, Кумар и Шарма разработали гибридную систему GPS-BLE для повышения точности определения местоположения в городских каньонах [2, с. 94]. В совокупности эти исследования указывают на неиспользованный потенциал BLE как дополнительной технологии для навигации в автобусах, особенно в сложных условиях.

Bluetooth Low Energy (BLE) — это технология беспроводной персональной сети (WPAN), разработанная для приложений, требующих минимального энергопотребления и затрат. Работая в диапазоне 2,4 ГГц, BLE обеспечивает связь на короткие расстояния между устройствами и в особенности может подходить для служб, основанных на определении местоположения [4].

BLE работает с использованием трех ключевых компонентов:

- небольшие маяки передатчики на батарейках, которые посылают сигналы через регулярные промежутки времени;
- приемники (сканеры), которые обнаруживают сигналы маяков и оценивают уровень сигнала с помощью индикатора уровня принимаемого сигнала (RSSI);
- центральные серверы, которые собирают и обрабатывают данные, полученные от сканеров, для вычисления местоположения или запуска действий.

Эффективность локализации на основе BLE зависит от таких факторов, как плотность маяков, стратегия размещения, помехи в сигнале и калибровка. Стандартный метод оценки расстояния с использованием BLE включает в себя отображение значений RSSI для приблизительного определения расстояний с помощью эмпирических моделей или алгоритмов машинного обучения.

Несмотря на то, что блютуз показал себя многообещающим в области позиционирования внутри помещений, его применение в контексте мобильных

систем, таких как автобусы, вызывает ряд технических и логистических вопросов. Основные проблемы включают в себя:

- насколько точно системы на базе BLE могут отслеживать местоположение автобусов в городских условиях и в полуподвальных помещениях?
- каковы требования к инфраструктуре и техническому обслуживанию при крупномасштабном внедрении BLE?
- как можно интегрировать BLE с существующими системами навигации и управления транспортом?

Применимость технологии тесно связана с ее эффективностью в городских условиях, требованиями к инфраструктуре и совместимостью с существующими транспортными системами. В данной статье излагаются основополагающие соображения, необходимые для концептуальной и практической реализации системы позиционирования автобусов, управляемых BLE, в условиях мегаполиса.

Точность систем позиционирования варьируется в зависимости от топологии окружающей среды, стратегии развертывания и используемых методов обработки сигналов. В открытых городских районах и полужакрытых объектах инфраструктуры, таких как автобусные станции или пересадочные терминалы, BLE демонстрирует более высокую стабильность сигнала по сравнению с GPS, который часто страдает от неточностей, связанных с препятствиями. Эмпирические исследования показывают, что при наличии хорошо откалиброванной сети радиомаяков и надлежащих механизмов фильтрации сигналов системы позиционирования на основе BLE могут достигать точности в диапазоне от 1,5 до 3,0 метров в условиях типичного городского шума [1, с. 1741]. Этот уровень точности достаточен для таких задач, как автоматическое обнаружение остановок, отслеживание автопарка в пределах складов и определение местоположения транспортных средств на последних метрах пути вблизи станционных платформ. Тем не менее, точность определения

местоположения очень чувствительна к размещению маяков, плотности и выбранному методу оценки расстояния — будь то трилатерация, дактилоскопия или гибридные подходы, включающие статистические фильтры [2, с. 102].

Надежная стратегия развертывания BLE требует внимания как к архитектуре оборудования, так и к управлению жизненным циклом. Устройства Beacon, как правило, недорогие и энергоэффективные, требуют структурированной схемы установки, которая обеспечивает непрерывный охват и перекрытие сигналов. Оптимальное размещение включает установку маяков через каждые 25-40 метров в прямолинейных транспортных коридорах или в более плотных конфигурациях в более перегруженных или закрытых помещениях. Основным ограничением остается энергоснабжение. Хотя модели с батарейным питанием отличаются мобильностью и упрощенной установкой, они требуют периодического технического обслуживания. Альтернативные источники энергии, такие как солнечная энергия или интеграция с муниципальными электросетями, могут облегчить бремя долгосрочной поддержки, особенно при крупномасштабном внедрении [3, с. 2420].

Но стоит отметить, что при дальних расстояниях можно не ставить маяки близко друг к другу и использовать получаемый прерываемый сигнал для примерного определения местоположения транспорта, что сократит расходы на интеграцию и закупку устройств.

Система поддержки инфраструктуры BLE включает в себя возможности удаленного мониторинга, управление встроенным ПО и диагностику уровня сигнала и заряда батареи [4]. Эти задачи часто решаются с помощью централизованных платформ управления маяками. Кроме того, необходимо учитывать долговечность устройств BLE в городских условиях на открытом воздухе, поэтому для долговременной стабильности рекомендуется использовать защитные корпуса и антивандальные крепления. Для учета физических и электромагнитных изменений в рабочей среде следует

периодически выполнять процедуры калибровки, включая отображение температуры сигнала и протоколы настройки параметров окружающей среды.

Эффективное использование BLE в городском транспорте также требует последовательной интеграции с существующими системами управления транспортом. Вместо того, чтобы действовать как изолированная система, локализация BLE может дополнять существующие сервисы на основе GPS с помощью методов объединения данных. Используя контекстно-зависимые алгоритмы, навигационная логика может динамически переключаться между входами BLE и GPS в зависимости от качества сигнала и условий окружающей среды. Например, GPS может доминировать на открытой местности, в то время как BLE становится основным в туннелях, терминалах или плотно застроенных коридорах, где спутниковые сигналы ухудшаются.

Для взаимодействия потоков данных BLE с платформами управления транспортом требуются стандартизированные форматы данных и четко определенные API. Обычно используется многоуровневая архитектура системы, в которой исходные данные BLE обрабатываются локально с помощью встроенных вычислительных модулей перед передачей в централизованные системы управления дорожным движением. Эти модули могут быть встроены в инфраструктуру шины или подключены через вспомогательные устройства, способные сканировать сигнал BLE и предварительно определять местоположение. Совместимость с существующими стандартами, такими как Общая спецификация транзитной информации (GTFS) и ее вариант в режиме реального времени (GTFS-RT), обеспечивает плавную интеграцию с общедоступными платформами, включая инструменты оценки прибытия и цифровые вывески.

Более того, присутствие BLE на устройствах пассажиров дает двунаправленное преимущество: мобильные приложения могут получать гиперлокализованные обновления и в то же время служить пассивными датчиками местоположения для комплексной оптимизации системы - при

условии соблюдения строгих правил конфиденциальности. При использовании анонимизированных идентификаторов и политик авторизации взаимодействие пользователя и устройства на основе BLE может обогатить навигационную информацию без ущерба для безопасности данных.

Чтобы полностью раскрыть потенциал BLE в транспортных системах, рекомендуется разработать и протестировать модульную архитектуру прототипа в контролируемом сегменте транспортной сети. Эта модель может включать все критически важные компоненты, включая компоновку аппаратного обеспечения, логику встроенного ПО, интеграционные интерфейсы и модули анализа данных. Такой испытательный стенд будет служить ориентиром для оценки эксплуатационной осуществимости, определения типовых сценариев и уточнения критериев соотношения затрат и эффективности перед широкомасштабным внедрением.

### **Заключение**

В этой статье рассматривается потенциал технологии Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE) как жизнеспособного решения для дополнения или замены GPS в автобусных навигационных системах. Система может обеспечивать ощутимые преимущества с точки зрения затрат, энергоэффективности и масштабируемости. Она может служить важнейшим компонентом интеллектуальных транспортных систем, особенно в сочетании с существующими системами локализации. Однако для практического масштабного развертывания потребуется решить проблемы долговечности оборудования, помех сигналу, обеспечения конфиденциальности и интеграции с устаревшими системами. Постоянное развитие стандартов Bluetooth и инфраструктуры "умного города" делает BLE перспективным решением для улучшения систем общественного транспорта в эпоху цифровых технологий.

### **Список литературы**

1. Li Y., Wang C., Liu H. Bluetooth-based vehicle detection and travel time estimation system // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2020. Vol. 21, No. 4. P. 1739–1749.
2. Kumar R., Sharma A. Urban navigation enhancement using hybrid BLE-GPS localization // International Journal of Smart Transportation. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 89–102.
3. Faragher R., Harle R. Location fingerprinting with Bluetooth Low Energy beacons // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2015. Vol. 33, No. 11. P. 2418–2428.
4. Сигнал Bluetooth. Спецификация ядра Bluetooth [электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications> (дата обращения: 10.05.2025).