

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-2-1-31>

EDN: QEDDVK

Исследование технологии высокоточного позиционирования nanoLOC

✉ Багаев Е. С., Шаламов П. А., Фокин Г. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Современные сценарии высокоточного позиционирования в беспроводных локальных сетях требуют преодоления ограничений, связанных с многолучевым распространением сигналов и нелинейными задержками. Для реализации дальномерного метода позиционирования при отсутствии синхронизации между опорными приемопередающими узлами используется известный метод симметричного двустороннего двунаправленного измерения расстояния. **Целью работы** является исследование применения технологии симметричного двустороннего двунаправленного измерения расстояния в контексте определения местоположения пользовательского устройства в беспроводной локальной сети по технологии nanoLOC с нестационарной окружающей средой внутри помещений. **Новизна** заключается в разработке методического сопровождения для экспериментальной оценки точности позиционирования устройств внутри помещений с использованием технологии nanoLOC. **Результаты** показывают, что применение системы nanoLOC для решения задачи определения местоположения пользовательского устройства может обеспечить точность измерения в пределах нескольких дециметров за счет применения метода симметричного двустороннего двунаправленного измерения расстояния. **Практическая значимость:** представленное исследование может быть использовано для прикладной конфигурации сценариев определения местоположения внутри помещений с настройкой модулей сбора и обработки дальномерных измерений nanoLOC, а также для проведения лабораторных занятий по курсам систем прикладного радиодоступа.

Ключевые слова: сеть связи, системы определения местоположения, беспроводная локальная сеть, пользовательское устройство, nanoLOC, ToA (time of arrival), ToF (time of flight), SDS-TWR (symmetric double-sided two way ranging)

Введение

Необходимость как можно быстрее определять местонахождение людей и объектов всегда была важной частью любой организации или отрасли, особенно в производстве, здравоохранении и логистике. С развитием беспроводных технологий появилась возможность удаленного определения местоположения (МП) объектов или людей в течение заданного времени. Такую возможность обеспечивают системы определения МП в реальном времени (RTLS, аббр. от англ. Real Time Location Systems) [1]. В них обычно используются небольшие маломощные передатчики, называемые RFID-метками (аббр. от англ. Radio

Библиографическая ссылка на статью:

Багаев Е. С., Шаламов П. А., Фокин Г. А. Исследование технологии высокоточного позиционирования nanoLOC // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 2. С. 1–31. DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-2-1-31. EDN: QEDDVK

Reference for citation:

Bagaev E., Shalamov P., Fokin G. A Study on High-Precision Positioning Technology Using nanoLOC // Telecom IT. 2025. Vol. 13. Iss. 2. PP. 1–31 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-2-1-31. EDN: QEDDVK

Frequency IDentification – радиочастотная идентификация) [2, 3], которые прикрепляются к объектам (или надеваются на людей), а также наборы считывающих устройств, определяющие МП этих меток. Такие системы являются геолокационными и обычно используют GPS для отображения МП [4].

Применение RTLS универсально благодаря широкому спектру задач, которые могут быть решены с их помощью. В качестве примеров можно привести применение RTLS для определения МП медицинского персонала в загруженном больничном отделении или для быстрого установления МП и наличия критически важных ресурсов на производстве [5, 6].

RTLS стали важной разработкой в отрасли связи с ростом количества беспроводных технологий в промышленных, корпоративных, офисных, охранных и военных системах. Однако большинство этих систем состоит только из двух ключевых частей – набора беспроводных средств определения дальности, которые используются для вычисления расстояния между различными узлами, и механизма определения МП пользовательского устройства [7].

Средства измерения расстояния включают в себя точки доступа и пользовательские метки, которые совместно рассчитывают дистанции между участниками сети. Активные RFID-метки являются мобильными узлами, положение которых может постоянно меняться в пространстве. Точки доступа имеют известное положение и используются системой для определения МП пользовательского устройства. Кроме того, они могут быть частью сети, состоящей в том числе из узла или набора узлов, подключенных к проводной инфраструктуре для мониторинга системы через веб- или программный интерфейс [7].

Известной реализацией описанного выше подхода к решению задач определения МП является система nanoLOC, разработанная компанией Nanotron Technologies (https://nanotron.com/assets/pdf/support/productbriefs/Transceivers/PB_nanoLOC_1.1.pdf). Эта система основана на принципе, по которому расширение спектра осуществляется методом линейной частотной модуляции (ЛЧМ) [8]. В отличие от методов, в которых применяется скачкообразное изменение частоты (FHSS, *аббр. от англ.* Frequency Hopping Spread Spectrum) или псевдослучайные последовательности (DSSS, *аббр. от англ.* Direct Sequence Spread Spectrum), в системах с ЛЧМ частота сигнала изменяется плавно на определенном временном интервале. В системе nanoLOC применение такого подхода позволяет увеличить полосу пропускания до 80 МГц для режима измерения расстояния в реальном времени.

Работа средств определения МП основана на сборе относительных данных о расстоянии до объекта с помощью точек доступа, находящихся в сети. Затем полученные данные передаются на основной узел, в котором реализован алгоритм для определения МП искомого пользовательского устройства [9]. В системе NanoLOC в основу алгоритма положен расчет времени прохождения сигнала между точкой доступа и пользовательским устройством.

Настоящее исследование направлено на экспериментальную оценку точности позиционирования внутри помещений с использованием беспроводной сети на основе технологии nanoLOC. В качестве основного метода определения расстояния между узлами сети применялся симметричный двусторонний дву-

направленный метод (SDS-TWR, *аббр. от англ. Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging*), призванный компенсировать погрешности синхронизации часов.

Цель работы заключалась в разработке и апробации методики оценки координат мобильных устройств. Для ее достижения был проведен натурный эксперимент.

На первом этапе исследования формализованы теоретические модели и методы определения МП. Далее была рассмотрена специфика применения технологии nanoLOC для задач позиционирования внутри помещения. Описано использованное программно-аппаратное обеспечение – комплект nanoPAN 5375.

Ключевым этапом стала настройка сценариев определения МП и конфигурация модулей для сбора и обработки дальномерных измерений. В заключительной части эксперимента был реализован конкретный сценарий для оценки точности локации носимого модуля (НМ) в помещении. В контексте систем RTLS НМ выполняет ключевую функцию – он является мобильным элементом системы, МП которого определяется с помощью измерений дальности до базовых станций (БС). Стоит отметить, что НМ в технологии nanoLOC выполняет не только функцию приема сообщений от БС, но и участвует в процедуре передачи пакетов с БС. Такое свойство НМ необходимо для реализации метода SDS-TWR.

Модели и методы определения местоположения

Методы определения расстояния в RTLS можно разделить на несколько групп в зависимости от оцениваемой характеристики передаваемого сигнала [10]: угол прибытия сигнала (AoA, *аббр. от англ. Angle of Arrival*) [11]; уровень принимаемого сигнала (RSS, *аббр. от англ. Received Signal Strength*) [12]; время прибытия сигнала (ToA, *аббр. от англ. Time of Arrival*) [13]; время полета (ToF, *аббр. от англ. Time of Flight*) [14]; разница во времени прибытия сигнала (TDoA, *аббр. от англ. Time Difference of Arrival*) [15]; SDS-TWR [16, 17].

Методом AoA определяется МП НМ по углу прихода сигнала от фиксированных БС с помощью триангуляции. AoA определяется как угол между линией, проходящей от БС до НМ, и линией, проходящей от БС по заранее заданному направлению. На рисунке 1 искомый угол обозначается как θ . Способ ограничен тем, что оценка угла происходит при наличии сигналов как минимум от двух БС. Угол прибытия можно измерить с помощью антенных решеток или вращающихся лучевых антенн. Недостатками методов, основанных на AoA, являются затраты на установку и специальная конфигурация оборудования.

RSS также может быть использован для определения дальности, поскольку расстояние между точкой доступа и пользовательским устройством может быть получено с помощью модели потерь при распространении сигнала в тракте на логарифмическом расстоянии [18].

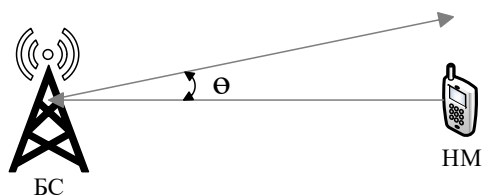


Рис. 1. Метод определения AoA

На рисунке 2 приводится схема расположения устройств при определении МП НМ по RSS, зависящему от размеров здания, размеров и количества окружающих объектов. Также модели распространения чувствительны к многолучевому распространению, дифракции. Результаты, представленные в [19], показывают, что применение RSS для определения МП затруднительно из-за возникающих помех.

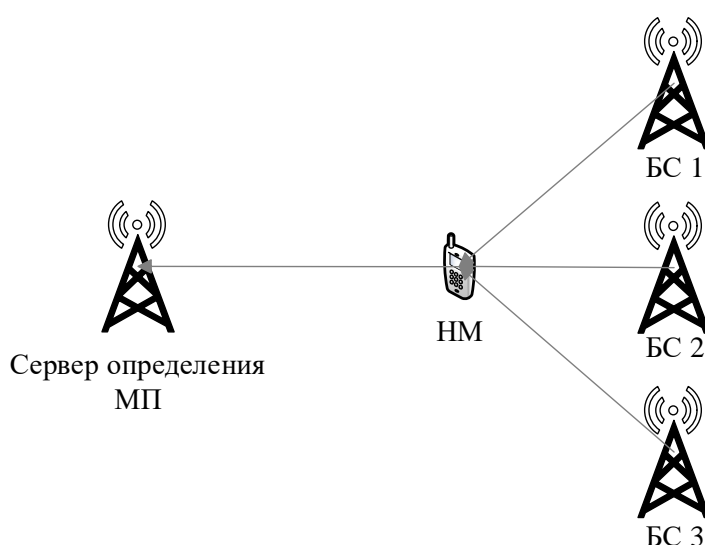


Рис. 2. Схема расположения устройств для определения МП НМ по RSS

При измерении ToA, ToF и TDoA производится оценка дальности между двумя узлами путем измерения задержки при распространении сигнала. Для определения МП НМ с помощью ToA, ToF и TDoA необходимо измерить расстояния как минимум до трех БС.

Для определения ToA необходимо измерить время прохождения сигнала от НМ до БС (рисунок 3). Сравнив время отправки t_0 и время прихода сигнала для каждой БС t_1, t_2, t_3 , можно вычислить задержку распространения для этих БС. Далее с помощью трилатерационных окружностей вычисляется МП НМ, который находится на их пересечении.

На рисунке 4 показана схема расположения устройств при определении ToF. При прохождении сигнала от БС к НМ необходимо сравнить время отправки сигнала t_1 и время его прибытия t_2 . Далее, используя вычисленное время распространения сигнала и известную скорость, можно рассчитать расстояние D до БС.

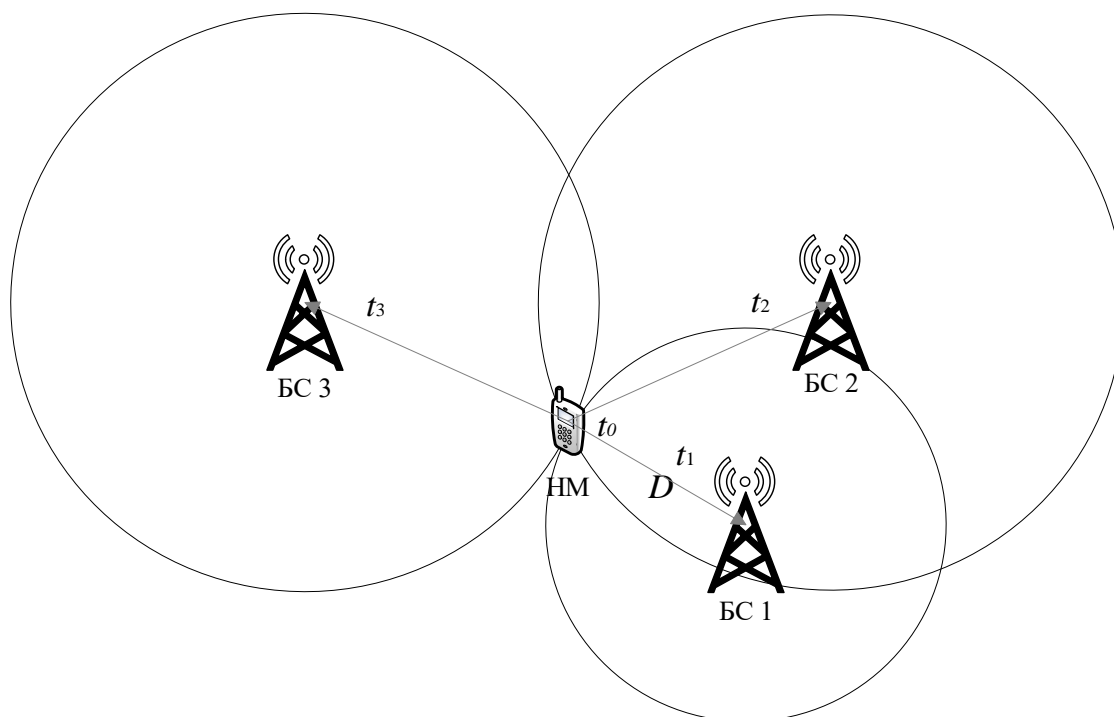


Рис. 3. Схема расположения устройств для определения МП НМ по ToA

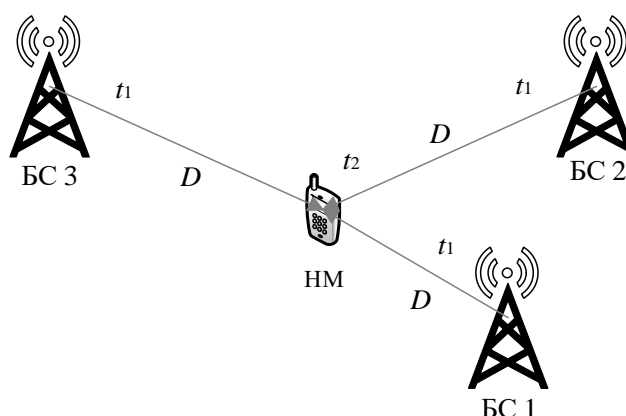


Рис. 4. Определение расстояния по ToF

При определении TDoA БС фиксируют время приема сигналов, приходящих от НМ. Координаты БС, находящихся в сети, должны быть известны заранее и не изменяться со временем. НМ рассылает сигнал для всех БС, которые, в свою очередь, фиксируют время его получения. Далее информация о времени прихода с каждой БС передается на сервер определения МП для расчета разницы во времени прихода, которая затем преобразуется в расчетное положение НМ относительно БС. Недостатком методов ToA, ToF и TDoA является необходимость точной синхронизации по времени между БС, поскольку даже погрешность в несколько наносекунд может привести к ошибкам в измерении. В таблице 1 приведены численные значения оценки точности МП для приведенных ранее методов [11–14].

Таблица 1 – Эффективность методов определения МП

Метод	Точность определения МП, м	Ключевые факторы, влияющие на точность определения МП
АоА	0,2–1,5	Многолучевое распространение, геометрическое расположение БС
RSS	3–5	Многолучевое распространение, геометрическое расположение БС, изменения в помеховой обстановке
ToA	< 0,1	Многолучевое распространение, качество синхронизации по времени между устройствами, стабильность генератора
ToF	1–3	Многолучевое распространение, наличие прямой видимости, пропускная способность канала, качество синхронизации по времени между устройствами, стабильность генератора
TDоА	< 50	Количество и геометрическое расположение БС, многолучевое распространение, наличие условий прямой видимости между устройствами

Позиционирование устройств внутри помещений с использованием технологии nanoLOC

В отличие от описанных выше методов, в SDS-TWR осуществляется расчет двух временных задержек, которые возникают естественным образом при передаче сигнала от одного устройства к другому, – непосредственной задержки сигнала при прохождении сквозь среду и задержки при обработке принимаемого пакета на одном из устройств.

Задержка распространения сигнала при передаче тестового пакета с БС на НМ рассчитывается на основе известных физических законов, так как электромагнитная волна распространяется в пространстве со скоростью света. В свою очередь, задержка обработки зависит от быстродействия устройства, которое принимает, обрабатывает и подготавливает пакет к отправке. Сумма этого времени и есть задержка обработки.

Схема обмена пакетами между БС и НМ в методе SDS-TWR представлена на рисунке 5. Процесс вычисления времени распространения сигнала можно описать следующим образом:

- в первом цикле в момент времени T_{a1} БС отправляет пакет НМ;
- НМ принимает пакет в момент времени T_{t1} и обрабатывает его;
- спустя фиксированное время T_{rep1} НМ отправляет пакет подтверждения БС, при этом фиксируется время приема T_{a2} ;
- во втором цикле НМ отправляет пакет БС в момент времени T_{t2} ;
- БС принимает его в момент времени T_{a3} , обрабатывает и передает обратно спустя время T_{rep2} ;
- в момент времени T_{t3} НМ принимает пакет.

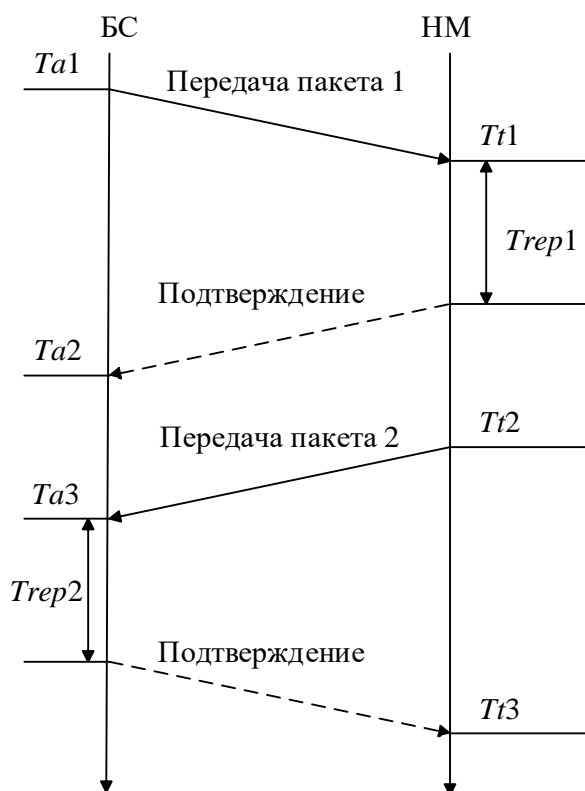


Рис. 5. Схема обмена пакетами между БС и НМ

На основе временных меток для первого цикла формула расчета времени распространения будет выглядеть следующим образом:

$$ToF = \frac{(T_{a2} - T_{a1}) - T_{rep1}}{2},$$

где T_{a2} – время прихода пакета подтверждения; T_{a1} – время отправки пакета от БС к НМ; T_{rep1} – время обработки и отправки пакета от НМ к БС.

Как было указано ранее, метод SDS-TWR позволяет избежать необходимости синхронизации по времени между устройствами при измерении расстояния. Это возможно за счет того, что время прохождения сигнала от БС к НМ измеряется самим НМ: он запускает внутренний таймер только после получения пакета от БС и останавливает его при отправке пакета подтверждения. В пакете подтверждения, передаваемом БС, содержится информация о времени запуска и остановки таймера. Полученные данные о времени используются БС для расчета расстояния между БС и НМ – разница во времени, измеренном БС, и временем таймера, запущенного НМ, равна удвоенному времени распространения сигнала в пространстве, как это указано в формуле выше. Расстояние между устройствами рассчитывается как:

$$d = ToF \cdot c,$$

где d – расстояние между устройствами; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитной волны в пространстве, равная скорости света.

Хотя метод SDS-TWR позволяет обойтись без синхронизации часов между устройствами, он предъявляет жесткие требования к стабильности тактовых генераторов внутри каждого из них. Эта проблема возникает из-за большой разницы во времени между передачей, приемом и обработкой сигнала от БС к НМ и самим временем распространения сигнала в окружающей среде. Обработка пакетов на устройстве занимает сотни микросекунд, а время распространения сигнала между устройствами составляет несколько десятков наносекунд. При таких условиях погрешность измерения ToF, возникающая из-за тактового генератора, не должна превышать величину в несколько наносекунд.

В системе nanoLOC аппаратная часть приемопередатчика работает по методу SDS-TWR и обеспечивает точную фиксацию времени обработки пакетов, что снижает влияние управляющего микроконтроллера на точность измерений. Благодаря применению SDS-TWR достигается высокая точность определения расстояний (до 1 м) при низкой стоимости оборудования (за счет использования менее стабильных кристаллов). Кроме того, применение ЛЧМ в nanoLOC повышает помехоустойчивость и надежность передачи данных, что делает эту технологию эффективной для беспроводных локальных сетей с несколькими каналами и в условиях сложной радиочастотной обстановки. В совокупности SDS-TWR в nanoLOC обеспечивает надежное и точное позиционирование объектов без необходимости жесткой временной синхронизации между узлами, что расширяет возможности применения технологии в различных прикладных задачах.

Применение метода SDS-TWR в системах nanoLOC может быть реализовано при построении беспроводной локальной сети (рисунок 6) с использованием USB-TCP-конвертером (*аббр. от англ. Universal Serial Bus-Transmission Control Protocol* – протокол управления передачей данных по универсальной последовательной шине).

В процессе функционирования системы беспроводной локальной сети БС и НМ обмениваются между собой пакетами по методу SDS-TWR с целью определения расстояния от станции до модуля. БС выполняет функцию сбора измеренных значений от НМ и БС 1–4, которые служат в качестве опорных точек (ОБС – опорных БС). Затем на основе принятых значений БС производит расчет МП НМ, параллельно передавая его координаты на персональный компьютер (ПК). На ПК с помощью демонстрационного приложения происходит визуализация МП НМ относительно БС. Метод SDS-TWR, применяемый в системе nanoLOC для определения МП внутри помещений, отличается от глобальных спутниковых систем позиционирования (GPS / ГЛОНАСС) тем, что не требует жесткой временной синхронизации между узлами и эффективно работает в условиях, где спутниковый сигнал ослаблен или отсутствует.

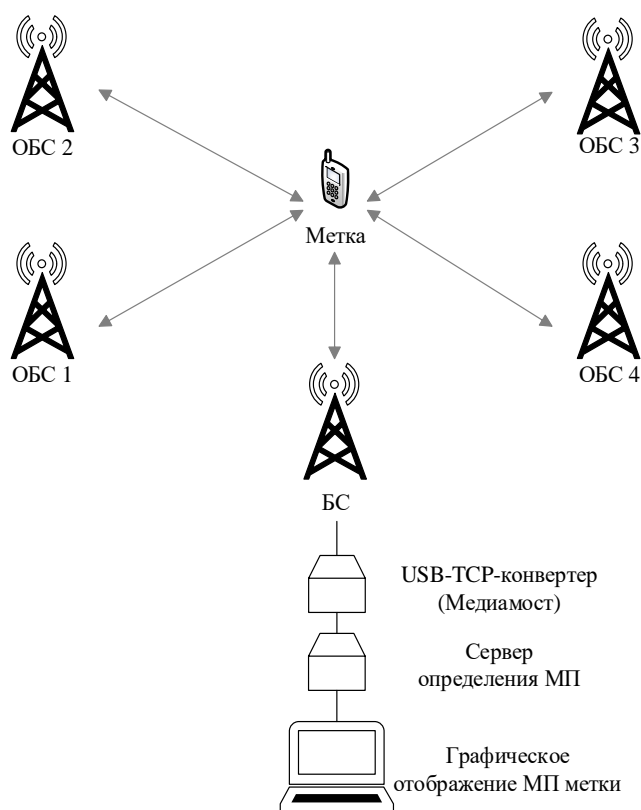


Рис. 6. Общая схема взаимодействия компонентов беспроводной локальной сети

Сравним метод SDS-TWR в системе nanoLOC со следующими известными технологиями беспроводных локальных сетей:

- Wi-Fi RTT (*аббр. от англ. Round Trip Time* – время двойного оборота);
- BLE (*аббр. от англ. Bluetooth Low Energy* – технология Bluetooth с низким энергопотреблением);
- RFID;
- сверхширокополосные технологии (UWB, *аббр. от англ. Ultra-Wide Band*);
- технологии на основе сотовой связи – GSM (*аббр. от англ. Global System for Mobile Communications* – глобальная система для мобильной связи) и CDMA (*аббр. от англ. Code Division Multiple Access* – множественный доступ с кодовым разделением).

В отличие от технологии Wi-Fi RTT [20], которая требует поддержки точного измерения времени (FTM, *аббр. от англ. Fine Timing Measurement*) и определенных версий операционных систем, nanoLOC использует автономную архитектуру, не зависящую от внешней инфраструктуры, что позволяет развертывать систему в закрытых помещениях без доступа к интернету.

В сравнении с технологиями на основе BLE, использующими RSS [21], nanoLOC демонстрирует существенно меньшую зависимость от окружающих помех благодаря применению ЛЧМ. Это выгодно отличает ее от BLE-систем, где точность позиционирования часто падает ниже 3 м из-за колебаний уровня сигнала. Кроме того, nanoLOC интегрирует функцию измерения расстояния непосредственно в процесс передачи данных, не требуя дополнительных энер-

гозатрат, тогда как активные BLE-маяки нуждаются в периодической замене батарей.

От UWB-систем [22] nanoLOC отличается возможностью работы при большом количестве препятствий и независимостью от условий помещения. Если UWB-решения обеспечивают сантиметровую точность, но требуют прямой видимости, то рабочий диапазон исходящих сигналов системы nanoLOC позволяет определять МП объектов за стенами или перегородками, хотя с некоторым снижением точности. В отличие от UWB-технологий, которые также используют временные методы, nanoLOC применяет менее стабильные кварцевые генераторы за счет алгоритмической компенсации погрешностей SDS-TWR, что снижает стоимость устройств при сохранении точности на уровне 1–2 м.

Важное отличие SDS-TWR от RFID-систем [23] заключается в двустороннем взаимодействии – узлы могут выступать как приемниками, так и передатчиками. В то же время пассивные RFID-метки полностью зависят от энергии считывателей. Это позволяет создавать децентрализованные сети позиционирования, где каждое устройство способно определять расстояния до соседних узлов.

Программно-аппаратное обеспечение комплекта nanoPAN 5375 технологии nanoLOC

Комплект nanoPAN 5375 (рисунок 7) предназначен для создания прототипов и разработки беспроводных приложений с функцией определения дальности и МП на основе радиочастотного модуля nanoPAN 5375. В комплект входит обширный набор приложений и средств разработки, позволяющий сразу же приступить к написанию собственных приложений для набора плат nanoPAN DK, входящих в комплект [24].



Рис. 7. Комплект nanoPAN 5375

Комплект nanoPAN 5375 включает четыре основных компонента:

- платы nanoPAN 5375, выполняющие роль НМ, БС и сервера определения МП;
- дипольные всенаправленные антенны с рабочей частотой 2,4 ГГц;
- источники питания с напряжением 5 В, а также кабель для питания и передачи данных;
- внутрисхемный отладчик-программатор с фоновой отладкой и кабель-переходник для непосредственного подключения программатора к платам nanoPAN 5375.

Отладочная плата из комплекта nanoPAN 5375 включает в себя компоненты, обеспечивающие радиосвязь, управление, а также сбор и передачу данных. Эта часть платы является центральной для всех функций, связанных с беспроводной передачей информации, обработкой сигналов и взаимодействием с внешней средой.

Основным элементом комплекта является RF-модуль nanoPAN 5375, который содержит все необходимые компоненты для работы в радиодиапазоне. В его состав входят трансивер nanoLOC TRX, усилитель мощности с выходной мощностью 20 дБм, балансный преобразователь, полосовой фильтр и кварцевые резонаторы, обеспечивающие стабильную работу устройства. Важным элементом синхронизации выступает внешний кварцевый генератор на частоту 7,3728 МГц, обеспечивающий точную тактовую частоту для модуля и микроконтроллера. Управление устройством осуществляется с помощью микроконтроллера ATmega1284P, который поддерживает отладку по стандартизированному интерфейсу JTAG (*аббр. от англ. Joint Test Action Group*) и способен работать с производительностью до 20 MIPS при тактовой частоте 20 МГц. Также на плате присутствуют два сенсора. Первый – цифровой температурный датчик с последовательным периферийным интерфейсом SPI (*аббр. от англ. Serial Peripheral Interface*), отличающийся низким энергопотреблением и высокой точностью, что делает его подходящим для энергосберегающих систем. Второй – микроэлектромеханический акселерометр, измеряющий ускорение по трем осям и выдающий цифровой сигнал, что позволяет использовать его для трекинга движений и ориентации. Индикация активности обеспечивается двумя светодиодами:

- RX LED загорается, когда модуль готов к приему или активен;
- TX LED указывает на передачу данных модулем.

Область интерфейса пользователя отладочной платы nanoPAN DK Board предназначена для непосредственного взаимодействия разработчика с платой в процессе тестирования, отладки и демонстрации работы встроенного программного обеспечения. Эта зона предоставляет базовые средства управления и индикации, необходимые для оперативной настройки и анализа работы устройства.

В состав платы входят программируемые кнопки, которые позволяют замыкать определенные точки ввода-вывода (Input / Output) на «землю». Это дает возможность инициировать различные события в прошивке, например, начало передачи, запуск измерений или изменение состояния устройства. Также в дан-

ной группе кнопок предусмотрен переключатель сброса, который перезагружает микроконтроллер, обеспечивая быстрый возврат к исходному состоянию без необходимости отключения питания. Для визуальной обратной связи предусмотрены шесть светодиодов, которые могут быть запрограммированы пользователем. Эти индикаторы активности отображают текущее состояние системы, помогают отслеживать выполнение операций, прием и передачу данных, а также могут служить для отладки алгоритмов, реагируя на различные условия в приложении. Дополнительно в этой части платы расположены тестовые точки – контактные площадки для подключения измерительного оборудования, предназначенные исключительно для измерений и тестирования и не использующиеся при обычной эксплуатации, но играющие важную роль в процессе отладки и мониторинга электрических сигналов платы.

Область питания отладочной платы отвечает за обеспечение энергией всех компонентов устройства, включая радиомодуль, микроконтроллер и периферию. Эта часть платы включает в себя как средства подачи питания, так и элементы индикации его состояния, обеспечивая стабильную и безопасную работу всей системы. Ключевым элементом этой зоны является разъем для подключения литий-ионного аккумулятора, который позволяет использовать перезаряжаемый источник питания, что может быть необходимо при проведении измерений вне лабораторных помещений. Через этот разъем аккумулятор подключается к внутренним цепям питания и зарядки, что обеспечивает автономную работу устройства. Для ручного управления подачей напряжения используется переключатель питания, который отключает питание, поступающее через стандартный цилиндрический разъем или через источник JP1. Однако стоит отметить, что он не отключает питание, поступающее через разъем отладчика JTAG, – это важно учитывать при использовании внешних средств отладки. Визуальный контроль за состоянием питания осуществляется с помощью нескольких светодиодов:

- PWR LED загорается, когда питание на плату подается;
- Charging LED сигнализирует об активной зарядке подключенного литий-ионного аккумулятора;
- USB LED показывает наличие подключения к USB-порту компьютера;
- USB RX / TX LEDs индицируют процесс передачи (красный светодиод TX) и приема данных (желтый светодиод RX) по USB-интерфейсу, позволяя отслеживать обмен информацией между платой и ПК.

Кроме того, в данной области расположен кнопочный переключатель сброса, позволяющий вручную перезагрузить микроконтроллер, не отключая питание.

Также плата nanoPAN 5375 оснащена специальной областью для подключения внешних модулей и периферии, что значительно расширяет ее функциональные возможности. Эта часть платы предназначена для интеграции дополнительных устройств, таких как дисплеи, сенсоры или другие интерфейсные модули, которые могут использоваться в рамках разрабатываемых или демонстрационных приложений. Ключевыми элементами этой области являются два типа разъемов:

– разъем расширения (Expansion Point Connector) обеспечивает возможность подключения внешней платы расширения к отладочной плате, например, к нему может быть подсоединен модуль с LCD-дисплеем или другой пользовательский интерфейс; он дает разработчику гибкость при проектировании и тестировании новых функций, которые выходят за рамки базовой конфигурации;

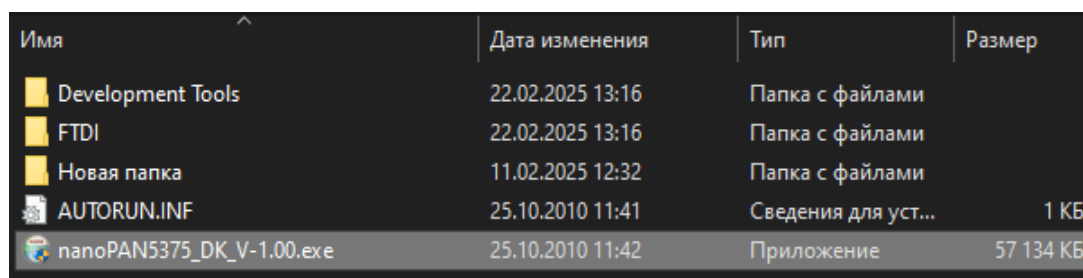
– SPI-разъем – универсальный интерфейс, который может использоваться как для подключения расширений, так и в целях отладки и тестирования; интерфейс широко используется во встроенных системах, что делает этот разъем удобным инструментом для взаимодействия с различными микросхемами и периферийными устройствами.

Помимо перечисленного выше оборудования, комплект nanoPAN 5375 включает в себя программное обеспечение (ПО), хранящееся на компакт-диске и содержащее nanoLOC Driver, устанавливаемый отдельно для операционной системы. Этот драйвер предоставляет набор правил и протоколов, который позволяет разным программам взаимодействовать друг с другом через интерфейс API (*аббр. от англ. Application Programming Interface* – интерфейс программирования приложения) и отправляет сообщения MAC-уровня (*аббр. от англ. Media Access Control* – контроль доступа к среде) на чип nanoLOC через последовательный интерфейс SPI.

Для практической оценки возможностей nanoPAN 5375, а также для разработки и отладки пользовательских решений в области беспроводной связи и позиционирования в состав комплекта входит обширный набор демонстрационных приложений и прошивок. Эти программные средства позволяют протестировать ключевые функции технологии nanoLOC, такие как определение расстояний, локализация объектов, обмен данными между устройствами, анализ трафика и построение простейших сетевых взаимодействий.

Для демонстрационных приложений, входящих в комплект, требуется операционная система Microsoft Windows XP или более поздних версий с процессором Pentium 4 с тактовой частотой 1,8 ГГц или выше. В зависимости от демонстрационного приложения требуется один или два ПК или, в идеале, ноутбука, каждый из которых должен иметь свободный USB-порт. Для полной установки всего ПО, входящего в комплект, требуется 414 Мб свободного места.

Установка ПО nanoPAN 5375 начинается с запуска мастера установки. Для этого необходимо запустить файл nanoPAN5375_DK_V-1.00.exe (рисунок 8). В появившемся окне мастера установки пользователю будет предложено ознакомиться с лицензионным соглашением и принять его.



Имя	Дата изменения	Тип	Размер
Development Tools	22.02.2025 13:16	Папка с файлами	
FTDI	22.02.2025 13:16	Папка с файлами	
Новая папка	11.02.2025 12:32	Папка с файлами	
AUTORUN.INF	25.10.2010 11:41	Сведения для уст...	1 КБ
nanoPAN5375_DK_V-1.00.exe	25.10.2010 11:42	Приложение	57 134 КБ

Рис. 8. Начало процесса установки системы nanoPAN 5375

На следующем этапе пользователю предлагается выбрать способ установки ПО – полный (Full) или персонализированный (Customized). При втором варианте у пользователя появляется возможность собственноручно выбрать компоненты, которые будут установлены на ПК. К ним относятся файлы конфигурации и исходный код, а также файлы документации и инструкция по эксплуатации из комплекта nanoPAN 5375. После выбора варианта установки следует нажать кнопку «Next». Отметим, что в случае отмены установки HEX-файлов, выбираемых в окне (рисунок 9), у пользователя не будет возможности работать с заранее созданными файлами конфигурации для НМ, БС и сервера определения МП.

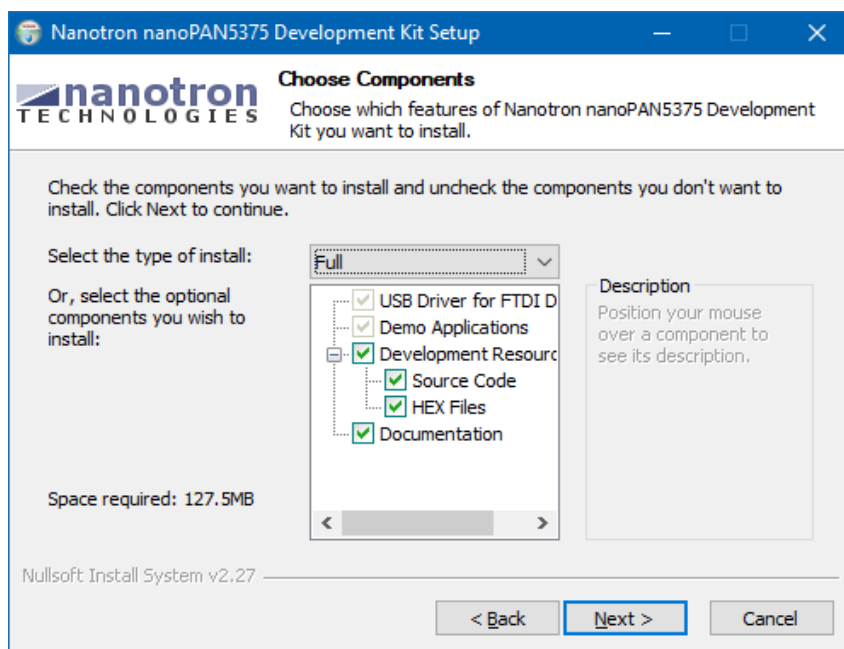


Рис. 9. Окно выбора компонентов

Далее следует выбрать путь установки. По умолчанию это C:\Program Files (x64)\nanotron\nanoPAN5375_DK\, однако пользователь может изменить расположение устанавливаемых файлов по своему усмотрению. При нажатии на кнопку «Install» запустится процесс установки, и далее на экране появится уведомление о завершении процесса установки.

Необходимо отметить, что для корректной работы комплекта nanoPAN5375 может потребоваться установка дополнительного драйвера. Для этого в расположении \FTDI\Win2000 WinXP VISTA WINDOWS7 необходимо запустить файл CDM20600.exe (рисунок 10).


Имя	Дата изменения	Тип	Размер
 CDM20600.exe	05.03.2010 13:07	Приложение	2 291 КБ

Рис. 10. Драйвер CDM20600

CDM20600.exe – это установочный файл драйвера для USB-устройств на базе чипов FTDI. Данный драйвер обеспечивает распознавание и взаимодействие компьютера с устройствами из набора nanoPAN5375 через виртуальный

COM-порт. Без этого драйвера дальнейшая работа с комплектом nanoPAN5375 будет невозможна.

Следующим этапом подготовки для работы с комплектом nanoPAN5375 является установка специализированных средств для компиляции и сборки проектов. Первое из таких средств – WinAVR – бесплатный набор инструментов для разработки программного обеспечения на языке C/C++ под микроконтроллеры семейства AVR от Atmel, предназначенный для работы в среде Windows, включающий в себя компилятор GNU GCC для AVR, набор утилит, оболочку для упрощения работы с командной строкой (MFile), а также интегрированные средства для прошивки микроконтроллеров через программаторы и отладочные платы. WinAVR предоставляет полный цикл разработки: от написания кода и компиляции до загрузки прошивки в память микроконтроллера, поддерживая такие этапы, как оптимизация и генерация HEX-файлов. В папке «Development Tools» (рисунок 11) необходимо запустить файл «WinAVR-20090313-install.exe.» (рисунок 12).

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
Development Tools	22.02.2025 13:16	Папка с файлами	
FTDI	22.02.2025 13:16	Папка с файлами	
Новая папка	11.02.2025 12:32	Папка с файлами	
AUTORUN.INF	25.10.2010 11:41	Сведения для уст...	1 КБ
nanoPAN5375_DK_V-1.00.exe	25.10.2010 11:42	Приложение	57 134 КБ

Рис. 11. Расположение файла установки средств WinAVR-20090313

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
AVRStudio4.18SP2.exe	07.09.2010 16:47	Приложение	28 765 КБ
AvrStudio4Setup.exe	07.09.2010 16:46	Приложение	119 306 КБ
WinAVR-20090313-install.exe	10.11.2009 17:35	Приложение	22 094 КБ

Рис. 12. Запуск файла установки WinAVR-20090313

После запуска мастера установки, принятия лицензионного соглашения и выбора пути расположения устанавливаемых файлов пользователь должен выбрать параметры установки дополнительных файлов (рисунок 13). По умолчанию все файлы будут добавлены в список.

Для разработки собственных приложений и прошивок образов файлов на платы nanoPAN пользователю может потребоваться установить AVR Studio. AVR Studio – это основанная на Visual Studio бесплатная проприетарная интегрированная среда разработки (IDE, *аббр. от англ.* Integrated Development Environment) приложений для 8- и 32-битных микроконтроллеров семейства AVR и 32-битных микроконтроллеров семейства ARM от компании Atmel, работающая в операционных системах Windows NT/2000/XP/Vista/7/8/10. Atmel Studio содержит компилятор GNU C/C++ и эмулятор, позволяющий отладить выполнение программы без загрузки в микроконтроллер.

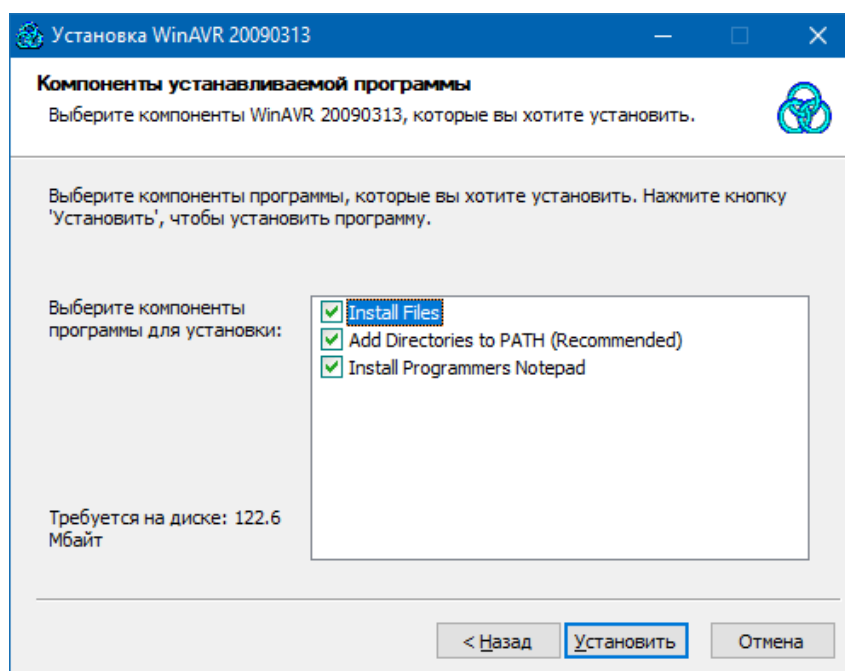


Рис. 13. Окно выбора дополнительных устанавливаемых компонентов

Для запуска мастера установки в той же папке следует запустить файл AvrStudio4Setup.exe (рисунок 14). При установке AVR Studio необходимость выбора дополнительных настроек и функций отсутствует.

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
AVRStudio4.18SP2.exe	07.09.2010 16:47	Приложение	28 765 КБ
AvrStudio4Setup.exe	07.09.2010 16:46	Приложение	119 306 КБ
WinAVR-20090313-install.exe	10.11.2009 17:35	Приложение	22 094 КБ

Рис. 14. Запуск установки AvrStudio

После установки всех описанных выше утилит и дополнительных пакетов подготовка к началу работы с комплектом nanoPAN5375 завершена.

Далее рассмотрим начало работы с комплектом nanoPAN5375, опишем шаги для первоначального подключения и настройки НМ, БС и сервера определения МП, а также аппаратные особенности при работе с комплектом.

Порядок конфигурации сценариев определения МП внутри помещений с настройкой модулей nanoLOC

После успешной установки ПО, описанного выше, можно переходить к непосредственной настройке аппаратной части комплекта nanoPAN5375. При работе комплекта с целью определения МП каждая входящая в него плата должна выполнять строго определенную функцию. Для этого перед началом работы с помощью установленного ранее ПО необходимо загрузить прошивку с нужным файлом конфигурации на плату.

Загрузка конфигурационных HEX-файлов начинается с подключения платы из комплекта к программатору и запуска ПО AVR Studio. Для установки соединения на панели инструментов программы следует нажать кнопку «Connect» и в появившемся окне указать тип подключаемой к программатору платы. На рисунке 15 показано окно подключения с необходимыми настройками, которые следует установить. При нажатии на кнопку «Connect» произойдет подключение программатора к ПК.

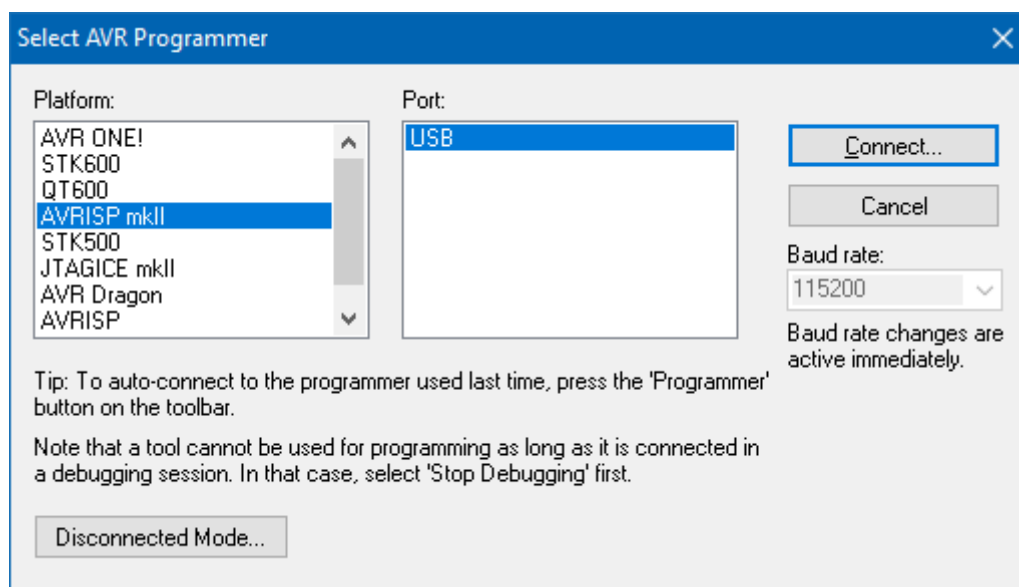


Рис. 15. Подключение программатора с помощью AVR Studio

Файлы конфигурации располагаются в той же папке, в которую были установлены компоненты, описанные выше. В зависимости от выбранного файла, каждая плата может выполнять следующие роли в организуемой сети: БС, НМ, ОБС.

После успешной загрузки HEX-файлов для каждой платы можно перейти к разворачиванию системы. В соответствии со схемой сети, приведенной на рисунке 6, плата, выполняющая роль БС должна быть подключена к одному из USB-портов ПК. В свою очередь, на ПК должны быть открыты исходные файлы сервера определения МП и USB-TCP-конвертера (рисунок 16).

Для организации сети в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 6, следует предпринять следующие действия: подключить плату, выполняющую роль базовой станции к ПК и убедиться, что на ней горят светодиоды «PWR» и «USB»; затем в рабочей папке программы, расположенной в C:\Program Files (x86)\nanotron\nanoPAN5375_DK\EXE\Location следует найти и последовательно запустить файлы «MediaBridge.exe» и «LEServer.exe» (рисунок 17).

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
LECoreDll	02.04.2025 10:25	Папка с файлами	
Original Data Files	02.04.2025 10:25	Папка с файлами	
anchors.dat	23.02.2010 16:44	Файл "DAT"	1 КБ
LEServer.exe	21.09.2010 10:49	Приложение	601 КБ
leservercore.dll	09.07.2010 13:46	Расширение при...	138 КБ
libgcc_s_dw2-1.dll	01.06.2010 15:25	Расширение при...	106 КБ
libstdc++-6.dll	01.06.2010 15:25	Расширение при...	860 КБ
LocationClient.exe	01.06.2010 16:14	Приложение	27 КБ
LocationGUI.exe	07.09.2010 15:13	Приложение	559 КБ
MediaBridge.exe	21.09.2010 17:57	Приложение	308 КБ
mingwm10.dll	27.12.2007 19:23	Расширение при...	16 КБ
nanotron.ico	24.02.2010 14:55	Значок	1 КБ
QtCore4.dll	08.12.2009 12:27	Расширение при...	2 667 КБ
QtGui4.dll	22.06.2009 16:51	Расширение при...	11 002 КБ
QtNetwork4.dll	22.06.2009 16:42	Расширение при...	1 348 КБ

Рис. 16. Запуск файлов медиамоста и сервера определения МП

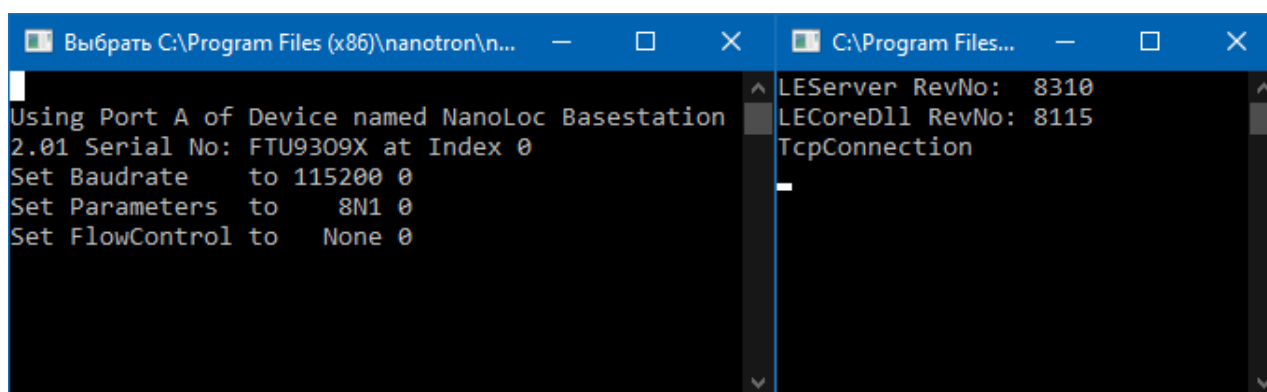


Рис. 17. Консоль медиамоста и сервера определения МП

Файл «MediaBridge.exe» запускает медиамост, без которого передача координат НМ и отображение его МП невозможно. Важно отметить, что установленная скорость обмена через последовательный порт ПК должна соответствовать скорости, определяемой медиамостом. Необходимая скорость определяется автоматически и выводится в окне медиамоста. В описываемом случае установленная скорость обмена равна 115 200 бод. Скорость последовательного порта изменяется на ПК через панель управления. Для этого необходимо открыть диспетчер устройств и найти последовательный порт, к которому подключена БС. Далее в свойствах последовательного порта необходимо установить скорость, определенную медиамостом (рисунок 18). Если подключение установлено и медиамост работает корректно, в окне медиамоста появится информация о серийном номере подключенного устройства, а также скорость обмена данными между платой и ПК.

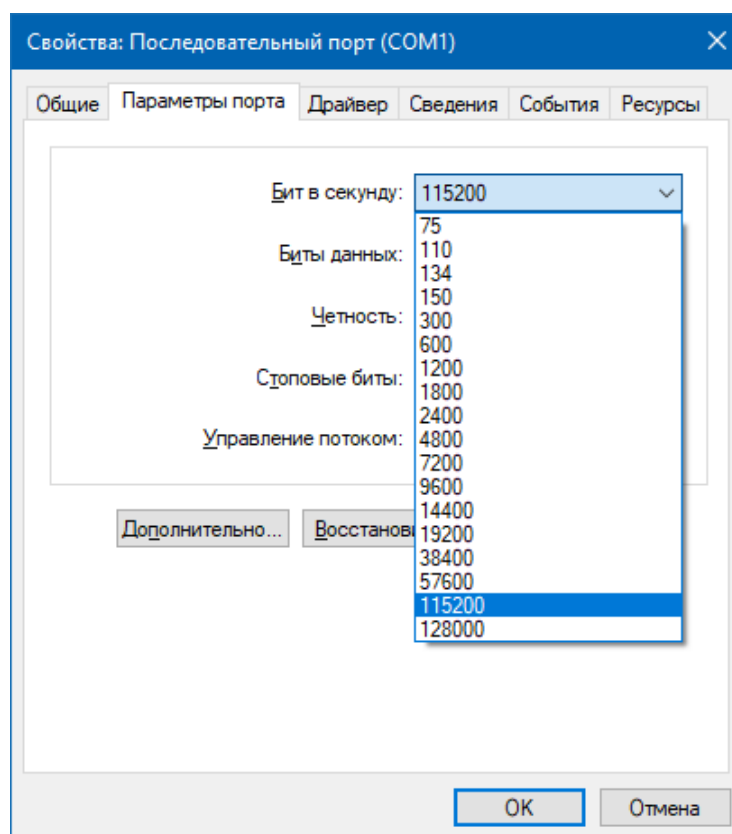


Рис. 18. Определение скорости обмена через последовательный порт

Файл «LEServer.exe» играет центральную роль в вычислении координат мобильных объектов на основе данных, полученных от БС и НМ. Также сервер обеспечивает отображение рассчитанных координат и перемещений объектов на карте или в графическом интерфейсе, предоставляя оператору наглядную информацию о текущем положении и маршрутах объектов.

На рисунке 19 представлен алгоритм конфигурации сценариев определения МП.

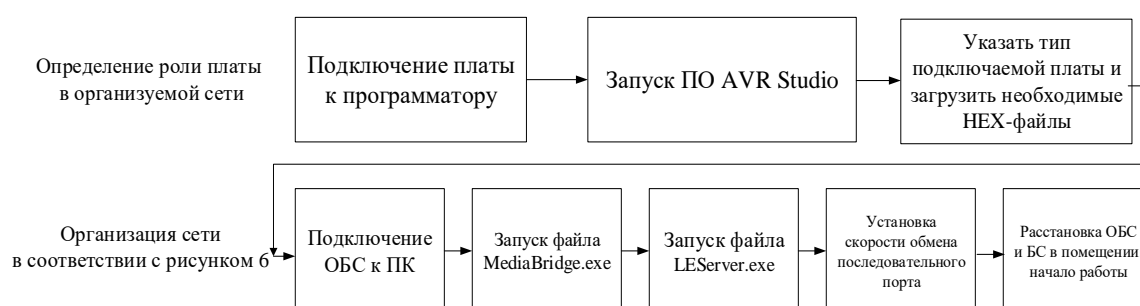


Рис. 19. Алгоритм конфигурации сценариев определения МП

Экспериментальная оценка точности позиционирования устройств внутри помещений с использованием технологии nanoLOC

Проведение эксперимента начинается с определения ОБС, поскольку от степени приближения устанавливаемых значений к реальным зависит точность определения МП метки. Это связано с тем, что координаты ОБС задаются

вручную через приложение «LocationGUI.exe», необходимое для непосредственного отображения МП НМ в реальном времени.

Для экспериментальной оценки было выбрано помещение размером 7×8 м. Положение ОБС в пространстве определяется возможностью подключения плат из комплекта nanoPAN5375 к сети электропитания. При проведении эксперимента в помещении были расположены четыре платы из комплекта nanoPAN5375, выполнявшие функцию ОБС. На рисунке 20 показано расположение ОБС в помещении СПбГУТ, а на рисунке 21 приведен план помещения.

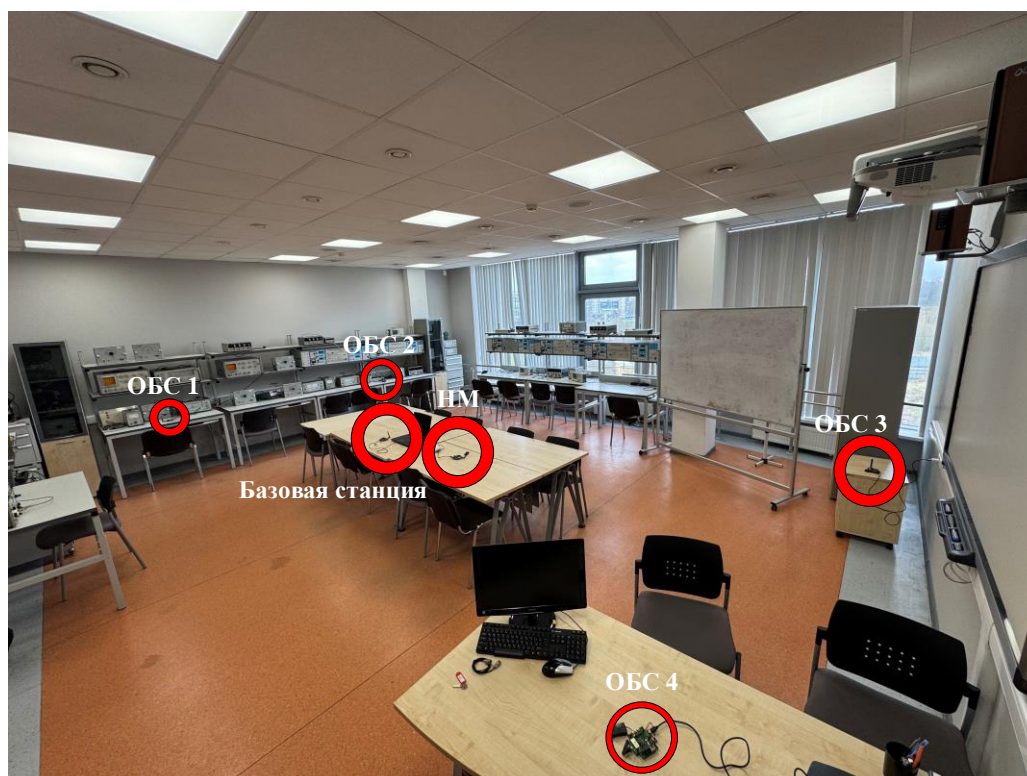


Рис. 20. Расположение системы nanoLOC при проведении эксперимента

Стоит отметить, что для проведения эксперимента необходимо заранее выбрать так называемую «нулевую» ОБС, для того чтобы определить координаты остальных БС и позднее внести их в приложение «LocationGUI.exe». В описываемом случае точкой отсчета координат ОБС является ОБС 1. Для всех остальных ОБС расстояние по оси X и Y указывается в метрах.

Необходимость определения начальных координат ОБС с точностью до нескольких дециметров обусловлена характеристиками технологии nanoLOC, заявленная точность которой составляет не более 2 м в помещении (https://nanotron.com/assets/pdf/support/productbriefs/Transceivers/PB_nanoLOC_1.1.pdf).

Для достижения такой точности в процессе определения координат ОБС использовался лазерный дальномер с погрешностью ± 1 мм. При этом при проведении процедуры калибровки положение дальномера по оси Z не изменялось со временем.

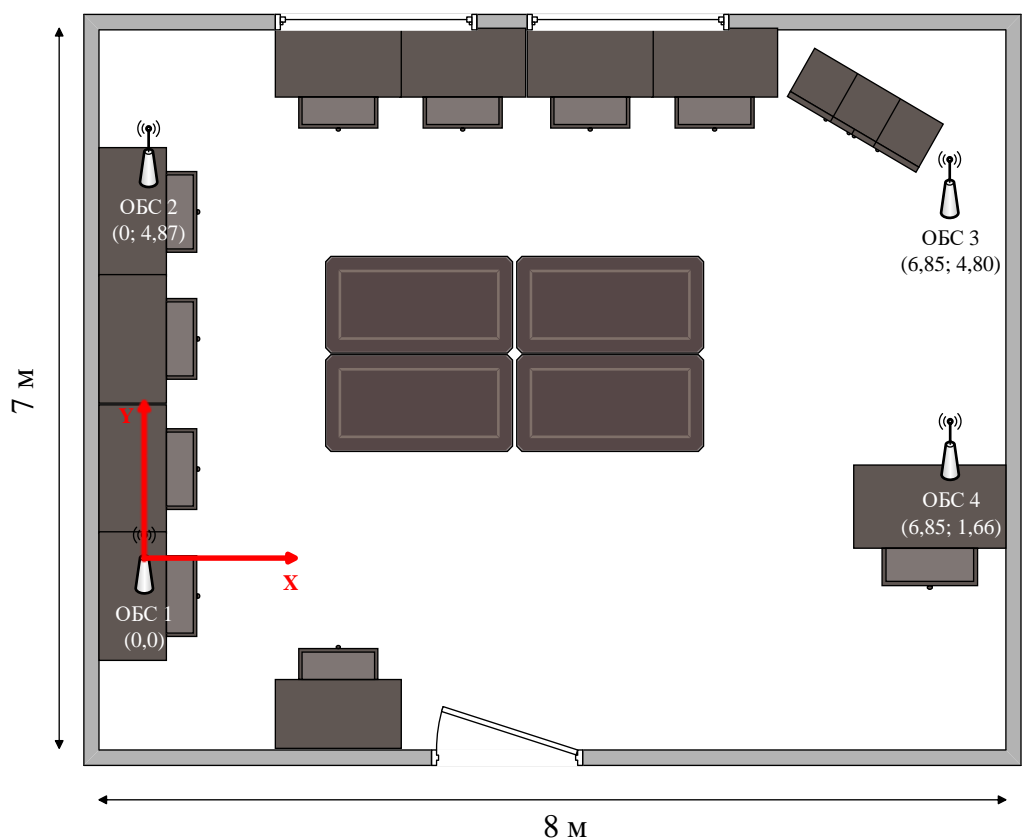


Рис. 21. План помещения, в котором проводился эксперимент

После того как все ОБС установлены на свои места, следует перейти к подключению БС к ПК. Ранее были запущены файлы медиамоста и сервера определения МП. Далее необходимо запустить приложение «LocationGUI.exe» (рисунок 22).

	libgcc_s_dw2-1.dll	01.06.2010 15:25	Расширение при...	106 КБ
	libstdc++-6.dll	01.06.2010 15:25	Расширение при...	860 КБ
	LocationClient.exe	01.06.2010 16:14	Приложение	27 КБ
	LocationGUI.exe	07.09.2010 15:13	Приложение	559 КБ
	MediaBridge.exe	21.09.2010 17:57	Приложение	308 КБ
	mingwm10.dll	27.12.2007 19:23	Расширение при...	16 КБ

Рис. 22. Запуск файлов приложения «LocationGUI.exe»

Установка необходимых параметров для проведения эксперимента производится в рабочем окне приложения (рисунок 23) с помощью нажатия на кнопку «Settings», а затем «Anchor Tags» (рисунок 24).

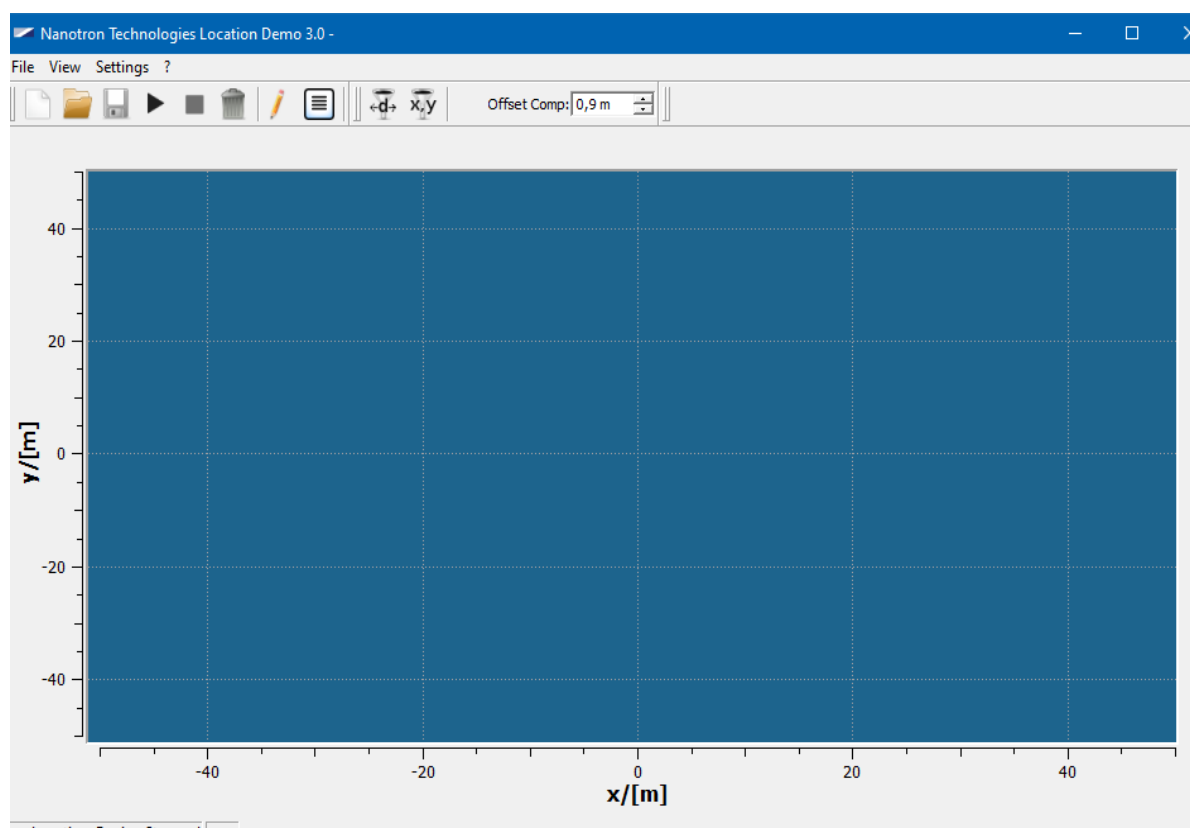


Рис. 23. Рабочее окно приложения «LocationGUI.exe»

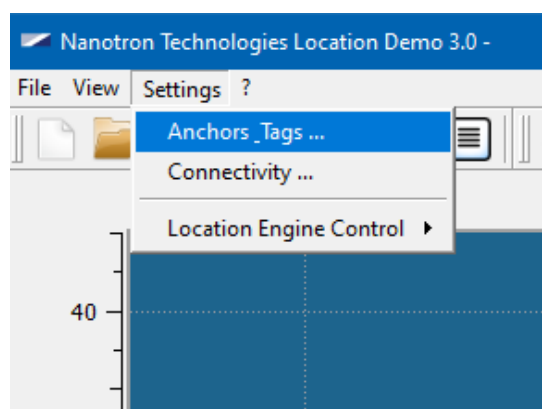


Рис. 24. Переход к настройкам в приложении «LocationGUI.exe»

Приведем описание возможных настроек, устанавливаемых в приложении «LocationGUI.exe» (рисунок 25):

Location Engine. Существует два варианта работы приложения «LocationGUI.exe»: 1) «SDS-TWR (File Mode)» – в качестве входных данных для визуализации выбирается заранее сохраненный файл, в котором приведены координаты НМ; этот режим служит исключительно для визуализации МП НМ и не направлен на работу в реальном времени; 2) «SDS-TWR (Socket Mode)» – в этом режиме процедура определения МП НМ происходит в реальном времени, на основе координат НМ, полученных от БС; для проведения описанного выше эксперимента использовался этот режим.

Data Source. Данное поле содержит в себе два пункта, значения для которых устанавливаются по умолчанию: «Server Address» принимает значение 127.0.0.1, пункт «Port» – 6868.

Penalties. В процессе определения МП НМ координаты НМ могут устанавливаться с отклонениями в связи с многолучевыми эффектами, потерями при распространении сигнала, наличием помех от соседних устройств. Для компенсации этих отклонений в приложении существует опция, позволяющая компенсировать разброс значений координат и сделать отображение траектории движения НМ при проведении эксперимента более плавным.

Axis Limits. Для удобства работы с приложением существует возможность ввести ограничения по оси X и Y для более приемлемого масштабирования.

Background Image. Настройка служит для загрузки фото помещения и отображения на нем МП НМ. Эта функция удобна при работе в больших пространствах, а также при возможности проведения съемки исследуемого помещения с высоты.

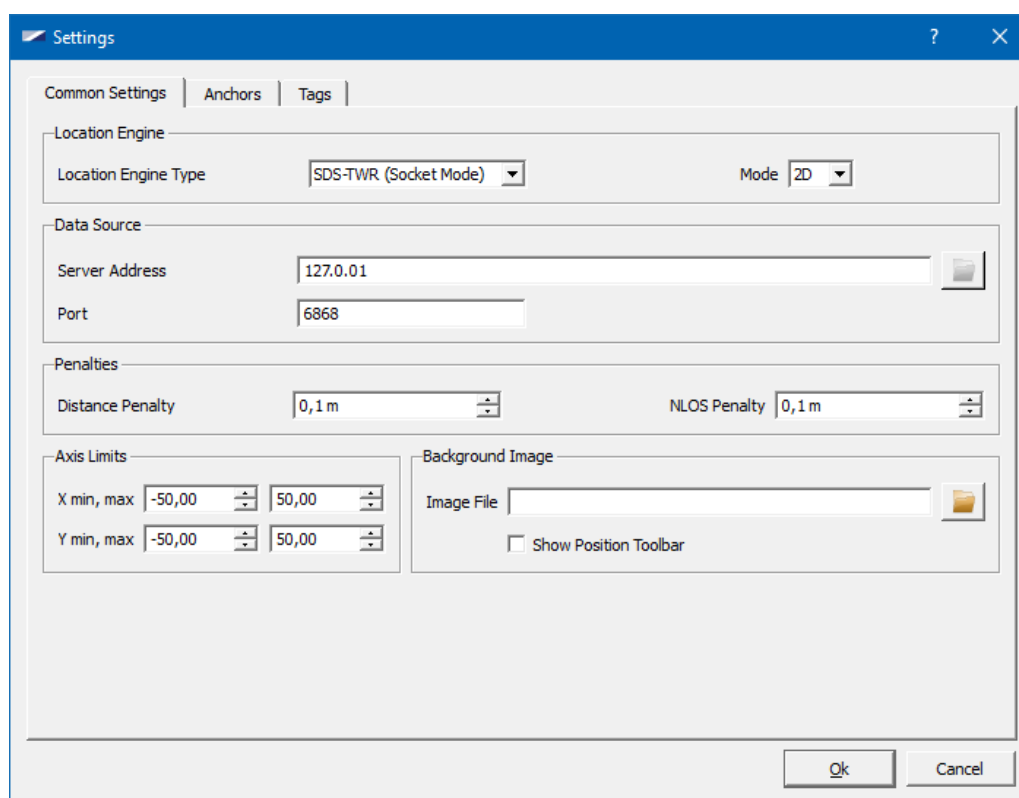
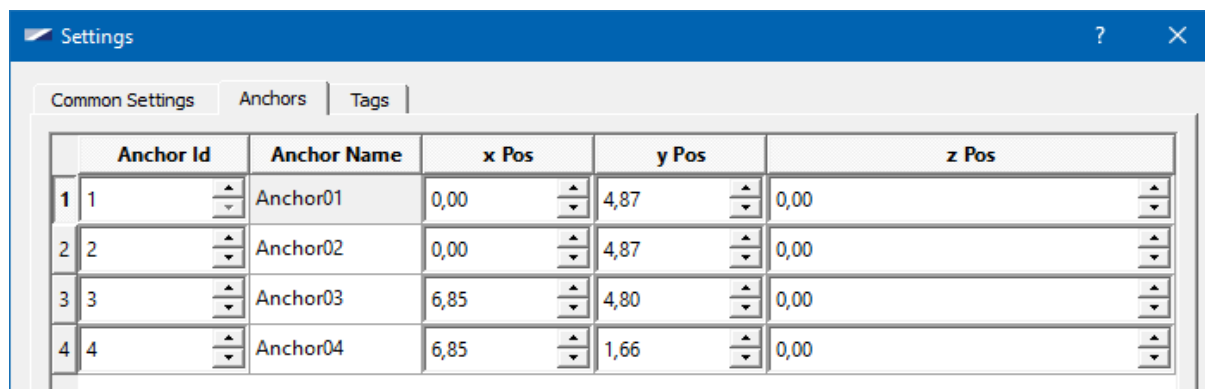


Рис. 25. Окно общих настроек приложения «LocationGUI.exe»

Далее в соответствии с планом расположения БС (рисунок 21) необходимо указать координаты БС в окне «Anchors» (рисунок 26). Стоит отметить, что в приложении «LocationGUI.exe» есть возможность указать координаты еще и по оси Z , однако в описываемом случае БС находились на одной высоте, соответственно разница по высоте между ними была равна нулю. По нажатию на кнопку «ОК» установленные настройки будут приняты.



	Anchor Id	Anchor Name	x Pos	y Pos	z Pos
1	1	Anchor01	0,00	4,87	0,00
2	2	Anchor02	0,00	4,87	0,00
3	3	Anchor03	6,85	4,80	0,00
4	4	Anchor04	6,85	1,66	0,00

Рис. 26. Определение координат БС в приложении «LocationGUI.exe»

На главном экране по нажатию на кнопку «Start Data Aquisition» запустится процесс сбора координат и отображение МП НМ. Маршрут движения при проведении эксперимента показан на рисунке 27. Движение начинается рядом с ОБС 1 и ведется по часовой стрелке с целью обойти все помещение. Зелеными точками обозначены места, в которых совершалась остановка, при этом сбор данных не прекращался. Остановки делались для накопления большего количества измерений и последующей оценки отклонения отображаемого МП НМ и его реального МП.

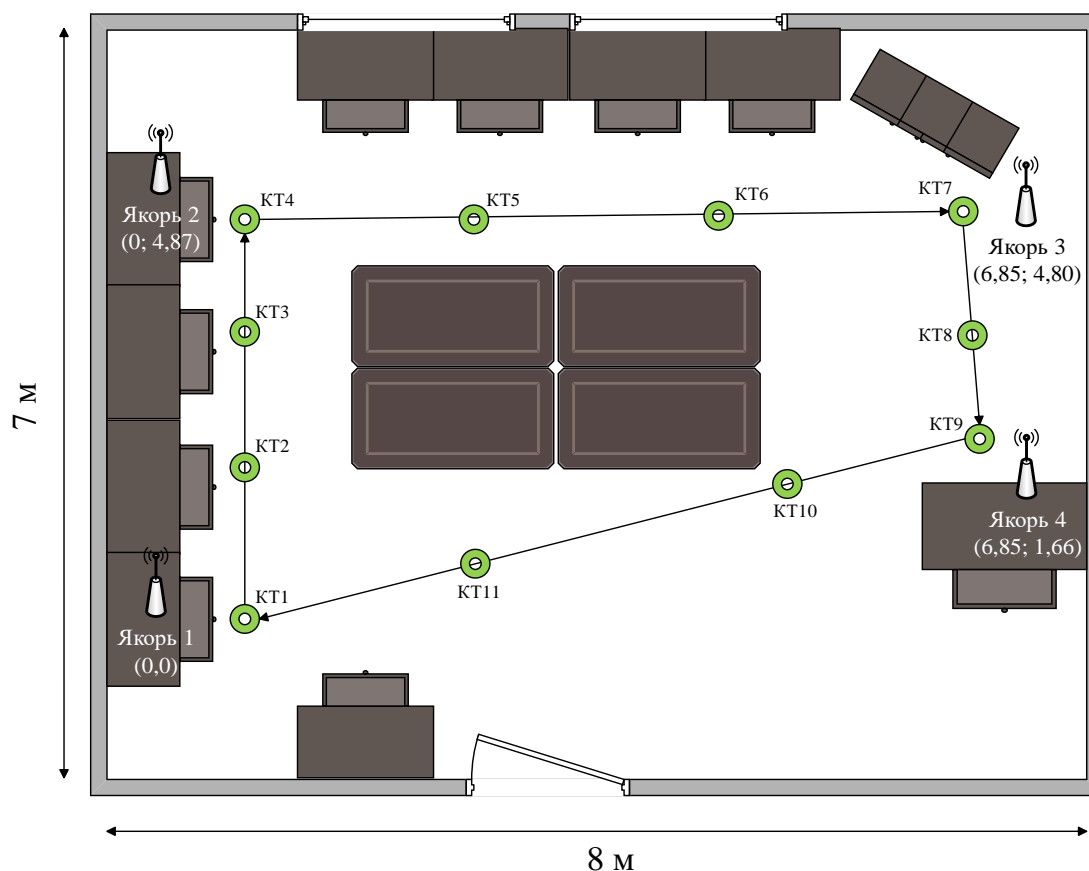


Рис. 27. Маршрут движения

На рисунке 28 показано МП НМ, определенное с помощью системы nanoLOC и в дальнейшем отрисованное в программе «LocationGUI.exe».

Оценка точности определения координат при проведении измерений проводилась на основе подхода, представленного в [25], согласно которому ошибка позиционирования определяется как:

$$\Delta = \frac{1}{P} \left(\sum_{p=1}^P \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \right),$$

где P – количество измерений; x_i и y_i – значения координат, полученные в ходе эксперимента с помощью комплекта nanoPAN; x_0 и y_0 – значения координат, измеренные с помощью лазерного дальномера для определенных контрольных точек.

Результаты измерений, полученные в ходе проведения эксперимента для 11 контрольных точек, а также ошибка позиционирования, рассчитанная по этой формуле, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

Координаты контрольных точек		Ошибка позиционирования Δ , м
x_0	y_0	
0,64	0,07	0,31
0,67	1,23	1,40
0,69	2,69	2,11
0,70	4,82	1,35
1,91	4,79	1,23
3,79	4,81	1,54
5,56	4,85	0,66
5,88	3,25	1,89
5,91	2,09	1,33
4,23	1,59	2,64
1,99	0,65	1,49

Как видно из рисунка 28, результаты эксперимента при определении МП НМ отличаются от реального маршрута. Средняя ошибка позиционирования, рассчитанная по таблице 2, составляет 1,45 м. Стоит отметить, что неточности при процедуре определения МП НМ могут возникать из-за факторов, связанных как с особенностями распространения электромагнитных волн в пространстве, так и с аппаратными аспектами.

Во-первых, в условиях многолучевого распространения фазовые шумы усиливают ошибку при детектировании фронта проходящего импульса, что критично при использовании технологии SDS-TWR, поскольку важнейшей измеряемой величиной является суммарное время распространения сигнала. При многолучевом распространении приемник фиксирует не только отправленный передатчиком сигнал, но и его отраженные копии, которые приходят с задерж-

ками. Эти явления особенно выражены в устройствах с ЛЧМ, использующих узкополосные системы.

Во-вторых, отношение сигнал / шум, от которого также зависит точность определения координат, может быть снижено за счет помеховой обстановки в помещении проведения эксперимента. Система nanoLOC работает на частоте 2,4 ГГц – так же, как и корпоративные беспроводные локальные сети. При проведении эксперимента процедура определения МП проводилась в условиях повышенных помех, что сказалось на точности определения координат.

В-третьих, метод SDS-TWR, используемый в технологии nanoLOC, предполагает двусторонний обмен пакетами между НМ и БС. Несмотря на симметричность процедуры, асимметрия задержек обработки в передатчике и приемнике вносит погрешность. Экспериментально установлено, что при скорости передачи 2 Мбит/с инструментальная ошибка метода составляет $\pm 1,5$ м.

В-четвертых, система nanoLOC, работающая на основе стандарта IEEE 802.15.4a, реализует лишь часть его возможностей. В системе не предусмотрена поддержка UWB-сигналов – использование полосы 80 вместо 500 МГц снижает разрешающую способность при определении дальности в шесть раз [26].

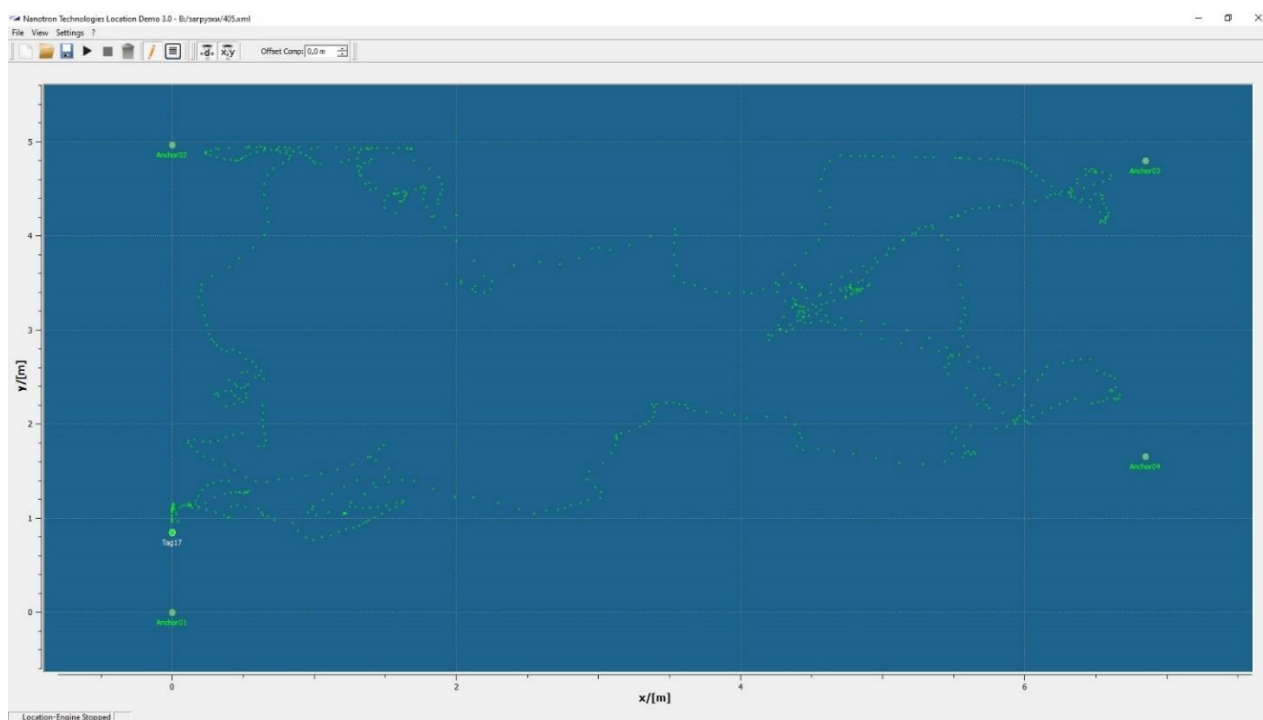


Рис. 28. Отображение МП НМ в процессе эксперимента

Заключение

В ходе исследования технологии высокоточного позиционирования nanoLOC были получены следующие основные результаты и выводы.

Проведен анализ известных моделей и методов позиционирования, в том числе внутри помещений. Формализован порядок работы метода SDS-TWR для сбора первичных дальномерных измерений. Рассмотрена специфика позиционирования устройств внутри помещений по технологии nanoLOC. Описано

программно-аппаратное обеспечение комплекта nanoPAN 5375. Систематизирован порядок конфигурации сценариев определения МП внутри помещений с настройкой модулей сбора и обработки дальномерных измерений nanoLOC. В ходе исследования разработано и апробировано методическое сопровождение для экспериментальной оценки точности позиционирования устройств внутри помещений с использованием комплекта nanoPAN 5375. Подробно описан процесс конфигурации аппаратного и программного обеспечения, а также порядок проведения экспериментов по определению координат НМ внутри помещения.

Экспериментальные испытания показали, что система nanoLOC обеспечивает точность позиционирования в пределах 1 м в условиях закрытого лабораторного помещения. Ключевыми факторами, влияющими на точность позиционирования, являются: многолучевое распространение радиосигнала, уровень шумов и помех в диапазоне 2,4 ГГц, а также аппаратные особенности комплекта nanoPAN 5375, в частности скорость обработки принимаемого пакета и качество исполнения генератора тактовых импульсов. При этом применение ЛЧМ и алгоритмических методов компенсации ошибок позволяет существенно повысить устойчивость и достоверность измерений, несмотря на многолучевой характер распространения сигнала в помещении.

Система nanoLOC выгодно отличается от альтернативных решений (Wi-Fi RTT, BLE, UWB, RFID) возможностью автономной работы, меньшей зависимостью от внешней инфраструктуры и высокой помехоустойчивостью, что делает ее перспективной для внедрения в различных прикладных сценариях – от промышленности до образовательных лабораторий.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития и внедрения систем позиционирования на базе nanoLOC в задачах мониторинга перемещений персонала, контроля доступа, логистики и автоматизации производственных процессов, а также для проведения лабораторных работ по курсам прикладного радиодоступа.

Таким образом, технология nanoLOC и реализованный в ней метод SDS-TWR демонстрируют высокую практическую значимость и позволяют решать широкий спектр задач по определению МП объектов внутри помещений.

Литература

1. Mustapa H., Kassim R., Bakri A., Nor H. A. M., Azman W. N. W., et al. A Review of the Literature on Real-Time Location Systems (RTLS) in Manufacturing // Innovative Technologies for Enhancing Experiences and Engagement. 2024. PP. 61–68. DOI: 10.1007/978-3-031-55558-9_7
2. Bendavid Y., Rostampour S., Berrabah Ya., Bagheri N., Safkhani M. The rise of Passive RFID RTLS Solutions in Industry 5.0 // Sensors. 2024. Vol. 24. Iss. 5. P. 1711. DOI: 10.3390/s24051711. EDN: UIPBBA
3. Ding B. Chen L., Chen D., Yuan H. Application of RTLS in Warehouse Management Based on RFID and Wi-Fi // Proceedings of the 4th International

Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (12–14 October 2008, Dalian, China). IEEE, 2008. DOI: 10.1109/WiCom.2008.1249

4. Xu G. GPS. Theory, Algorithms and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-72715-6

5. Thiede S., Sullivan B., Damgrave R., Lutters E. Real-Time Locating Systems (RTLS) in Future Factories: Technology Review, Morphology and Application Potentials // Procedia CIRP. 2021. Vol. 104. PP. 671–676. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.113. EDN: QUOFSJ

6. Kamel Boulos M. N., Berry G. Real-Time Locating Systems (RTLS) in Healthcare: A Condensed Primer // International Journal of Health Geographics. 2012. Vol. 11. Iss. 1. PP. 1–8. DOI: 10.1186/1476-072x-11-25. EDN: GIPYAH

7. Selvi M. S., Deepa K., Balamurugan S., Rani S. J., UvazeAhamed A. M. RTLS: An Introduction // Cyber-Physical Systems and Industry 4.0. Apple Academic Press, 2022. PP. 97–113.

8. Кривченко Т. Программно-аппаратные методы измерения расстояния по времени распространения радиосигнала при помощи приемопередатчика nanoLOC // Беспроводные технологии. 2012. № 3 (28). С. 48–53. EDN: PCDYEB

9. Дмитриев С., Екимов К., Кипрушкин С., Мощевикин А. Изучение возможности применения технологии nanoLOC // Беспроводные технологии. 2008. № 3 (12). С. 52–56. EDN: MTGBZV

10. Фокин Г. А., Багаев Е. С., Мещеряков Д. Е. Позиционирование в беспроводных локальных сетях. Часть 1. Постановка задачи достижения дециметровой точности // Первая миля. 2025. № 1 (125). С. 50–56. DOI: 10.22184/2070-8963.2025.125.1.50.56. EDN: YKDPHX

11. Peng R., Sichitiu M. L. Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (26–28 September 2006, Reston, USA). IEEE, 2006. PP. 374–382. DOI: 10.1109/SAHCN.2006.288442

12. Uluskan S., Filik T. A Survey on the Fundamentals of RSS Based Localization // Proceedings of the 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU, 16–19 May 2016, Zonguldak, Turkey). IEEE, 2016. DOI: 10.1109/SIU.2016.7496069

13. Zafari F., Gkelias A., Leung K. K. A Survey of Indoor Localization Systems and technologies // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21. Iss. 3. PP. 2568–2599. DOI: 10.1109/COMST.2019.2911558

14. Lanzisera S., Zats D., Pister K. S. J. Radio Frequency Time-of-Flight Distance Measurement for Low-Cost Wireless Sensor Localization // IEEE Sensors Journal. 2011. Vol. 11. Iss. 3. PP. 837–845. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2072496. EDN: OEORKP

15. Ho K. C., Sun M. Passive Source Localization Using Time Differences of Arrival and Gain Ratios of Arrival // IEEE Transactions on Signal Processing. 2008. Vol. 56. Iss. 2. PP. 464–477. DOI: 10.1109/TSP.2007.906728

16. Kwak M., Chong J. A New Double Two-Way Ranging Algorithm for Ranging System // Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (24–26 September 2010, Beijing, China). IEEE, 2010. PP. 470–473. DOI: 10.1109/ICNIDC.2010.5657814
17. Kim H. Double-Sided Two-Way Ranging Algorithm to Reduce Ranging Time // IEEE Communications Letters. Vol. 13. Iss. 7. PP. 486–488. DOI: 10.1109/LCOMM.2009.090093
18. Patwari N., Hero A. O., Perkins M., Correal N. S., O’Dea R. J. Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 2003. Vol. 51. Iss. 8. PP. 2137–2148. DOI: 10.1109/TSP.2003.814469
19. Röhrig C., Künemund F. WLAN based Pose Estimation for Mobile Robots // IFAC Proceedings Volumes. 2008. Vol. 41. Iss. 2. PP. 10433–10438. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01768
20. Ma Ch., Wu B., Poslad S., Selviah D. R. Wi-Fi RTT Ranging Performance Characterization and Positioning System Design // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2020. Vol. 21. Iss. 2. PP. 740–756. DOI: 10.1109/tmc.2020.3012563. EDN: CKFRXR
21. Mendoza-Silva G. M., Matey-Sanz M., Torres-Sospedra J., Huerta J. BLE RSS Measurements Dataset for Research on Accurate Indoor Positioning // Data. 2019. Vol. 4. Iss. 1. P. 12. DOI: 10.3390/data4010012
22. Dabove P., Di Pietra V., Piras M., Jabbar A. A., Kazimet S. A. Indoor Positioning Using Ultra-Wide Band (UWB) Technologies: Positioning Accuracies and Sensors’ Performances // IEEE / ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS, 23–26 April 2018, Monterey, USA). IEEE, 2018. PP. 175–184. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373379
23. Zhang Y., Li X., Amin M. Principles and Techniques of RFID Positioning // RFID Systems: Research Trends and Challenges. 2010. PP. 389–415. DOI: 10.1002/9780470665251.ch15
24. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D. et al. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of the 16th International Conference NEW2AN 2016, and 9th Conference ruSMART (26–28 September 2016, St. Petersburg, Russia). Springer International Publishing, 2016. PP. 465–476. DOI: 10.1007/978-3-319-46301-8_39. EDN: WLOHZZ
25. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D. et al. Wi-Fi Based Indoor Positioning System Using Inertial Measurements // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of the 17th International Conference NEW2AN 2017, 10th Conference ruSMART 2017, Third Workshop NsCC 2017 (28–30 August 2017, St. Petersburg, Russia). Springer International Publishing, 2017. PP. 734–744. DOI: 10.1007/978-3-319-67380-6_69. EDN: ZHVVMQ
26. Цех И. О. Высокоточное позиционирование людей в режиме реального времени: научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации) по направлению подготовки: 01.06. 01 – Математика и механика. Томск, 2021. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/>

vital/access/services/Download/vital:15633/SOURCE01?view=true (дата обращения 11.04.2025)

Статья поступила 29 апреля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 23 июня 2025 г.
Принята к публикации 22 июля 2025 г.

Информация об авторах

Багаев Егор Сергеевич – аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: bagaev.es@sut.ru

Шаламов Павел Александрович – магистрант второго курса (группа Р-32м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Фокин Григорий Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: fokin.ga@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-2-1-31>
EDN: QEDDVK

A Study on High-Precision Positioning Technology Using nanoLOC

✉ E. Bagaev, P. Shalamov, G. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. Modern scenarios of high-precision positioning in wireless local area networks require overcoming the limitations associated with multipath propagation of signals and nonlinear delays. To implement the rangefinder positioning method in the absence of synchronization between the reference transceiver nodes, the well-known symmetrical double-sided two-way ranging (SDS-TWR) is used. **The aim** of the work is to study the application of symmetric two-way bidirectional distance measurement technology in the context of determining the location of a user device in a wireless LAN using nanoLOC technology with an unstable indoor environment. **The novelty** lies in the development of methodological support for the experimental assessment of the accuracy of positioning devices indoors using nanoLOC technology. **The results** show that using the nanoLOC system to solve the problem of determining the location of a user device can ensure measurement accuracy within a few decimeters through the use of SDS-TWR method. **Practical relevance.** The presented study can be used for the applied configuration of indoor location scenarios with the configuration of nanoLOC range measurement acquisition and processing modules, as well as for conducting laboratory classes on applied radio access systems.

Keywords: communications network, location detection systems, WLAN, user device, nanoLOC, ToA (time of arrival), ToF (time of flight), SDS-TWR (symmetric double-sided two way ranging)

Information about Authors

Bagaev Egor – Postgraduate Student at the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: bagaev.es@sut.ru

Shalamov Pavel – 2nd-Year Master's Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Fokin Grigoriy – Ph. D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). Email: fokin.ga@sut.ru