
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий
Кафедра инфокоммуникационных систем и сетей

Направление подготовки / специальность: 03.03.01 Прикладные математика и физика

Направленность (профиль) подготовки: Радиотехника и компьютерные технологии

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

(бакалаврская работа)

Студент:

Милославов Глеб Евгеньевич

(подпись студента)

Научный руководитель:

Кузьмин Лев Викторович,
д-р физ.-мат. наук

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1. Проблема беспроводного определения координат внутри помещения	2
2. Способы позиционирования внутри помещения	2
3. Сверхширокополосные сигналы как средство для беспроводного определения координат объектов	3
Глава 1. Структура СШП сети с возможностью определения координат объектов	4
1.1. Структура сети	4
1.2. Устройство модулей	5
1.3. Способ определения расстояния между узлами сети по мощности сигнала	6
1.4. Способ определения координат объекта по нескольким маякам	7
Глава 2. Эксперименты по определению координат в беспроводной СШП сети	8
2.1. Схема эксперимента	8
2.2. Принцип "общения" между устройствами сети	10
2.3. Результаты экспериментальных данных	14
2.4. Анализ точности измерений	16
Заключение	18
Список использованных источников	20

ВВЕДЕНИЕ

1. Проблема беспроводного определения координат внутри помещения

Задача определения расстояния между узлами в беспроводных сетях является неотъемлемой частью функционирования такого рода сетей [1]. В настоящее время целый ряд систем и сетей для корректного функционирования требует определения расстояния между узлами сети, однако внутри помещения этот вопрос обстоит особенно остро, в силу технических и практических сложностей. Основные проблемы и их причины:

1. Отсутствие сигналов GPS/ГЛОНАСС из-за экранирования стенами и перекрытиями.
2. Низкая точность существующих систем на основе Wi-Fi, Bluetooth в силу многолучевого распространения.
3. Динамическая среда помещений может ухудшать точность, требуются частые калибровки устройств.

2. Способы позиционирования внутри помещения

На данный момент самым популярным способом определения расстояния между объектами внутри закрытых помещений на сетях малых размеров является использование RSSI модуля (Received Signal Strength Indication) и определение расстояния на основе измерения мощности сигнала, основываясь на законе о квадратичном затухании мощности сигнала в зависимости от расстояния. Данный метод используется в современных протоколах Wi-Fi и Bluetooth [5; 6], однако в силу многолучевого распространения сигнала в среде базовая реализация позволяет получить невысокую точность (средняя ошибка 1.1м со среднеквадратичным отклонением в 1.2м). Применение комбинированных фильтров в купе с данным подходом дают точность 0.5м со среднеквадратичным отклонением в 0.4м, однако такой подход сложен в программной реализации и требует повышенного расхода электроэнергии [4].

Ещё одним способом решения рассматриваемой проблемы является метод TOA (Time of Arrival) – определение расстояния, основанное на

оценке времени прохождения сигнала между узлами сети. Данный метод имеет точность до 1м [9], однако сложно реализуем в техническом плане из-за необходимости глобальной синхронизации часов. Аналогичная проблема возникает и для методологии TDOA (Time Difference of Arrival).

Существуют и другие методы определения координат, частично описанные в [8], однако все из них имеют либо низкую точность, либо сложную техническую реализацию.

3. Сверхширокополосные сигналы как средство для беспроводного определения координат объектов

В данной работе рассматривается метод использования сверхширокополосных сигналов для определения координат объектов, совмещающая в себе простоту технической реализации RSSI методологии и устойчивость таких сигналов к многолучевому распространению, что потенциально может привести к получению высокой точности измерений внутри помещения. Известно [2; 3], что данный метод определения расстояния позволяет достигать абсолютной точности около 20 см на расстояниях 10 метров внутри помещений или на открытой местности. Мощность излучаемого сигнала составляет около 10мВт.

На сегодняшний день получены принципиально результаты [3], которые описывают точность измерения расстояния с помощью такого метода, и влияние условий распространения на эту точность [2], полученные в макете, в котором имелся один излучатель и несколько приёмников сигнала. Приёмники сигнала соединены с компьютером проводным способом.

Цель настоящей работы заключается в разработке метода определения координат объекта относительно маяков в беспроводной сверхширокополосной сети за счёт оценки показателя затухания радиосигнала в месте расположения сети и определения мощности сигналов, которыми обмениваются узлы сети.

ГЛАВА 1. Структура СШП сети с возможностью определения координат объектов

1.1. Структура сети

Сеть представляет из себя идентичные по устройству модули, делящиеся на мобильное устройство (МУ) и на якорные устройства. Мобильное устройство может свободно передвигаться в пространстве и в рамках эксперимента было подсоединено по СОМ-порту к управляющему устройству (ПК), то есть к компьютеру. Данные между ними передавались по UART протоколу. Устройства, идентичные МУ, расставлены на определённом расстоянии друг от друга и имеют фиксированное положение в пространстве. В дальнейшем будем называть их якорями, якорными узлами (ЯУ) или маяками.

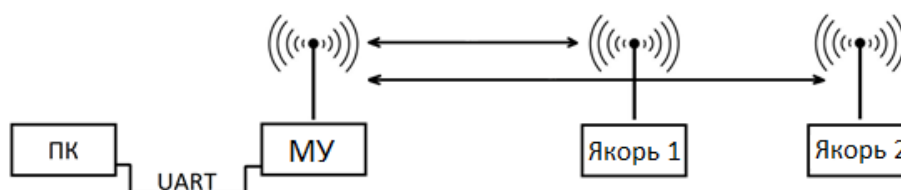


Рис. 1.1. Схематичное представление структуры сети с двумя якорями

По умолчанию все якорные узлы находятся в режиме прослушивания среды, а мобильное устройство находится в режиме ожидания команд от ПК. Общение между мобильным устройством и якорями осуществляется путём передачи управляющих команд от ПК и трансляцией этой команды в эфир СШП сигналами. Якорные устройства распознают команду и в зависимости от неё либо переходят в режим отправки сигналов, либо остаются в режиме прослушивания. Стоит заметить, что якоря между собой не общаются, поэтому управляющие команды нужны, в том числе, чтобы они распознавали, к кому в данный момент обращается мобильное устройство и отвечали ему строго по одному.

1.2. Устройство модулей

Модуль представляет из себя сверхширокополосный модем (приёмопередатчик), соединённый с платой Arduino Nucleo-F746ZG.

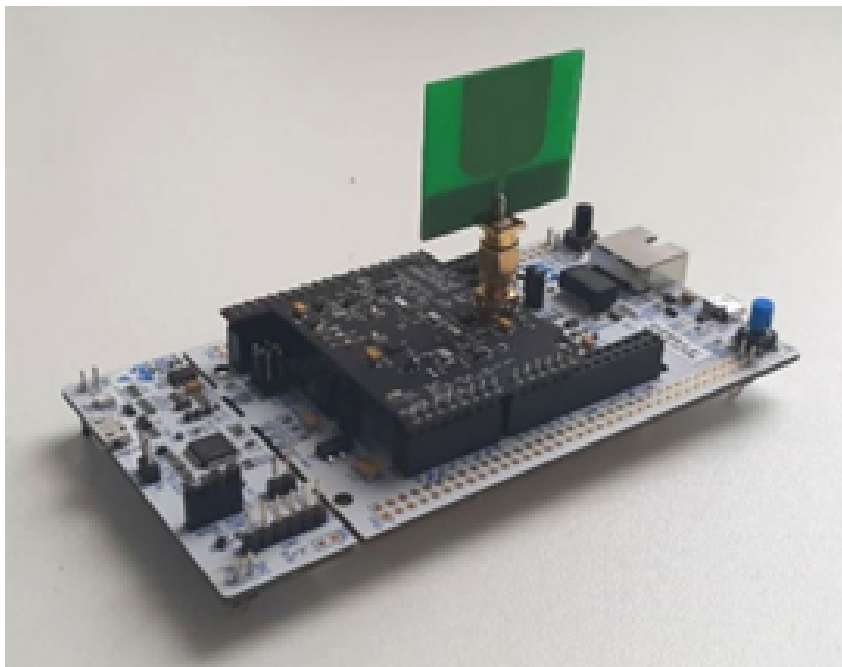


Рис. 1.2. Фото модуля

Приёмопередатчик на основе сверхширокополосных (СШП) хаотических радиоимпульсов состоит из следующих ключевых компонентов:

1. Генератор хаотического сигнала (CS): Формирует шумоподобный СШП сигнал в полосе частот 3–5 ГГц с выходной мощностью 12.5 dBm.
2. Усилитель мощности (PA): Усиливает сигнал перед передачей.
3. Антенна (ANT): Излучает модулированный сигнал в эфир.
4. Малошумящий усилитель (LNA): Усиливает принятый сигнал.
5. Логарифмический детектор (LD): Преобразует мощность сигнала в аналоговую огибающую.
6. Компаратор (CMP): Сравнивает огибающую с пороговым напряжением, формируя двухуровневый сигнал, который далее обрабатывается цифровыми методами.

Полный принцип работы модема подробно описан в [3].

1.3. Способ определения расстояния между узлами сети по мощности сигнала

Схема измерения расстояния соответствует схемам, опубликованным в работах [2; 3], где описан разностный метод определения расстояния между беспроводными узлами за счёт определения относительного изменения мощности принимаемого сигнала при изменении расстояния между узлами сети. Данный метод берёт за основу закон затухания сигнала в беспроводном канале связи

$$P \sim \frac{1}{d^n}, \text{ откуда следует } P_d = P_0 + 10n \lg \frac{d}{d_0},$$

где P_0 – известная мощность сигнала на заданном расстоянии d_0

Также для точного определения расстояния между узлами сети необходимо знать коэффициент затухания среды n , который может отличаться в зависимости от помещения и расстановки внутри него. Поэтому к тому, что нужно произвести одно измерение для P_0 и d_0 , в силу того что метод является разностным, также необходимо произвести как минимум ещё одно измерение.

Однако так как для преобразования полученного сигнала в аналоговую огибающую используется логарифмический детектор, то измеряется не напрямую мощность, а амплитуда сигнала $A = hP$, которая связана с мощностью коэффициентом пропорциональности $h = 21 \text{ мВ/дБ}$.

Итого, имея среднее значение амплитуды сигнала на логарифмическом детекторе A и все остальные величины после произведения калибровки, можно записать в явном виде:

$$d = d_0 * 10^{\frac{A-A_0}{10*n*h}}$$

Подробное изложение статистического метода измерения амплитуды с помощью логарифмического детектора и компаратора описано в [2; 3]. Однако для общего понимания, предоставлен график напряжения на логарифмическом детекторе с выделенными отсчётами, по которым считалась статистика амплитуды. Зелёным пунктиром на Рис. 1.3 обозначено медианное значение выделенного множества, которое по итогу и принима-

лось за амплитуду сигнала.

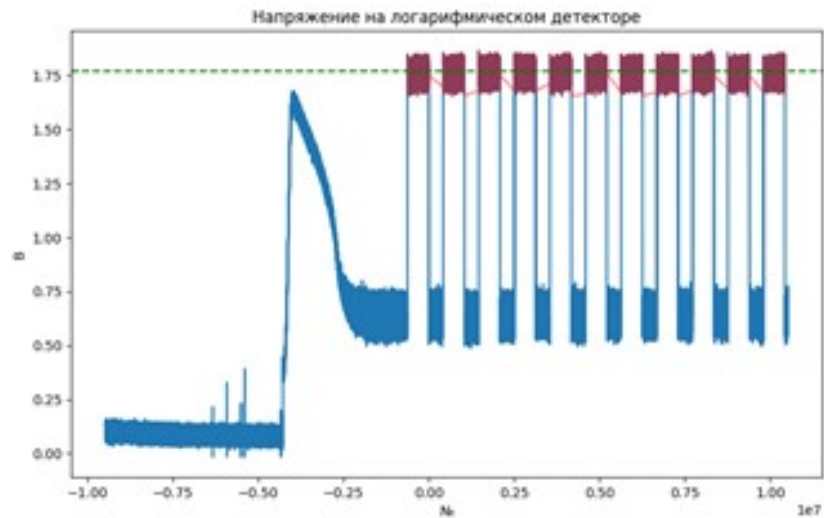


Рис. 1.3. Сигнал на выходе логарифмического детектора в якорном узле, амплитуда которого пропорциональна мощности принимаемого сигнала

1.4. Способ определения координат объекта по нескольким маякам

Теперь, имея возможность узнать расстояния до всех маяков, необходимо получить значение координат объекта. В пределах 1D пространства достаточно использовать метод среднего арифметического

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i \pm d_i)$$

где x_i — известные координаты маяков, d_i — измеренные расстояния. Данный подход минимизирует сумму квадратов ошибок и одновременно с этим является вычислительно простым.

ГЛАВА 2. Эксперименты по определению координат в беспроводной СШП сети

2.1. Схема эксперимента

Суть эксперимента заключалась в реализации конкретно беспроводного макета сети с возможностью по запросу мобильного объекта определять собственные координаты в 1D пространстве, используя СШП сигналы. Параллельно с этим проверялась работоспособность приведённого выше метода определения расстояний до объектов в случае такой сети. Непосредственный интерес также будет вызывать точность определения координат.



Рис. 2.1. Размещение модулей на стойках в помещении, в котором проводились эксперименты

Опыт проводился следующим образом: три стойки одинаковой высоты были размещены в офисном помещении $6 \times 6.5 \text{ м}^2$ вдоль одной прямой. На этих стойках были закреплены описанные выше модули. В роли мобильного устройства выступал модуль посередине, находящийся между двумя другими. В роли маяков выступали крайние модули, находящиеся на расстоянии 5 м друг от друга. Мобильное устройство передвигалось между маяками, начиная с 0.5 м от одного маяка с шагом в 0.25 м заканчивая на расстоянии 0.5 м до другого маяка. Таким образом реализовывалась дистанция 0.5 – 4.5 м для каждого из двух маяков.

Чтобы измерить расстояния до маяка, мобильному устройству необходимо отправить ему сигнал-запрос на получение серии импульсов, по которым можно будет замерить амплитуду полученного сигнала и вычислить расстояние.

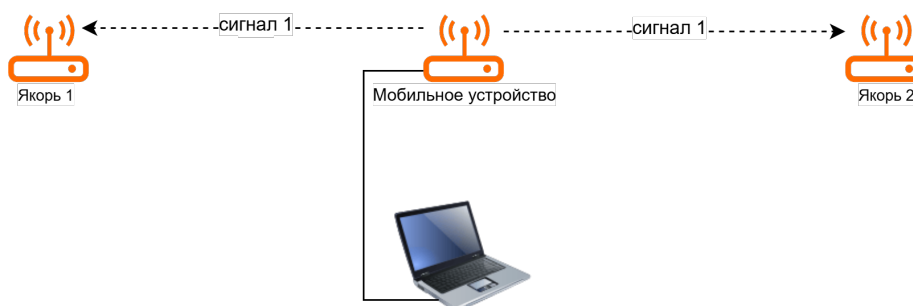
2.2. Принцип "общения" между устройствами сети

0. Все устройства включены и по умолчанию находятся в режиме прослушивания: мобильное устройство ждёт сигнала от управляющего устройства, т.е. компьютера, маяки в свою очередь прослушивают среду.

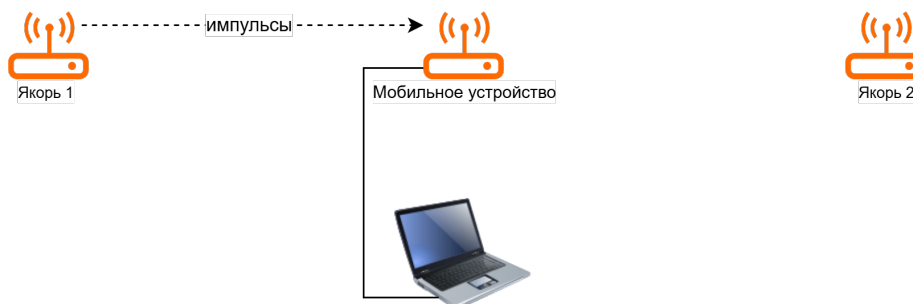
1. Управляющее устройство, то есть компьютер, отправляет по СОМ-порту "сигнал 1" мобильному устройству. Сигнал этот представляет из себя любую фиксированную последовательность бит, желательно не больше восьми, например 120_{10} передастся как 01111000_2 цельным байтом по UART протоколу.



2. Мобильное устройство, получив сигнал от компьютера, переходит в режим передачи данных и дублирует в среду полученный от компьютера сигнал (см. Рис. 2.3). После мобильного устройства переходит в режим прослушивания эфира.



3. Оба устройства распознают ”сигнал 1”, но отвечает на него только ”Якорь 1”. Он, опознав, что сигнал относится к нему, переходит из режима прослушивания среды в режим передачи и отправляет пачку импульсов в эфир.



4. Мобильное устройство, накапливая измерения амплитуды полученного сигнала с помощью однобитного АЦП из [3], отправляет пачку значений компьютеру, пока компьютер не получит установленное количество измерений.



5. Далее, получив требуемое количество измерений от ”Якоря 1”, компьютер отправляет ”сигнал 2” мобильному устройству, и всё то же самое происходит с ”Якорем 2”.

Таким образом, реализуется полный цикл общения между мобильным устройством и всеми якорями, причём программно это реализовано таким образом, что сеть легко масштабируется на большее количество маяков.

Стоит отметить несколько важных моментов:

Конкретно в данной работе получение компьютером данных от мобильного устройства реализовано в виде механизма "запрос - ответ". Допустим, как это было в работе, компьютеру нужно 4000 измерений с одного маяка, а количество измерений в пачке равно 100. В таком случае компьютер циклически отправляет сигнал-запрос на 100 измерений. Этот запрос отличен от сигналов общения с маяками и не дублируется в эфир. Мобильное устройство, накопив данное количество измерений, отправляет их компьютеру, и только после получения пачки измерений, компьютер отправляет сигнал-запрос на следующую пачку. Таким образом, буфер мобильного устройства не перегружается большим количеством измерений, и вследствие этого нет строгих технических ограничений на количество памяти, используемой для измерения расстояния.

Также следует упомянуть о возможной скорости передачи данных в такой сети и времени, необходимом для определения координат. Непосредственно в работе использовалась скорость 100000 бит/с, т.е. примерно 12 Кб/с, поэтому на 4000 измерений с одного маяка уходило 15-20с с учётом всех задержек в "общении", нахождении медиан амплитуд сигнала компаратором и пауз на устройствах, необходимых для смены режимов "получения-отправки". Однако позже было протестирован режим работы передатчиков на больших скоростях и было получено, что до 2 — 2.5 Мб/с наблюдалась устойчивая картина "общения" между маяками и точность измерения не падала в связи с увеличением скорости передачи данных. Более того, за счёт устойчивости СШП сигнала к многолучевому распространению, полученные измерения амплитуд сигналов обладают крайне низкой дисперсионностью, а именно не более 1мВ среднеквадратичного отклонения при диапазоне 0 — 3.3 В. Этот факт наталкивает на мысль, что 4000 измерений — избыточно, и можно обойтись гораздо меньшим числом, например количеством в 10-100 штук. Приняв всё это во внимание, время измерения расстояния до одного маяка может занимать порядка 20мс, причём

наибольший вклад в данную величину будут вносить не временные затраты на непосредственное общение между устройствами, а переходы между TX-RX режимами работы модулей (примерно 5мс на переход).

2.3. Результаты экспериментальных данных

Калибровка производилась на расстояниях 2 и 3 от каждого из маяков и дала результаты $n \approx 1.65$ для обоих маяков (калибровка проводится для каждого из них), что соответствует коэффициенту затухания в офисной среде в условиях прямой видимости в офисном помещении [7]. Далее амплитуды на расстояниях 2 и 3 не будут принимать участие в результирующих данных, а значение амплитуды сигнала на 3 примем за "опорное" значение для использования в разностном методе, описанном выше [ссылка на формулу].

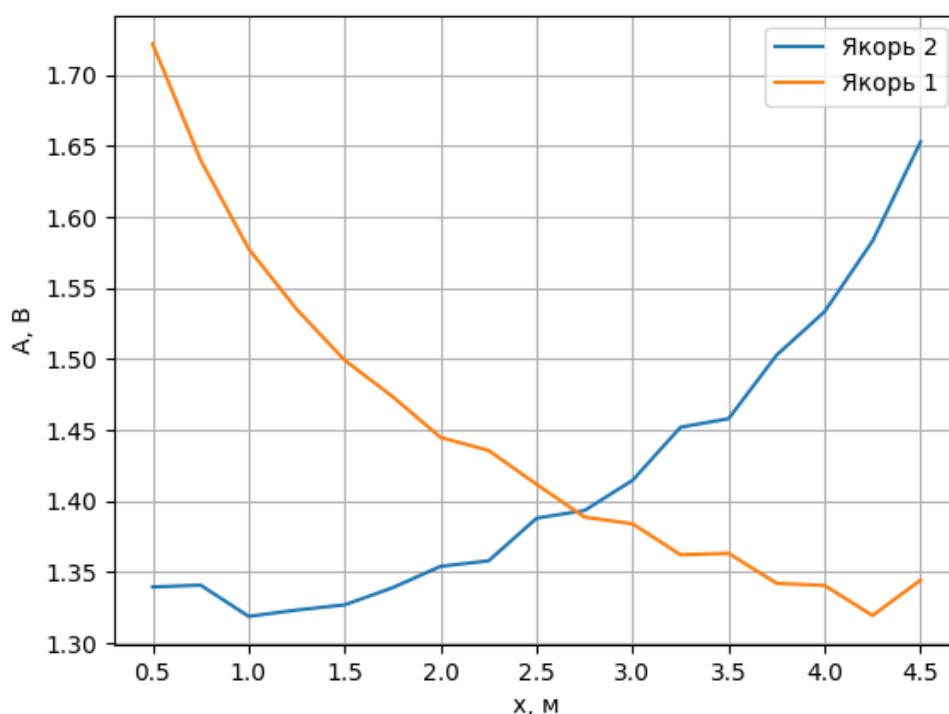


Рис. 2.2. Графики зависимости принятой на мобильном устройстве амплитуды излучения якорей в зависимости от собственного положения.

Как видно из [Рис. 2.2] амплитуда принятого сигнала от маяков соответствует экспоненциальному убыванию по мере увеличения расстояния, что согласуется с теорией. Это явно видно для "Якоря 1", а график для "Якоря 2" симметричен первому, так как по мере движения мобильного устройства расстояние от одного маяка увеличивается, тогда как от другого – уменьшается.

Рассчитав расстояния по полученным амплитудам и используя метод средних [ссылка на формулу], были получены следующие результаты:

Таблица 2.1

Сравнение реальных и измеренных координат		
Реальные координаты, м	Измеренные координаты, м	Ошибка, м
0.50	1.00	0.50
0.75	1.13	0.38
1.00	1.01	0.01
1.25	1.20	-0.05
1.50	1.40	-0.10
1.75	1.67	-0.08
2.25	2.10	-0.15
2.50	2.55	0.05
2.75	2.80	0.05
3.25	3.46	0.21
3.50	3.47	-0.03
3.75	3.93	0.18
4.00	4.05	0.05
4.25	4.48	0.23
4.50	4.25	-0.25

Среднеквадратичная ошибка $RMSE = 0.18$, что является хорошим показателем точности для измерения координат объекта в закрытом помещении [4]. Наибольшие ошибки наблюдаются на краях, где уровень сигнала до дальнего маяка становится низким и относительно больше подвержен выбросам. Средняя абсолютная ошибка $MAE = 0.17$, а максимальная ошибка составила 0.5

Таблица 2.2

Значения ошибок по результатам измерения		
Среднеквадратичная, м	Средняя абсолютная, м	Максимальная, м
0.18	0.17	0.50

Проведённые эксперименты позволили не только подтвердить работоспособность предложенного метода позиционирования на основе широкополосных сигналов, но и выявить ряд важных закономерностей, которые открывают пути для дальнейшего совершенствования системы.

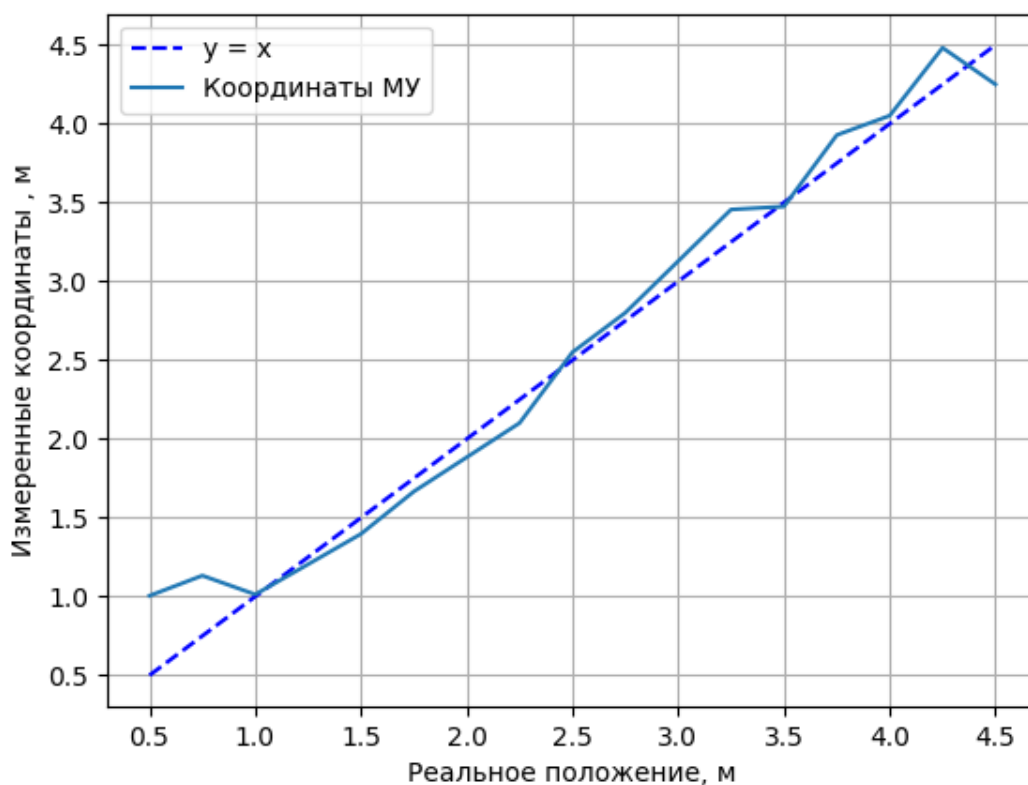


Рис. 2.3. Визуализация измерений

2.4. Анализ точности измерений

Как видно из полученных данных, система демонстрирует высокую точность в центральной зоне измерений (от 1 до 4 метров), где ошибка не превышает 0.25 метра. Это свидетельствует о корректности выбранного метода расчёта расстояний на основе затухания сигнала и подтверждает теоретические предпосылки, заложенные в основу работы. Однако на границах измеряемой области (0.5 и 4.5 метра) наблюдаются более значительные отклонения — до 0.5 метра. Это связано с рядом факторов:

- **Затухание сигнала:** На краях зоны покрытия мощность принимаемого сигнала существенно снижается, что увеличивает влияние шумов и погрешностей измерений.
- **Многочувствительное распространение:** Несмотря на устойчивость СШП-сигналов к данному эффекту, в условиях сложной офисной среды отражения от стен и оборудования могут вносить дополнительные искажения.
- **Калибровка системы:** Точность калибровки коэффициента затухания ($n \approx 1.65$) играет ключевую роль. Небольшие отклонения в этом параметре могут приводить к накоплению ошибки при расчёте расстояний.

Предложенное решение демонстрирует значительное преимущество перед традиционными методами на основе RSSI (Wi-Fi, Bluetooth), где типичная погрешность составляет 1–2 метра [4]. Более того, система не требует глобальной синхронизации узлов, что упрощает её развёртывание по сравнению с TOA/TDOA-методами.

Тем не менее, для достижения максимальной точности в реальных условиях необходимо учитывать динамику окружающей среды. Например, перемещение людей или оборудования может временно блокировать прямую видимость между узлами, что потребует дополнительных алгоритмов компенсации таких помех.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткое перечисление конкретных результатов

В ходе выполнения работы достигнуты следующие результаты:

- Разработана архитектура сверхширокополосной беспроводной сети для позиционирования мобильных объектов
- Создан экспериментальный макет на основе СШП-модемов и плат Arduino Nucleo-F746ZG
- Реализован протокол взаимодействия между мобильным устройством, якорными узлами и управляющим ПК
- Предложен и апробирован разностный метод измерения расстояний на основе анализа мощности СШП-сигнала
- Разработан алгоритм определения координат в 1D-пространстве методом среднего арифметического
- Проведены натурные испытания в офисном помещении с контролируемыми условиями

Реальная точность

Экспериментально подтверждена высокая точность позиционирования:

- Среднеквадратичная ошибка (RMSE): 0.18 м
- Средняя абсолютная ошибка (MAE): 0.17 м
- Максимальная ошибка: 0.50 м (на границах зоны покрытия)
- В центральной зоне (1-4 м) точность достигает 0.10-0.25 м

Полученные показатели в 5-6 раз превышают точность традиционных RSSI-систем на базе Wi-Fi/Bluetooth [4].

Область применения

Разработанная система предназначена для использования в:

- Системах навигации в помещениях (склады, заводы, торговые центры)
- Промышленном IoT для отслеживания оборудования и погрузчиков
- Робототехнике (позиционирование мобильных платформ)

- Умных зданиях для контроля доступа и управления ресурсами
- Медицинских учреждениях для мониторинга оборудования и пациентов

Ключевое преимущество — работа в условиях отсутствия GPS-сигнала.

Вопросы дальнейшего развития технологии

Перспективные направления совершенствования:

- Масштабирование системы для 2D/3D позиционирования
- Оптимизация количества измерений (сокращение с 4000 до 10-100 точек в выборке)
- Разработка алгоритмов компенсации динамических помех (движение людей)
- Исследование NLOS (non-line-of-sight) сценариев
- Интеграция сенсорного слияния (IMU-датчики)
- Повышение скорости обмена данными до 2.5 Мб/с
- Уменьшение задержки переключения TX/RX режимов (<1 мс)
- Разработка энергоэффективных протоколов для автономных устройств

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sesyuk A., Ioannou S., Raspopoulos M. A Survey of 3D Indoor Localization Systems and Technologies // *Sensors*. — 2022. — Vol. 22, no. 24. — P. 9380. — DOI: 10.3390/s22249380.
2. Efremova E. V., Kuzmin L. V. Wireless Ranging by Evaluating Received Signal Strength of UWB Chaotic Radio Pulses: Effects of Signal Propagation Conditions // *Technologies*. — 2024. — Vol. 12, no. 1. — P. 141. — DOI: 10.3390/technologies120100141.
3. Efremova E. V., Kuzmin L. V., Itskov V. V. Measuring Received Signal Strength of UWB Chaotic Radio Pulses for Ranging and Positioning // *Electronics*. — 2023. — Vol. 12, no. 21. — P. 4425. — DOI: 10.3390/electronics12214425.
4. Survey of wireless based indoor localization technologies / H. Liu [et al.] // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2017. — Vol. 19, no. 4. — P. 2561–2593. — DOI: 10.1109/COMST.2017.2728442.
5. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications : Std 802.11. — IEEE, 2020. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2020.9363693.
6. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs) : Std 802.15.1. — IEEE, 2005. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.96290.
7. Коэффициенты затухания радиосигналов в офисных помещениях. — URL: <https://moluch.ru/archive/...> (дата обр. 20.06.2025).
8. Методы определения координат в замкнутых пространствах. — URL: <https://publications.hse.ru/pubs/sharefolder/rtg9b5ctj2/51386113.pdf> (дата обр. 20.06.2025).
9. Оценка точности метода ТОА в помещениях. — URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/26907/10703> (дата обр. 20.06.2025).