

Санкт–Петербургский государственный университет

Шишкин Валентин Евгеньевич

Выпускная квалификационная работа

*Определение местоположения в помещении с
помощью беспроводных технологий*

Уровень образования: бакалавриат

Направление: 02.03.02 «Фундаментальная информатика и
информационные технологии»

Основная образовательная программа: СВ.5003.2017 «Программирование
и информационные технологии»

Научный руководитель: доцент,
кафедра компьютерных технологий
и систем,
к.ф. - м.н. Погожев С. В.

Рецензент: доцент,
кафедра компьютерного моделиро-
вания,
и многопроцессорных систем,
к.т.н. Гришкин В. М.

Санкт-Петербург

2021 г.

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| Постановка задачи | 4 |
| Обзор литературы | 5 |
| Глава 1. Обзор технологий и алгоритмов | 6 |
| 1.1. Вычисление расстояние по RSSI | 6 |
| 1.2. Фильтрация | 6 |
| 1.3. Вычисление координат | 7 |
| Глава 2. Программная реализация | 10 |
| 2.1. Выбор технологии | 10 |
| 2.2. Фильтрация RSSI методом скользящего среднего | 11 |
| 2.3. Вычисление расстояний и координат | 12 |
| Глава 3. Эксперименты | 14 |
| 3.1. Подготовка к проведению экспериментов | 14 |
| 3.2. Проведение экспериментов | 14 |
| 3.2.1 Замер данных данных в конкретных точках | 15 |
| 3.2.2 Составление трека передвижения | 16 |
| Глава 4. Анализ результатов и выводы | 17 |
| 4.1. Эксперимент с замером данных в определённых точках | 17 |
| 4.1.1 Первое помещение | 17 |
| 4.1.2 Второе помещение | 20 |
| 4.2. Эксперимент с отслеживанием траектории перемещения | 21 |
| 4.3. Возможные усовершенствования | 25 |
| Заключение | 26 |
| Список литературы | 27 |

Введение

В наше время сложно представить себе жизнь без навигационных систем. Они стали важной составляющей ежедневных нужд практически каждого человека. Навигация нужна пешеходу, велосипедисту, водителю автомобиля, пилоту летательного аппарата. Благодаря спутниковым системам навигации GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и широкому распространению смартфонов, оснащенных необходимыми технологическими решениями, разнообразные системы навигации стали доступны людям по всему миру. Однако использование этих решений внутри помещений зачастую приводит к некачественному результату. Это связано с тем, что спутниковые сигналы экранируются бетоном, металлом, некоторыми видами пластика и стекла, и это мешает корректной работе GPS-приёмника [13].

При этом востребованность систем навигации внутри зданий неоспорима. У многих компаний рабочие помещения расположены в больших зданиях со сложной инженерной инфраструктурой, ориентирование в них без специальных технологий может представлять непростую задачу. Системы для навигации могут быть полезны в больших учебных кампусах, крупных музейных комплексах, офисных зданиях, складских помещениях, парках развлечений, на парковках. Также подобные системы могут быть частью приложений с дополненной реальностью, получивших особую популярность в последние годы.

Благодаря всему вышесказанному на рынке существует множество различных предложений навигационных систем в помещении, использующих самые разные технологические решения. Однако единое универсальное решение все еще не найдено. Регулярно публикуются новые работы, представляющие те или иные новые методы, например, навигация при помощи 5g mmWave радаров [7].

Постановка задачи

Целью данной работы является исследование различных решений для навигации внутри помещений, а также создание собственного прототипа, проверка его работоспособности и точности при различных условиях. Для достижения этих целей были сформулированы следующие задачи:

- Изучение существующих технологий для навигации внутри помещений.
- Реализация прототипа с использованием BLE-маячков.
- Проведения ряда экспериментов с разными условиями и параметрами.
- Анализ влияния вышеупомянутых условий и параметров на качество работы прототипа.

Обзор литературы

В работе [1] авторы сравнивают два разных подхода к решению задачи навигации. Первый использует показатель уровня принимаемого сигнала (RSSI) для вычисления расстояния от расставленных заранее устройств до пользователя, в то время как второй использует время, которое потребовалось сигналу на преодоление этого расстояние (ToF, time of flight). Статья [2] содержит общее описание подхода к решению задачи навигации внутри помещения с использованием Bluetooth Low Energy, а также сравнение различных методов фильтрации RSSI.

В [8] приводится алгоритм вычисления расстояния от источника сигнала до получателя через RSSI, в [3] рассмотрены возможные методы фильтрации сигналов. В [4] описаны различные алгоритмы трилатерации и их сравнение. В особенности практический интерес представляет двумерная модель, основанная на пересечении хорд и трехмерная модель.

Работы [9, 10] представляют собой спецификации устройств, используемых при создании BLE-маячков. По ссылке [11] можно получить информацию об используемом SDK. [15] – библиотека, используемая для решения задачи трилатерации по методу Левенберга-Марквардта. В [12] описывается структура пакета по стандарту AltBeacon.

В книге [6] автор хорошо объясняет основы технологии Bluetooth Low Energy.

Глава 1. Обзор технологий и алгоритмов

1.1 Вычисление расстояние по RSSI

Для вычисления расстояния до устройства, посылающего радиосигнал, используется показатель уровня принимаемого сигнала – RSSI (received signal strength indicator). Этот показатель измеряется в dBm – децибелл относительно милливатта. Согласно [8], уравнение 1 отражает потери сигнала на коротких расстояниях:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \frac{d^n}{d_0^n}, \quad (1)$$

Здесь $P_r(d)$ – RSSI, получаемый приемником, d_0 – калибровочное расстояние (чаще всего один метр), $P_r(d_0)$ – значение RSSI на расстоянии d_0 , n – коэффициент потерь мощности сигнала, который может принимать значения от 2 до 4 для воздуха (в зависимости от наличия препятствий). Из этого уравнения можно получить формулу для ожидаемого RSSI на расстоянии d и формулу для определения расстояния до приемника по RSSI:

$$RSSI = RSSI_{d_0} - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) [dBm],$$
$$d = d_0 * 10^{\frac{RSSI_{d_0} - RSSI}{10n}} [m]. \quad (2)$$

1.2 Фильтрация

Разработчики систем навигации, в которых расчет координат зависит от радиосигналов, часто сталкиваются с проблемой точного определения показателя уровня принимаемого сигнала. Значение RSSI на практике зависит от множества ситуативных факторов, например, наличия препятствия на пути сигнала, помех и шумов. Для улучшения точности измерений используют различные алгоритмы фильтрации, например, фильтр скользящего среднего.

Скользящая средняя или скользящее среднее – это общее наименование семейства функций, значения которых вычисляются как среднее неко-

того количества последних значений исходной функции. В общем случае скользящее среднее можно вычислять по формуле:

$$MA_t = \sum_{i=0}^{n-1} w_{t-i} * p_{t-i},$$

где MA_t – значение взвешенного среднего в момент t , n – число значений функции для вычисления скользящего среднего, w_{t-i} – весовой коэффициент, p_{t-i} – значение исходной функции.

Для сглаживания сигнала чаще всего используются простое скользящее среднее и экспоненциально взвешенное скользящее среднее [3]. Скользящее среднее называется простым в случае, когда на каждом этапе вычислений все веса равны между собой. В применении к фильтрации RSSI получается:

$$\overline{RSSI}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n RSSI_i,$$

где n – число полученных сигналов,

$RSSI_n$ – RSSI, полученный в момент n ,

$RSSI_i$ – RSSI, полученный в момент i .

Экспоненциально взвешенным скользящее среднее называется, когда его коэффициенты веса со временем экспоненциально убывают, при этом никогда не обращаются в ноль. В приложении к фильтрации RSSI:

$$RSSI = \alpha * RSSI_n + (1 - \alpha) * RSSI_{n-1},$$

где $RSSI_i$ – RSSI, полученный в момент $n - 1$, а α - взвешивающая константа. $\alpha \in (0, 1)$.

1.3 Вычисление координат

В большинстве случаев вычисление координат обеспечивается триангуляцией или трилатерацией. Триангуляция - это процесс определения местоположения точки путем измерения углов к ней от опорных точек, в то время как методы трилатерации включают определение местоположе-

ния точек путем измерения расстояний от известных точек и дальнейшего поиска пересечения сфер или окружностей. Для задач навигации по маякам чаще применимы именно алгоритмы трилатерации, поскольку они оперируют расстояниями до маяков.

Рассмотрим задачу двумерной трилатерации. Есть три опорные точки, координаты которых нам известны, а также точка, представляющая центральное устройство, для которой известны расстояния до всех трех точек и координаты которой требуется найти. В таком случае точка пересечения трех окружностей с центрами в опорных точках и радиусами, соответственно равными расстояниям от опорных точек до неизвестной, и будет искомым решением. Схема такого положения маяков и центрального устройства представлена на Рис. 1.

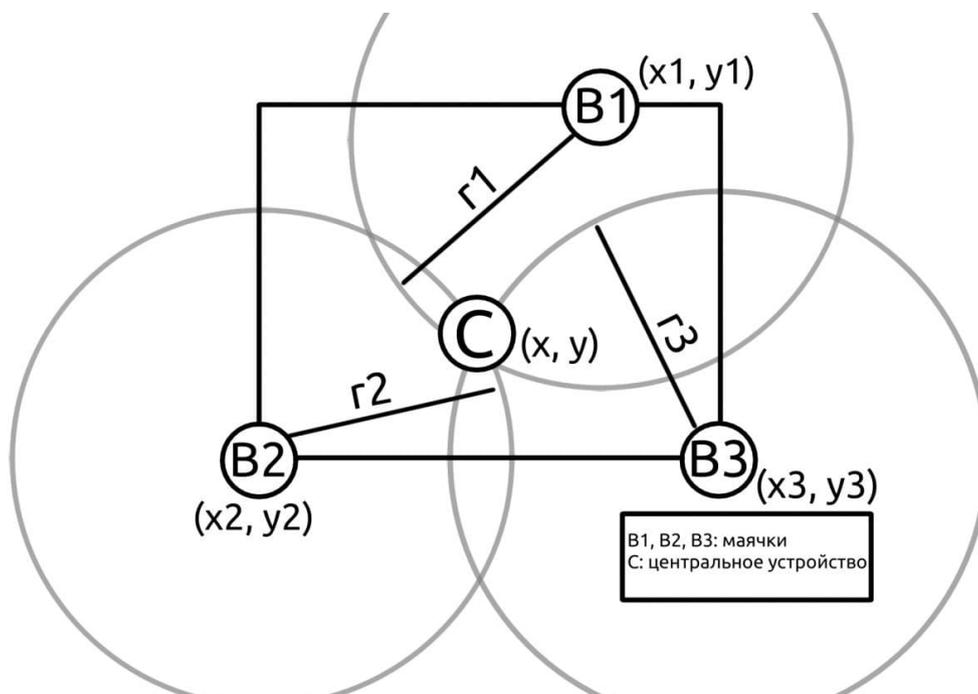


Рис. 1: Элементарный случай

Однако на практике расстояния практически никогда не будут вычисляться достаточно точно, чтобы все окружности пересекались в одной точке. В таком случае можно использовать другой метод, основанный на нахождении пересечения линий, содержащих общие хорды пересекающихся окружностей. Соответствующая схема представлена на Рис. 2. Такой метод будет хорошо обрабатывать все случаи, за исключением тех, где

окружности не пересекаются вовсе.

$$a_i = -2x_i, b_i = -2y_i, c_i = x_i^2 + y_i^2 - r_i^2, i = 1, 3;$$

$$x = \frac{(c_1 - c_3) \cdot (b_1 - b_2) - (c_1 - c_2) \cdot (b_1 - b_3)}{(a_1 - a_2) \cdot (b_1 - b_3) - (a_1 - a_3) \cdot (b_1 - b_2)};$$

$$y = \frac{(c_1 - c_3) \cdot (a_1 - a_2) - (c_1 - c_2) \cdot (a_1 - a_3)}{(b_1 - b_2) \cdot (a_1 - a_3) - (b_1 - b_3) \cdot (a_1 - a_2)}.$$

Здесь (x, y) – искомые координаты неизвестной точки.

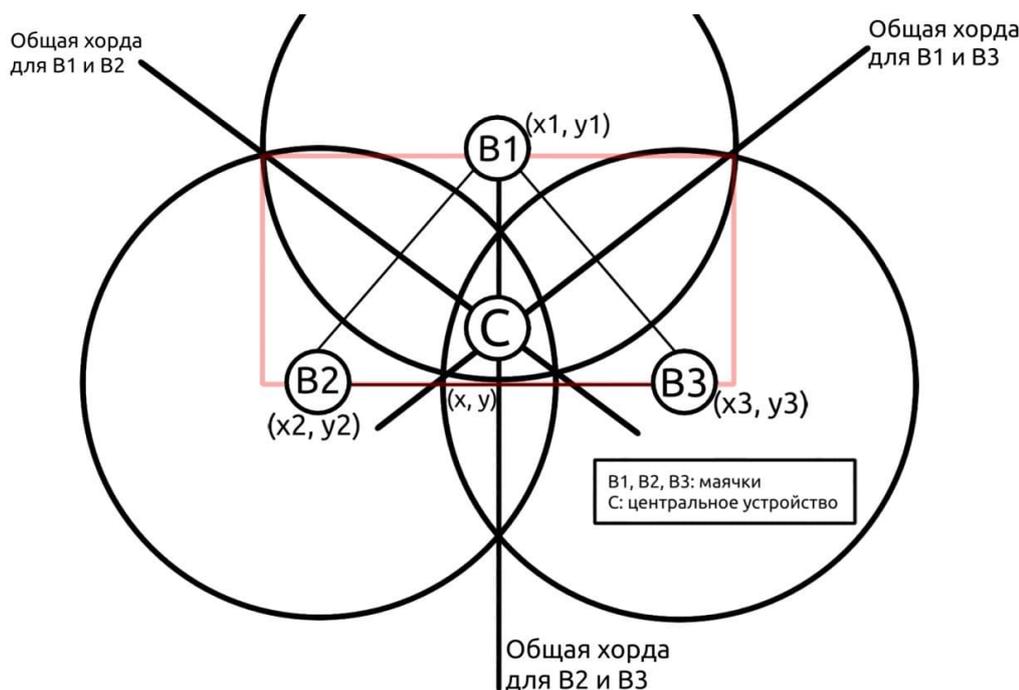


Рис. 2: Метод пересечения хорд

Вышеописанные методы трилатерации предполагают, что для вычисления координат используются данные только с трёх ближайших маячков. В качестве альтернативы можно использовать n маячков, получая переопределённую систему из n уравнений при двух неизвестных. Для решения этой системы можно применять различные методы регрессионного анализа, например, метод наименьших квадратов.

Пусть $x = x_1, \dots, x_n$ – набор неизвестных переменных (параметров); $f_i(x), i = 1, \dots, m, m > n$ – совокупность функций от x_1, \dots, x_n . Задача метода наименьших квадратов состоит в подборе таких значений x , чтобы значения f_i были максимально близки к некоторым значениям y_i .

То есть нужно решить переопределенную систему уравнений $f_i(x) = y_i$, $i = 1, \dots, m$, для которой будут максимально близки левая и правая части системы. Нужно выбрать сумму квадратов отклонений левых и правых частей $|f_i(x) - y_i|$ в качестве "меры близости". Таким образом, суть метода наименьших квадратов выражается формулой:

$$\sum_i e_i^2 = \sum_i (y_i - f_i(x))^2 \rightarrow \min_x.$$

Если система уравнений имеет решение, то наименьшее значение суммы квадратов отклонений будет равно нулю, и точные решения системы уравнений могут быть найдены аналитически или, например, различными численными методами оптимизации. Если система переопределена, то есть количество независимых уравнений больше количества искомых переменных, то система не имеет точного решения и метод наименьших квадратов позволяет найти некоторый оптимальный вектор x , при котором векторы y и $f(x)$ будут максимально близки друг к другу в смысле Евклидовой нормы, или вектор отклонений e будет близок к нулю.

Если расположить маячки на разной по отношению друг к другу и к принимающему устройству высоте, то необходимо будет перейти к трехмерной трилатерации, чтобы учесть вертикальную компоненту [4].

Глава 2. Программная реализация

2.1 Выбор технологии

В качестве основы для создания прототипа и проведения последующих экспериментов было принято решение реализовать систему, вычисляющую координаты центрального устройства, смартфона, основываясь на расстояниях от него до BLE-устройств. Далее эти устройства будем называть BLE-маячки. Выбор этой технологии обусловлен ее широкой распространенностью и легкой доступностью материалов для реализации.

Для создания маячков были выбраны устройства Ebyte-E73-Tba на основе чипа nrf52832 [9, 10]. Nordic Semiconductor – ведущий производитель на рынке BLE чипов. Преимущества этого чипа в его доступности и соот-

ветствии требуемой мощности. Семейство nrf52832 поддерживает Bluetooth Low Energy 5.0, обладает двумя программируемыми кнопками и красными светодиодами, а также интерфейсом для внешнего отладчика JLINK. Кроме того, есть NFC-чип, но в данной работе он не использовался. Выбранные устройства сразу готовы к работе, не требуют дополнительной распайки или монтажа.

При создании маячков активно использовался Nordic SDK [11]. Он очень удобен для подобных задач, поскольку доступен в исходниках, хорошо задокументирован и активно развивается, адаптируясь под изменения технологий. Также важным преимуществом Nordic SDK является то, что он не требует специальных окружений разработки, хоть и допускает их использование. И, наконец, SDK не имеет никаких лицензионных ограничений при условии работы с чипами Nordic.

В качестве основы для маячка был взят стандарт AltBeacon [12], над которым были проделаны некоторые изменения. Структура передаваемого пакета осталась неизменной, но был добавлен режим с переменной мощностью передачи. В этом режиме циклично время от времени маячок меняет свою мощность, при этом соответственно меняется и откалиброванное на одном метре значение *Ref RSSI*, передаваемое в конце пакета. Такой подход был выбран с целью исследовать, как изменится точность определяемого местоположения при разных мощностях передачи от маячков.

В качестве центрального устройства был выбран смартфон Samsung Galaxy A30S, было написано простое приложение на языке программирования Kotlin, способное собирать BLE-пакеты, считать расстояние до маячков и вычислять координаты телефона методами трилатерации.

2.2 Фильтрация RSSI методом скользящего среднего

Даже при статичном положении центрального устройства значения уровня принимаемого сигнала RSSI существенно варьируются. Для сглаживания было решено использовать обычное и экспоненциально взвешенное скользящее среднее. Работа фильтра наглядно продемонстрирована на Рис.3.

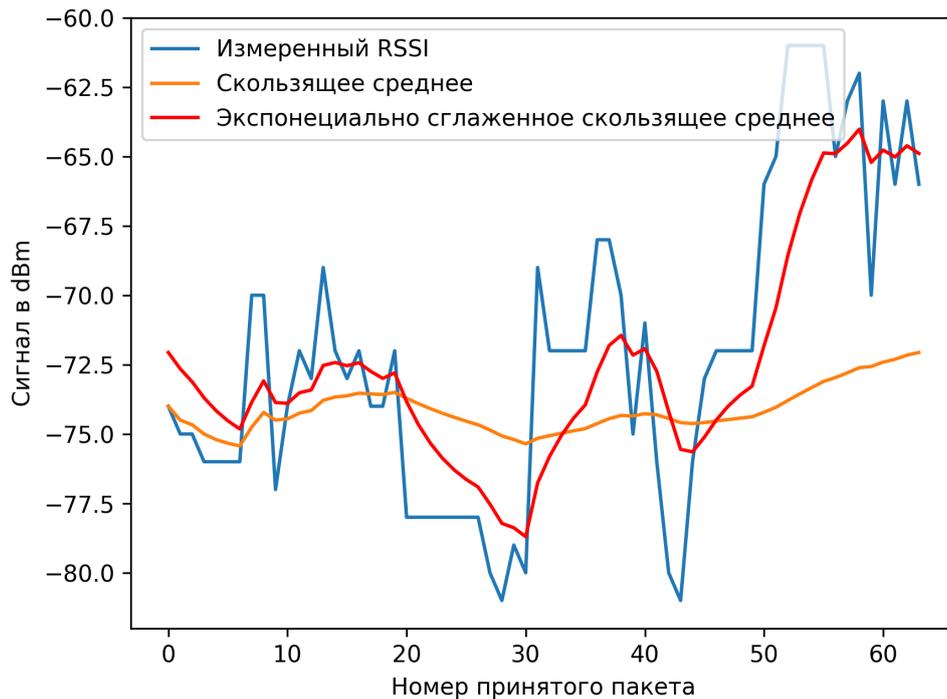


Рис. 3: Пример работы фильтра

На графике приводится сравнение измеренных значений RSSI, значений, к которым был применен фильтр скользящего среднего, и тех, к которым был применен фильтр экспоненциально сглаженного скользящего среднего. Оба фильтра сглаживают RSSI, учитывая значения, полученные раньше, однако экспоненциальный делает это более точно.

2.3 Вычисление расстояний и координат

Для вычисления расстояния по вышеприведенной формуле 2 необходимо для каждого эксперимента вычислить коэффициент потерь мощности сигнала, поскольку он зависит от внешних условий. Также нужно для каждого значения мощности передачи маячка провести процесс калибровки значения RSSI на одном метре.

Коэффициент потери мощности n вычисляется экспериментально, он зависит от шумового фона (другие Bluetooth-устройства, точки доступа Wi-fi, и т.д.) и препятствий на пути распространения сигнала (стены, перегородки, люди). Для каждого эксперимента были измерены значения RSSI

на известных фиксированных расстояниях. Выразив из формулы 2 коэффициент потери мощности, можем посчитать его численно для каждого из расстояний, после чего усреднить.

$$n = \frac{RSSI_{d_0} - RSSI}{10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)}.$$

| <i>Помещение</i> | <i>RSSI на 1м</i> | <i>RSSI на 3м</i> | <i>RSSI на 5м</i> | <i>n</i> |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| №1 | -63 | -77 | -84 | 3.1 |
| №2 | -63 | -73 | -79 | 2.3 |

Таблица 1: RSSI на фиксированных расстояниях и усредненное n

Найдем значения RSSI на одном метре для различных мощностей маячка. Из спецификации устройства [9] известно, что диапазон устанавливаемой мощности передатчика: $[-20dBm, +4dBm]$. Будем проверять для крайних значений и одного промежуточного.

| | <i>+4dBm</i> | <i>-8dBm</i> | <i>-20dBm</i> |
|------------|--------------|--------------|---------------|
| RSSI на 1м | -63 | -68 | -75 |

Таблица 2: Откалиброванное RSSI на 1 метре

Чтобы улучшить точность измерений, во время экспериментов производились замеры RSSI большого числа пакетов, после чего к полученным данным применялся фильтр экспоненциально сглаженного скользящего среднего, затем отбрасывались 10% наибольших и 10% наименьших значений (как это делается в [14]), оставшиеся значения усреднялись.

В процессе подготовки к экспериментам метод хорд показал себя существенно хуже, чем метод Левенберга-Марквардта, реализованный в библиотеке [15], поэтому было принято решение отказаться от его использования в этой работе.

Глава 3. Эксперименты

Тестирование прототипа приложения проходило в несколько этапов. В этой главе будет описана постановка экспериментов, приведены результаты, их визуализация и анализ.

3.1 Подготовка к проведению экспериментов

1. Выбор подходящих помещений.

Одна из задач данной работы – проведение ряда экспериментов *с разными условиями и параметрами* с целью исследования точности работы разработанного прототипа. С этой целью для проведения экспериментов были выбраны два помещения, различающиеся по размерам и характеристикам:

- Маленькая комната в общежитии. Здание густонаселено, следовательно, вокруг находится множество Wi-fi точек и посторонних Bluetooth сигналов.
- Большая пустая комната, посторонних источников сигналов и перегородок преимущественно нет.

2. Калибровка устройств и вычисление коэффициента потерь мощности.

3. Расстановка шести заранее подготовленных и запрограммированных маячков в каждой из комнат согласно схемам, представленным на Рис. 4 и Рис. 5 соответственно.

3.2 Проведение экспериментов

Для тестирования различных аспектов приложения было принято решение провести два типа экспериментов: замер данных в конкретных точках и составление трека передвижения.

3.2.1 Замер данных данных в конкретных точках

Целью данного испытания было исследовать точность определения положения приёмного устройства в зависимости от длительности сбора данных. Эксперимент проходил следующим образом: для каждой комнаты была разработана схема проведения эксперимента, она приведена на Рис. 4 соответственно. В начале оператор – человек, управляющий приёмным устройством – помещал смартфон в условное место согласно схеме, затем включал приложение и собирал данные в течение 20 с, 1 мин или 2 мин в каждой серии. Затем оператор, не выключая приложения, перемещал смартфон в следующую точку и проводил измерения там. Таким образом были собраны данные со всех выбранных точек.

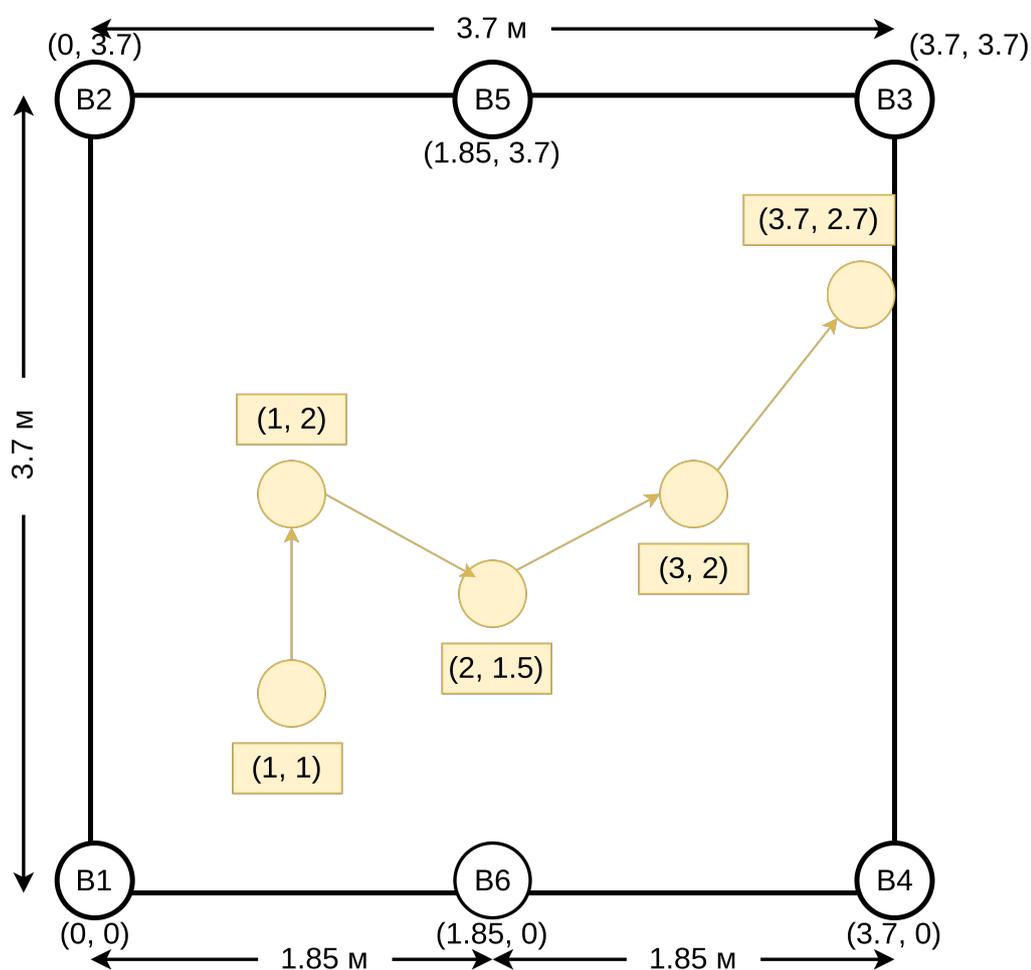


Рис. 4: Первый эксперимент

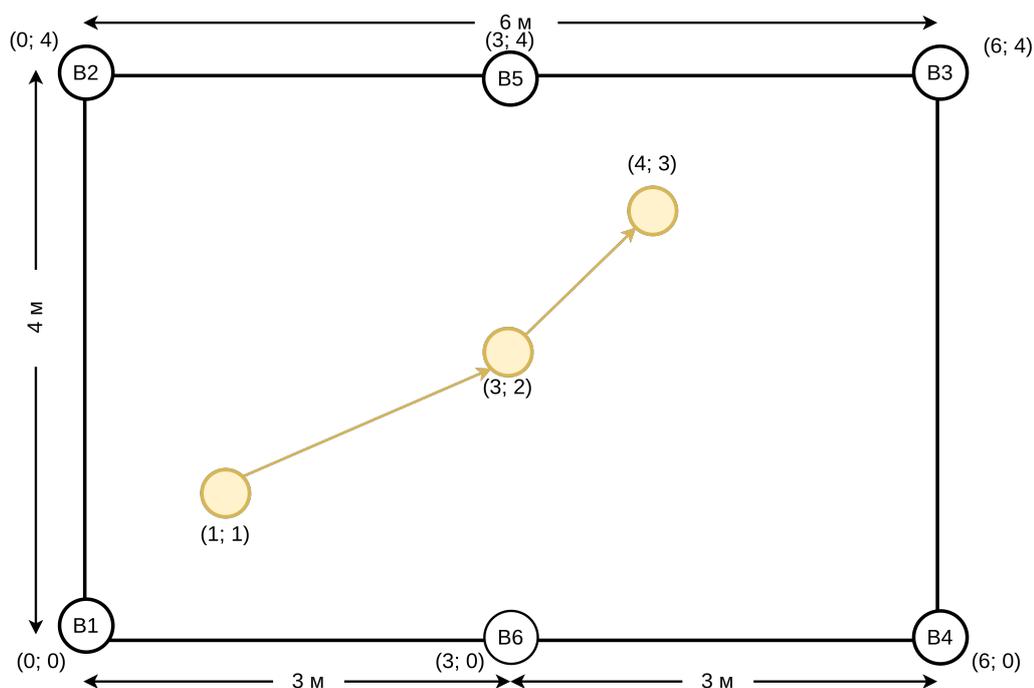


Рис. 5: Второй эксперимент

3.2.2 Составление трека передвижения

Целью данного испытания было исследование работоспособности прототипа при отслеживании положений движущегося объекта. Кроме того, интерес представляла не только возможность составления трека движения, но и зависимость точности измерения этого трека от мощности излучателя маячков. В ходе эксперимента оператор включал приложение и медленно пересекал комнату зигзагом в следующей последовательности: левый нижний угол, левый верхний, правый нижний, правый верхний. Шаги были с интервалом в две секунды, чтобы в каждой новой точке проводилось только одно измерение. Экспериментов данного типа было проведено несколько: по одному для каждого из трёх уровней мощности сигнала и один для режима с переменной мощностью.

Глава 4. Анализ результатов и выводы

4.1 Эксперимент с замером данных в определённых точках

4.1.1 Первое помещение

Как описывалось в предыдущей главе, в каждой точке производился замер данных в течение определённого промежутка времени, различного для каждой серии. Визуализация полученных данных для каждого временного интервала приведена на Рис. 6, 7, 8. Для наглядности измерения, относящиеся к различным условным точкам, обозначены разными цветами. Для исследования точности работы прототипа для каждой группы измерений были вычислены центроиды (как среднее по массиву точек) и стандартное отклонение. Соответствующие точки обозначены на графиках чёрным крестиком.

В серии, где накопление данных происходило в течение 20 секунд, с достаточно хорошей точностью (в пределах погрешности) удалось определить местоположение только первых двух точек. При этом данные довольно сильно разбросаны и определить точность измерений визуально не представляется возможным.

Во второй серии экспериментов было принято решение увеличить время накопления данных до 1 минуты. При рассмотрении графика видно, что разброс данных стал меньше, точки расположены более компактно вокруг положения центроида. Расположения четырёх из пяти точек удалось определить достаточно хорошо.

В третьей серии длительность замеров составила по 2 минуты в каждой точке. В этом эксперименте расположения четырёх точек также были измерены достаточно точно. Интересная особенность данной серии в том, что собранные данные имеют свойство сгущаться к положению центроида. Эта особенность хорошо отображена на графике.

Также, рассмотрев все 3 графика, можно сделать вывод, что положение пятой точки, которая находится прямо у стены и расположена между третьим и четвёртым маячками, не получилось точно определить ни в од-

ной из серий. Возможно, дело в неудачном выборе её положения или во влиянии каких-либо сторонних факторов.

В приведённой ниже таблице представлены расстояния от центроидов до истинных положений опорных точек. Видно, что точность определения координат возрастает с ростом времени накопления данных. При этом существенные улучшения заметны только при переходе от 20 секунд до 1 минуты, дальнейшее увеличение времени замеров не даёт существенного улучшения точности измерений.

| | <i>20 секунд</i> | <i>1 минута</i> | <i>2 минуты</i> |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 точка | 0.30501643371672765 | 0.4600717654886373 | 0.0463448445284779 |
| 2 точка | 0.1130213432805607 | 0.17699626347208833 | 0.1564439199689732 |
| 3 точка | 0.4591112219530021 | 0.26287853423893587 | 0.21363644437120233 |
| 4 точка | 1.064452597747723 | 0.2659928152245989 | 0.26414087977717793 |
| 5 точка | 1.1437389336562451 | 0.3504391316932687 | 1.3441553546881229 |

Таблица 3: Отклонение центроида от истинного положения опорных точек в зависимости от длительности накопления данных.

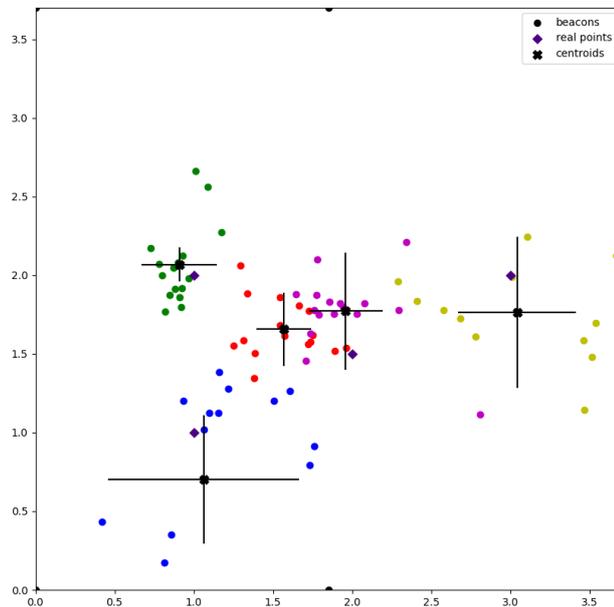


Рис. 6: 20 секунд на точку.

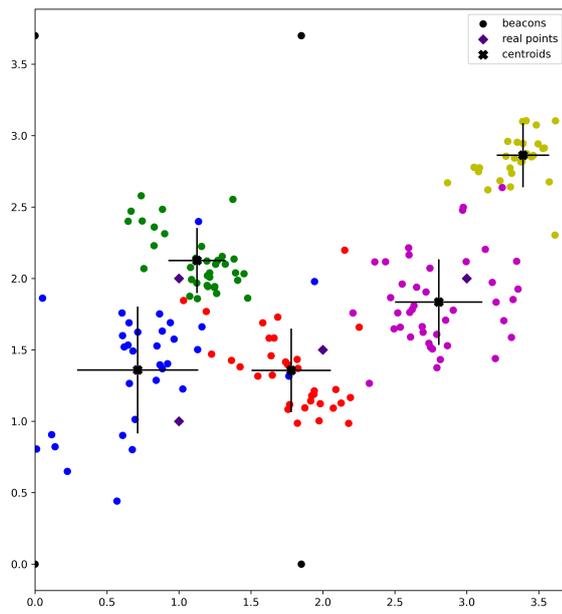


Рис. 7: 1 минута на точку.

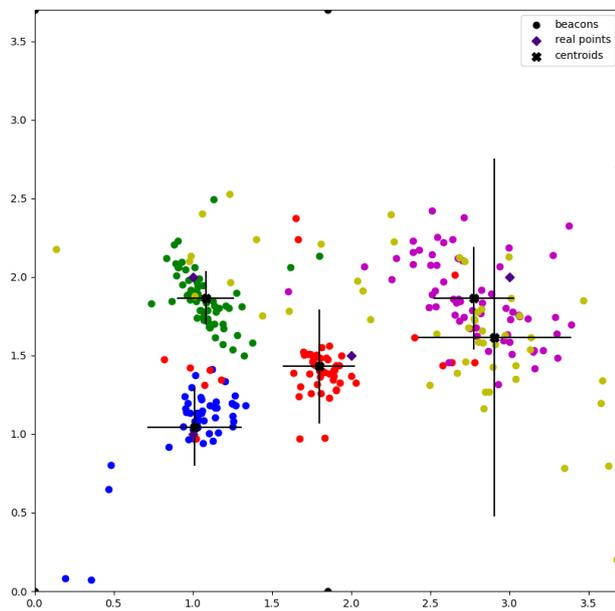


Рис. 8: 2 минуты на точку.

4.1.2 Второе помещение

Для второго помещения эксперимент был проведен аналогичным образом. Визуализация полученных данных для каждого временного интервала приведена на Рис. 9, 10, 11.

В серии, где накопление данных происходило в течение 20 секунд, с достаточно хорошей точностью была определена только третья точка. Во второй серии неплохо получилось определить первую и третью точки. В третьей серии замеров все точки были определены достаточно хорошо.

В приведённой ниже таблице представлены расстояния от центроидов до истинных положений опорных точек. Как и в случае с первым помещением, точность определения координат возрастает с ростом времени накопления данных.

| | <i>20 секунд</i> | <i>1 минута</i> | <i>2 минуты</i> |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 точка | 0.3208575601963413 | 0.2349767572707989 | 0.19522634025900543 |
| 2 точка | 0.4016328226249561 | 0.4110475938383854 | 0.2261157541327958 |
| 3 точка | 0.24025588625851801 | 0.27246058561500935 | 0.2576725145836189 |

Таблица 4: Отклонение центроида от истинного положения опорных точек в зависимости от длительности накопления данных.

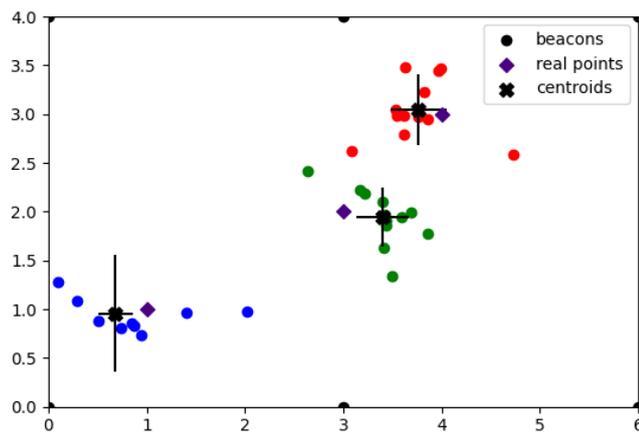


Рис. 9: 20 секунд на точку.

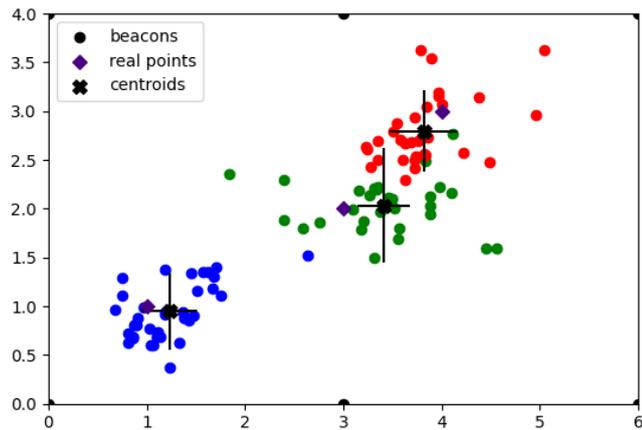


Рис. 10: 1 минута на точку.

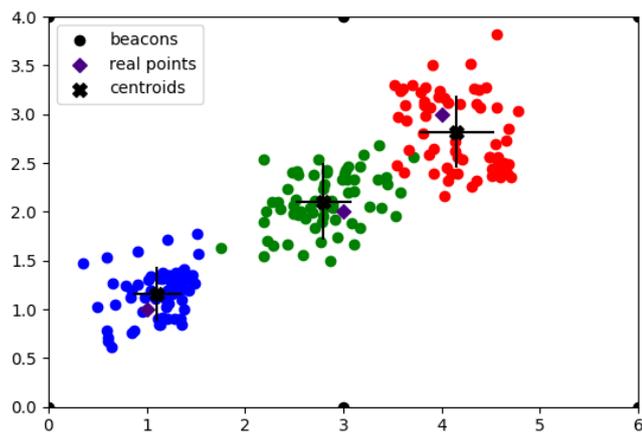


Рис. 11: 2 минуты на точку.

4.2 Эксперимент с отслеживанием траектории перемещения

В ходе этого эксперимента положение оператора в каждой точке было измерено только один раз, что позволяет вычислить траекторию перемещения по комнате. Истинная траектория движения оператора нанесена красной линией. В этом эксперименте точность составления треков была определена визуально.

Визуализация треков при различных уровнях мощности сигнала для первого помещения приведена на Рис. 12. При мощностях $+4\text{dBm}$ и -8dBm , трек будем считать удовлетворительным, однако на мощности -20dBm существенно менее качественный.

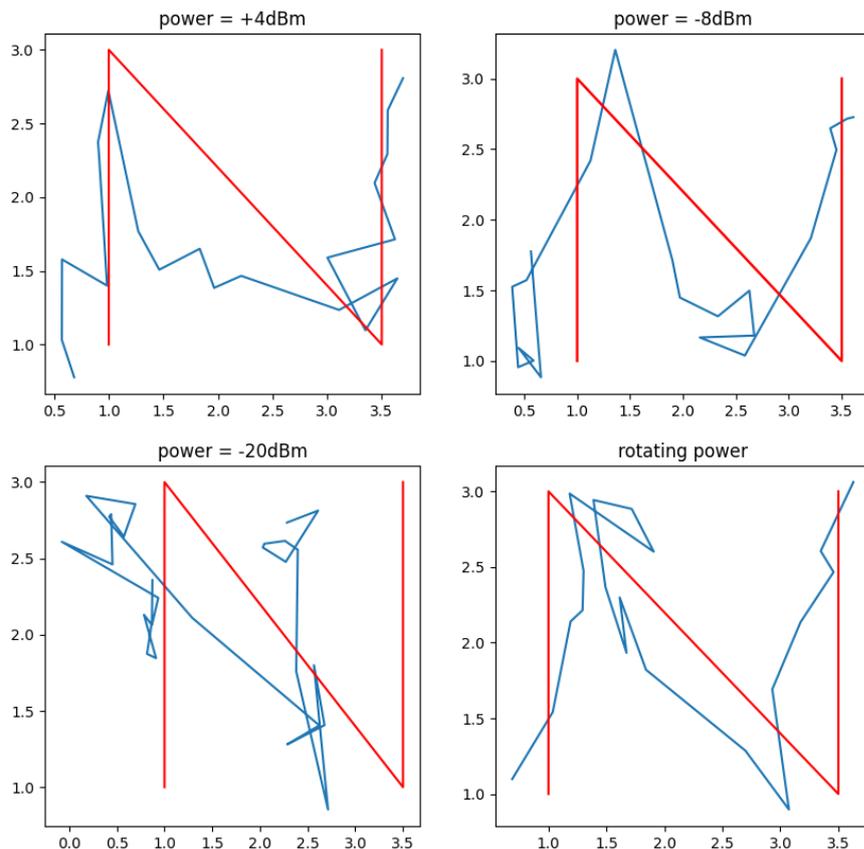


Рис. 12: Сравнение траекторий, вычисленных при различных мощностях в первом помещении

Визуализация треков при различных уровнях мощности сигнала для второго помещения приведена на Рис. 13. При мощности $+4\text{dBm}$ траектория менее гладкая по сравнению с таковой в первом помещении, но направление пути все еще узнается. Однако, в отличие от первого помещения, во втором при мощности $+8\text{dBm}$ некоторые точки траектории существенно удалены от реального пути. Совсем плохой результат получается при мощности -20dBm , предположить исходный путь по составленной траектории

НЕВОЗМОЖНО.

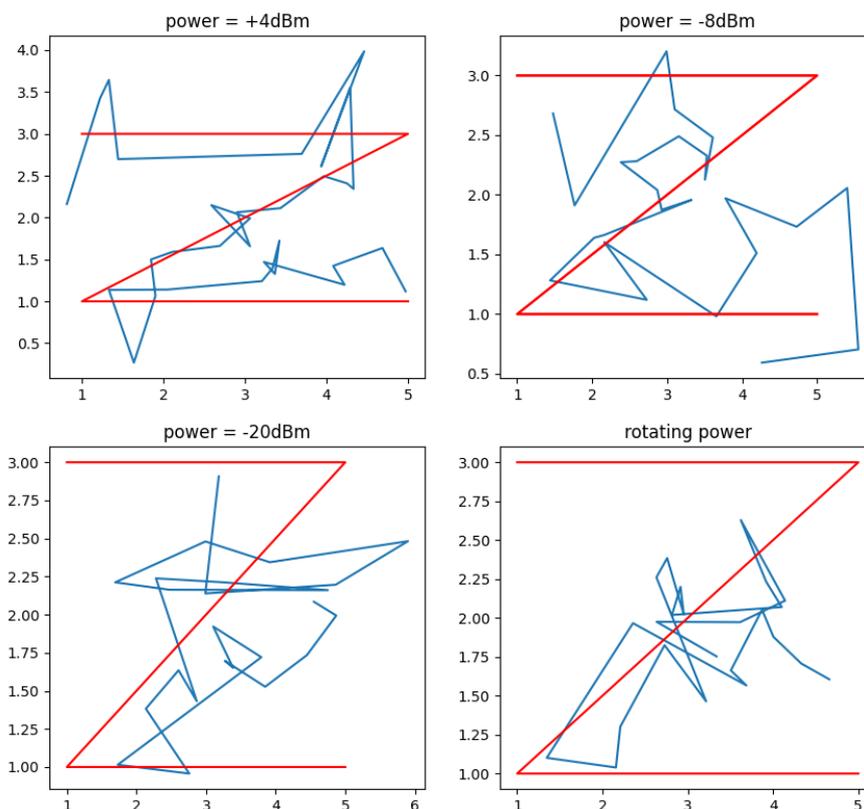


Рис. 13: Сравнение траекторий, вычисленных при различных мощностях во втором помещении

Рассмотрим теперь треки, полученные в режиме переменной мощности. После сравнения траекторий первого помещения был сделан вывод, что точность, достигнутая в режиме переменной мощности, отличается от точности, полученной при максимальной мощности несущественно, а следовательно также является удовлетворительной. При этом, работая в режиме переменной мощности, маячки будут потреблять меньше электроэнергии, что положительно скажется на продолжительности их работы, без необходимости проведения процедур технического обслуживания. Однако во втором помещении трек, составленный в режиме переменной мощности совсем неудачный. Предположительно это может быть связано с расширением размеров комнаты, а следовательно и увеличением расстояния между

маячками. В качестве потенциального улучшения можно увеличить долю времени, которое маячок работает на высокой мощности или расставить по комнате еще несколько маячков.

По итогу проведения экспериментов была продемонстрирована способность прототипа к построению траекторий. Было проведено исследование, показавшее зависимость точности построенной траектории от мощности маячков. Был предложен режим с переменной мощностью, но его работоспособность оказалось удовлетворительной только при небольших размерах комнаты.

4.3 Возможные усовершенствования

Для дальнейшего улучшения точности предлагается:

- Использовать в приложении инерциальные датчики смартфона (акселерометр, гироскоп, магнитометр). Это позволит существенно улучшить точность расчета траектории.
- Использовать NFC. Это может помочь увеличить точность при небольшом расстоянии от маячка до смартфона.
- Использовать Wi-fi роутеры. Это позволит расширить возможности системы, так как в большинстве зданий уже установлена сеть роутеров.

Также, в дальнейшем планируется улучшить непосредственно приложение, сделать его более удобным для пользователя.

Заключение

В процессе выполнения работы были достигнуты следующие цели:

- Исследованы существующие решения для задачи определения местоположения внутри помещения с помощью беспроводных сетей.
- Разработано простое приложение под ОС Android, способное собирать BLE-пакеты, считать расстояние до маячков и вычислять координаты телефона методами трилатерации.
- Проведены экспериментальные исследования прототипа в различных условиях и с различными параметрами.
- Реализована идея использования маячков с переменной мощностью.

Список литературы

- [1] Comparison of 2.4 GHz WiFi FTM- and RSSI-Based Indoor Positioning Methods in Realistic Scenarios / Markus Bullmann, Toni Fetzner, Frank Ebner, Markus Ebner, Frank Deinzer and Marcin Grzegorzec
- [2] An Improved BLE Indoor Localization with Kalman-Based Fusion: An Experimental Study/ Jenny Röbesaat, Peilin Zhang, Mohamed Abdelaal, and Oliver Thee
- [3] ERFS: Enhanced RSSI value Filtering Schema for Localization in Wireless Sensor Networks / Seung-chan Shin, Byung-rak Son, Won-geun Kim, Jung-gyu Kim
- [4] Three-dimensional positioning system using Bluetooth low-energy beacons / Hyunwook Park, Jaewon Noh, Sunghyun Cho
- [5] A new three object triangulation algorithm based on the power center of three circles./ V. Pierlot, M. Van Droogenbroeck, M. Urbin-Choffray. // Research and Education in Robotics (EUROBOT), 161:248-262, 2011.
- [6] Intro to Bluetooth Low Energy: The Easiest Way to Learn BLE / Mohammad Afaneh
- [7] Real-time People Tracking and Identification from Sparse mm-Wave Radar Point-clouds / Jacopo Pegoraro, Michele Rossi
- [8] Adaptive distance estimation based on rssi in 802.15.4 network / M. Botta, M. Simek
- [9] Ebyte E73-TBA manual. URL: <https://www.manualslib.com/download/1907264/Ebyte-E73-Tba.html>
- [10] nrf52832 chip specificaton. URL: https://infocenter.nordicsemi.com/topic/struct_nrf52/struct/nrf52832_ps.html
- [11] nRF5 SDK. URL: <https://www.nordicsemi.com/Software-and-tools/Software/nRF5-SDK/Download>

- [12] AltBeacon Protocol specification. URL: <https://github.com/AltBeacon/spec>
- [13] GPS: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить / Б.К. Леонтьев
- [14] Android Beacon Library. URL: <https://altbeacon.github.io/android-beacon-library>
- [15] Trilateration library. URL: <https://github.com/lemmingapex/trilateration>