

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

**Паскевич Артем Андреевич**

**Выпускная квалификационная работа бакалавра**

**Определение координат и навигация внутри  
помещений**

Направление 010300

Фундаментальная информатика и информационные технологии

Научный руководитель,

PhD,

доцент

Корхов В. В.

Санкт-Петербург

2017

# Содержание

<b>Содержание</b>	<b>2</b>
<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>Постановка задачи</b>	<b>6</b>
<b>Обзор литературы</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1. Существующие решения</b>	<b>8</b>
1.1. Решения от популярных картографических сервисов	8
1.2. Коммерческие решения	10
<b>Глава 2. Технологии и алгоритмы</b>	<b>11</b>
2.1. Использование беспроводных технологий	11
2.1.1 Камера	11
2.1.2 Инфракрасное излучение и ультразвук	11
2.1.3 Wi-Fi	12
2.1.4 Bluetooth	12
2.1.5 RFID и NFC	14
2.1.6 GNSS (GPS, ГЛОНАСС)	15
2.1.7 Инерциальная навигация (ИНС)	15
2.1.8 Магнитометрия	16
2.2. Определение расстояния с помощью RSSI	16
2.3. Трилатерация	17
2.4. Алгоритмы сглаживания и фильтрации данных	19
2.4.1 Сглаживание методом скользящего среднего	19

2.4.2 Фильтр Калмана	20
<b>Глава 3. Реализация</b>	<b>22</b>
3.1. Выбор технологий	22
3.2 Структура приложения	23
3.3 Определение координат	24
3.3.1. Расчет расстояния	24
3.3.2. Идентификация маяка и получение координат	27
3.4 Промежуточные результаты	28
3.5 Сглаживание и фильтрация данных	29
3.6 Упрощение алгоритма трилатерации	31
<b>Глава 4. Обзор работы приложения</b>	<b>33</b>
4.1 Результаты работы приложения	33
4.2 Последующее развитие сервиса	34
<b>Выводы</b>	<b>35</b>
<b>Заключение</b>	<b>36</b>
<b>Список литературы</b>	<b>37</b>
<b>Приложение</b>	<b>39</b>

## Введение

На сегодняшний день сложно представить свою жизнь без использования навигационных сервисов. Навигация стала неотъемлемой частью нашей жизни и используется повсеместно начиная от обычных пешеходов, таксистов, служб доставки и заканчивая авиацией, военной и космической промышленностью. Благодаря развитию мобильных технологий, связи и активным внедрением глобальных спутниковых систем, таких как GPS или ГЛОНАСС, навигационные сервисы стали доступны любому человеку в любое время и практически в любом месте. Но, если попытаться применить подобные системы позиционирования внутри помещений, где сигнал от вышек сотовой связи или спутников может быть очень слабым или отсутствовать вовсе, можно столкнуться с неизбежными задержками и большими погрешностями в определении местоположения.

На рынке навигационных услуг в 2013 году экспертами была замечена тенденция на спонсирование сервисов для навигации внутри помещений. Это связано с растущим спросом на создание сервисов indoor-навигации, который по мнению экспертов в ближайшее время будет продолжать расти [1].

Для большинства организаций проблема создания системы для навигации внутри помещений стоит очень остро. Зачастую такие организации располагаются в нескольких зданиях, имеющих очень сложную и запутанную структуру. Для посетителей и персонала использование навигационного сервиса может значительно облегчить процесс поиска и построения маршрута до нужной точки на карте. Администрация же дополнительно получает возможность собирать информацию о местоположении пользователей и использовать ее для оптимизации работы.

На данный момент на рынке навигационных сервисов уже существует множество компаний, предлагающих свои услуги по созданию и

развертыванию подобных систем, однако до сих пор не существует какого-либо единого и наилучшего подхода для определения координат пользователя внутри помещений. Периодически появляются решения, применяющие не используемые ранее подходы. Примером может послужить компания IndoorAtlas [2], которая внедряет технологии, основанные на обнаружении магнитных аномалий, для решения задачи навигации внутри помещений.

## Постановка задачи

Как было замечено ранее, спрос на создание сервисов indoor-навигации на рынке навигационных услуг будет расти. В частности, у некоторых организаций может появиться необходимость в создании независимого сервиса с возможностью внедрения собственных технологий и алгоритмов, что не представляется возможным при использовании существующих на данный момент решений на рынке.

Например, компании Vista [3], сотрудничающей с большим количеством медицинских организаций, занимающейся автоматизацией различных бизнес процессов и внедрением современных технологий, потребовалось создание подобного сервиса для облегчения навигации посетителей внутри медицинских учреждений.

Целью данной работы является разработка прототипа мобильного приложения для решения задачи навигации внутри помещений в условиях неподходящих для использования привычных технологий определения координат.

Были поставлены следующие задачи:

- Исследование доступных технологий и решений.
- Разработка прототипа приложения для мобильных устройств на базе ОС Android, позволяющего определять координаты пользователя в пространстве с точностью до 2 метров.
- Составление списка предложений для улучшения качества работы и дальнейшего развития приложения.

## Обзор литературы

В [1] описаны результаты исследования рынка навигационных сервисов и актуальность проблемы indoor-навигации.

Решения некоторых популярных компаний представлены в [2], [4-7].

[3] - компания, заинтересованная в решении проблемы навигации внутри помещений

Спецификации различных протоколов для работы с BLE-маяками представлены в [8] и [9].

В статье [10] выводится зависимость показателя уровня принимаемого сигнала от расстояния между приемником и излучателем.

В [11] рассказывается о применении алгоритма трилатерации к задаче навигации, а также приводятся некоторые способы решения проблемы трилатерации в пространстве.

Статья [12] является оригинальной статьей Рудольфа Калмана, в которой описывается популярный фильтр Калмана.

В [14] содержится вся необходимая информация об используемом SDK от компании Accent Systems. Информацию о самой компании можно найти в [13].

В [15] можно ознакомиться со статистикой android устройств по различным критериям.

[16] представляет собой репозиторий, содержащий всю необходимую информацию о библиотеке trilateration.

В работе [17] описывается применение алгоритма Левенберга-Марквардта для решения системы уравнений методом наименьших квадратов.

# Глава 1. Существующие решения

На данный момент на рынке навигационных услуг существует некоторое количество решений от различных организаций. В данной главе будут рассмотрены самые популярные из них, описаны их преимущества и недостатки.

## 1.1. Решения от популярных картографических сервисов

В 2011 году компания Google запустила сервис “Схемы зданий” (Рис. 1.1), который вместе с привычными технологиями определения местоположения использует информацию о сетях Wi-Fi для навигации пользователей. На данный момент сервис доступен лишь в некоторых крупных объектах, таких как торговые центры и аэропорты, в 25 странах мира [4].

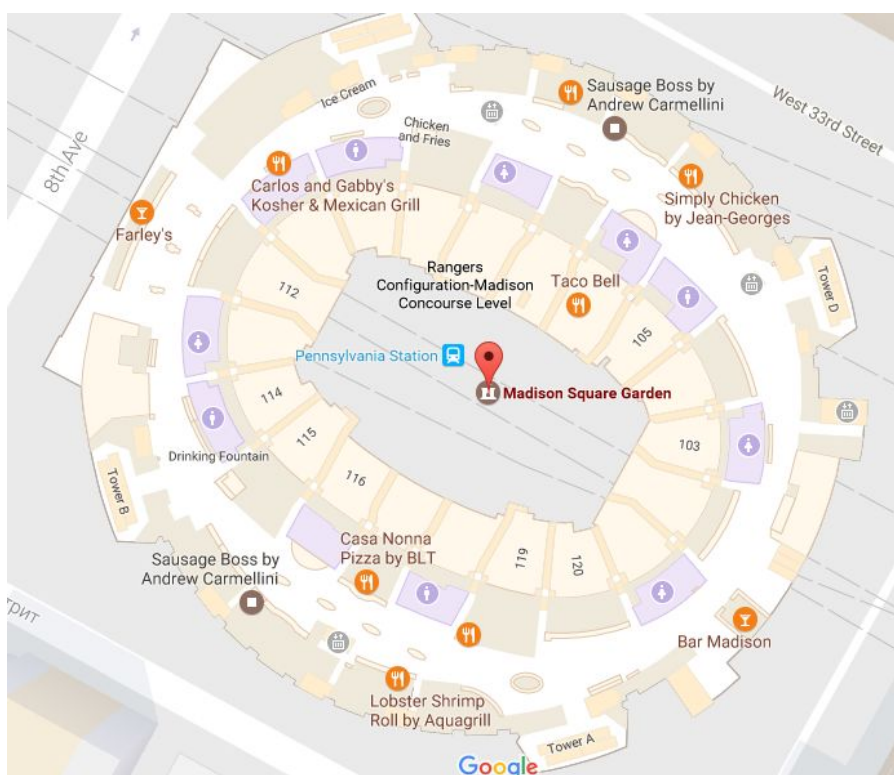


Рис. 1.1 “Схемы зданий” от Google





инструментов для создания навигационного сервиса, что оставляет необходимость решения задачи [7].



Рис. 1.3 OpenStreetMap Indoors

## 1.2. Коммерческие решения

На данный момент на рынке навигационных услуг уже существует несколько компаний и стартапов, которые предлагают свои решения в области indoor-навигации. Все они используют различные подходы к решению проблемы, применяя огромный спектр технологий от GPS, Wi-Fi и Bluetooth до магнитометрии, использовании камер мобильных устройств и построения полноценных ИНС на базе инерциальных датчиков. Некоторые компании также являются производителями оборудования, которое применяется в их решениях.

Как правило использование сервисов от таких компаний сопровождается большой стоимостью услуг, а также проблемами при интеграции со сторонними технологиями. Это может оказаться большой проблемой для организаций, имеющих потребность создания и развертывании системы определения координат внутри помещений.

## **Глава 2. Технологии и алгоритмы**

В данной главе рассматриваются возможности использования различных технологий и алгоритмов, их сильные и слабые стороны в применении для решения поставленной задачи.

### **2.1. Использование беспроводных технологий**

Для определения координат внутри помещений можно применять различные технологии. Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки перед другими и больше подходит для решения определенного круга задач.

#### **2.1.1 Камера**

С развитием технологий компьютерного зрения становится возможным использование камеры мобильного устройства для определения местоположения. Для этого дополнительно можно использовать систему меток, расположенных внутри помещения. Выглядит такая технология перспективно, однако для данного решения могут потребоваться довольно большие вычислительные мощности и огромный расход батареи. На данный момент схожий подход применяется в робототехнике.

#### **2.1.2 Инфракрасное излучение и ультразвук**

На данный момент используется для навигации в робототехнике. Основная проблема использования подобных технологий совместно с мобильными устройствами заключается в необходимости использования специальных приемников сигнала.

### **2.1.3 Wi-Fi**

Использование точек доступа Wi-Fi является, пожалуй, наиболее популярным решением в этой области. Для определения координат пользователя используется показатель уровня принимаемого сигнала (RSSI - Received Signal Strength Indicator). RSSI - полная мощность принимаемого приемником сигнала, измеряемая по логарифмической шкале в дБм (дБм, децибел относительно 1 милливатта). RSSI является единственным показателем с помощью которого возможно измерить расстояние от приемника сигнала до ресивера. С помощью трилатерации, зная расстояния до нескольких ближайших передатчиков и их координаты, становится возможным вычислить координаты пользователя. Другим же способом является создание карты отпечатков (fingerprints) RSSI. В случае использования последнего необходимо проводить предварительное сканирование и запись векторов значений RSSI от передатчиков сигнала, до некоторого набора точек в помещении. После обучения система выбирает наиболее подходящую точку на основании получаемых RSSI.

Использование Wi-Fi для навигации внутри помещений весьма удобно тем, что можно использовать уже существующую инфраструктуру точек доступа. Однако, для получения результатов достаточной точности может быть необходимым увеличение их числа, что может стать большой проблемой ввиду зависимости от наличия точки подключения к сети питания.

### **2.1.4 Bluetooth**

Использование технологии bluetooth для определения местоположения пользователя полностью повторяет опыт использования точек доступа Wi-Fi, но при этом решает некоторые проблемы. Технология Bluetooth Low Energy

позволяет использовать небольшие bluetooth маяки, способные работать до нескольких лет на одной батарее. Благодаря этому становится гораздо проще изменять их местоположение и добавлять новые устройства в уже существующую инфраструктуру маяков.

Наиболее популярными протоколами, обеспечивающими передачу данных между маяками и пользовательскими устройствами являются iBeacon [8], разработанный Apple, и несколько более открытый Eddystone [9] от Google.

- iBeacon

iBeacon - протокол, разработанный компанией Apple, для передачи данных между маяками и устройствами, поддерживающими технологию Bluetooth Low Energy.

В пакете передается следующая информация:

1. UUID - 128-бит. Является уникальным идентификатором для группы маяков, что позволяет определять их тип или принадлежность одной организации.
2. Major - 16-бит. Является беззнаковым значением, с помощью которого могут быть сгруппированы маяки с одинаковым UUID.
3. Minor - 16-бит. Является беззнаковым значением, позволяющим группировать маяки с одинаковым UUID и Major.

- Eddystone

Eddystone - это открытый формат, разработанный Google с упором на прозрачность и надежность. Eddystone поддерживается устройствами как на базе Android, так и iOS. Протокол поддерживает несколько различных типов полезной нагрузки:

1. Eddystone-UID:        16-байтовый        статичный        уникальный

идентификатор, состоящий из 10-байтового Namespace и 6-байтового Instance.

2. Eddystone-TLM: предназначен для передачи информации о маяке. Может содержать такие данные как уровень заряда батареи, температуру, количество переданных пакетов с момента последнего перезапуска устройства.
3. Eddystone-URL: Транслирует URL, который может быть использован устройствами при получении
4. Eddystone-EID: Передает периодически изменяющийся идентификатор. Является защищенной версией UID, что позволяет защититься от различного рода угроз, использующих маяки для передачи ложной информации.

### **2.1.5 RFID и NFC**

RFID (Radio Frequency IDentification) - способ идентификации, основанный на использовании радиочастотного электромагнитного излучения.

NFC (Near Field Communication) - технология беспроводной передачи данных, позволяющая обмениваться данными между устройствами на коротких расстояниях.

На данный момент многие смартфоны оснащены NFC чипами, однако применение этой технологии осложнено небольшим (до 20 см) радиусом действия.

Использование RFID позволяет принимать сигналы от меток на гораздо больших расстояниях. Такой подход может использоваться в складских помещениях, где напольное покрытие покрывают метками, а погрузчики оснащены считывателями, что позволяет им принимать информацию и

определять свое местоположение. К сожалению, невозможно или, по крайней мере, нецелесообразно выдавать каждому пользователю специальный приемник сигнала. Все это приводит к тому, что данные технологии в поставленных условиях не могут быть использованы для получения координат пользователя.

### **2.1.6 GNSS (GPS, ГЛОНАСС)**

Спутниковые системы навигации уже много лет используются для получения географических координат объектов, что означает необходимость предварительной привязки карты помещения к географическим координатам. Но как говорилось ранее в некоторых условиях уровень приема сигнала от спутников может быть недостаточен для определения местоположения пользователя. Существуют примеры использования ретрансляторов сигнала, установленных внутри помещений, но стоимость такого решения велика, а сами ретрансляторы снижают точность определения координат.

Спутниковые системы навигации могут быть использованы для решения поставленной задачи при приемлемом уровне сигнала в качестве дополнительной технологии. Это поможет сэкономить средства при создании собственной инфраструктуры маяков или снижая погрешность при использовании ИНС.

### **2.1.7 Инерциальная навигация (ИНС)**

Инерциальные навигационные системы используют внутренние датчики устройства (акселерометр, гироскоп, компас) для получения информации об ускорении и угловых скоростях объекта. На основе этих данных и происходит вычисление изменения координат тела. Однако, для успешного применения необходимо знать начальную координату, а также

периодически сверять местоположение, полученное от других источников. Это требуется для уменьшения погрешности, которая значительно растет с каждым новым шагом вычисления.

Таким образом ИНС могут быть использованы совместно с другим решением, как дополнительная технология, позволяющая увеличить точность вычисления местоположения пользователя.

### **2.1.8 Магнитометрия**

Использует информацию о магнитном поле земли. Навигация производится с помощью компаса, который на данный момент присутствует у подавляющего большинства мобильных устройств.

Основной недостаток такого подхода заключается в том, что показания компаса сильно подвержены влиянию от металлических сооружений или электромагнитного излучения. Если источники помех неизменны, то для уменьшения погрешности можно применить предварительную калибровку системы, однако источники электромагнитного излучения, как правило, непостоянны и присутствуют практически повсеместно, а значит калибровку для такого случая провести не представляется возможным.

## **2.2. Определение расстояния с помощью RSSI**

Единственным показателем, с помощью которого возможно определить расстояние до посылающего радиосигнал устройства, является RSSI.

Уравнение зависимости RSSI от расстояния выводится из формулы передачи Фрииса (Friis) и имеет следующий вид [10]:

$$P_d = P_0 - 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$



где:

$P_d$  - RSSI (dBm),

$P_0$  - мощность сигнала, измеренная на расстоянии  $d_0$ ,

$n$  - коэффициент потерь мощности сигнала от 2 до 4 для воздуха (в зависимости от наличия препятствий),

$lg$  - десятичный логарифм,

$d$  - расстояние до передатчика,

$d_0$  - калибровочное расстояние, на котором производилось измерение мощности  $P_0$  (например, 1м).

Таким образом, уравнение для расчета расстояния выглядит следующим образом:

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{P_0 - P_d}{10 \cdot n}} \quad (2)$$

### 2.3. Трилатерация

Трилатерация - это метод, позволяющий определить координаты точки с помощью построения смежных треугольников, в которых измеряются длины их сторон [11]. Решение задачи трилатерации для навигации в трехмерном пространстве сводится к решению задачи поиска точки пересечения трех или более сфер (Рис. 2.1). В качестве координат центров выступают известные по условию координаты маяков, а радиусами являются расстояния от искомой точки до соответствующих маяков.

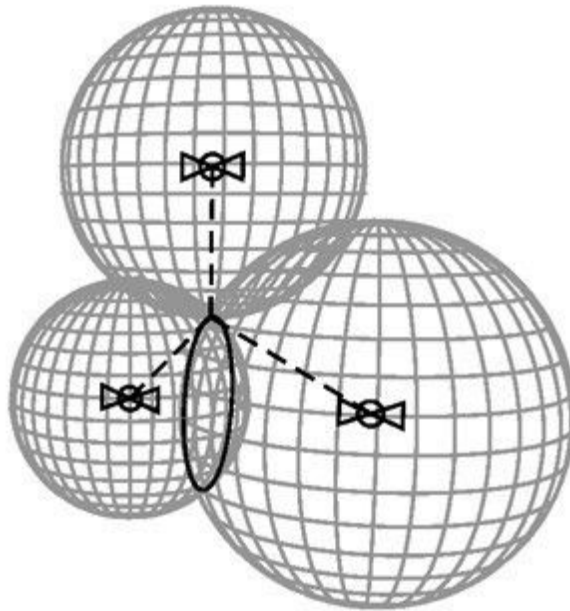


Рис. 2.1 Трилатерация

В случае трех сфер задача может быть упрощена с помощью приведения координат к следующему виду:

- Все точки лежат в плоскости  $Z=0$
- Координата одной из точек совпадает с началом координат
- Вторая точка лежит на оси  $x$

Далее, решая систему уравнений, находятся координаты искомой точки.

Однако, расстояния могут быть вычислены неточно, в качестве решения может выступать не единственная точка или решений может не быть вовсе. Все это может привести к неопределенности.

Другим способом определения координат с помощью трилатерации в трехмерном пространстве является решение системы линейных уравнений, которая может быть переопределена, т.е. количество уравнений может превышать количество неизвестных. Для этого может быть использован, например, метод наименьших квадратов.

## 2.4. Алгоритмы сглаживания и фильтрации данных

К сожалению, при использовании технологий использующих радиосигналы для передачи данных некоторые показатели (например, RSSI) могут быть неточными. Для решения этой проблемы могут применяться различные алгоритмы сглаживания и фильтрации.

### 2.4.1 Сглаживание методом скользящего среднего

Скользящее среднее или скользящая средняя - это название для семейства функций, значения которых вычисляются как среднее некоторого периода последних значений исходной функции. В общем случае скользящие средние вычисляются по формуле:

$$A_k = \sum_{i=1}^{n-1} w_{k-i} \cdot p_{k-i}$$

где:

$A_k$  - значение вычисляемого скользящего среднего в точке  $k$ ,

$n$  - количество значений исходной функции, используемых для вычисления скользящего среднего,

$w_{k-i}$  - нормированный весовой коэффициент значения  $p_{k-i}$ . Нормированный означает, что сумма всех коэффициентов равна 1.

$p_{k-i}$  - значение исходной функции в точке  $k - i$

Скользящее среднее называют стандартным, если все весовые коэффициенты равны между собой:

$$A_k = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{k-i}$$

Линейно взвешенным скользящим средним называют скользящее среднее, весовые коэффициенты которого равны соответствующему числу арифметической прогрессии:

$$A_k = \frac{2}{n \cdot (n+1)} \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) \cdot p_{k-i}$$

Экспоненциально взвешенным скользящим средним называют скользящее среднее, весовые коэффициенты которого экспоненциально убывают и не равны нулю:

$$A_k = \alpha \cdot p_k + (1 - \alpha) \cdot A_{k-1}$$

где  $\alpha$  - сглаживающая константа, принимающая значение от 0 до 1.

#### 2.4.2 Фильтр Калмана

Фильтр Калмана является итерационным рекурсивным фильтром, позволяющий оценивать состояние динамической системы на основании оценки состояния системы на предыдущем этапе и неполных и/или зашумленных измерений, полученных на текущей итерации. На каждой итерации алгоритм делится на две фазы: фаза экстраполяции или прогнозирования и фаза коррекции.

- Фаза экстраполяции

Во время экстраполяции фильтр получает предварительную оценку состояния системы на текущий шаг по итоговой оценке состояния с предыдущего шага. Эту предварительную оценку также называют априорной оценкой состояния, так как для её получения не используются наблюдения соответствующего шага.

- Фаза коррекции

В фазе коррекции априорная экстраполяция дополняется соответствующими текущими измерениями для коррекции оценки. Скорректированная оценка также называется апостериорной оценкой состояния, либо просто оценкой вектора состояния.

Как правило, идет чередование этих фаз. То есть экстраполяция

производится по результатам коррекции предыдущего шага, а коррекция на основании результатов экстраполяции при получении новых данных на текущем шаге [12].

## Глава 3. Реализация

В этой главе описывается выбор технологий и библиотек для создания мобильного сервиса, логика работы приложения, а также показаны подходы к реализации, возникшие в процессе проблемы и способы их устранения.

### 3.1. Выбор технологий

Сравнив все рассмотренные ранее технологии, было принято решение использовать BLE-устройства в качестве основной технологии для определения координат пользователя. Выбор обусловлен тем, что в последнее время производители мобильных устройств сильно ограничивают возможности использования Wi-Fi в целях защиты своих пользователей от рекламы. Остальные же системы имеют ряд существенных недостатков, что не позволяет использовать их в качестве основной.

Для создания прототипа были предоставлены пять устройств модели “iBKS105” от компании Accent Systems [13]. Данные устройства имеют возможность одновременной передачи данных по 6 каналам: 2 для протокола iBeacon, 4 для Eddystone. Для работы с ними используется открытый SDK от производителя [14]. Это позволяет упростить процедуры сканирования, чтения, записи, а также предоставляет другие удобные инструменты для работы с маяками. Использование SDK доступно лишь для приложений, разрабатываемых для версии, android не ниже 5.0, что не является существенным ограничением, так как этому критерию удовлетворяют более 70% android устройств [15].

В качестве формата для передачи данных был выбран Eddystone, являющийся более открытым и функциональным по сравнению с iBeacon. Однако в дальнейшем, благодаря возможности одновременной передачи устройствами данных по нескольким протоколам, iBeacon тоже может быть

использован наряду с Eddystone.

Для определения координат в пространстве будет использоваться метод трилатерации. Этот выбор обусловлен тем, что построение карты отпечатков является долгим и трудоемким процессом, требующим большого количества измерений, а также предварительного обучения системы. Все это значительно усложняет процесс тестирования приложения, так как требует намного больше времени для внесения изменений по сравнению с трилатерацией, где требуется лишь информация о местоположении маяков.

Для трилатерации используется открытая библиотека `trilateration` версии 1.0.2 от `lemmingarex`, которая была разработана специально для решения подобных задач и на данный момент продолжает активно развиваться и улучшаться [16].

### **3.2 Структура приложения**

Примерная структура приложения выглядит следующим образом (Рис. 3.1). Пользователь взаимодействует с активностью (компонент приложения, обеспечивающий взаимодействие с пользователем), на которой отображается вся необходимая информация (карта, местоположение на карте). Координаты устройства активность получает от привязанной к ней службе (компонент приложения, позволяющий выполнять операции в фоновом режиме и не имеющий пользовательского интерфейса), в которой в фоновом режиме производятся все необходимые действия и вычисления. Для работы алгоритма трилатерации необходима информация о координатах маяков, которая хранится в специальной структуре в виде пар ключ-значение, где в качестве ключа выступает уникальный идентификатор маяка, а в качестве значения - его координаты в пространстве. На начальном этапе разработки для облегчения процессов отладки и тестирования такая структура может

являться частью программного кода.



Рис. 3.1 Структура приложения

### 3.3 Определение координат

#### 3.3.1. Расчет расстояния

Расчет расстояния производится по формуле (2). Единственной переменной в ней является значение RSSI, получаемое устройством при сканировании BLE-устройств. Однако перед началом вычисления необходимо определить значения калибровочного RSSI (уровня сигнала, измеренного на калибровочном расстоянии) и коэффициента потери мощности сигнала.

Ввиду того, что показатель уровня принимаемого сигнала является не стабильным даже на небольших расстояниях, в качестве калибровочного значения RSSI было принято усредненное значение по результатам, полученным за 45 секунд (Рис. 3.2). При установленной частоте передачи 450 мс за 45 секунд передается около 100 пакетов. Среднее значение, полученное на основании этих данных, равно -49.3. Этот параметр может быть измерен для каждого маяка в отдельности, если в разных частях здания внешние источники влияют на качество сигнала с разной силой. Так как Eddystone позволяет передавать калибровочное значение вместе с прочими данными, то использование разных показателей для устройств не потребует дополнительной структуры для хранения этой информации.



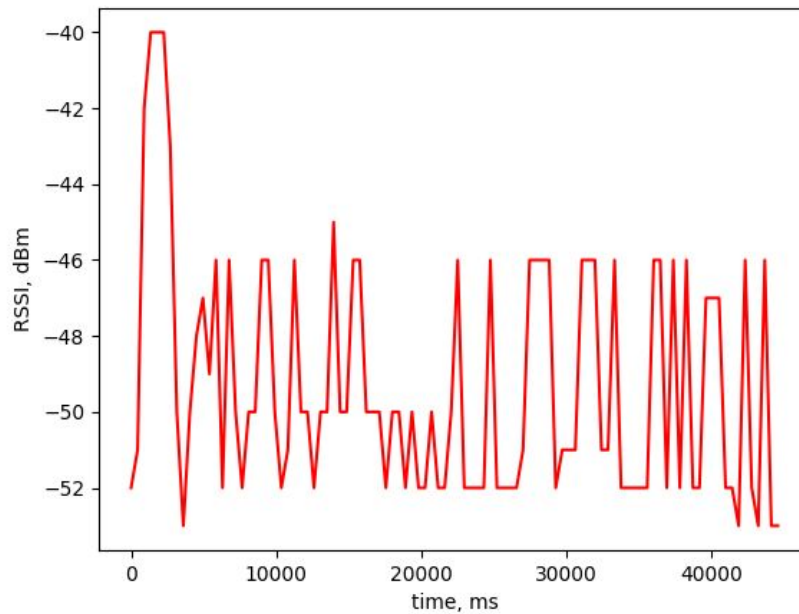


Рис. 3.2 RSSI на расстоянии 1м

В связи с тем, что значение калибровочного RSSI, передаваемого маяком, не может быть дробным, округлим его до -49.

Коэффициент потери мощности сигнала зависит от наличия шумов и препятствий (в том числе и человек) между маяком и приемником сигнала, а следовательно для разных помещений он может изменяться. На данном этапе работы коэффициент был вычислен на основании замеров RSSI на расстоянии 3 (Рис. 3.3) и 5 (Рис. 3.4) метров от маяка. Выделив из формулы (1) искомый коэффициент получается формула следующего вида

$$n = \frac{P_0 - P_d}{10 \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right)}$$

Подставляя все известные значения, вычисляется коэффициент. В качестве показателя уровня сигнала было взято среднее по полученным данным, как в случае с калибровочным RSSI. Вычисленные таким образом коэффициенты получились равными 2.44 для 3 метров и 2.56 для 5 метров. С учетом нестабильности данных значение коэффициента было принято равным 2.5.

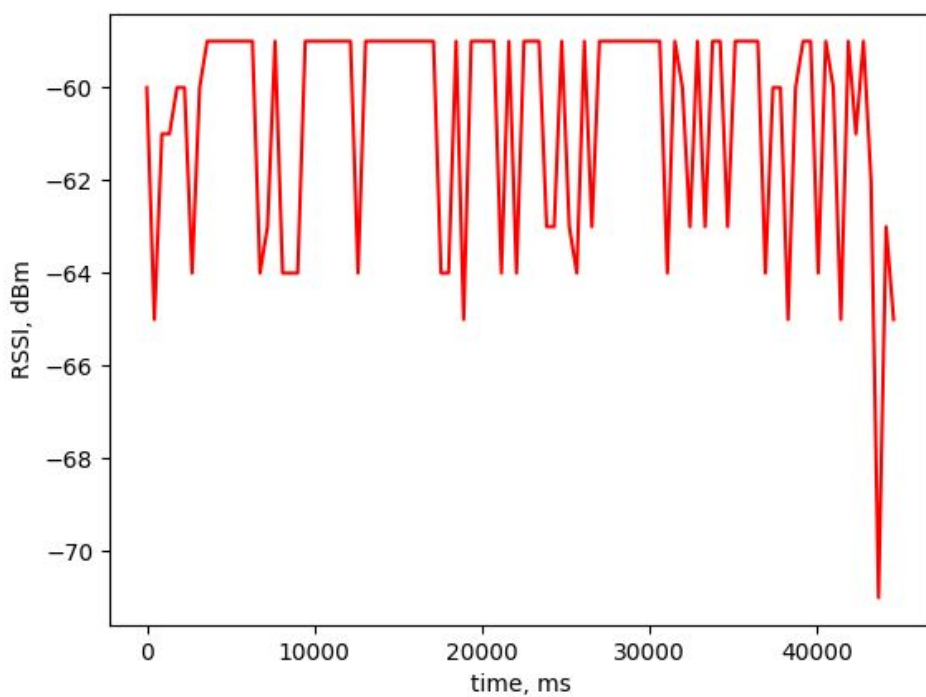


Рис. 3.3 RSSI на расстоянии 3м

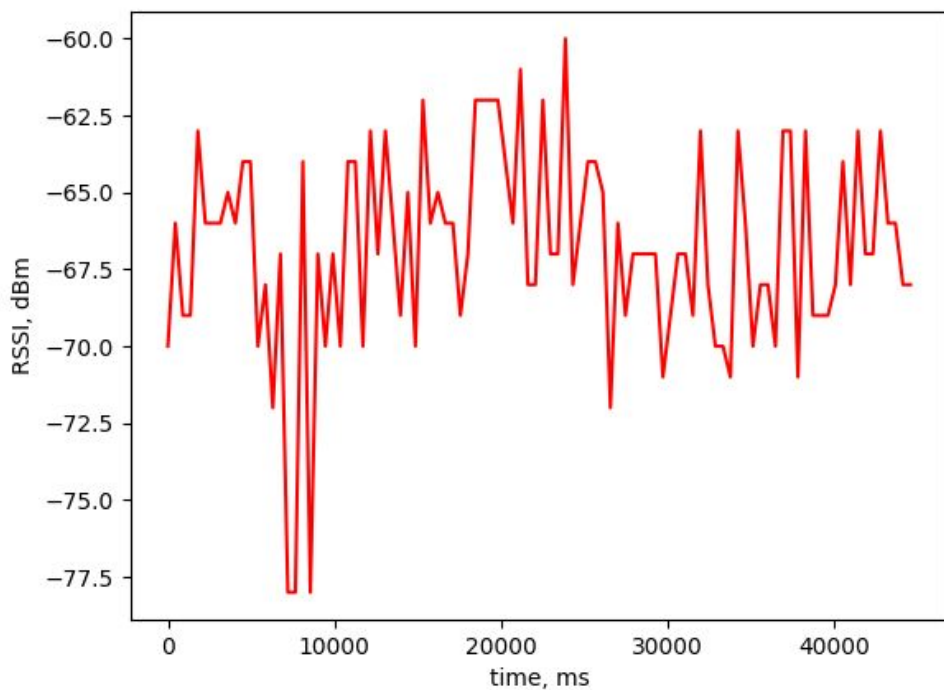


Рис. 3.4 RSSI на расстоянии 5м

Как и в случае с калибровочным RSSI, коэффициент потери мощности

сигнала может быть вычислен отдельно для различных частей помещения, однако это потребует создания дополнительной структуры, наподобие карты отпечатков, для хранения информации.

### **3.3.2. Идентификация маяка и получение координат**

Для идентификации маяка на этапе реализации прототипа было решено использовать передачу данных по протоколу Eddystone-UID. Выбор Eddystone-UID вместо Eddystone-EID обусловлен отсутствием шифрования, что делает проще процессы отладки и тестирования. В качестве Namespace выступает хеш полученный из названия фирмы с помощью SHA-1, а Instance будет использоваться для идентификации конкретного маяка в помещении. В зависимости от потребностей, Instance может быть логически разделен на несколько частей для обозначения группы маяков, находящихся в одной части комплекса зданий и/или на одном этаже.

Для получения информации от маяков используется SDK от производителя. При получении устройством сигнала от маяка вызывается callback-функция, в которой выполняются действия по алгоритму (см. Приложение).

Активность с заданной периодичностью отправляет службе запрос на вычисление координат. Вычисление производится с использованием библиотеки trilateration, которая использует алгоритм Левенберга-Марквардта [17] для решения системы уравнений с помощью нелинейного метода наименьших квадратов.

На основе полученных от службы данных о местоположении, активность перерисовывает точку на экране.

### 3.4 Промежуточные результаты

Можно заметить, что из-за нестабильности показателя уровня принимаемого сигнала координаты устройства, вычисленные даже в одной и той же точке пространства, но в разное время могут отличаться (Рис. 3.6). Красными точками обозначены точки с координатами полученными при вычислении местоположения недвижимого устройства.

Для демонстрации на рисунке 3.7 показаны значения расстояния, вычисленные при периодическом перемещении устройства по прямой на отрезке от 1 до 4 метров между маяком и мобильным устройством с периодом равным 26 секунд.

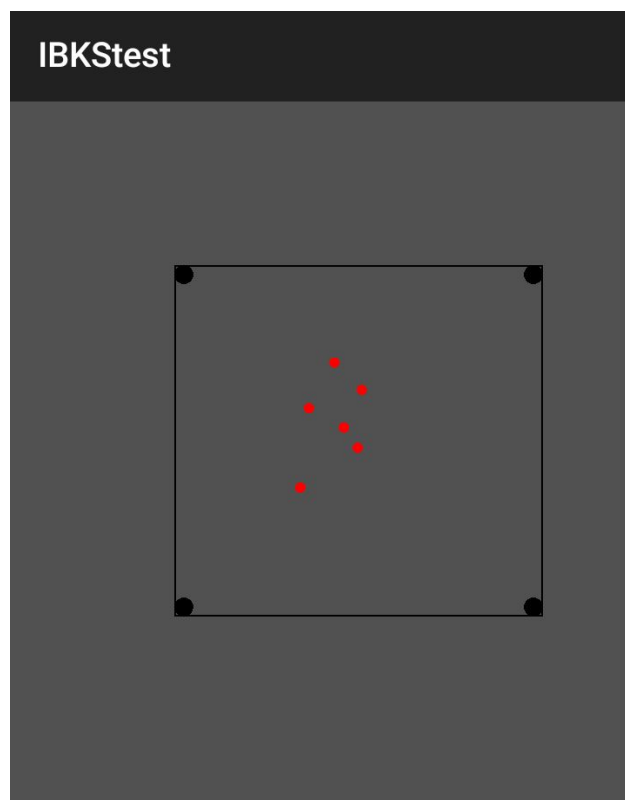


Рис. 3.6 Нестабильность при вычислении

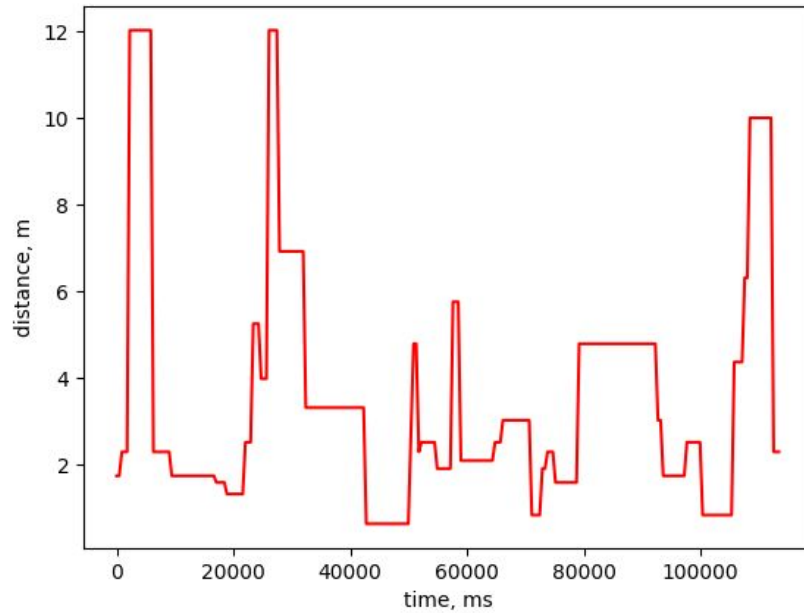


Рис. 3.7 Вычисление расстояний до маяка

Для решения этой проблемы могут быть применены различные алгоритмы сглаживания и фильтрации данных.

### 3.5 Сглаживание и фильтрация данных

По рисункам 3.2 - 3.4 можно заметить, что показания уровня принимаемого мобильным устройством сигнала сильно колеблются даже при неизменном его положении. Для сглаживания данных можно использовать метод скользящего среднего на основе данных, полученных за некоторый промежуток времени, например 1 секунда, или на основе некоторого постоянного количества последних результатов. При конфигурации маяков стоит учитывать, что передача данных с большей частотой увеличит точность при сглаживании, однако может значительно сократить срок работы батареи. В качестве “золотой середины” значение интервала передачи пакетов было принято равным 450 мс. С таким интервалом за 1 секунду мобильным устройством будет принято около трех пакетов.

На рисунках 3.8 - 3.10 показаны результаты сглаживания (синим цветом) различными видами скользящих средних показателей RSSI (красным

цветом), полученных при перемещении мобильного устройства аналогично тому, как проводились измерения на рисунке 3.7.

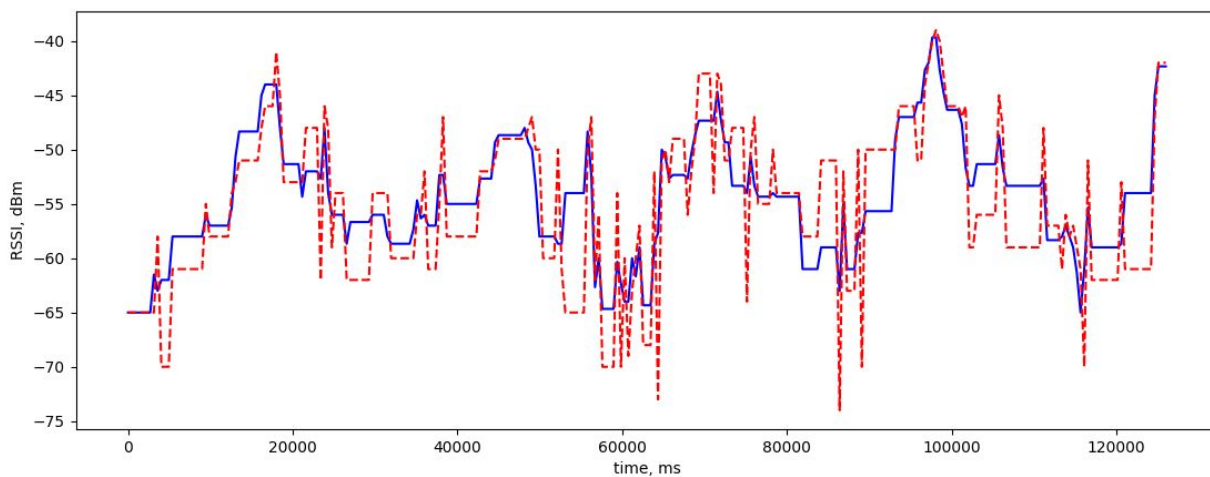


Рис. 3.8 Простое скользящее среднее

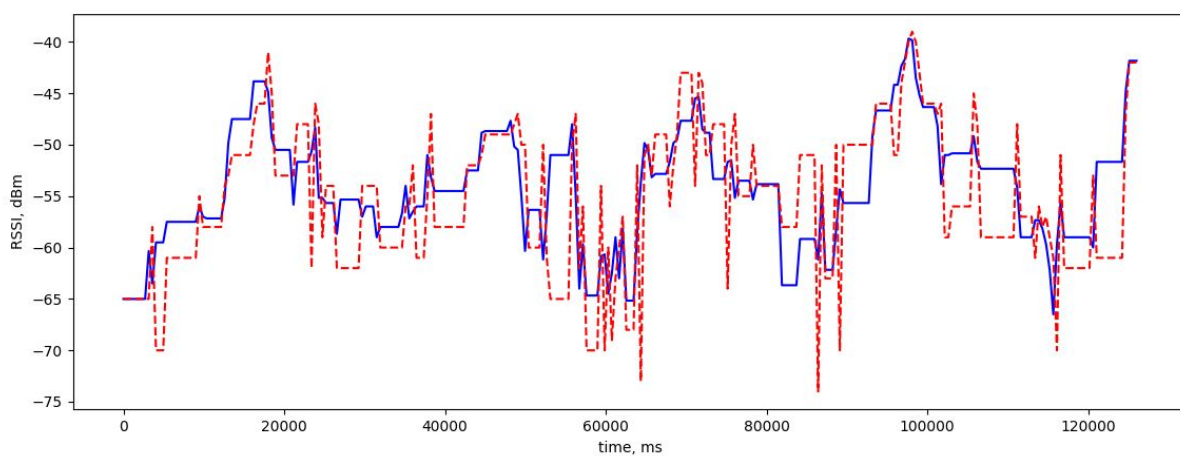


Рис. 3.9 Линейно взвешенное скользящее среднее

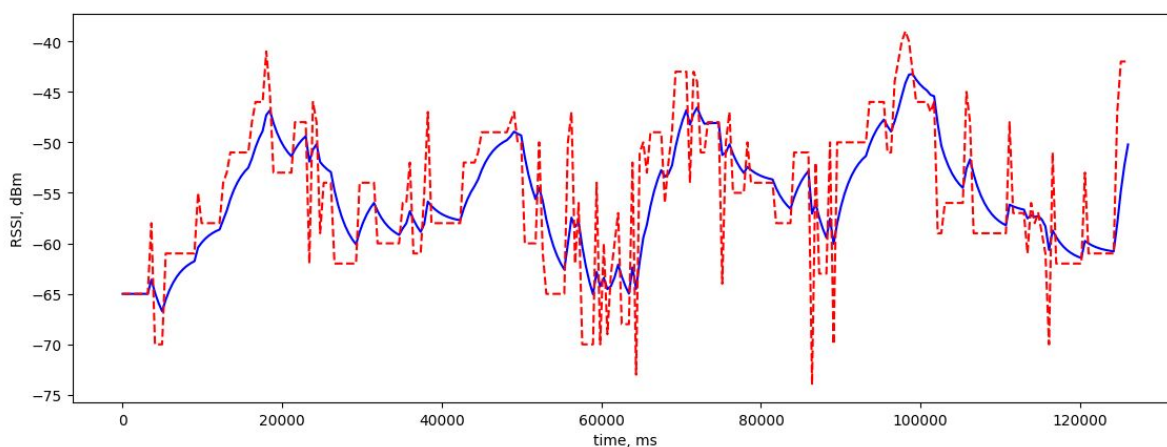


Рис. 3.10 Экспоненциально взвешенное скользящее среднее

Можно заметить, что экспоненциальное сглаживание дает лучший по сравнению с остальными результат.

Еще одним способом улучшить результаты является применение фильтра Калмана на этапе вычисления координат. Для его использования требуется информация о физике движения, которая может быть получена от инерциальных датчиков таких как акселерометр, гироскоп и магнитометр, установленных внутри мобильного устройства. К сожалению разработка полноценной ИНС для мобильных устройств является большой и трудоемкой задачей и не будет представлена в этой работе. Без информации о физике движения фильтр Калмана становится весьма схож со сглаживанием экспоненциально взвешенной скользящей средней и вообще говоря использован быть не может, так как это нарушает саму идею Калмана.

### 3.6 Упрощение алгоритма трилатерации

На практике, пользуясь устройством, человек, как правило, держит его в некотором небольшом интервале высот над уровнем пола или земли. В среднем эта величина составляет около 120 см. Данное значение было получено на основании измерений высоты смартфона над уровнем земли при

использовании людьми разного роста.

Это значит, что одна из координат может рассматриваться, как постоянное значение. Благодаря этому алгоритм трилатерации может быть упрощен до двумерного случая, используя вместо расстояний и координат маяков их проекции (Рис. 3.11) на плоскость  $Z=h$ , где  $h$  - постоянное значение высоты устройства над поверхностью пола.

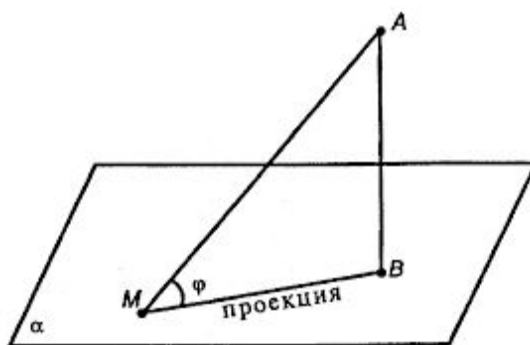


Рис. 3.11 Проекция на плоскость

Такой подход позволяет уменьшить минимальное необходимое количество маяков до трех.





Таким образом, сейчас приложение позволяет определять местоположение пользователя с достаточно большой точностью. Погрешность вычислений не превышает 2 метров. Однако в дальнейшем планируется продолжать работу над улучшением сервиса и увеличением точности определения координат внутри помещений.

## **4.2 Последующее развитие сервиса**

Для дальнейшей работы по улучшению приложения планируется выполнение следующих задач:

- Создание ИНС с использованием имеющихся в современных мобильных устройствах инерциальных сенсоров. Это поможет значительно увеличить точность определения координат при перемещении.
- Использование карты отпечатков для определения местоположения в качестве альтернативы или совместно с алгоритмом трилатерации.
- Разработка алгоритмов взаимодействия с оцифрованными планами зданий для автоматизированного построения маршрутов.
- Внедрение современных технологий для отображения информации (например, технологии дополненной реальности).
- Разработка системы мониторинга и анализа данных для организации рабочего процесса компании

## **Выводы**

После анализа рынка навигационных услуг с целью поиска существующих решений поставленных задач было решено разработать собственную систему навигации внутри помещений.

Было разработан прототип мобильного приложения для устройств под управлением ОС Android, позволяющего пользователю определять свое местоположение внутри помещения. В качестве основной технологии используется сеть BLE-маяков, передача данных осуществляется по протоколу Eddystone. Для определения местоположения на основе информации о координатах маяков и расстояниях до них используется метод трилатерации.

Представленное решение может быть использовано организациями, которые имеют потребность в создании подобного сервиса. Например, компания Vista готова использовать данный прототип в собственных целях, а также заинтересована в будущем развитии сервиса.

В дальнейшем планируется работа по улучшению сервиса, увеличению точности вычислений и значительное расширение функционала. Для уменьшения погрешности планируется разработать ИНС с использованием инерциальных датчиков, установленных в большинстве современных мобильных устройств.

## **Заключение**

По итогам работы был создан прототип приложения, позволяющего определять координаты мобильного устройства в помещении с точностью до 2 метров без использования спутниковых навигационных систем и мобильной связи. Представлен ряд предложений для дальнейшей работы по улучшению сервиса.

Все поставленные задачи были выполнены в полном объеме, цели были достигнуты.

## Список литературы

1. Исследование компании Berg Inside  
<http://www.berginsight.com/ReportPDF/ProductSheet/bi-lpt5-ps.pdf>
2. Компания IndoorAtlas <http://www.indooratlas.com/>
3. Компания Vista <http://vistamed.ru>
4. Google “Схемы зданий”  
<https://www.google.com/maps/about/partners/indoormap/>
5. Правила использования сервиса “Схемы зданий”  
[https://support.google.com/maps/answer/2803784?p=gmm\\_guidelines&visit\\_id=1-636308877238996756-3255448617&rd=1](https://support.google.com/maps/answer/2803784?p=gmm_guidelines&visit_id=1-636308877238996756-3255448617&rd=1)
6. 2GIS “Этажи” <http://floors-widjet.2gis.ru/>
7. OpenStreetMap Indoors  
[http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Indoor\\_Mapping](http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Indoor_Mapping)
8. iBeacon <https://developer.apple.com/ibeacon/>
9. Eddystone <https://developers.google.com/beacons/eddytone>
10. Park, J.J. and Yang, L.T. and Lee, C. Future Information Technology: 6th International Conference on Future Information Technology, FutureTech 2011, Crete, Greece, June 28-30, 2011. Proceedings. — Springer, 2011. — P. 89-90. — 526 p.
11. Trilateration: The Mathematics Behind a Local Positioning System  
<https://github.com/lemmingapex/trilateration/blob/master/TurgutOzal-11-Triilateration.pdf>
12. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): 35-45. Copyright © 1960 by ASME
13. Компания Accent Systems <https://accent-systems.com/>
14. Accent Systems Android SDK  
<https://github.com/AccentSystems/iBKS-SDK-Android>

15. Android Dashboards

<https://developer.android.com/about/dashboards/index.html>

16. Библиотека Lemmingapex Trilateration

<https://github.com/lemmingapex/trilateration>

17. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares

curve-fitting problems <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf>

# Приложение

Алгоритм работы функции обратного вызова

