**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**«Внутреннее позиционирование в системах виртуальной и дополненной реальности для виртуальных реконструкций»**

Автор Завадский Дмитрий Иванович \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Фамилия, Имя, Отчество) (Подпись)

Направление подготовки (специальность) 01.03.02 \_

Квалификация бакалавр \_

(бакалавр, специалист, магистр)

Руководитель Александров Е. В., магистр \_

(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

**К защите допустить**

Зав. кафедрой Попов И. Ю., профессор,

доктор физико-математических наук \_

(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

“ ” июня 20 17 г.

**Студент** Завадский Дмитрий Иванович Группа А3400 Кафедра ВМ Факультет СУиР \_

(ФИО)

Направленность (профиль), специализация Математическое моделирование \_

Консультант(ы):

а) \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

б) \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

Квалификационная работа выполнена с оценкой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Дата защиты “ ” июня 20 17 г.

Секретарь ГЭК Сытенко Н.В. Принято “ ” июня 20 17 г.

(ФИО) Подпись

Листов хранения \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Демонстрационных материалов/Чертежей хранения \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Зав. кафедрой Попов И. Ю. \_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(ФИО) (подпись)

**«**\_\_\_\_» « » 20 г.

**ЗАДАНИЕ**

**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

**Студенту** Завадскому Д. И. **Группа** А3400 **Кафедра** ВМ **Факультет**  СУиР \_

**Руководитель** Александров Е. В., магистр, ИТМО, ассистент \_

(ФИО, ученое звание, степень, место работы, должность)

**1 Наименование темы:** Внутреннее позиционирование в системах виртуальной и\_\_\_ \_\_\_\_\_ \_ дополненной реальности для виртуальных реконструкций \_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Направление подготовки (специальность)** 01.03.02 \_

**Направленность (профиль)**  Математическое моделирование \_

**Квалификация**  бакалавр \_

(бакалавр, магистр, специалист)

**2 Срок сдачи студентом законченной работы «**\_\_\_\_» « июня » 20 17 г.

**3 Техническое задание и исходные данные к работе**

Создание приложения в системе виртуальной реальности для виртуальной реконструкции и проведение исследовательской работы по получению результатов о точности проводимых исчислений на множестве устройств в различных условиях \_

**4 Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов)**

Создать приложение в системе виртуальной реальности для готовой виртуальной реконструкции. Выбрать технологию внутреннего позиционирования и алгоритм фильтрации полученных данных от шумов. Экспериментально убедиться в работоспособности выбранного алгоритма на различных устройствах. \_

**5 Перечень графического материала (с указанием обязательного материала**)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**6 Исходные материалы и пособия**

1. A. Chandgadkar - An Indoor Navigation System For Smartphones
2. N. Sirola - Mathematical methods for personal positioning and navigation
3. R. Peng and M. L. Sichitiu - Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №№  п/п | Наименование этапов выпускной квалификационной работы | Срок выполнения этапов работы | Отметка о выполнении, подпись руков. |
| 1. | Ознакомление с предметной областью | 01.09.2015 |  |
| 2. | Подбор, изучение и анализ основных источников информации | 01.01.2016 |  |
| 3. | Реализация программы | 15.06.2016 |  |
| 4. | Экспериментальная проверка программы на различных устройствах | 01.01.2017 |  |
| 5. | Построение графиков и анализ полученных данных | 20.03.2017 |  |
| 6. | Подведение итогов работы, оформление пояснительной записки | 05.06.2017 |  |

**8 Дата выдачи задания «** 1 » « сентября » 20 15 г.

Руководитель\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(подпись)

Задание принял к исполнению\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ **«** 1 » « сентября » 20 15 г.

(подпись)

**АнНотация**

**ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Студент** Завадский Дмитрий Иванович \_

(ФИО)

**Наименование темы ВКР:** Внутреннее позиционирование в системах виртуальной и дополненной реальности для виртуальных реконструкций \_

\_

**Наименование организации, где выполнена ВКР:** Университет ИТМО \_

**ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1 Цель исследования: Расчет получаемой точности позиционирования устройства в пространстве при использовании смартфона. \_

2 Задачи, решаемые в ВКР: Создать приложение в системе виртуальной реальности для готовой виртуальной реконструкции. Выбрать технологию внутреннего позиционирования и алгоритм фильтрации полученных данных от шумов. Экспериментально убедиться в работоспособности выбранного алгоритма на различных устройствах. \_

3 Число источников, использованных при составлении обзора\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_3\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

4 Полное число источников, использованных в работе \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_12\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

5 В том числе источников по годам

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Отечественных** | | | **Иностранных** | | |
| Последние 5 лет | От  5 до 10 лет | Более  10 лет | Последние  5 лет | От  5 до 10 лет | Более  10 лет |
| 5 | 2 | 0 | 3 | 1 | 1 |

6 Использование информационных ресурсов Internet да \_

(Да, нет, число ссылок в списке литературы)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

7 Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий

(Указать, какие именно, и в каком разделе работы)

Язык программирования C#, пакет 3D моделирования Unity \_

8 Краткая характеристика полученных результатов \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Реализовано приложение для виртуальной реальности. В работе реализован алгоритм \_

фильтрации данных от шумов. Рассмотрены получаемые данные с различных устройств. \_

\_

\_

9 Полученные гранты, при выполнении работы отсутствуют \_

(Название гранта)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

10 Наличие публикаций и выступлений на конференциях по теме выпускной работы нет \_

(Да, нет)

Выпускник Завадский Д. И. \_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(ФИО) (подпись)

Руководитель Александров Е. В. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(ФИО) (подпись)

**«**\_\_\_\_» « июня » 20 17 г.

**Содержание**

[Введение 5](#_Toc484703290)

[Обзор литературы и существующих решений 6](#_Toc484703291)

[1 Выбор технологии внутреннего позиционирования 7](#_Toc484703292)

[1.1 Технология получения виртуальной реальности 7](#_Toc484703293)

[1.2 Историческая справка 7](#_Toc484703294)

[1.3 Создание приложения 8](#_Toc484703295)

[1.4 Технологии позиционирования 9](#_Toc484703296)

[1.4.1 GPS 10](#_Toc484703297)

[1.4.2 Позиционирование по сотовым сетям 11](#_Toc484703298)

[1.4.3 Инерциальные системы 11](#_Toc484703299)

[1.4.4 Магнитометрия 11](#_Toc484703300)

[1.4.5 Оптическая локация 12](#_Toc484703301)

[1.4.6 Лидар (Ладар) 12](#_Toc484703302)

[1.4.7 Инфракрасное излучение 13](#_Toc484703303)

[1.4.8 Звук (в том числе ультразвук) 13](#_Toc484703304)

[1.4.9 Wi-Fi / Bluetooth локация 14](#_Toc484703305)

[1.4.10 Ultra-wide band (UWB) 14](#_Toc484703306)

[1.5 Сравнение технологий внутреннего позиционирования 15](#_Toc484703307)

[2 Точное вычисление собственного положения 16](#_Toc484703308)

[2.1 Методы определения местоположения 16](#_Toc484703309)

[2.1.1 Received Signal Strength 16](#_Toc484703310)

[2.1.2 Angle of Arrival 16](#_Toc484703311)

[2.1.3 Time of Flight 16](#_Toc484703312)

[2.1.4 Time of Arrival 16](#_Toc484703313)

[2.1.5 Time Difference of Arrival 17](#_Toc484703314)

[2.2 Вычисление местоположения 17](#_Toc484703315)

[2.3 Алгоритм Калмана 20](#_Toc484703316)

[2.4 Выбранные средства разработки 22](#_Toc484703317)

[3 Итоги практической реализации 23](#_Toc484703318)

[3.1 Результаты 25](#_Toc484703319)

[Заключение 29](#_Toc484703320)

[Список литературы 30](#_Toc484703321)

# Введение

В наше время такие словосочетания как «виртуальная реальность» или «дополненная реальность» слышны все чаще, однако в повседневной жизни редко встречаются устройства, реализованные для массового пользования.

Технологии дополненных и виртуальных реальностей применимы для различных направлений: наука, игры, обучение, медицина и этот список все время пополняется.

В основе всех реализованных на данный момент устройствах, лежит точное определение местоположения в пространстве, которое можно определить с достаточно высокой точностью с помощью сенсоров, находящихся непосредственно на самом устройстве, например с помощью акселератора, компаса или гироскопа.

Однако этих сенсоров не достаточно для точного расчета пройденного расстояния в пространстве. Следовательно, появляется необходимость использования сторонних средств.

Целью выполнения данной дипломной работы является рассмотрение и реализация методов внутреннего позиционирования (*Indoor positioning*) в закрытых помещениях, как частного случая систем виртуальной и дополненной реальностей при использовании смартфона, и исследовательская работа по измерению точности при использовании различных алгоритмов внутреннего позиционирования.

## Обзор литературы и существующих решений

На момент написания данной работы было просмотрено множество источников, в которых описывалась работа с внутренним позиционированием для определения собственного положения (1).

В одних источниках (2) описывалось, как можно достигнуть сантиметровой точности при использовании ультразвука, в других (3) рассказывалось про создания дорогостоящих устройства, которые при использовании большого количества антенн могли вычислять с высокой точностью свое положение при использовании Wi-Fi точек доступа (4). Но нигде не рассматривалась проблема позиционирования только лишь при помощи смартфона и устройств, которыми люди пользуются в повседневной жизни.

Самое близкое к моей теме, что было найдено – обработка сигнала устройством, находящимся на одном месте, получаемого от точки доступа фильтром Калмана. В моем же случае – устройство может передвигаться вместе с пользователем, а значит, что данный алгоритм не может быть использован приложением напрямую.

В качестве подобных приложений были найдены программы, использующие методы панорамной съемки на 360 градусов, однако передвижение производится лишь по точкам, в которых выполнены эти панорамы.

А те видео, которые поддерживают режим виртуальной реальности и вовсе не позволяют пользователю перемещаться в пространстве.

# Выбор технологии внутреннего позиционирования

В данной главе приведены общие сведения, полученные во время написания дипломной работы и приложения, а так же проведен обзор методов внутреннего позиционирования.

## Технология получения виртуальной реальности

В большинстве случаев для реализации виртуальной реальности и частичного погружения человека в нее достаточно согласовать движение виртуальной камеры и устройства.

Дизайн для виртуальной реальности очень похож на дизайн видеоигр, поскольку в обоих случаях мы имеем дело с интерактивным 3D-опытом.

Следует понимать, что разработав работающую схему для виртуальной реальности, все использующиеся технологии можно перенести и на дополненную реальность. Поэтому в качестве основы и примера для изучения рассмотрим реализацию приложения виртуальной реальности, построенную на виртуальной реконструкции трапезной палаты Феодоровского (русского) городка в Царском селе.

## Историческая справка

Трапезная палата русского городка была построена всего за полтора года, после чего за два годы были проведены все отделочные работы, включая росписи, которые выполнил талантливый художник Пашков.

Изначально эта палата строилась для духовенства, но какое-то время там хранили различные предметы русской старины.

Во время оккупации, городок был сильно поврежден, а ценности из него - вывезены. После окончания войны планировалось отреставрировать комплекс, но реставрация началась лишь в 1976 году.

Рис. 2. Виртуальная реконструкция

Рис. 1. Трапезная палата

В настоящее время здание не используется. Этот объект культурного наследия находится под угрозой уничтожения, и поэтому был выбран, для виртуальной реконструкции студентами кафедры Графических технологий, факультета ПИиКТ, мегафакультета КТиУ, университета НИУ ИТМО.

## Создание приложения

Изначально, в качестве основной идеи, была лишь реализация приложения с использованием дополненной или виртуальной реальности для проведения экскурсии по виртуальной реконструкции для Гранта № 17-04-12034 Российского гуманитарного научного фонда от кафедры Графических технологий, факультета ПИиКТ.

Один из предложенных вариантов реализации дополненной реальности с помощью обработки рисунка полигональной сетки или иных меток на стенах и потолке помещения полученного при помощи камеры устройства был откинут. Плюсами данного подхода были бы автономность и свобода от остальных устройств. Не требовалось бы электричество.

Однако сложность воспроизведения подобных конструкций в быстрые сроки послужили поводом отказа от данной идеи.

Поэтому в качестве основного варианта была выбрана реализация приложения на основе виртуальной реальности.

После реализации поворота для устройства с помощью сенсоров (гироскопа, акселерометра и магнитометра), было решено отказаться от перемещения по вертикали с помощью алгоритмов внутреннего позиционирования, так как все изученные на тот момент алгоритмы давали очень большую погрешность. Поэтому перемещение по вертикали было заменено на возможность зумирования (увеличения изображения при помощи уменьшения угла обзора).

Для горизонтального передвижения решено было сделать два варианта передвижения: один – с помощью экранного джойстика, который бы позволял любому пользователю без каких либо дополнительных действий и калибровок устройства перемещаться по виртуальному помещению, и второй – при помощи сторонних устройств и позиционирования по местности. Осталось лишь разобраться с выбором метода для внутреннего позиционирования.

## Технологии позиционирования

Для определения местоположения объектов в реальном времени существует ряд технологических платформ и алгоритмов (5). Большинство из них применимы для определения положения внутри зданий (6) (7), однако, одни технологии не слишком точные, а другие слишком сложные для использования в смартфоне (8). Рассмотрим их и выберем наиболее подходящую технологию для нашего случая:

### GPS

Global Positioning System — система глобального позиционирования, можно найти почти в любом смартфоне. К сожалению, не работает, если спутников не видно. Можно отдельно приобретать ретрансляторы, но их стоимость оставляет желать лучшего.

Главный принцип работы — расчет положения измерением моментов времени приёма синхронизированного сигнала от навигационных спутников антенной пользователя.

Огромным же минусом использования большинства радионавигационных систем является невозможность получения сигнала приемником при определенных условиях, или сигнал приходит со значительными искажениями или задержками.

Для определения точных координат GPS-приёмнику нужно иметь четыре уравнения: «дистанция равняется скорости света помноженной на разность моментов приёма сигнала потребителя и момента его синхронного излучения от спутников»:

Здесь:

— местонахождение - го спутника;

— время приёма сигнала от - го спутника по часам пользователя;

— момент времени синхронного излучения сигнала всеми спутниками по часам пользователя (неизвестно);

— скорость света;

— точное местоположение пользователя (неизвестно).

### Позиционирование по сотовым сетям

Основная идея состоит в том, что смартфон (или модуль сотовой связи) знает, какой базовой станцией он обслуживается и, имея базу данных размещений передатчиков станции, можно приблизительно определить своё местоположение.

Чаще всего используется как раз тогда, когда не видны спутники, но есть мобильная связь. Однако точность в этом случае еще ниже, чем у GPS, даже в районах с высокой плотностью станций.

### Инерциальные системы

Здесь используется модель движения человека: если мы знаем, где были, в какую сторону и как быстро двигались, то можно рассчитать, где мы оказались через некоторое время.

Сейчас это достигается с помощью гироскопов и акселерометров смартфона. К плюсами данного решения можно отнести автономность и отсутствие привязки к внешней инфраструктуре.

Минусы — необходимость знать начальную точку, со временем накапливающаяся погрешность и потребность сверяться с другим источником данных, например, GPS.

Однако в нашем случае эти сенсоры отвечают за то, в какую сторону пользователь направляет своё устройство, а значит, использовать их для инерциальной системы уже не получится.

### Магнитометрия

Навигация по магнитному полю с помощью компаса смартфона.

Данное решение требует предварительной калибровки в помещении и слишком подвержено влиянию металла и магнитов. Поэтому имеет смысл использовать его для определения поворота устройства в пространстве, только при отсутствии более точных сенсоров, к примеру, гироскопа.

### Оптическая локация

Основная идея этого метода – предварительное сканирование помещения, а потом определение своего местоположения по картинке, полученной с камеры смартфона.

Теоретически, может использоваться как при работе с дополненной реальностью, так и с виртуальной реальностью. Однако во втором случае картинка с камеры просто не будет использоваться при выводе итогового изображения.

Из минусов данного подхода можно выделить как само требование съемки помещения заранее, так и появляются проблемы с прямой видимостью ключевых точек изображения, по которым производится определение местоположения и само внутреннее позиционирование.

### Лидар (Ладар)

Light (Laser) Detection and Ranging. Технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем. При работе на небольших расстояниях, например в помещениях, главные свойства лазера не нужны; излучателями света здесь могут быть простые светодиоды. Но в основных сферах применения этой технологии с радиусами действия от сотен метров до сотен километров можно использовать только лазеры.

Хотя это решение дает достаточно высокую точность, на данный момент это остается очень дорогим методом и не применимо к рядовым смартфонам.

### Инфракрасное излучение

При позиционировании мобильного устройства, местонахождение устройства рассчитывается по времени прохождении инфракрасного импульса от источника к приемнику, испущенного с определенной периодичностью. Недостатком подобной системы является невысокая точность и помехи от солнечного света. Инфракрасный лазер повышает дальность и точность полученных измерений, однако выходит дороже. Точность определения положения составляет до 15 сантиметров.

### Звук (в том числе ультразвук)

Формула крайне похожа на предыдущие: дистанция рассчитывается по времени прохождения сигнала от источника до приемника. Используя несколько приемников, можно точно рассчитать местоположение передатчика.

Достоинство – высочайшая, до трех сантиметров, точность позиционирования.

Из недостатков можно выделить некоторую потерю сигнала из-за препятствий, ложные сигналы из-за отражений, а также помехи от высокочастотных источников звука. Для того чтобы избежать подобных недостатков требуется тщательное планирование системы.

### Wi-Fi / Bluetooth локация

Местоположение рассчитывается методом сравнения измеренных в реальном времени мощностей сигнала от окружающих точек доступа, заранее привязанных к карте помещения.

Позиционирование в сетях Wi-Fi происходит подобно определению местоположения в сотовых сетях – по факту подключения к конкретной базовой станции. Тем не менее, точность позиционирования даже в системах с применением специальных расширений Wi-Fi, относительно невысока.

### Ultra-wide band (UWB)

Беспроводная технология связи на малых расстояниях при низких затратах энергии, использующая в качестве несущей сверхширокополосные сигналы с крайне низкой спектральной плотностью мощности.

В отличие от радио технологий, имеющих ширину полосы от нескольких сотен килогерц до десятков мегагерц, сверхширокополосные UWB сигналы распространяются на частоте нескольких гигагерц.

Среди достоинств данной технологии можно выделить надежную работу и высокая точность позиционирования даже при наличии отраженных сигналов.

## Сравнение технологий позиционирования

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Название** | **Дистанция (**~ **м.)** | **Точность (**~ **м.)** | **Стоимость** |
| GPS | - | 10 (на улице) | Низкая |
| Сотовая связь | - | 100 (на улице) | Низкая |
| Инерциальные системы | - | 10 | Средняя |
| Wi-Fi/BLE | 50 | 10 | Средняя |
| Optic | - | 10 | Высокая |
| Lidar | 1000 | 1 | Высокая |
| IR | 5 | 0.1 | Высокая |
| Ультразвук | 5 | 0.05 | Высокая |
| UWB | 10 | 0.1 | Высокая |

Первые два варианта оставляют желать лучшего при позиционировании внутри здания. Сенсоры, требуемые для инерциальных систем, используются для определения поворотов в пространстве виртуальной реальности, а остальные технологии дороги в реализации. Поэтому в качестве внутренней навигации выберем технологию Wi-Fi.

# Точное вычисление собственного положения

После выбора инструмента для внутреннего позиционирования, рассмотрим методы (9) (10), которые используются для определения местоположения устройства в пространстве.

## Методы определения местоположения

### Received Signal Strength

Уровень принимаемого сигнала от передатчика. С его помощью можно рассчитать оценочное расстояние между приемником и точкой доступа. Однако стоит помнить, что данный метод эффективен на коротких расстояниях. На длинных дистанциях накапливается большая погрешность.

### Angle of Arrival

Суть метода заключается в триангуляции пользователя между точками доступа, оборудованными несколькими антеннами. Соответственно для точного местоположения требуется либо множество антенн, либо специальные направленные антенны.

### Time of Flight

Метод позволяет рассчитать расстояние до устройства посредством измерения времени прохождения специфической волны с использованием линейно-частотной модуляции от самого устройства до точки доступа.

### Time of Arrival

Основная идея очень похожа на предыдущий метод, однако, вместо модуляции сигнала требуется точная синхронизация времени между устройством и точкой доступа, после чего расстояние высчитывается по времени прохождения сигнала между точкой доступа и устройством.

### Time Difference of Arrival

Метод является расширением предыдущего, так как расстояние рассчитывается из измерения времени, требующегося на получение сигнала до нескольких точек доступа. Здесь не требуется синхронизация времени с устройством, однако остается требование строгой синхронизации между точками доступа, чего достичь достаточно сложно.

Из вышеописанного можно сделать вывод, что только первый метод (RSS) позволяет без особых сложностей при использовании смартфона вычислить расстояние от точки доступа до местонахождения пользователя, так как все вычисления предположительно производятся на небольших расстояниях, и специфика распространения радиосигнала не успеет накопить большую погрешность.

## Вычисление местоположения

Для того чтобы определить расстояние от устройства до Wi-Fi точки доступа можно использовать формулу FSPL.

Free-space path loss – формула, учитывающая потери сигнала в электромагнитной среде, которые возникают в результате прохождения волны сквозь пространство (обычно воздух), без каких-либо препятствий поблизости, вызывающих отражение или дифракцию.

Она определена в «Стандартных определениях терминов для антенн», IEEE Std 145-1983, как «Потеря между двумя изотропными излучателями в свободном пространстве, выраженная в виде отношения мощностей». Обычно она выражается в децибелах. Таким образом, предполагается, что коэффициент мощности не включает в себя какие-либо потери, связанные с дефектами оборудования или последствиями усиления антенны.

Потери в свободном пространстве пропорциональны квадрату расстояния между передатчиком и приемником, а также пропорциональны квадрату частоты радиосигнала:

Где:

– длина волны сигнала (в метрах);

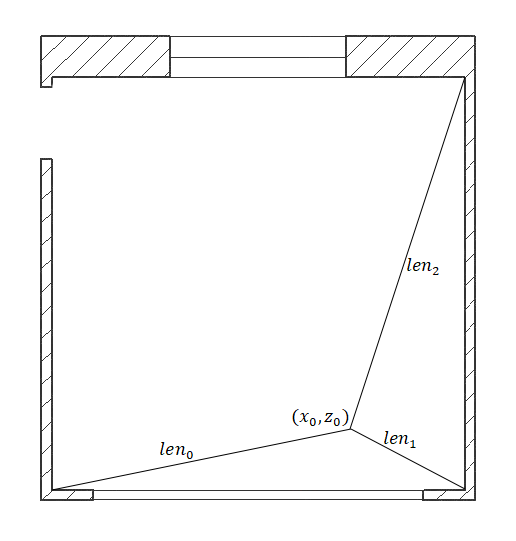
– частотный сигнал (в герцах);

– расстояние от передатчика (в метрах);

– скорость света в вакууме (2.998 \* 108 м/с).

Эта формула принимает частотный сигнал в герцах, но функция, которая используется в программе ScanResult.frequency() получает частоту в мегагерцах. Значит, конечная формула будет выглядеть как:

Однако стоит помнить, что это уравнение выдает очень зашумленный результат, основываясь только на силе приходящего сигнала.



После того, как приложение получило данные о расположении точек доступа, начинаются вычисления о собственном местоположении методом трилатерации.

Трилатерация применяется последовательно к каждой группе точек доступа, после чего полученные координаты виртуального местоположения камеры усредняются:

Рис. 3. Проведение трилатерации

Для увеличения точности позиционирования можно использовать большее количество точек доступа и вычислять медиану измерений по ним.

Но стоит заметить, что полученные данные изначально зашумлены (11). Поэтому, перед тем как работать с зашумленными данными, следует применить к ним фильтрацию для удаления, либо гашения основных шумов (12). В качестве метода для фильтрации входящих данных выбран алгоритм Калмана.

## Алгоритм Калмана

Все измерительные приборы имеют некоторые погрешности, которые появляются при внешних или внутренних воздействиях на прибор, что является причиной зашумленности данных, получаемых с этого прибора. А чем зашумленнее входящие данные, тем сложнее работать с полученной информацией.

Фильтр Калмана обрабатывает получаемые данные и старается избавиться от лишних шумов в зависимости от изначальной настройки алгоритма. В самом алгоритме есть несколько переменных, при изменении которых задается информация о системе, после чего появляется возможность получить более точную информацию на выходе.

Фильтр Калмана использует динамическую модель системы и состоит из двух постоянно повторяющихся фаз: предсказание и корректировка.

Фаза предсказания – рассчитывается предсказание состояния в следующий момент времени (с учетом неточности их измерения):

1. Предсказание состояния системы
2. Предсказание ошибки ковариации

Фаза корректировки – изменяется предсказанное значение (также с учетом неточности измерений):

1. Вычисление усиления Калмана
2. Обновление оценки с учетом измерений
3. Обновление ошибки ковариации

Разберемся в обозначениях:

Подстрочный индекс «k» означает текущий или предыдущий момент времени, а знак минус в надстрочном индексе означает, что это *предсказанное* промежуточное значение;

– матрица перехода между состояниями (динамическая модель системы);

– матрица применения управляющего воздействия;

– матрица измерений, отображающая отношение измерений и состояний;

– предсказание состояния системы в текущий момент времени;

– состояния системы в прошлый момент времени;

– управляющее воздействие в прошлый момент времени;

– измерение в текущий момент времени;

– предсказание ошибки;

– ошибка в прошлый момент времени;

– усиление Калмана

– ковариация шума измерения;

– ковариация шума процесса;

– единичная матрица.

Уравнения представлены в матричной форме, однако, так как мы работаем с одной переменной – матрицы вырождаются в скалярные значения.

После того, как заданы все начальные данные и запущен алгоритм фильтрации полученных данных с точек доступа количество шумов значительно уменьшается.

Так как виртуальная комната представляется собой комнату с четырьмя углами, то можно по углам расположить несколько точек доступа, и работать с ними в каждом из углов как с единым целым. Зная, что каждый из них выдает не точный результат, медиана отфильтрованных измерений по ним будет более приближена к реальным значениям.

## Выбранные средства разработки

Для реализации конечного приложения использовались стандартные библиотеки Unity, а скрипты приложения написаны на языке программирования C-sharp.

Использование готовых структур данных позволяет получить ряд достоинств. Устраняется необходимость заново реализовывать известные решения. Также удобством использования библиотеки является то, что она предоставляет наиболее эффективные реализации структур данных и операторов. В качестве стороннего решения была использована библиотека Native Wi-Fi. Она используется для возможности работы приложения на компьютере под операционной системой Windows, используя API для работы с модулем Wi-Fi компьютера.

# Итоги практической реализации

В процессе написания приложения для устройств под операционной системой Android и компьютерной версии под операционной системой Windows реализован следующий функционал:

1) Определение направления взгляда пользователя и соответствующий поворот виртуальной камеры двумя вариантами:

1.1) Гироскоп

1.2) Магнитометр + Акселерометр

2) Возможность ручной корректировки изначального направления горизонтального поворота

3) Вычисление расстояния до ближайших Wi-Fi точек

4) Передвижение по горизонтали с помощью:

4.1) Джойстика

4.2) С помощью трилатерации по Wi-Fi точкам доступа

5) Возможность приближения (зумирования) изображения

Рис. 4. Приложение на основе виртуальной реконструкции



Рис. 5. Передвижение при помощи джойстика

В данном приложении телефон оперирует массой данных с различных сенсоров. Используется информация, поступающая с акселерометра, компаса, гироскопа, GPS и даже с ближайших Wi-Fi точек доступа.

В первую очередь приложение получает данные о том, какие сенсоры присутствуют на аппарате, и в зависимости от полученных ответов использует нужный алгоритм обработки данных для определения поворота в пространстве. Это может быть лишь гироскоп, комбинация данных от магнитометра и акселерометра, либо предупреждение о том, что требуемых сенсоров в данном устройстве не обнаружено.

Если приложение работает с акселерометром и магнитометром, следует понимать, что данные будут очень искажаться в зависимости от местности, поэтому приходится использовать фильтрацию полученных данных, что сказывается на небольших задержках в скорости поворота.

В случае использования гироскопа таких сильно выраженных проблем нет, поэтому повороты выглядят более точными и без задержек.

Далее пользователь выбирает, каким образом он предпочитает передвигаться по виртуальной площадке. На выбор предлагаются два варианта: возможность передвижения в приложении посредством своего реального передвижения, либо с использованием более стандартного метода – экранного джойстика.

В первом случае пользователю предлагают совершить калибровку помещения, в котором он находится, и пометить точки доступа, которые он используется как «рабочие». После чего, используются данные Wi-Fi точек, от которых приложение получает информацию о мощности сигнала и ее частоте. Эти данные он использует для вычисления расстояния до них, которое используется для определения собственного положения в пространстве. Таким образом, пользователь, перемещаясь по комнате, перемещается в приложении.

Второй способ более понятен для многих и требует меньше подготовок. На экран выводится джойстик, изменяя положение которого, пользователь меняет горизонтальное положение камеры в приложении.

После создания приложения, проведенных косметических изменений и оптимизационных работ, была проведена исследовательская работа по получению результатов о точности проводимых исчислений на множестве устройств в различных условиях.

Ниже приведены полученные результаты и сделанные по ним выводы.

## Результаты

Первый полученный график. Проводится измерения с несколькими точками доступа находящимися на одном и том же расстоянии от устройства. На графике отчетливо видно сильная зашумленность приходящих данных. При использовании полученных данных для передвижения виртуальной камеры видны резкие скачки.

Рис. 6. Первый график с полученными данными с устройства

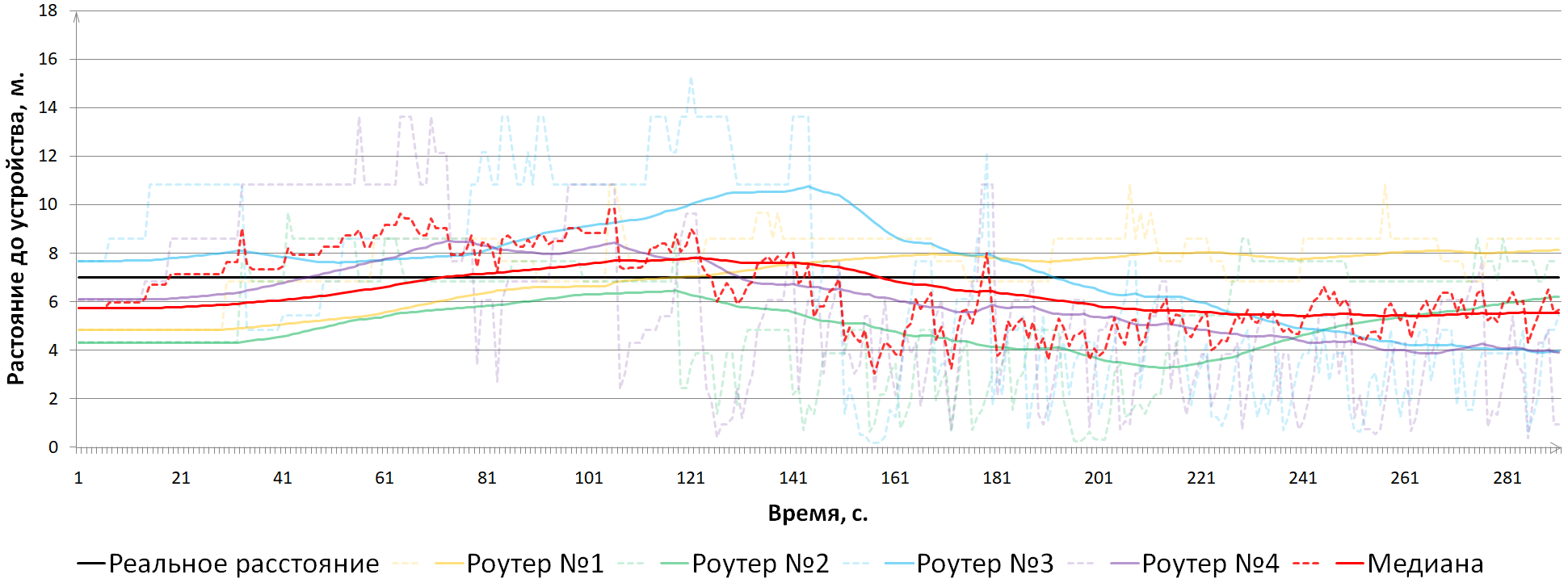
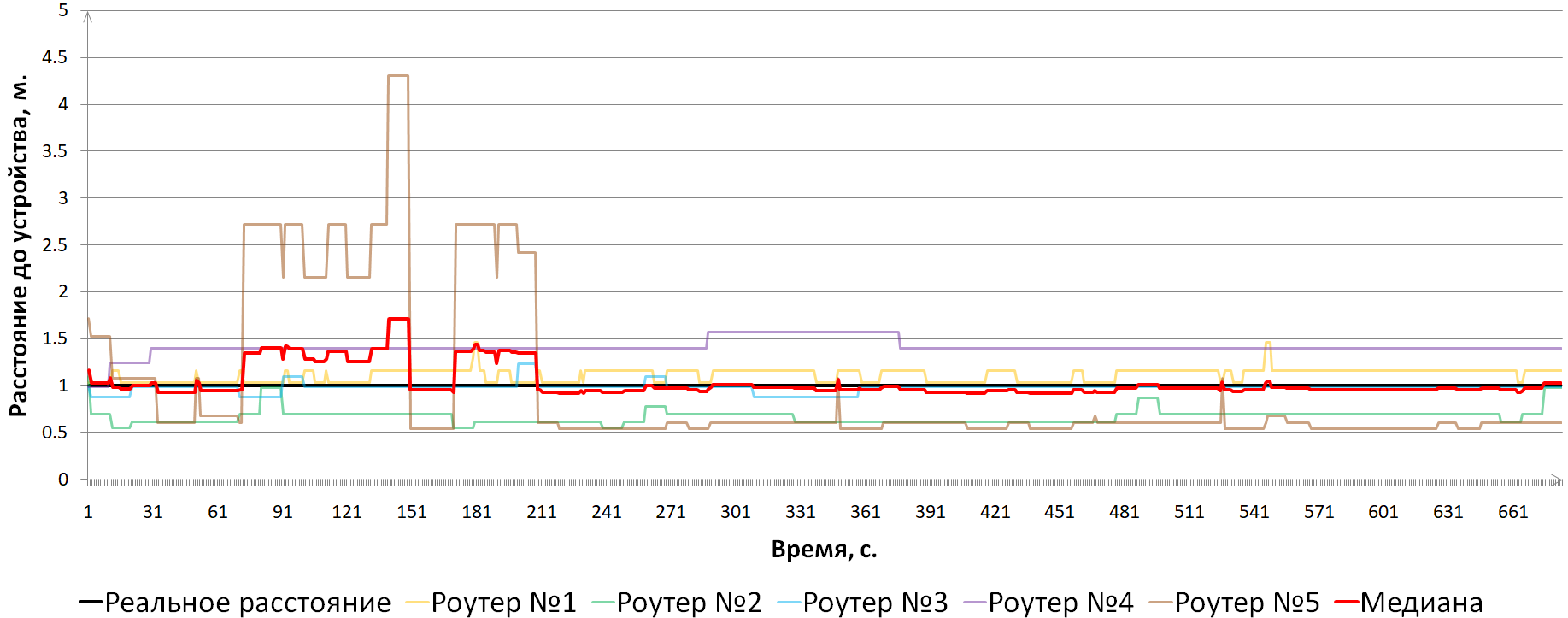
Полученная медиана всех измерений (красная линия) очень сильно отлична от реального положения устройства (черная линия), которое держалось на одном месте от всех точек доступа.

Рис. 7. Первый график с обработанными данными

На графике на Рис. 7 отображены результаты после применения фильтра Калмана к полученным данным. Мы получаем сглаженные линии, медиана которых гораздо точнее отображает реальное местоположение устройства в пространстве. При использовании этих измерений для трилатерации отсутствует «подергивания» виртуальной камеры.

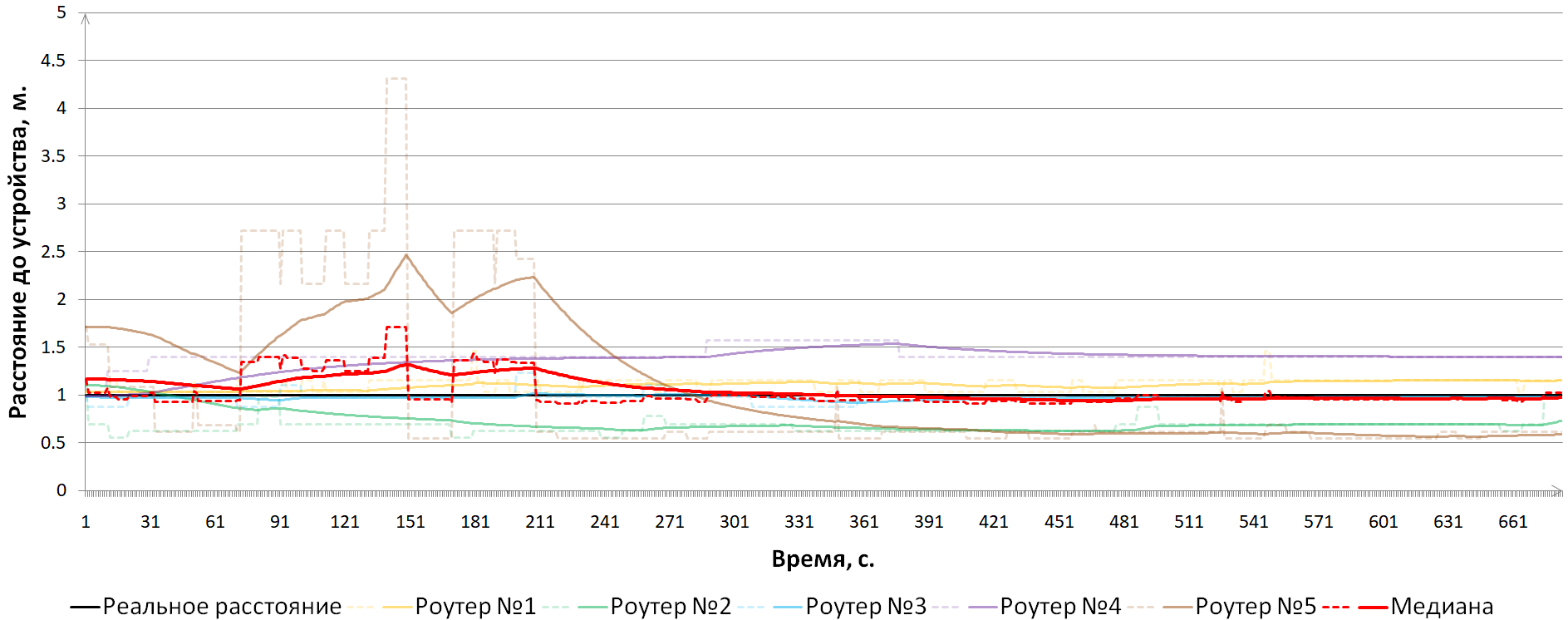
На графике отображены результаты сбора информации с нескольких точек доступа, расположенных на заранее заданном расстоянии от другого смартфона. Смартфон находится в небольшой комнате. Препятствия между устройством и точками доступа отсутствуют. Явно виден сильный всплеск от одной из точек доступа.

Рис. 9. Второй график с обработанными данными

Рис. 8. Второй график с полученными данными с другого устройства

После применения фильтра Калмана результаты становятся немного лучше. Стоит заметить, что после применения фильтра результаты не становятся хуже, так как при изначальной настройке задается оценочное ограничение скорости передвижения пользователя.

Среди всех проверяемых устройств, самые нестабильные данные получались с телефонов и ноутбуков работающих на частоте 2.4 GHz.

В то же время, самыми стабильными по приходящим данным, были устройства работающие на частоте 5 GHz.

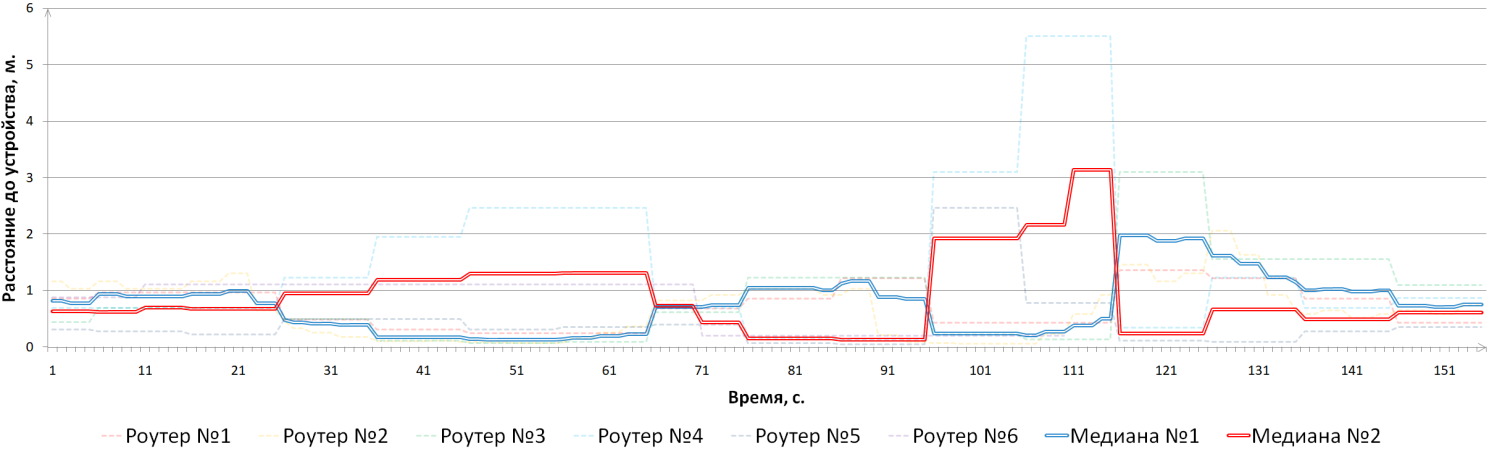
Данный график показывает, как ведут себя данные при передвижении устройства. В эксперименте учавствуют 6 точек доступа, поделенные на две группы.

Рис. 10. Третий график с полученными данными во время передвижения

В течении 20 секунд устройство находилось примерно посередине между точками доступа, после чего начало плавные движения то к одной группе, то к другой. Заметно, что медиана полученных данных далека от гладкой прямой, отчего передвижение в приложении получатся дерганным.

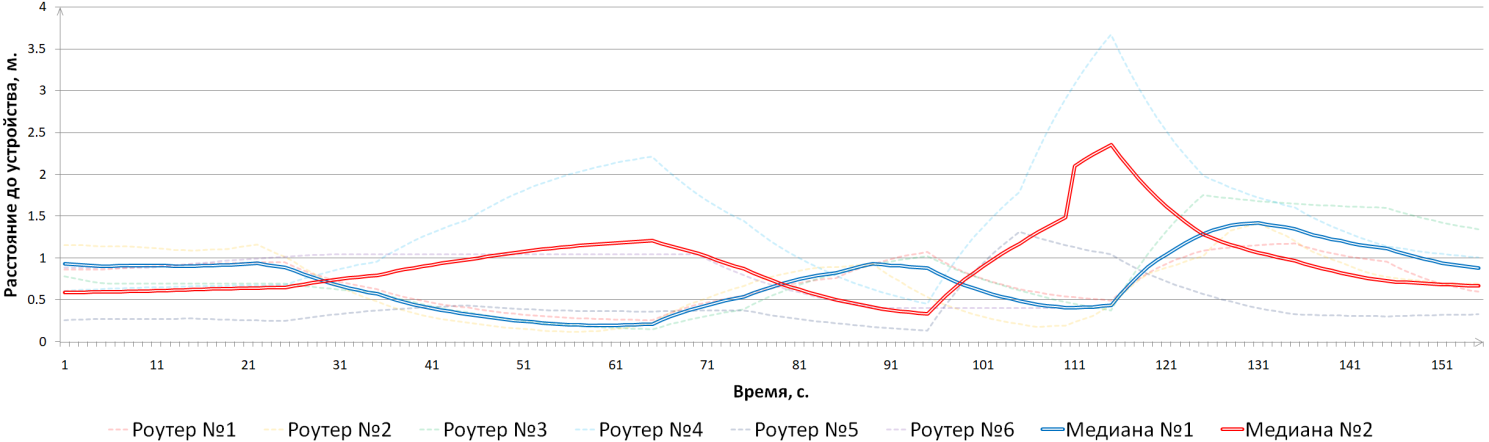
После применения фильтра Калмана, медиана полученных данных от каждой из групп точек доступа показывает сильно приближенное к реальности местоположение пользователя с устройством. Отчего передвижения в приложении получаются плавными и спокойными.

Рис. 11. Третий график с обработанными данными

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Даже при нахождении смартфона на месте – полученные данные о его местоположении, даже после многоэтапной фильтрации не будут сверхточными и стабильными, т.к. качество сигнала постоянно меняется. Они могут быть лишь приближены к реальным значениям.
2. Если на руках имеется достаточное количество точек доступа, то можно производить между ними выборку и присваивать веса полезности, на основе которых появится возможность обходить длительные резкие скачки, тем самым повысить точность вычисления местоположения устройства.
3. При использовании лишь смартфона и подручных средств есть возможность создать достаточно точное внутреннее позиционирование для проведения экскурсий в системах виртуальной и дополненной реальности.

# Заключение

В ходе выполнения дипломной работы было написано приложение под операционную систему Android, а также проведены исследования по точности вычисления собственного местоположения на множестве устройств в различных условиях.

Полученные результаты в ходе исследования показывают, что только при использовании Wi-Fi и метода измерения расстояния при помощи RSS, а также использования фильтрации входных данных можно получить достаточно точное местоположение устройства в пространстве.

Разработанное приложение оптимизировано под различные устройства, функционально, удобно в использовании и расширяемо. Расширяемость приложения состоит в возможности добавления различных виртуальных реконструкций к существующему на данный момент помещению

В условиях гранта предполагается продолжение работы с добавлением остальных комнат данного архитектурного комплекса, что в итоге выльется в полноценную экскурсию по всему архитектурному сооружению Феодоровского городка.

В продолжение данной дипломной работы планируется написание кросплатформенного приложения под остальные операционные системы смартфонов, и возможно, под очки виртуальной реальности.

# Список литературы

1. **Chandgadkar, Abhijit.** An Indoor Navigation System For Smartphones. *Department of Computing.* [В Интернете] 18 Июня 2013 r. http://www.doc.ic.ac.uk/teaching/distinguished-projects/2013/a.chandgadkar.pdf.

2. **CEO & Founder.** Indoor «GPS» с точностью +/- 2см. *Хабрахабр.* [В Интернете] 30 Марта 2015 r. https://habrahabr.ru/post/254361/.

3. **Sichitiu, Rong Peng и L., Mihail.** Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks. *NC State University.* [В Интернете] 28 Сентября 2006 r. http://www4.ncsu.edu/~mlsichit/Research/Publications/aoaLocalizationSecon06.pdf.

4. **Ализар, Анатолий.** Система позиционирования по Wi-Fi с дециметровой точностью. *Гиктаймс.* [В Интернете] 31 Марта 2016 r. https://geektimes.ru/post/273686/.

5. Технологии позиционирования в реальном времени. *«РТЛС».* [В Интернете] 2011 r. http://www.rtlsnet.ru/technology/view/4.

6. Системы позиционирования внутри зданий для мобильных сервисов. *Хабрахабр.* [В Интернете] 17 Августа 2011 r. https://habrahabr.ru/post/126410/.

7. **SAP.** Indoor навигация и позиционирование. *Хабрахабр.* [В Интернете] 22 Сентября 2015 r. https://habrahabr.ru/company/sap/blog/267433/.

8. Навигация в помещениях с помощью ИНС. *Хабрахабр.* [В Интернете] 9 Декабря 2014 r. https://habrahabr.ru/post/245325/.

9. **Henniges, Robin.** Current approches of Wifi Positioning. *Service-centric Networking.* [В Интернете] 2012 r. https://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1112/snet-project/wifi-positioning\_henniges.pdf.

10. **Овчинников, Сергей.** Системы позиционирования и мониторинга. *Технологии и средства связи.* [В Интернете] Журнал "Технологии и средства связи" #2, 2014 r. http://tssonline.ru/articles2/safe-city/sistemy-pozitsionirovaniya-i-monitoringa.

11. **Lee, Jea-Gu, и др.** Accuracy Enhancement of RSSI-based Distance Estimation by Applying Gaussian Filter. *Indean Journal of Science and Technology.* [В Интернете] Май 2016 r. http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/94675/70032.

12. **Sirola, Niilo.** Mathematical methods for personal positioning and navigation. *TUTCRIS Research Portal.* [В Интернете] 5 Октября 2007 r. https://tutcris.tut.fi/portal/files/1881441/sirola.pdf.