

На правах рукописи

Гусева Юлия Олеговна

Локальное позиционирование мобильных систем с детальной проработкой алгоритмов формирования и передачи данных

Направление подготовки

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
направленность – Многоканальные телекоммуникационные системы
программа академической магистратуры

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации
на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

Научный руководитель, к.т.н., доцент

Н.В. Будылдина

Рецензент, к.ф.-м.н., доцент

В.Т. Куанышев

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9.00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

Секретарь Государственной аттестационной комиссии

О.А. Шумилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

На сегодняшний день спрос на услуги позиционирования и навигации обуславливается внедрением автоматизированного производства, ростом количества производимых товаров, требованиями клиентов к улучшению временных показателей поиска необходимого товара или пути, необходимость в составлении маршрутов и поиска зданий, компаний, предприятий или фирм. Актуальность и практическая значимость систем позиционирования обусловлена положительной тенденцией, сформированной согласно популярности сервисов и приложений навигации и позиционирования.

Особое место среди систем и технологий позиционирования принадлежит локальному позиционированию. Согласно высоким требованиям к устойчивости и точности таких систем и технологий, локальное позиционирование является свободным от влияния на радиосигнал условий городской застройки, необходимости в обеспечении прямой видимости и влияний окружающей среды. В отношении негативного влияния препятствий внутри помещений, также вызывающих ошибки и погрешности в измерениях, разворачивают беспроводные сенсорные сети, активно развивающиеся в настоящее время. Равномерное покрытие сетевыми устройствами всей площади помещения, реализованное с помощью установки специализированных датчиков, позволяет исключить потерю мощности сигнала из-за отсутствия препятствий. Подключение абонентского устройства, при вхождении в сеть или кластер сети, к ближайшему сенсорному узлу обеспечивает условия прямой видимости.

Эффективность метода позиционирования является определяющим фактором точности и качества реализуемых систем. Метод Distance Vector-Нор является способом позиционирования в беспроводных сенсорных сетях. Преимуществом данного метода является то, что он не работает без участия набора измерений физических величин. Это позволяет избежать появления погрешностей и ошибок, вызванных содержанием в измерениях значительного количества шумов.

Таким образом, актуальность темы магистерской диссертации определяет востребованность исследуемых систем и технологий, фундаментальные требования к беспроводным сенсорным сетям и процессу позиционирования в целом. Основными средствами определения местоположения и навигации являются методы, технологии и соответствующие им алгоритмы. В рамках реализации проекта «Цифровая экономика», актуальность темы подтверждается ростом спроса на услуги локального позиционирования в условиях развития цифровых технологий в экономической и социальной сфере.

Объект исследования – беспроводные сенсорные сети.

Предмет исследования – использование методов и алгоритмов в локальном позиционировании мобильных систем.

Целью работы является моделирование процесса локального позиционирования мобильных систем с детальным анализом алгоритма Distance-Vector Нор.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) проведение анализа публикаций по теме исследования;
- 2) исследование систем и технологий позиционирования;
- 3) исследование методов локального позиционирования;
- 4) моделирование процесса локального позиционирования и оценка эффективности алгоритма Distance-Vector Hop.

Научная новизна работы заключается в оценке эффективности исследуемого алгоритма, сформированного на базе метода Distance Vector-Hop, с учетом требований, установленных для беспроводной сенсорной сети.

Практическая значимость заключается в обеспечении возможности определения местоположения применительно к беспроводной сенсорной сети, развернутой с помощью технологий Wi-Fi, Bluetooth 4.2 и Bluetooth 5.0. Исследуемая локальная сеть, спроектированная согласно требованиям, предъявляемым к беспроводным сенсорным сетям, является способом оценки эффективности сформированного алгоритма в условиях распределенной самоорганизующейся беспроводной сети. Эффективность работы алгоритма оценивается графическим и числовым представлениями, что позволяет выполнить расчет погрешностей результатов и наглядно оценить метровую точность процесса позиционирования.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач моделирования, расчета и оценки результатов использовался высокоуровневый язык программирования Octave 5.2.0, совместимый с Matlab. В качестве методов позиционирования, в сформированном алгоритме, используются Distance Vector-Hop и двумерная угловая латерация. Эффективность процесса определения местоположения абонентского устройства реализуется с использованием технологий Wi-Fi, Bluetooth 4.2 и Bluetooth 5.0.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) системы и технологии позиционирования;
- 2) методы позиционирования;
- 3) алгоритм позиционирования в беспроводной сенсорной сети;
- 4) графическое представление методов Distance Vector-Hop и двумерная угловая латерация;
- 5) графический результат действия алгоритма для сети с радиусом действия мота равным 50 метров;
- 6) сравнительная характеристика генерируемого и расчетного путей для сети с радиусом действия мота равным 50 метров;
- 7) графический результат действия алгоритма для сети с радиусом действия мота равным 10 метров;
- 8) сравнительная характеристика генерируемого и расчетного путей для сети с радиусом действия мота равным 10 метров.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием, при моделировании и исследовании, высокоуровневого языка программирования Octave 5.2.0. Алгоритм сформирован согласно известным методам, представленным в научных публикациях. Результаты исследования

эффективности и моделирования процесса локального позиционирования получены при различных условиях и согласно техническим требованиям.

Апробация результатов.

1) материалы XX научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, I этап, «Системы локального и глобального позиционирования», г. Екатеринбург, 2018 г.;

2) материалы V Межвузовского научного семинара «Информационные технологии и когнитивная электросвязь» УрТИСИ СибГУТИ, «Позиционирование в сетях Wireless Local Area Network», г. Екатеринбург, 2019г.;

3) материалы XII международной молодежной научно-практической конференции «Инфоком-2019», «Определение местоположения мобильного устройства на основе алгоритма латерации», г. Ростов-на-Дону, 2019 г.;

4) материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, I этап «Systems and technologies for local positioning», г. Екатеринбург, 2019 г.;

5) материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии и когнитивная электросвязь», «Позиционирование с помощью метода Distance Vector-Hop в беспроводной сенсорной сети», г. Екатеринбург, 2020 г.;

6) материалы XIII международной молодежной научно-практической конференции «Инфоком-2020», «Анализ эффективности метода позиционирования Distance Vector-Hop», г. Ростов-на-Дону, 2020 г.;

7) материалы IX Международной научно-технической и научно-методической конференции АПИНО 2020, «Позиционирование в Wi-Fi-технологии локальной беспроводной сети», г. Санкт-Петербург, 2020 г.

По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, в том числе 4 статьи в научных журналах РИНЦ, 3 статьи в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ. По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 29 наименований. Объем диссертации 85 страниц, включены также 14 рисунков, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы магистерской диссертации, определены объект и предмет исследования, приведены цель и задачи работы, описаны научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Анализ публикаций» проведен анализ публикаций по теме исследования, который позволил определить степень проработанности вопроса обеспечения качества услуги локального позиционирования мобильных систем. Изученные материалы отражают популярные направления развития исследований в данной области.

В результате анализа трудов таких авторов, как Али Халаймехрабади, Павел Давидсон, Роберт Ф. Кифи, Мехди Голестаниан, Акис Коккинис, Герман Мартин

Мендоза-Сильва, С. Аруна Деви, Алехандро Корреа были сделаны выводы, подтверждающие актуальность темы магистерской диссертации.

Представленные достижения являются основополагающими в формировании выбора, в качестве объекта исследования, алгоритма Distance Vector-Нор. Однако, в рассмотренных публикациях отсутствует исследование алгоритма Distance Vector-Нор с учетом погрешностей, плотности распределения узлов в сенсорной сети и вспомогательного метода для определения местоположения без влияния погрешностей, вызванных использованием RSS измерений. Данным исследованиям посвящена настоящая магистерская диссертация.

Во второй главе «Системы и технологии позиционирования» рассматриваются глобальные спутниковые системы навигации и позиционирования, сотовые сети и локальные сетевые системы. Изучены преимущества и недостатки, а также эффективность использования технологий локального позиционирования, таких как Wi-Fi, Bluetooth 5.1, ZigBee и NanoLoc.

Глобальные системы навигации являются основным средством в позиционировании, так как на них базируется большинство разработанных приложений и сервисов по определению местоположения абонентов.

Важнейшим аспектом в достижении точности до нескольких десятков метров в определении местоположения является отсутствие препятствий и наличие условий окружающей среды, близких к идеальным. Для глобальных спутниковых систем, такая задача является не достижимой. Это обусловлено плотностью городской застройки, многоэтажностью и отсутствием условий прямой видимости.

Определение местоположения с помощью сотовой сети позволяет решить вопрос обеспечения прямой видимости для глобальных спутниковых систем. Стандарт четвертого поколения позволяет обеспечить точность до нескольких метров, а стандарт пятого поколения до нескольких сантиметров, что определяется радиусом действия соты.

Достоинством таких сетей является существующая инфраструктура сотовых операторов с возможностью наращивания. Однако, в настоящее время покрытие сетей четвертого и пятого поколения не реализовано на территории всей страны. Также, диапазон частот для сотовых систем является лицензированным, что накладывает ограничение на проектирование сетей и использование частот. В том числе возникает трудность поддержки используемых диапазонов частот данных поколений абонентскими устройствами.

Широкое развертывание сетей Wi-Fi позволяет внедрять сервисы по определению местоположения. Инфраструктура Wi-Fi сети с функцией позиционирования требует большей плотности в размещении точек доступа. Оборудование стандарта IEEE 802.11a/g/n имеет некоторые ограничения в использовании, так как является устройствами для сетей малого радиуса действия. Таким образом, решением проблемы использования радиочастотного диапазона и ограничения в количестве точек доступа является использование данных позиционирования от других систем и технологий локального позиционирования.

Технология Bluetooth 5.1 является одним из способов улучшения позиционирования внутри помещений. Службы определения местоположения Bluetooth для оценки расстояния между двумя устройствами используют уровень принимаемого сигнала RSSI и трилатерацию. Повышение точности достигается с помощью методов триангуляции и данных о направлении передачи сигнала.

ZigBee технология предполагает в своей структуре использование специализированного программного обеспечения. Данный метод позиционирования подразумевает наличие гистограмм, описывающих уровень сигнала в конкретной области. Повышение точности базы данных напрямую влияет на результаты процесса позиционирования.

Используемые в технологии NanoLoc протоколы являются открытыми, что позволяет разрабатывать новые сервисы и использовать данную технологию в системах локального позиционирования реального времени. Однако, применение данной технологии предполагает установку большого количества устройств NanoLoc технологии для охвата всех сегментов сети.

Поэтому, в решении вопроса локального позиционирования необходимо использовать технологии Bluetooth 5.1 и Wi-Fi, а также непосредственно абонентское устройство. Также на качество позиционирования влияет выбор метода позиционирования, которые характеризуются разными степенями избыточности и погрешностей.

Анализ эффективности является определяющим фактором при выборе метода определения местоположения и моделировании процесса локального позиционирования.

В третьей главе «Методы позиционирования» проведен анализ эффективности методов для обеспечения услуги позиционирования в локальной сети мобильных систем, таких как класс подходов позиционирования с учетом измерений расстояния, класс алгоритмов определения местоположения мобильного устройства вблизи ранее известных местоположений, инерциальные навигационные системы, метод воспроизводимости моделей измеримых переменных – индивидуальная идентификация, SDS-TWR и Distance Vector-Hop.

Латерация представляет собой процесс оценки местоположения мобильного устройства с учетом измерений расстояния до набора точек с известным местоположением. Тем не менее, измерения расстояния являются ошибочными и ограничивают местоположение мобильного устройства областью между пунктирными линиями, как показано на рисунке 1.

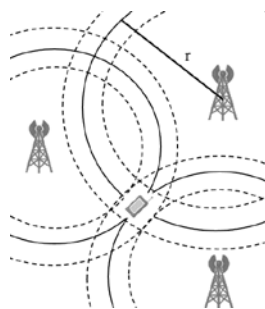


Рисунок 1 – Местоположение устройства

Местоположение $p = (x, y)$ абонентского устройства характеризуется уравнениями k_i , описывающими зоны покрытия базовых станций и определенными, как $p_i = (x_i, y_i)$ с радиусом r_i по формуле:

$$r_i(x, y) = k_i(x, y) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \quad (1)$$

где $i = 1 \dots k$;

r_i – радиус окружности вокруг местоположения базовой станции.

Гиперболическая латерация – это разновидность латерации, при которой входное измерение не состоит из оценок расстояния до известных местоположений, а состоит из разности оценок расстояний. Важнейшим преимуществом измерений разницы во времени является то, что мобильному устройству не нужно быть синхронизированным по времени с передатчиком сигнала. Когда для двух базовых станций разница в расстоянии между мобильным устройством и обеими базовыми станциями Δd известна, тогда местоположение мобильного объекта определяется этой разницей расстояний, как показано на рисунке 2.

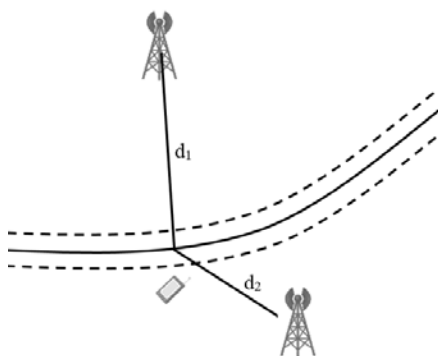


Рисунок 2 – Гиперболическая латерация

Для вычисления геопозиции используется система уравнений, которая отражает установленные ограничения местоположений мобильного устройства на гиперболах, определенных для измерений:

$$\Delta d_{ij} = k_i(x, y) - k_j(x, y) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}, \quad (2)$$

где $i, j = 1 \dots k, i < j$;

Δd_{ij} – разница в расстоянии между мобильным устройством и базовыми станциями.

Угловая латерация еще один очень распространенный класс подходов позиционирования, в котором измеренные углы между базовыми станциями и мобильными устройствами используются для определения местоположения мобильного устройства. Данный метод подразумевает использование базовых

станций с антеннами в виде фазированных решеток. Эти множественные антенны измеряют время прибытия сигнала. И за счет различия во времени прибытия и геометрии принимающей решетки становится возможным определить угол между базовой станцией и устройством абонента. Двумерная угловая латерация подразумевает использование измерений двух углов и одной длины, такой как расстояние между опорными точками, как показано на рисунке 3.

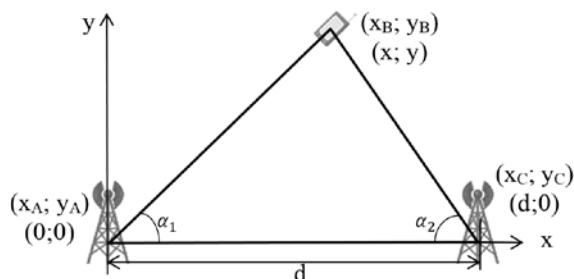


Рисунок 3 – Двумерная угловая латерация

Приближение – это класс алгоритмов определения местоположения, которые полностью основаны на расположении мобильного устройства вблизи ранее известных местоположений. Местоположение устройства в данном случае фиксируют системы отдаленной идентификации, когда устройство находится в одной или нескольких зонах действия таких систем, процесс иллюстрируется рисунком 4.

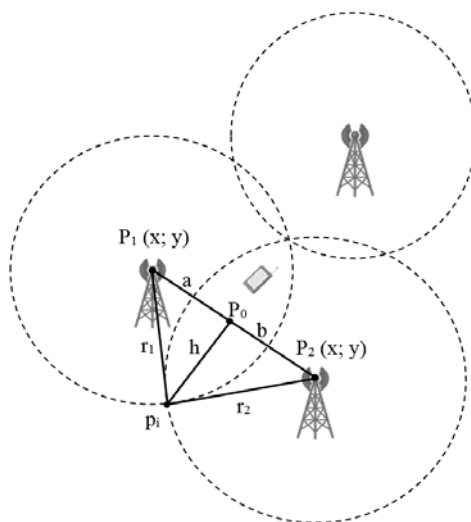


Рисунок 4 – Определение местоположения устройства методом обнаружение вблизи

Инерциальные навигационные системы – это системы, базирующиеся на оценке местоположения мобильного устройства, использующие только те измерения, которые созданы внутри инерциальной системы мобильного устройства. Данный вид навигации обычно основан на измерении ускорения и поворотов и иногда включает одометрические измерения шагов, а также

управляемых углов. Измерения, в данном случае, используются для обновления состояний перемещения мобильного устройства и тем самым получая полную информацию о местонахождении клиента. Однако, с течением времени, в датчиках будут накапливаться ошибочные измерения, что делает инерциальные навигационные системы не применимыми после определенного отрезка времени.

Метод индивидуальной идентификации базируется на воспроизводимости моделей измеримых переменных. Предполагается, что набор измерений в конкретном определённом месте является подобным набору измерений, полученным в той же локации в другой временной отрезок или с помощью другого устройства. Тем не менее они не являются подобными измерениям, сделанным в другом месте. Данная концепция подразумевает наличие гистограмм, описывающих уровень сигнала в конкретной области. Относительно рассматриваемых методов, данный метод не позволяет достигать лучшего показателя позиционирования из-за избыточности, вызванной погрешностями атрибутов измерений.

Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging (SDS-TWR) метод является методом позиционирования в системах реального времени RTLS и основан на измерении времени распространения радиосигнала от передатчика до приемника.

$$t_{\text{сигнала}} = \frac{(t_{\text{МА}} - t_{\text{А откл}}) \times (1 + e_{\text{max}}) + (t_{\text{АМ}} - t_{\text{М откл}}) \times (1 + e_{\text{max}})}{4}, \quad (3)$$

где $t_{\text{МА}}$ – время обмена пакетами запрос-ответ метка-анкер, с;

$t_{\text{АМ}}$ – время обмена пакетами запрос-ответ анкер-метка, с;

$t_{\text{М откл}}$ – задержка ответа от маркера на запрос анкера, с;

$t_{\text{А откл}}$ – задержка ответа от анкера на запрос метки, с;

$e_{\text{max}} \leq 40 \text{ нс}$ – максимальная погрешность опорных генераторов.

Измерения выполняются на разных устройствах, поэтому, необходимо учитывать погрешности опорных генераторов. Разница между значениями времени отклика не превышает 1 мкс, согласно требованиям стандарта ISO24730-5. Поэтому, ошибки синхронизации не возникают и не вызывают погрешности измерения времени распространения сигнала при позиционировании. Тем не менее, точность определения местоположения метода SDS-TWR напрямую зависит от скорости распространения радиосигнала. Необходимо учитывать какие частоты используются в той или иной технологии, а также среду.

Метод Distance Vector-Hop является средством определения местоположения в беспроводных сенсорных сетях и основан на дистанционно-векторном протоколе маршрутизации, без необходимости в вычислении расстояний между уже известными узлами сети и обладая информацией о топологии сети. Позволяет выявить среднее расстояние хопа в сети и выполнить оценку расстояния до узлов с неизвестным местоположением.

При использовании данного метода позиционирования, с целью достижения максимальной точности, требуется определенная плотность размещения сетевых узлов. Однако, радиочастотное планирование беспроводных сетей требует

выполнения определенных требований, в том числе влияющих на качество сигнала. В таком случае необходим поиск лучшей комбинации беспроводных технологий в сети с учетом наилучших методов позиционирования относительно каждой из них.

Основная проблема определения местоположения заключается в том, что предположить местоположение устройства можно основываясь на наборе измерений физических величин. Данные измерения обычно содержат значительное количество шумов или других систематических ошибок в измерении. Выбор метода позиционирования определяется минимальными погрешностями в измерениях, минимальной избыточностью и наилучшей точностью.

Анализ эффективности рассмотренных методов позиционирования является определяющим фактором, в результате которого для дальнейшего исследования был выбран метод локального позиционирования Distance Vector-Hop, так как является способом позиционирования в беспроводных сенсорных сетях, активно развивающихся в настоящее время.

В четвертой главе «Решение задачи определения местоположения» проведен анализ эффективности метода локального позиционирования Distance Vector-Hop на базе смоделированных беспроводных сенсорных сетей и в рамках сформированного алгоритма.

В настоящее время обеспечение услуги определения местоположения в помещении реализуется с помощью установки в некоторых сегментах сети или во всей сети специализированных датчиков. При моделировании процесса локального позиционирования стоит учитывать, что топология сети и радиокарта помещения неизвестна абонентскому устройству. В таком случае, для снижения погрешностей определяемых координат, с помощью специализированных методов, требуется равномерное покрытие сетевыми устройствами всей площади помещения.

Анализ процесса позиционирования в сенсорной сети данной работы не предполагает использование датчиков и сенсоров, как средство измерения уровня сигнала RSSI для проведения расчетов, так как такой процесс вызывает накопление ошибок. На точность определения местоположения влияет среда обмена информацией и данными. В сенсорной сети подключение абонентского устройства, при вхождении в сеть или кластер сети, производится к ближайшему сенсорному узлу. Поэтому, абонентское устройство находится в непосредственной прямой видимости по отношению к моту. Это позволяет исключить вероятность возникновения препятствий для распространения сигнала или снизить ее до минимума.

В данном исследовании предлагается улучшить анализируемый метод Distance Vector-Hop за счет использования сетевой топологии дерево и данных о местоположении не только головных узлов, но и сенсорных. Тогда, снизиться погрешность конечного результата, вызываемая неточностью расчета расстояний до искомого местоположения абонентского устройства.

В совокупности, использование методов Distance Vector-Hop и двумерная угловая латерация позволяет исключить неизвестные величины, не позволяющие

выполнить расчет координат абонентского устройства за счет только одного из рассматриваемых методов.

Процесс определения местоположения предполагает определенный алгоритм. Расчет координат абонентского устройства, в исследуемом алгоритме, выполняется с помощью адаптированных формул указанных методов. Разработанный алгоритм для исследования эффективности анализируемых методов позиционирования, в беспроводной сенсорной сети, представлен на рисунке 5.

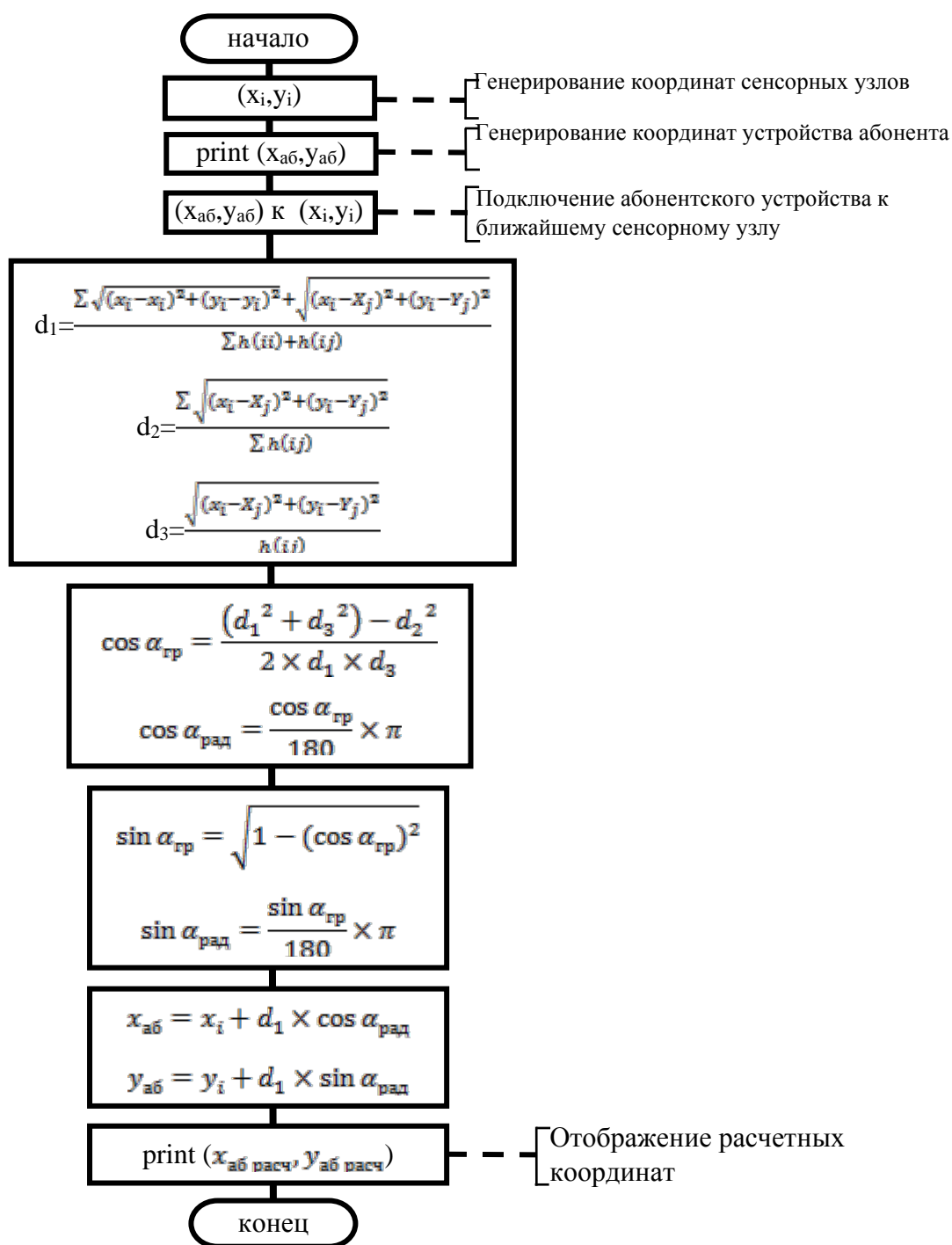


Рисунок 5 – Алгоритм позиционирования в беспроводной сенсорной сети

Пояснение процесса расчета на примере одного кластера представлено на рисунке 6.

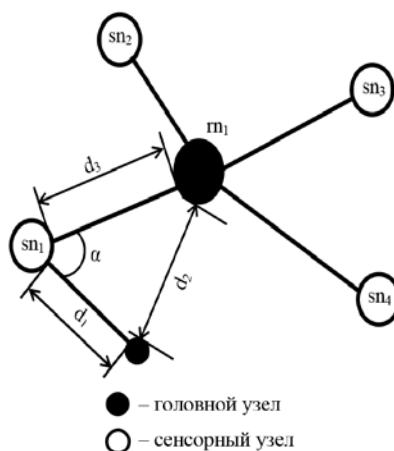


Рисунок 6 – Методы Distance Vector-Hop и двумерная угловая латерация

Расстояние между сенсорным и искомым узлами определяется по формуле:

$$d_1 = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} + \sqrt{(x_1 - X_1)^2 + (y_1 - Y_1)^2} + \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}}{h(12) + h(11) + h(41)}, \quad (4)$$

где (x_1, y_1) – координаты сенсорного узла sn1;

(x_2, y_2) – координаты сенсорного узла sn2;

(x_4, y_4) – координаты сенсорного узла sn4;

(X_1, Y_1) – координаты головного узла m1;

$h(12)$ – расстояние хопа между сенсорным sn1 и сенсорным sn2 узлами, м;

$h(11)$ – расстояние хопа между головным m1 и сенсорным sn1 узлами, м;

$h(41)$ – расстояние хопа между сенсорным sn1 и сенсорным sn4 узлами, м.

Расстояние между головным и искомым узлами определяется по формуле:

$$d_2 = \frac{\sqrt{(x_2 - X_1)^2 + (y_2 - Y_1)^2} + \sqrt{(x_1 - X_1)^2 + (y_1 - Y_1)^2}}{h(21) + h(11)}, \quad (5)$$

где $h(21)$ – расстояние хопа между сенсорным sn2 и головным m1 узлами, м.

Расстояние между сенсорным и головным узлами определяется по следующей формуле:

$$d_3 = \frac{\sqrt{(x_1 - X_1)^2 + (y_1 - Y_1)^2}}{h(11)}, \quad (6)$$

Метод двумерной угловой латерации, в исследуемом алгоритме, выражен представленными далее формулами:

$$\cos \alpha_{\text{гр}} = \frac{d_1^2 + d_3^2 - d_2^2}{2 \times d_1 \times d_3}, \quad (7)$$

где α – угол между сенсорным sn1 и искомым узлами, градусы.

$$\sin \alpha_{\text{гр}} = \sqrt{1 - (\cos \alpha_{\text{гр}})^2}. \quad (8)$$

Координаты абонентского устройства $(x_{\text{аб}}, y_{\text{аб}})$ определяются по формулам:

$$x_{\text{аб}} = x_1 + d_1 \times \cos \alpha_{\text{рад}}, \quad (9)$$

$$y_{\text{аб}} = y_1 + d_1 \times \sin \alpha_{\text{рад}}. \quad (10)$$

Результатом моделирования процесса локального позиционирования является база значений местоположений абонентского устройства, вычисленных согласно сформированному алгоритму. Также алгоритм позволяет произвести наглядную оценку результатов моделирования, с помощью графического отображения полученных расчетных показателей координат. Стоит отметить, что оценка эффективности исследуемого процесса основывается на сравнительном анализе математических и графических показателей с реальными, генерируемыми

Сенсорные узлы распределяются произвольно в кластере с установленными ограничениями. Ограничения обусловлены требованиями к радиочастотному планированию сети и предотвращают размещение двух и более узлов в радиусе тридцати метров для сети с радиусом действия мота равным 50 метров и в радиусе четырех метров для сети с радиусом действия мота равным 10 метров. В данном исследовании предполагается, что генерируемое местоположение имеет всевозможные значения координат внутри каждого из кластеров за счет отсутствия препятствий внутри одного кластера.

Точность вычисленных местоположений находится в прямой зависимости от расстояния между искомым и сенсорным узлами. Пределы удаленности абонентского устройства от сенсорного узла определяют границы погрешностей расчетных координат процесса позиционирования. Это гарантирует не превышение погрешности показателей радиуса действия мота. Относительная погрешность характеризует степень несоответствия расчетной координаты истинной (генерируемой алгоритмом) координате в процентах. Среди двадцати проведенных измерений координат местоположения абонентского устройства,

значение относительной погрешности для сети с радиусом действия мота равным 50 метров составляют 0,48-340 %, а для сети с радиусом действия мота равным 10 метров варьируются в пределах 0-62,5 %.

Результат работы алгоритма, включающего сгенерированную беспроводную сенсорную сеть, сгенерированное и расчетное местоположения искомого узла, для первого опыта, для сети с радиусом действия мота равным 10 метров, представлен на рисунке 7.

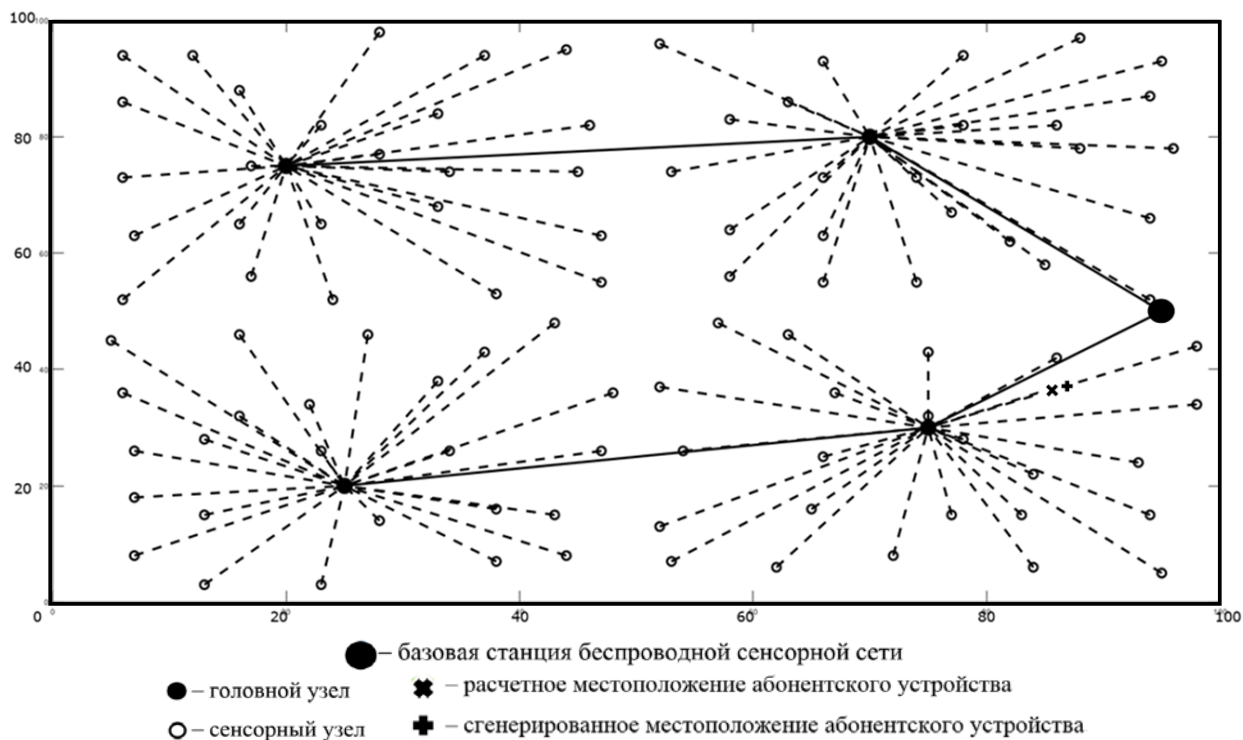


Рисунок 7 – Графический результат действия алгоритма

Стоит отметить, что сенсорные узлы получают координаты случайным образом. Это обусловлено свойствами беспроводных сенсорных сетей и необходимостью охватить различные начальные условия для проведенных испытаний. Тем самым, алгоритм не привязан к конкретной сети и топологии, а адаптирован к изменениям в ее структуре. Внесение изменений о расположении базовой станции и головных узлов включено в исследуемый алгоритм. Количество головных и сенсорных узлов не влияет на свойства адаптивности.

Непрерывный процесс навигации обеспечивается за счет равномерного распределения сенсорных узлов по всей площади помещения. Как и в беспроводной сенсорной сети с радиусом действия мота в 50 метров, размеры погрешности, вызываемой удаленностью от мота, наличием препятствий или неравномерной плотностью покрытия, при данной топологии и свойствах узлов не превышают десять метров.

Сравнительная характеристика генерируемого алгоритмом и расчетного путей, для сети с радиусом действия мота равным 50 метров, представлена на рисунке 8.

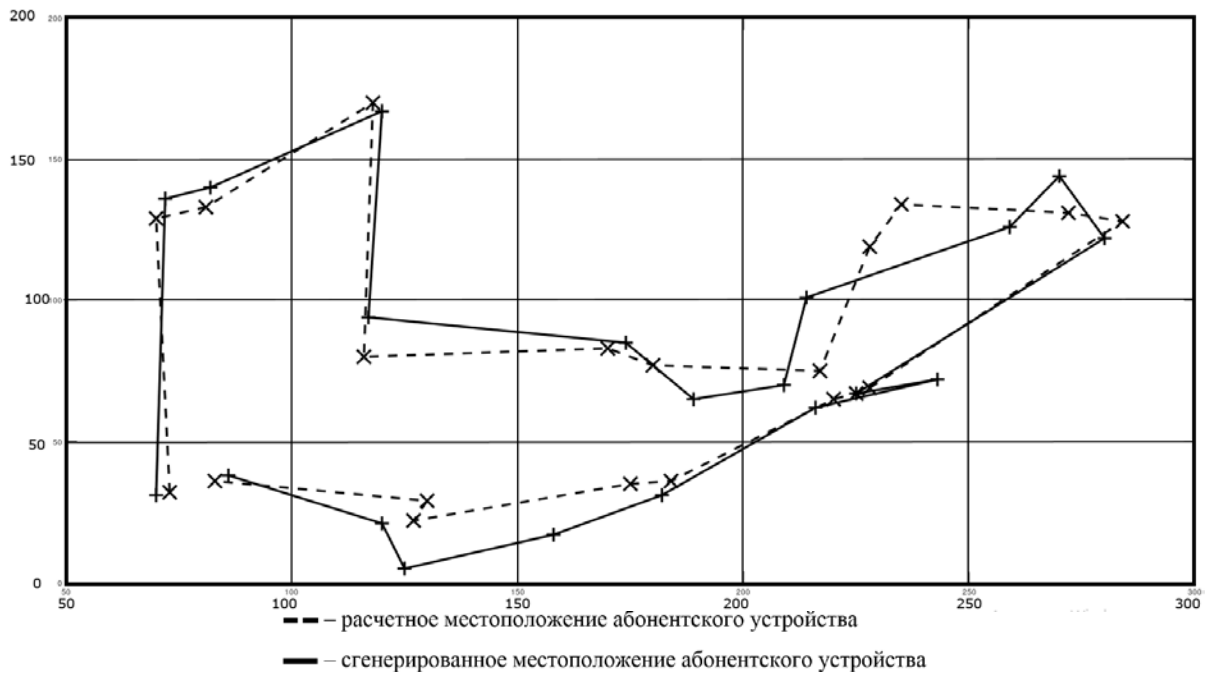


Рисунок 8 – Сравнительная характеристика генерируемого и расчетного путей

Оценка различия данных, полученных расчетным путем, и сгенерированных местоположений производится с помощью формирования траектории перемещения абонента. Данная траектория составляется на основании двадцати случайных опытных измерений. Сравнительная характеристика генерируемого алгоритмом и расчетного путей, для сети с радиусом действия мота равным 10 метров, представлена на рисунке 9.

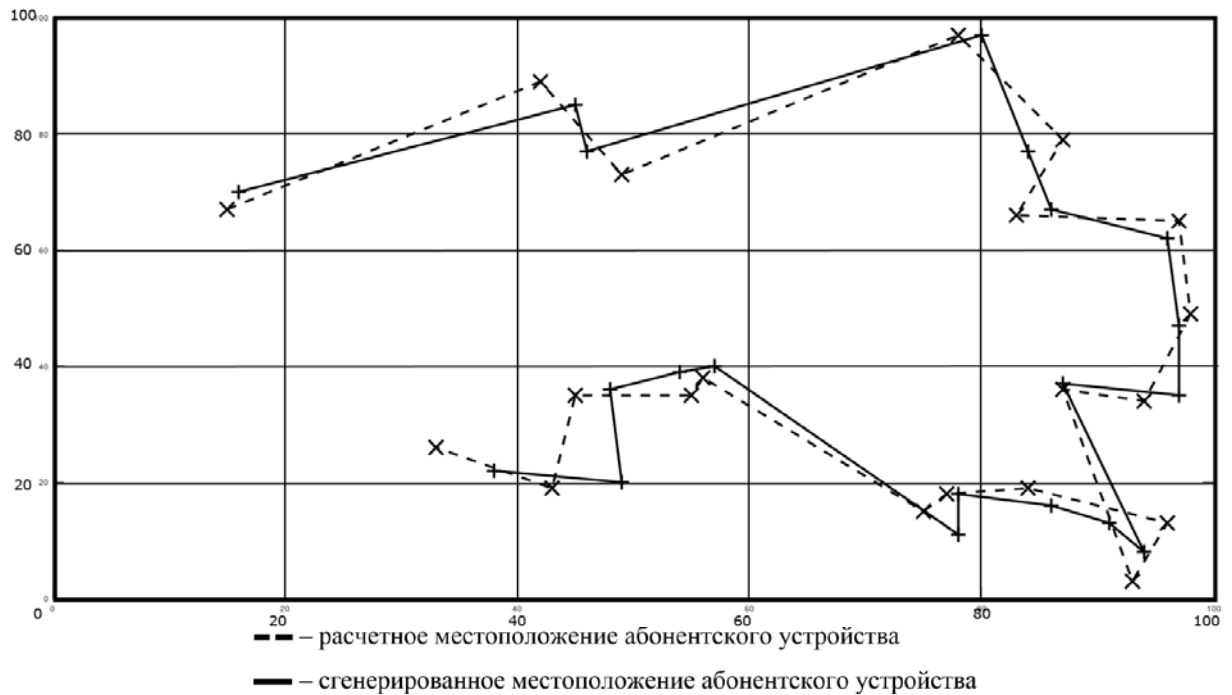


Рисунок 9 – Сравнительная характеристика генерируемого и расчетного путей

Анализ вышеприведенной сравнительной характеристики генерируемого алгоритмом и расчетного путей и данных таблиц с показателями по координатам показывает, что имеется необходимость в выборочной корректировке полученных значений. С точки зрения требований, предъявляемых к точности позиционирования современных сетей и систем, данный алгоритм им не удовлетворяет. Так как, метод Distance Vector-Hop, в совокупности с методом двумерная угловая латерация, не позволяет производить вычисления местоположений с сантиметровой точностью.

Оценку качества процесса позиционирования необходимо провести с помощью сравнения результатов значений координат. Сравнительная характеристика местоположений показывает, что разница расстояний между узлами не влияет на конечный результат позиционирования. Исходя из полученных значений координат, погрешности в значениях координат, полученных с помощью исследуемого алгоритма и гиперболической латерации, пренебрежимо малы. Таким образом, метод Distance Vector-Hop и сформированный для исследования алгоритм, с учетом вышеприведенных опытов, является методом позиционирования и навигации с метровой точностью.

Показатели расчетных координат, полученных согласно вышеуказанным методам и генерируемое эталонное значение сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика местоположений абонента

Опыт	$x_{аб}, y_{аб}$ генерир		$x_{аб}, y_{аб}$ расчетное		$x_{аб}, y_{аб}$ гипер латер	
1	87	37	88	35	88	35
2	40	95	36	93	36	92
3	23	65	24	65	24	65
4	8	31	3	39	3	38
5	51	32	57	33	57	33
6	83	88	82	86	82	86
7	52	10	56	6	56	6
8	53	66	56	65	55	64
9	9	12	8	14	7	13
10	38	97	37	99	37	98

Полученные опытным путем показатели, исследуемого процесса в условиях беспроводной сенсорной сети и используемых методов, являются результатами, не превышающими погрешность величин более пяти метров. Для достижения наибольшей точности определения координат абонентского устройства, необходимо исследование или разработка других методов позиционирования в беспроводных сенсорных сетях.

Однако, стоит отметить, что преимуществом исследуемого алгоритма является то, что он работает без участия набора измерений физических величин. Это позволяет избежать появления погрешностей и ошибок, вызванных содержанием в полученных измерениях значительного количества шумов и систематических ошибок.

Таким образом, необходим поиск лучшей комбинации беспроводных технологий в сенсорной сети с учетом наилучших методов позиционирования относительно каждой из используемых инфраструктур, без участия измерений физических величин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской диссертации получен алгоритм локального позиционирования мобильных систем метровой точности, для разработанных моделей беспроводных сенсорных сетей, с учетом сравнительной оценки эффективности методов Distance-Vector Hop и двумерная угловая латерация.

Целью диссертации являлось моделирование процесса локального позиционирования мобильных систем с детальным анализом алгоритма Distance-Vector Hop.

В ходе диссертационного исследования были выполнены поставленные задачи. Проведенный анализ публикаций по теме исследования позволил определить степень проработанности вопроса обеспечения качества услуги локального позиционирования мобильных систем. Изученные материалы отражают популярные направления развития исследований в данной области. Представленные достижения являются основополагающими в формировании выбора, в качестве объекта исследования, алгоритма Distance Vector-Hop.

Рассмотренные системы и технологии позиционирования послужили формированием базового представления о процессе определения местоположения. Анализ изученных и выделенных достоинств и недостатков исследованных технологий, является определяющим фактором выбора инфраструктуры для моделирования локальной сети с услугой позиционирования. В результате, для использования в качестве среды передачи данных в моделируемой сети и для решения поставленных задач выбраны технологии Bluetooth 5.1 и Wi-Fi.

Исследованы методы позиционирования в локальных сетях – описан математический аппарат расчета методов позиционирования применительно к локальным сетям. Рассмотренные методы описаны с учетом особенностей, выделены преимущества и выполнена оценка негативного влияния каждого метода на процесс позиционирования в целом. Проведенный анализ эффективности рассмотренных методов являлся определяющим фактором выбора алгоритма позиционирования в беспроводной сенсорной сети для исследований в области моделирования процесса локального позиционирования.

Произведено моделирование процесса локального позиционирования с оценкой эффективности результатов работы исследуемого алгоритма, с помощью высокоуровневого языка программирования Octave 5.2.0. Процесс позиционирования в беспроводной сенсорной сети смоделирован с помощью сформированного алгоритма. Расчет координат абонентского устройства, в исследуемом алгоритме, выполнен с помощью адаптированных формул методов Distance Vector-Hop и двумерная угловая латерация. Представлена сравнительная характеристика генерируемых случайным образом местоположений абонентского

устройства с расчетными согласно исследуемому алгоритму. Сформирована траектория перемещения абонентского устройства для выполнения наглядной сравнительной характеристики погрешностей исследуемого алгоритма. Исследование метода Distance Vector-Hop проведено для двух беспроводных локальных сетей с использованием технологий Wi-Fi, Bluetooth 4.2 и Bluetooth 5.0. Расчет погрешностей определенных координат устройства абонента для двух сетей показал, что сеть, с использованием технологии Bluetooth 4.2 и радиусом действия сенсорных узлов равным 10 метров, обладает наибольшей эффективностью в сравнении с сетью с радиусом действия мотов равным 50 метров. Проведенные исследования и выполненные сравнительные оценки показывают, что метод Distance Vector-Hop, в совокупности с двумерной угловой латерацией, составляют алгоритм определения местоположения в локальной беспроводной сети, выполняющий позиционирование и навигацию с метровой точностью.

Основные результаты работы:

1) разработаны модели беспроводных сенсорных сетей, созданные в высокоуровневом языке программирования Octave 5.2.0, с инфраструктурой, реализованной с использованием технологий Wi-Fi, Bluetooth 4.2 и Bluetooth 5.0;

2) смоделирован процесс локального позиционирования мобильных систем, с помощью сформированного алгоритма с использованием существующих методов Distance-Vector Hop и двумерная угловая латерация, и на базе разработанных моделей беспроводных сенсорных сетей;

3) исследована эффективность алгоритма локального позиционирования мобильных систем метровой точности в беспроводной сенсорной сети, основанного на существующем методе Distance-Vector Hop и обеспечивающего процесс определения местоположения без учета измерений физических величин;

4) сформированный алгоритм для локального позиционирования в беспроводных сенсорных сетях является данными для проведения исследований в направлении достижения результатов с сантиметровой точностью.

Научная новизна работы заключается в оценке эффективности исследуемого алгоритма, сформированного на базе метода Distance Vector-Hop, с учетом требований, установленных для беспроводной сенсорной сети.

Практическая значимость заключается в обеспечении возможности определения местоположения применительно к беспроводной сенсорной сети, развернутой с помощью технологий Wi-Fi, Bluetooth 4.2 и Bluetooth 5.0. Исследуемая локальная сеть, спроектированная согласно требованиям, предъявляемым к беспроводным сенсорным сетям, является способом оценки эффективности сформированного алгоритма в условиях распределенной самоорганизующейся беспроводной сети. Эффективность работы алгоритма оценивается графическим и числовым представлениями, что позволяет выполнить расчет погрешностей результатов и наглядно оценить метровую точность процесса позиционирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня РИНЦ

1 Гусева Ю.О. Определение местоположения мобильного устройства на основе алгоритма латерации / Ю.О. Гусева, Н.В. Будылдина // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Часть I. – Ростов-на-Дону, 2019. – С.367-372.

2 Гусева Ю.О. Позиционирование с помощью метода Distance Vector-Hop в беспроводной сенсорной сети / Ю.О. Гусева, Н.В. Будылдина // Информационные технологии и когнитивная электросвязь. – Екатеринбург, 2020.

3 Гусева Ю.О. Анализ эффективности метода позиционирования Distance Vector-Hop / Ю.О. Гусева, Н.В. Будылдина // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Часть I. – Ростов-на-Дону, 2020.

4 Гусева Ю.О. Позиционирование в Wi-Fi-технологии локальной беспроводной сети / Ю.О. Гусева, Н.В. Будылдина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция – Санкт-Петербург, 2020.

Научные статьи, опубликованные в изданиях УрТИСИ СибГУТИ

1 Гусева Ю.О. Системы локального и глобального позиционирования / Ю.О. Гусева, Н.В. Будылдина // Формирование профессиональных компетенций выпускников инфокоммуникационного вуза в соответствии с требованиями отраслевых стандартов и ФГОС 3++. – I этап – Екатеринбург, 2018.

2 Гусева Ю.О. Позиционирование в сетях Wireless Local Area Network / Ю.О. Гусева, Н.В. Будылдина // Информационные технологии и когнитивная электросвязь. – Екатеринбург, 2019.

3 Гусева Ю.О. Системы и технологии локального позиционирования / Ю.О. Гусева, Р.Г. Новкшенова // Цифровая экономика: взгляд студенчества. – I этап – Екатеринбург, 2019.