

Исследование распространения радиоволн внутри помещений с целью определения местоположения движущихся объектов

Е. В. Кокорева, А. С. Брагин, К. И. Шурыгина

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: Перед разработчиками была поставлена задача создать систему геолокации с применением оборудования от российского производителя, погрешность определения местоположения в которой не превышает 5 метров. В рамках работы над проектом была определена опытная зона проведения экспериментов, спроектирована и построена тестовая сеть Wi-Fi для реализации системы локального позиционирования. В качестве физического параметра, измерение которого необходимо для вычисления координат целевого объекта, был выбран уровень мощности сигнала на входе приёмного устройства. Затем был разработан комбинированный алгоритм определения местоположения, основанный на механизмах ближайшей точки доступа, дифференциации пространственных образцов и трилатерации. В тестовой сети было проведено более тысячи измерений, в ходе которых были выявлены основные проблемы системы локации и предложены способы их преодоления.

Ключевые слова: Wi-Fi, позиционирование, локация, RSSI, модель распространения радиоволн.

Для цитирования: Кокорева Е. В., Брагин А. С., Шурыгина К. И. Экспериментальное исследование системы позиционирования в централизованной Wi-Fi сети // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 1. С. 80–94. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-1-80-94>



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Кокорева Е. В., Брагин А. С.,
Шурыгина К. И., 2025

Статья поступила в редакцию 02.08.2024;
переработанный вариант – 15.09.2024;
принята к публикации 16.09.2024.

1. Введение

В современном мире системы геолокации встречаются в различных отраслях экономики, науки, техники, а также повседневной жизни. Традиционно различают глобальное и локальное позиционирование, причём каждый из этих подходов находит свои сферы применения.

Системы определения местоположения востребованы в сфере потребительских услуг, рекламы и торговли, образования, медицины, культурно-просветительской деятельности, в логистике и на охранных предприятиях. На геолокации базируются такие виды услуг, как отслеживание логистических и транспортных потоков, защита жилых и производственных зданий от взломов и незаконных проникновений, а также обнаружение присутствия людей в не предназначенных для этого (опасных) местах; обнаружение пострадавших в замкнутых пространствах, например, шахтах, подвалах, тоннелях и др. при проведении спасательных операций; выдача рекламы или информирование пользователя при его приближении к

определенной точке, например, магазину, городской достопримечательности или музейному экспонату, а также многие другие.

Спутниковые системы навигации (GLONASS, GPS, Бэйдоу, DORIS, Галилео и др.) находят мало применения при решении задач позиционирования внутри помещений из-за значительного влияния многолучёвости и затухания сигнала при его прохождении через препятствия (бетонные или кирпичные стены и перекрытия) [1]. Широкое распространение получили системы на основе имеющихся в любой государственной или коммерческой организации сетей Wi-Fi.

Современный рынок заполнен предложениями иностранных фирм и компаний, например, Mikrotik, Huawei, Cisco, ZyXEL и пр. [2–5]. Но дороговизна предоставляемых данными разработчиками услуг геолокации, а также несоблюдение ими требований информационной безопасности по отношению к российским пользователям, в особенности государственным учреждениям и организациям, делает применение решений от зарубежных компаний неприемлемым.

Таким образом, перед авторами была поставлена задача разработать и исследовать систему локального позиционирования, построенную на основе российского оборудования от предприятия Элтекс, а также протестировать режимы её работы и добиться обеспечения погрешности определения координат объекта не более 5 м.

Для определения координат мобильного объекта авторами используется комбинированный алгоритм на основе механизмов ближайшей точки доступа, сравнения с образцами и мультилатерации [6–7]. Для реализации алгоритма необходимо производить измерение индикатора мощности сигнала на входе антенны абонентского устройства (RSSI) [8].

2. Проведение испытаний в экспериментальной сети Wi-Fi

2.1. Организация экспериментальной Wi-Fi сети

Для проведения экспериментов было выбрано партнёрское предприятие в г. Новосибирске с уже расставленными на четырёх этажах здания и связанными в локальную корпоративную сеть точками доступа AP (англ. Access Point).

Точки доступа объединены в сеть посредством проводной технологии Ethernet, для чего используют подключение через витую пару UTP-5 к коммутатору MES-2324P с поддержкой технологии PoE. Создание и настройка нескольких виртуальных сетей VLAN (англ. Virtual Local Area Network) позволяет упростить контроль над локальной сетью. Одна из этих VLAN обслуживает трафик управления точками доступа Wi-Fi, а остальные используются для локальной передачи данных по корпоративной сети и для доступа в глобальную сеть.

Программный комплекс управления сетью Wi-Fi SoftWLC производителя Eltex служит для аутентификации пользователей и выступает в роли маршрутизатора для организации VLAN. Включенный в данное программное обеспечение DHCP-сервер выдает IP-адреса точкам доступа и пользовательским устройствам, подключенным к сети.

Для вычисления координат искомого объекта применяется специализированное программное обеспечение [9–10], установленное на сервере определения местоположения, который в то же время служит для управления беспроводной локальной сетью с помощью контроллера SoftWLC.

2.2. Частотно-территориальное планирование экспериментальной Wi-Fi сети

Для наглядного представления о зонах покрытия радиопространства внутри помещений со сложной структурой, а также материалами стен и перекрытий было выполнено моделирование тепловых карт при помощи планировщика беспроводных сетей Wi-Fi Planner PRO [11]. Сравнение полученных тепловых карт с экспериментальными

данными, полученными в ходе натурного моделирования в реальной сети позволило выполнить частотно-территориальное планирование тестовой сети.

Тепловая карта Wi-Fi представляет собой график распределения уровня мощности сигнала (RSSI) сети Wi-Fi внутри помещения и позволяет оценить зону покрытия, которую обеспечивает каждая из точек доступа, увидеть «теневые» участки и на основе сопоставления модельных карт с результатами измерений выполнить более эффективное размещение AP и распределение частотных каналов. По результатам предварительных исследований были получены рекомендации обеспечить уровень RSSI не менее -65 дБм не менее чем от трёх точек доступа внутри каждого помещения при отношении сигнал/шум не менее 2 дБ независимо от схемы модуляции и кодирования (MCS) в источнике сигнала [12].

Программа визуализации радиопокрытия использует следующие параметры:

- частоту, на которой работает точка доступа;
- мощность передачи;
- конфигурация помещения и материал его перегородок.

В ходе своей работы данная программа анализирует планировку помещения, вычисляет, где находятся перегородки и стены, анализирует положение точки доступа, используя различные модели распространения сигнала внутри зданий, после чего выдает изображение тепловых карт.

На рис. 1–2 приведены примеры карт радиопокрытия точек доступа, расположенных на 2-м этаже экспериментальной зоны.

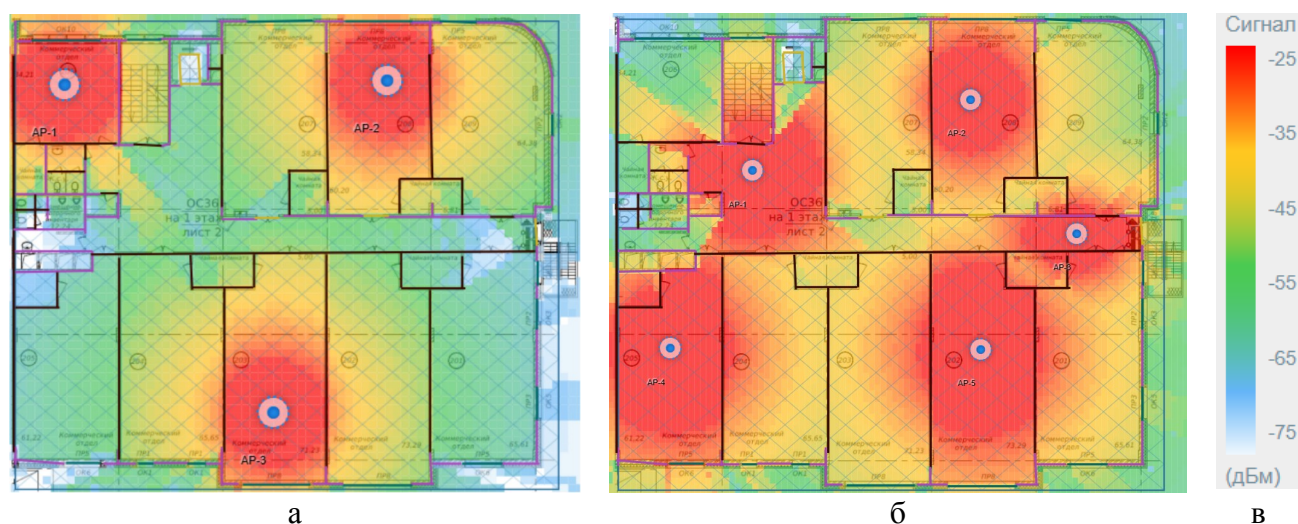


Рис. 1. Тепловая карта размещения точек доступа в помещениях экспериментальной зоны:
а – исходного; б – скорректированного в соответствии с рекомендациями;
в – уровень мощности сигнала на рисунке

Изначально корпоративная локальная сеть была настроена на эффективную передачу данных, а также широкополосный доступ в интернет, при этом услуга определения местоположения и навигации сотрудников внутри помещений в учёт не принималась. Поэтому рис. 1а демонстрирует наличие «теневых» зон в местах передвижения абонентов сети. Кроме того, при исходном размещении точек доступа не было выполнено условие относительно уровня мощности принимаемого сигнала (-65 дБм) одновременно от трёх AP в каждой точке помещения.

Проверка зоны покрытия в натурной сети по результатам измерений дает достаточно точное совпадение с результатами моделирования, отраженными на тепловых картах.

По результатам построения тепловых карт удалось обнаружить в помещениях места с самым низким уровнем сигнала, провести измерения в этих проблемных зонах, проанализировать расхождения между модельными картами и натурными, учесть эти расхождения, чтобы в дальнейшем переместить точки доступа в те места, откуда

обеспечивается более равномерное радиопокрытие. На рис. 2 в качестве примеров отображены тепловые карты отдельно стоящих АР, позволяющие скорректировать их размещение для эффективного радиопокрытия.

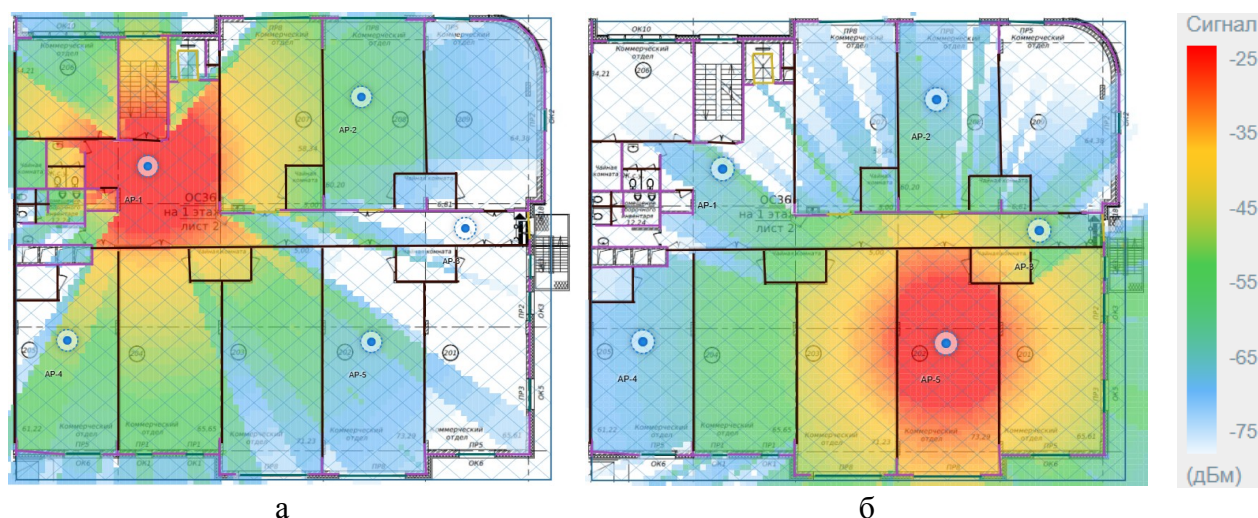


Рис. 2. Тепловые карты точек доступа со скорректированным местоположением: а – AP-1; б – AP-5

2.3. Выбор моделей и параметров распространения радиоволн внутри помещений

Было проведено более тысячи измерений сигнала RSSI в заранее обозначенных точках экспериментальной зоны (рис. 1б) с помощью пяти моделей смартфонов и специально разработанного для этой цели программного продукта. Смартфон каждого члена команды осуществлял по десять измерений с интервалом 10 секунд в каждой образцовой точке, по которым затем было определено выборочное среднее (по каждому смартфону отдельно, а затем по всем смартфонам).

Чтобы определить расстояние от образцовой точки до точки доступа по измеренному значению RSSI необходимо использовать формулу определения потерь мощности при передаче сигнала внутри помещения. Существует множество моделей, учитывающих распространение радиоволн через перегородки и перекрытия. Из них путем эмпирических исследований для дальнейшего анализа были отобраны следующие шесть моделей:

- модель распространения радиоволн в свободном пространстве или формула Фрииса (англ. Free Space Propagation Model) [13];
- модель линейного ослабления (англ. Linear Attenuation Model) [14];
- модель с одним наклоном (англ. One-Slope Model) [14];
- модель со многими стенами (англ. Multi-Wall Model) [14];
- модель, рекомендованная Международным Союзом Электросвязи (рекомендация ITU-R P.1238.8) [15];
- модель, разработанная компанией Lucent Technologies Bell Laboratories для сетей стандарта IEEE 802.11 при передаче на частоте 2.45 ГГц [16].

2.3.1. Модель распространения радиоволн в свободном пространстве

Важнейшей характеристикой распространения радиосигнала является *затухание* в канале связи L (потери) в зависимости от расстояния между антеннами передатчика и приёмника [13].

Затухание определяется как отношение передаваемой мощности к принимаемой (в виде положительной величины) и выражается в дБ:

$$L(d) = 10 \lg \frac{P_T}{P_R}, \text{ дБ},$$

где P_T, P_R – мощность передатчика и приёмника соответственно, Вт.

Большинство выражений для вычисления потерь мощности как внутри помещений, так и вне их, опираются на модель распространения сигнала в свободном пространстве (формула Фрииса):

$$L_{FS}(d) = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f, \text{ дБ},$$

где d – расстояние между антеннами передатчика и приёмника (км); f – несущая частота (МГц).

2.3.2. Модель линейного ослабления

Самая простая модель распространения радиоволн в помещении называется моделью линейного ослабления. В её основе лежит предположение о том, что потери мощности (дБ) линейно зависят от расстояния (м):

$$L(d) = L_{FS}(d) + \alpha \cdot d, \text{ дБ},$$

где $L_{FS}(d)$ – потери на распространение сигнала в свободном пространстве на расстоянии d от передатчика; константа α – коэффициент ослабления.

Данная модель используется, когда передатчик и приёмник находятся на одном этаже, и позволяет произвести приблизительную оценку радиообстановки в помещении.

2.3.3. Модель с одним наклоном

Анализ множества экспериментальных данных говорит о том, что потери на распространение сигнала внутри помещений можно оценить по формуле:

$$L(d) = L(d_0) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \text{ дБ},$$

где $L_{FS}(d_0)$ – потери на распространение сигнала в свободном пространстве на расстоянии $d_0 = 1$ м от передатчика; n – показатель степени; X_σ – гауссова случайная переменная с дисперсией σ^2 .

Параметры n и σ для конкретных несущих, применяемых в беспроводной телефонии и беспроводных локальных сетях, характеризуют различные типы стен и условия распространения в различных зданиях (жилых, офисных, промышленных).

2.3.4. Модель со многими стенами COST-231

Более гибкое решение, нежели описанные в предыдущих подразделах, предлагает модель со многими стенами. Данная модель учитывает потери на проникновение сигнала через стены и перекрытия, лежащие на линии прямой видимости между передатчиком и приёмником. Было обнаружено, что потери при прохождении через некоторое число перекрытий нелинейно зависят от количества последних. Для учета этого фактора введен эмпирический коэффициент b , который позволяет описать потери на распространение выражением:

$$L = L_{FS}(d_0) + L_C + \sum_{i=1}^I k_{w,i} L_{w,i} + k_f \left(\frac{k_j + 2}{k_f + 1} - b \right) L_f, \text{ дБ},$$

где $L_{FS}(d_0)$ на расстоянии 1 м от передающей антенны; L_C – постоянные потери, как правило, их значение принимается равным нулю; $k_{w,i}$ – количество стен i -го типа, через которые проходит сигнал; k_j – количество преодолеваемых перекрытий; $L_{w,i}$ – потери на прохождение через стену i -го типа; L_f – потери на прохождение на соседний этаж; I – количество типов стен (обычно $I = 2$ для учета тонких ≤ 10 см и толстых стен > 10 см).

2.3.5. Модель ITU-R P.1238.8

Данная модель описывается рекомендацией международного союза электросвязи (МСЭ) и служит для расчета потерь сигнала внутри зданий и помещений. Она является обобщённой и не зависит от местонахождения объекта. Модель пригодна для характеристики распространения радиоволн в диапазоне частот от 900 МГц до 100 ГГц:

$$L(d) = 20 \lg f + N \lg d + L_f(n) - 28, \text{ дБ},$$

где f – частота передачи; N – дистанционный коэффициент потерь мощности сигнала (дБ); d – расстояние между приемником и передатчиком (м); $L_f(n)$ – коэффициент потерь мощности за счёт прохождения сигнала через перекрытия (дБ); n – количество этажей между антеннами передатчика и приёмника.

2.3.6. Модель для расчёта потерь мощности в канале IEEE 802.11 на частоте 2,45 ГГц

Для планирования Wi-Fi сетей эмпирическим путём была выведена простая формула расчёта потерь мощности внутри помещений при распространении сигнала на частоте 2,45 ГГц [16].

$$L(d) = 58,3 + 33 \lg \left(\frac{d}{8} \right), \text{ дБ}, d > 8,$$

где d – расстояние между приемником и передатчиком.

2.3.7. Сравнение измеренных и вычисленных потерь мощности сигнала

На рис. 3 приведены результаты расчёта потерь мощности сигнала с использованием приведённых выше моделей распространения радиоволн в зависимости от расстояния и их сравнение с измеренными на данных расстояниях значениями RSSI. В данном случае измерения производились однократно абонентом, передвигающимся от одной образцовой точки к другой, постепенно увеличивая расстояние от AP.

В расчётах были учтены: координаты размещения точек доступа; мощность на выходе передатчика; коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн; частота канала передачи и коэффициенты потерь мощности для различных условий.

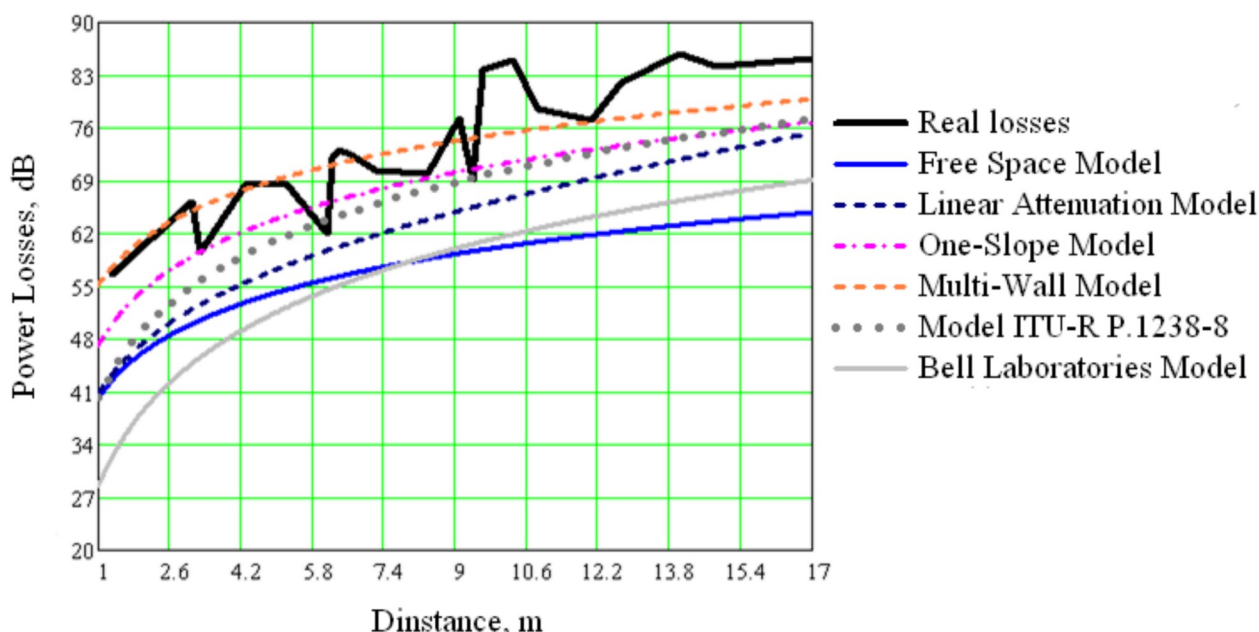


Рис. 3. Сравнение измеренных потерь мощности сигнала от одной из тестовых AP в образцовых точках с вычисленными значениями

Анализируя зависимости, приведённые на рисунке, можно видеть, что результаты измерений соответствуют значениям, полученным с помощью модели с одним наклоном, в тех точках, которые находятся на небольшом расстоянии и через одну перегородку от АР, хотя иногда больше приближаются к результатам расчёта по формуле из рекомендации ITU-R P.1238, и совпадают с кривой, полученной с использованием модели со многими стенами в точках, расположенных через две и более перегородок от точки доступа. Причём на большом удалении от АР (12–17 м) усиливается влияние многолучевого распространения, интерференции и других мешающих факторов, которые создают дополнительные потери в пределах 5 дБ.

Наиболее подходящими для применения в системе определения местоположения методом трилатерации являются модели с одним наклоном, со многими стенами и рекомендованная Международным союзом электросвязи. Остальные модели исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Более того, анализ полученных в результате расчёта и измерения в образцовых точках данных показывает, что для целей позиционирования необходимо использовать не одну избранную модель распространения радиоволн внутри помещений, а набор моделей, каждая из которых применяется в зависимости от конфигурации помещения и местоположения точки доступа относительно объекта.

3. Экспериментальная проверка метода латерации (трилатерации) с применением различных моделей распространения радиоволн внутри помещений

3.1. Механизм трилатерации

Метод латерации реализует геометрический подход к решению задачи позиционирования (рис. 4). Использующий для этой цели три точки доступа метод получил название *трилатерации*. При этом местоположение определяется решением системы уравнений трёх сфер, в центрах которых расположены точки доступа АР с известными координатами:

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2$$

$$r_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2$$

$$r_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2$$

где r_1 , r_2 и r_3 – радиусы трёх сфер; (x, y, z) – координаты объекта; (x_1, y_1, z_1) – координаты АР₁; (x_2, y_2, z_2) – координаты АР₂; (x_3, y_3, z_3) – координаты АР₃.

Координатами целевого объекта являются координаты точки пересечения этих сфер, а их радиусы указывают на расстояние до искомой позиции и могут быть определены, исходя из измерения уровня мощности сигнала RSS или его задержки TOA.

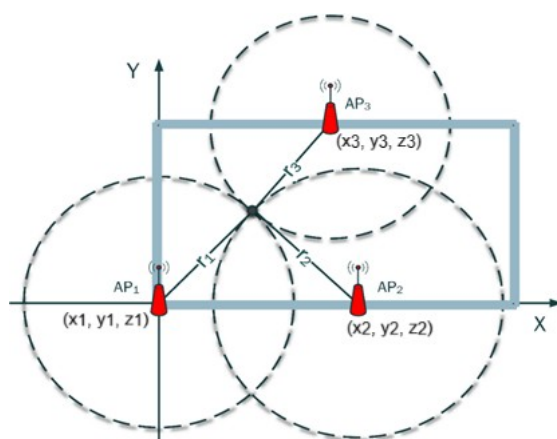


Рис. 4. Механизм трилатерации

3.2. Примеры экспериментов в помещениях опытной зоны

Экспериментальные результаты показали, что применение метода трилатерации возможно лишь в специально созданной в целях определения местоположения Wi-Fi сети и при условии полного и тщательного изучения конфигурации и обстановки помещений и зданий, поскольку формулы вычисления расстояний между антеннами передатчика и приёмника с помощью различных моделей распространения радиоволн содержат коэффициенты прохождения сигнала через различные материалы перегородок и перекрытий, и малейшее отклонение этих величин от истинного значения приводит к погрешности в десятки метров. С этой целью была изучена экспликация помещений опытной зоны и определены требуемые коэффициенты.

Далее будут рассмотрены несколько случаев определения местоположения объекта на разных этажах опытной зоны. Механизм трилатерации будет применяться к параметрам, измеренным несколькими мобильными устройствами и усреднённым значениям уровня мощности принимаемого сигнала RSSI.

Пример 1. Искомый объект находится в точке с координатами (10.6, 13.8, 5.0) на 2-м этаже и принимает сигналы от шести AP, находящихся как в одной плоскости с образцовой точкой, так и этажом выше или этажом ниже. В первом случае будем определять местоположение по трём точкам доступа, которые размещены на одном этаже с объектом, причём расстояние до каждой из них не превышает 20 м, и уровень принятого сигнала не ниже –65 дБм. Результаты локации представлены на рис. 5.

Разными символами на рисунке обозначены результаты вычисления координат с помощью трёх разных моделей распространения сигнала. Голубой круг вокруг образцовой точки определяет заданную точность вычислений 5 м.

Рисунок демонстрирует, что при прохождении сигнала от AP с номером 2–4 (2 – этаж, 4 – номер точки доступа) к объекту измерений на трассе нет никаких постоянных препятствий, при распространении от AP 2–1 на пути сигнала находятся две стены из гипсокартона и при прохождении от AP 2–5 – три таких же стены.

На рис. 5 показано, что координаты, вычисленные при помощи всех используемых моделей, попадают в пределы допустимых отклонений от искомого значения.

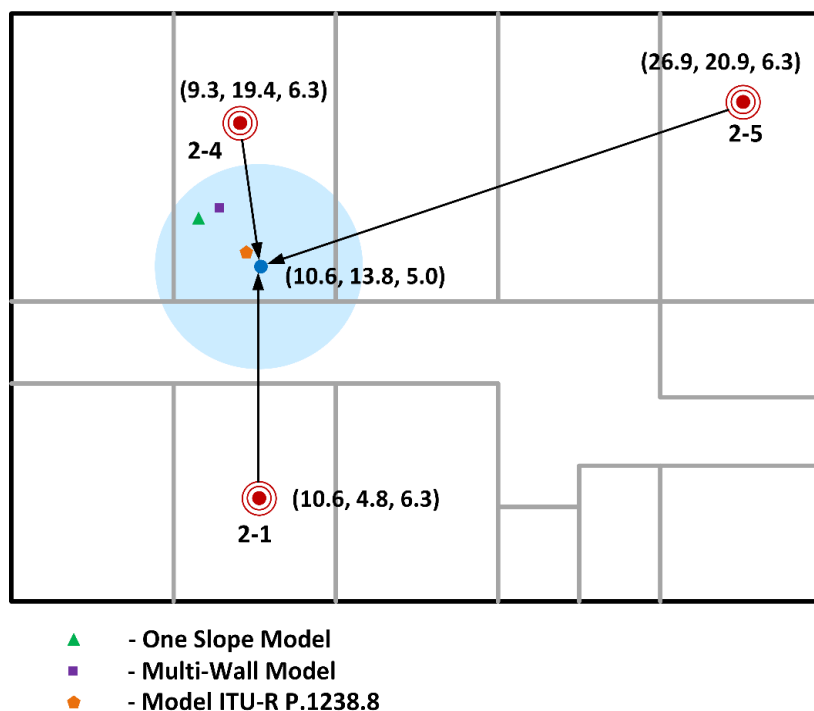


Рис. 5. Позиционирование объекта в точке (10.6, 13.8, 5.0): точки доступа и цель находятся на одном этаже

Пример 2. Объект располагается в точке с координатами (8.6, 19.8, 5.0) на 2-м этаже. В этой точке принят сигнал от одной АР на том же этаже и через пять стен от объекта, и сигналы от двух АР, расположенных этажом ниже (нет стен, но есть одно перекрытие) и этажом выше (сигнал проходит через одну стену и одно перекрытие).

На рис. 6 можно видеть, что в этой ситуации ни один метод не дал приемлемых результатов, поскольку из-за удалённости объекта от точек доступа и наличия большого количества перегородок и перекрытий уровень сигнала на приёме слишком слабый для точного определения местоположения.

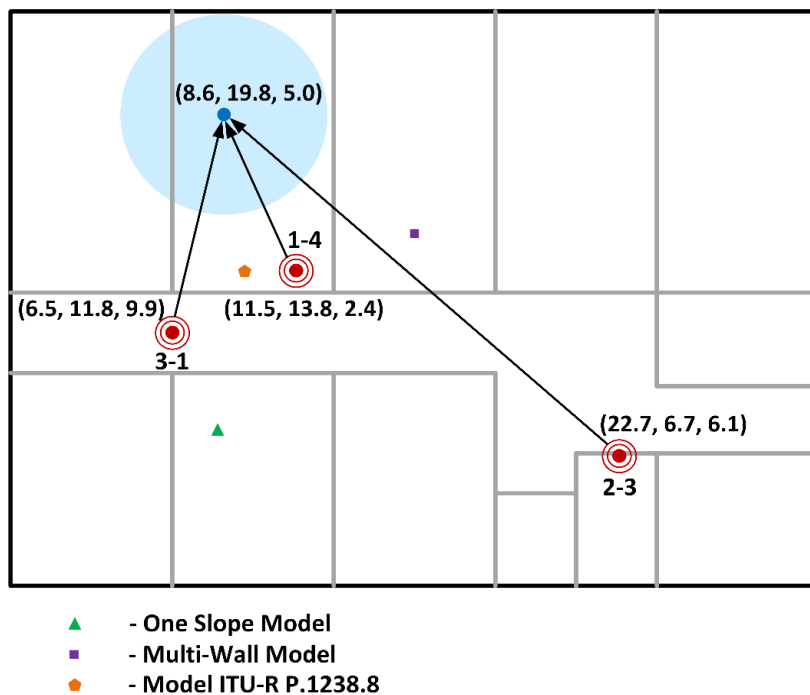


Рис. 6. Определение местоположения объекта в образцовой точке (8.6, 19.8, 5.0):
все АР находятся на разных этажах

Пример 3. Образцовая точка имеет координаты (4.4, 13.4, 8.6) и находится на третьем этаже. Соотношение стен между приёмной и передающей антеннами и результаты позиционирования представлены на рис. 7.

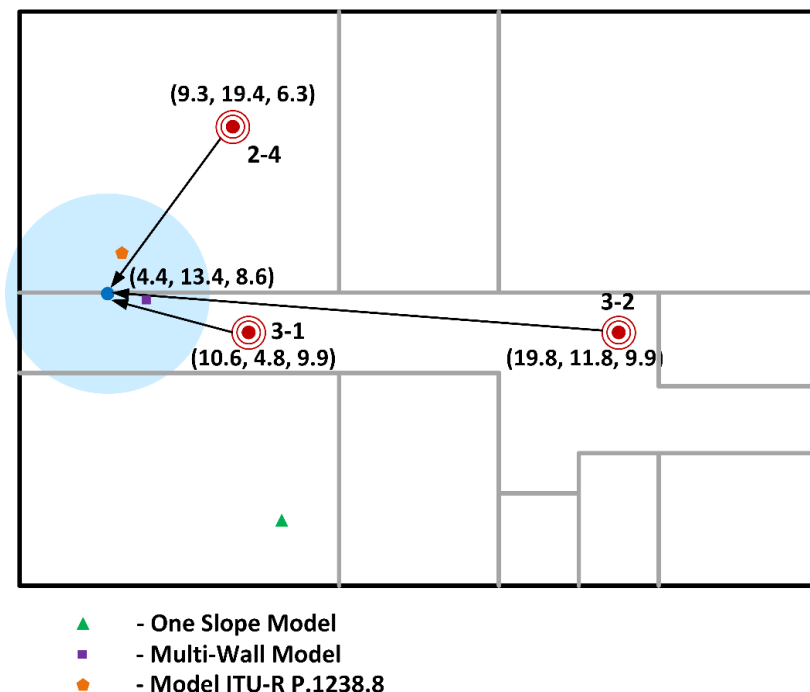


Рис. 7. Определение местоположения объекта в образцовой точке (4.4, 13.4, 8.6)

К объекту поступает сигнал от двух АР, расположенных в одной с ним плоскости, и одной АР с нижнего этажа. Рисунок показывает, что модель с одним наклоном не работает для расчёта характеристик системы, в которой точка доступа и целевой объект располагаются на разных этажах, а приемлемые результаты демонстрируют модели ITU-R P.1238.8 и COST 231.

Пример 4. Объект расположен в образцовой точке с координатами (9.6, 19.9, 12.2) на четвёртом этаже и принимает сигнал от трёх АР, расположенных в одной с ним горизонтальной плоскости. Как видно на рис. 8, прохождению сигнала препятствует 0, 2 и 3 гипсокартонных перегородки соответственно.

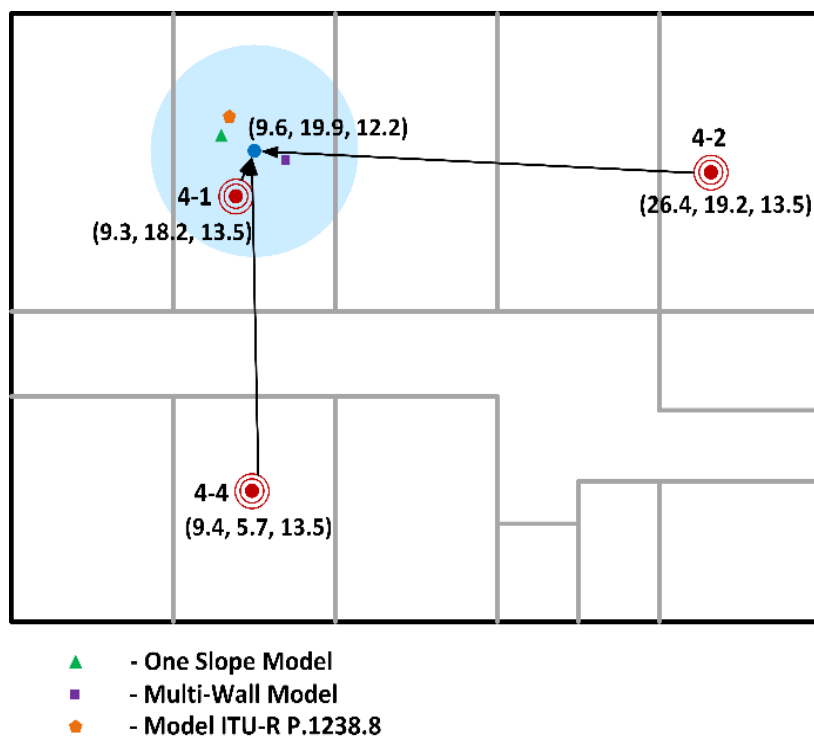


Рис. 8. Определение местоположения объекта в образцовой точке (9.6, 19.9, 12.2)

Можно видеть, что при размещении целевого объекта в одной горизонтальной плоскости с точками доступа и достаточно высоком уровне принятого сигнала все рассматриваемые модели расчёта потерь мощности при распространении волны внутри помещения дали положительный результат.

Таким образом, делаем вывод, что для каждой конкретной ситуации необходимо подбирать механизм и методику определения местоположения объекта.

4. Результаты обработки экспериментальных данных определения местоположения методом трилатерации

Для данных, полученных в результате экспериментов с тремя описанными выше моделями расчёта потерь мощности сигнала, было произведено вычисление среднеквадратической ошибки по формуле

$$Er = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2},$$

где x_1, y_1, z_1 – реальные координаты точки, в которой был измерен уровень RSSI; x_2, y_2, z_2 – координаты точки, полученные посредством механизма мультитрилатерации, в котором расстояния между антеннами передатчика и приёмника были вычислены с использованием различных моделей распространения радиоволн.

Статистика в виде гистограмм распределения ошибки определения координат мобильного объекта представлена на рис. 9. На гистограммах столбик, соответствующий погрешности 6 м, содержит все результаты с погрешностью более 5 м.

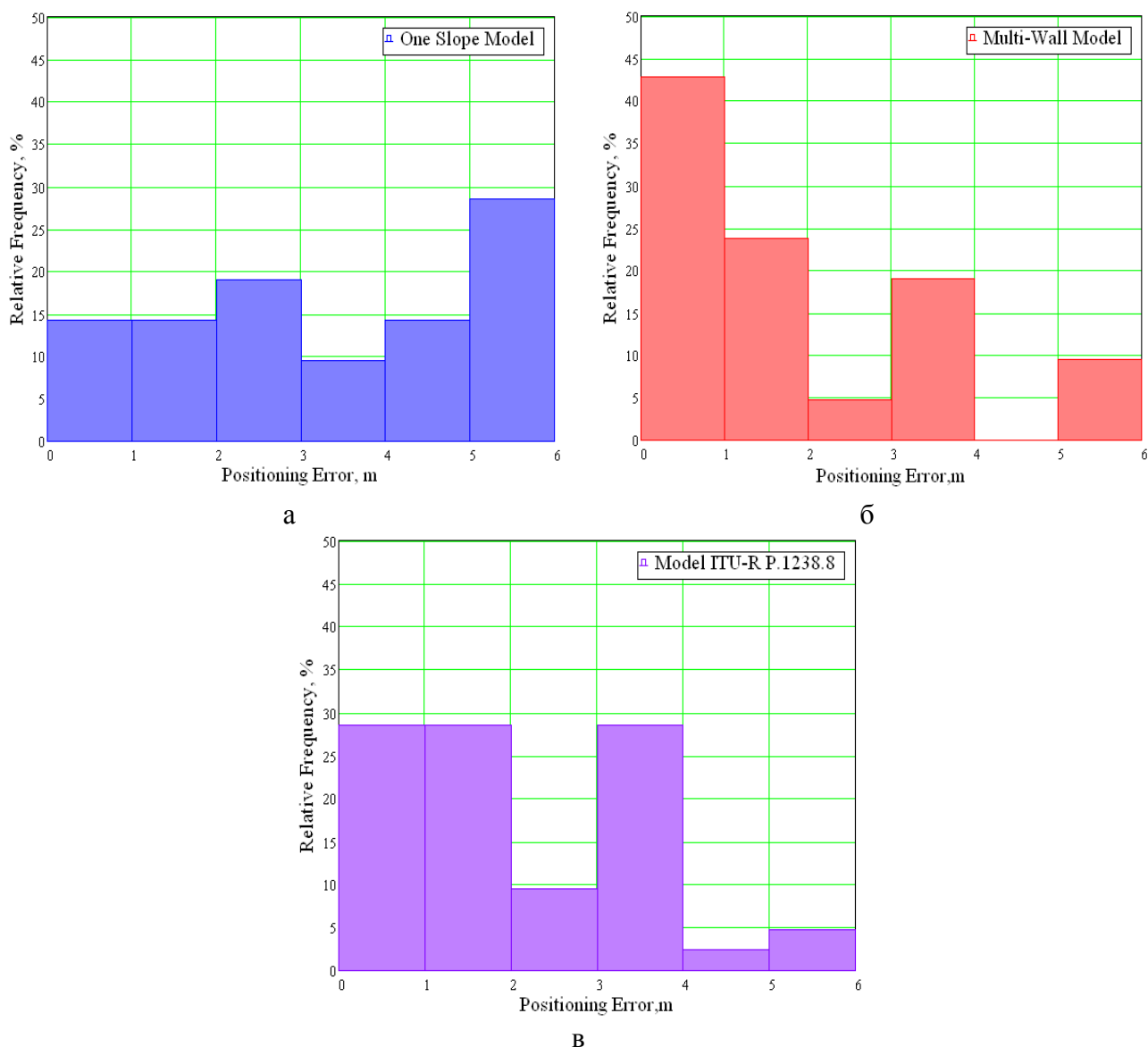


Рис. 9. Распределение погрешности определения местоположения: а – модель с одним наклоном; б – модель со многими стенами; в – модель из рекомендации ITU-R P.1238-8

Как можно видеть на рисунке, наиболее точные значения предоставляет модель со многими стенами, т.к. более 90 % результатов не выходят за пределы 5 м (рис. 9б). Модель с одним наклоном (рис. 9а) можно применять только при наличии одной перегородки между антеннами, при этом результаты выходят за пределы допустимого значения погрешности позиционирования в более чем 25 % опытов.

Наиболее спорные результаты при определении местоположения мобильного объекта внутри здания показала модель, предложенная в рекомендации ITU-R P.1238-8 (рис. 9в). У данной модели результат точного вычисления расстояния от АР до целевого объекта хуже, чем гистограмма на рис. 9б, но значительно лучше, чем результат на рис. 9а. Кроме того, рекомендованная Международным союзом электросвязи модель расчёта показывает наименьшее количество недопустимых результатов из всех представленных выше.

5. Заключение

Результаты, продемонстрированные в статье, убедительно доказывают необходимость гибкого подхода к определению расстояний между приёмными и передающими антеннами и дальнейшему расчёту координат целевой точки.

Данные на рисунках 5–9 показывают, что практически невозможно применять одну и ту же модель для разных условий распространения сигнала на трассе между передающей и приёмной антеннами.

Например, модель с одним наклоном с достаточной степенью точности определяет расстояние при прохождении сигнала через одну стену и совсем не подходит для случаев, когда передатчик и приёмник располагаются на разных этажах. На практике редко встречается ситуация, когда все точки доступа находятся на одном этаже с абонентом и отделены от него ровно одной стеной, поэтому применение данной модели носит ограниченный характер в конкретных условиях.

Модель со многими стенами хорошо описывает ситуации при прохождении сигнала через одну или несколько перегородок и/или через одно или несколько перекрытий (к сожалению, тестовая сеть не позволила рассмотреть случаи с прохождением сигнала через несколько перекрытий), но в случаях прямой видимости между источником сигнала и измерительным устройством, в связи с исключением из уравнения коэффициентов для учета наличия препятствий на пути распространения сигнала, модель ведет себя подобно модели распространения сигнала в свободном пространстве, что дает слишком большие расстояния, выходящие за рамки допустимых погрешностей точности. Однако при наличии стен и перегородок модель в среднем дает наименьшую погрешность среди рассмотренных. Работа с ней требует подбора коэффициентов потерь мощности при прохождении сигнала через перегородки и препятствия, сделанные из различных материалов, и под разным углом.

Модель, рекомендованная Международным союзом электросвязи (ITU-R P.1238-8), в большинстве случаев даёт приемлемый результат, кроме ситуаций, когда точки доступа располагаются на достаточно большом расстоянии от целевого объекта и отделены от него большим количеством препятствий (в таком случае наилучший результат получается применением модели COST 231).

Таким образом, можно сделать вывод, что универсального уравнения для вычисления расстояний между устройствами связи, динамически учитывающего все возможные ситуации на пути прохождения сигнала, пока не существует. Поэтому необходимо выполнять подбор модели РРВ исходя из конкретной обстановки – конфигурации помещения, количества перегородок, препятствий и перекрытий на трассе распространения сигнала, уровня сигнала и, возможно, некоторых других особенностей помещения.

Выражение благодарности

Авторы выражают благодарность доцентам кафедры инфокоммуникационных систем и сетей Костюковичу Анатолию Егоровичу и Лизневой Юлии Сергеевне за помощь в организации измерений и обработке этих измерений при подготовке данной статьи.

Литература

1. GPS: The Global Positioning System // A global public service brought to you by the U.S. government [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gps.gov/> (дата обращения: 15.05.2024).
2. Wi-Fi location-based services 4.1 design guide. Cisco Systems, Inc. Americas Headquarters. San Jose. 2008. 206 p.
3. Mikrotik [Электронный ресурс]. URL: <https://mikrotik.com/support> (дата обращения: 23.06.2024).

4. Huawei CloudCampus WLAN Location Technology White Paper [Электронный ресурс]. URL: <https://e.huawei.com/ru/material/networking/wlan/9dc74c8ef89f4bdab96382f6028ea78d> (дата обращения: 23.06.2024).
5. ZYXEL networks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zyxel.com/ru/ru/products/wireless> (дата обращения: 25.06.2024).
6. *Bensky A.* Wireless Positioning Technologies and Applications, 2nd ed. Artech House, Boston, London. 2016. 424 p.
7. *Kokoreva E. V., Kostyukovich A. E., Doshchinsky I. V. and Shurygina K. I.* A combined location method with indoor signal strength measurement // 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE-2020). Novosibirsk. 2020. Pp. 281–286.
8. *Bullmann M., Fetzer T., Ebner F., Ebner M., Deinzer F. and Grzegorzec M.* Comparison of 2.4 GHz WiFi FTM and RSSI-based indoor positioning methods in realistic scenarios / *Sensors*, 2020, V. 20(16): 4515.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611216 Российская Федерация. Программа определения местонахождения абонента методом дифференциации пространственных образцов в сети Wi-Fi / Дошинский И. В. Заявка № 2019666051 от 04.12.2019.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611439 Российская Федерация. Программа измерения уровня сигнала, принимаемого абонентским устройством в сети Wi-Fi, для определения местоположения абонента / Шурыгина К. И., Кокорева Е. В. Заявка № 2021610057 от 11.01.2021.
11. D-link Wi-Fi Planner Pro [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dlink.ru/tools/wi-fi> (дата обращения: 11.03.2024).
12. Отчет о НИР № 084-00003-19-00 от 27.12.2018 (Федеральное агентство связи). Исследование и разработка системы определения местоположения в централизованной Wi-Fi сети / Костюкович А. Е., Кокорева Е. В., Якушев И. Ю., Зубкова Н. О., Дошинский И. В. Новосибирск : СибГУТИ, 2019. 109 с.
13. *Shaw J. A.* Radiometry and the Friis transmission equation / *American Journal of Physics*, 2013. V. 81(1). Pp. 33–37.
14. Indoor Propagation Models // COST Action 231 : Digital mobile radio towards future generation systems: Final report. 1999. Pp. 175–189.
15. ITU-R P.1238 : Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Geneva: ITU-R Recommendations. 2022. 30 p.
16. *Obeidat H. A.N., Asif R., Obeidat O.A. et al.* An Indoor Path Loss Prediction Model using Wall Correction Factors for WLAN and 5G Indoor Networks / *Radio Science Journal*. 2018. V. 53(4). Pp. 544–564.

Кокорева Елена Викторовна

к.т.н., доцент кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 2698 265, e-mail: kokoreva@sibguti.ru, ORCID ID: 0000-0002-4437-7251.

Брагин Антон Сергеевич

аспирант кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 2698 265, e-mail: bragin_ant@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9704-9676.

Шурыгина Ксения Игоревна

магистр, ассистент кафедры инфокоммуникационных систем и сетей, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 2698 265, e-mail: miraclele@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-1698-1918.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Study of Radio Wave Propagation Indoors for the Purpose of Locating the Moving Objects

Elena V. Kokoreva, Anton S. Bragin, Kseniya I. Shurygina

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: The task before the developers was to create a geolocation system using Russian manufacturer equipment, so that the error in location determination would not exceed 5 meters. To implement a local positioning system, the pilot area for conducting experiments was defined, a Wi-Fi test network was designed and built in the course of the work on the project. The signal strength level at the input of the receiving device was chosen as a physical parameter, the measurement of which is necessary to calculate the target object's coordinates. A combined location determination algorithm based on the mechanisms of nearest access point, spatial pattern differentiation and trilateration was developed. More than a thousand measurements were carried out in the test network, and during that the main problems of the location system were identified and ways to overcome them were proposed.

Keywords: Wi-Fi, positioning, location, RSSI, radio wave propagation model.

For citation: Kokoreva E. V., Bragin A. S., Shurygina K. I. Experimental Study of a Positioning System in a Centralized Wi-Fi Network. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 1, pp. 80–94. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-1-80-94>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Kokoreva E. V., Bragin A. S.,
Shurygina K. I., 2025

The article was submitted: 02.08.2024;
revised version: 15.09.2024;
accepted for publication 16.09.2024.

References

1. GPS: The Global Positioning System. A global public service brought to you by the U.S. government, available at: <https://www.gps.gov/> (accessed: 15.05.2024).
2. Wi-Fi location-based services 4.1 design guide. Cisco Systems, Inc. Americas Headquarters. San Jose. 2008. 206 p.
3. Mikrotik, available at: <https://mikrotik.com/support> (accessed: 23.06.2024).
4. Huawei CloudCampus WLAN Location Technology White Paper, available at: <https://e.huawei.com/en/material/networking/wlan/9dc74c8ef89f4bdab96382f6028ea78d> (accessed: 23.06.2024).

5. ZYXEL networks, available at: <https://www.zyxel.com/ru/ru/products/wireless> (accessed 25.06.2024).
6. *Bensky A.* Wireless Positioning Technologies and Applications. 2nd ed. Artech House, Boston, London. 2016. 424 p.
7. *Kokoreva E. V., Kostyukovich A. E., Doshchinsky I. V., Shurygina K. I.* A combined location method with indoor signal strength measurement. 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE-2020). Novosibirsk. 2020. Pp. 281–286.
8. *Bullmann M., Fetzer T., Ebner F., Ebner M., Deinzer F., Grzegorzek M.* Comparison of 2.4 GHz WiFi FTM and RSSI-based indoor positioning methods in realistic scenarios. *Sensors*, 2020, V. 20(16): 4515.
9. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registracii programmy dlya EVM [State registration certificate of the computer program] No. 2020611216 Russian Federation. Programma opredeleniya mestonakhojdeniya abonenta metodom differenciacii prostranstvennykh obrazcov v seti Wi-Fi [Program for subscriber location determination by spatial pattern differentiation in Wi-Fi network]. Doshchinsky I. V. Submission No. 2019666051 from 04.12.2019.
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registracii programmy dlya EVM [State registration certificate of the computer program] No. 2021611439 Russian Federation. Programma izmereniya urovnya signala, prinimaemogo abonentskim ustroystvom v seti Wi-Fi, dlya opredeleniya mestopolozheniya abonenta. [Program for measuring the strength level of the signal received by a subscriber device in a Wi-Fi network to determine the subscriber's location]. Shurygina K. I., Kokoreva E. V. Submission No. 2021610057 from 11.01.2021.
11. D-link Wi-Fi Planner Pro, available at: <https://www.dlink.ru/tools/wi-fi> (accessed: 11.03.2024).
12. Scientific research work report No. 084-00003-19-00 from 27.12.2018 (Federal Communications Agency). Issledovanie i razrabotka sistemy opredeleniya mestopolozheniya v centralizovannoi Wi-Fi seti [Research and development of location system in centralized Wi-Fi network]. Kostyukovich A. E., Kokoreva E. V., Yakushev I. Yu., Zubkova N. O., Doshchinsky I. V. Novosibirsk, SibSUTIS, 2019. 109 p.
13. *Shaw J. A.* Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 2013. V. 81(1). Pp. 33-37.
14. Indoor Propagation Models. COST Action 231 : Digital mobile radio towards future generation systems: Final report. 1999. Pp. 175-189.
15. ITU-R P.1238 : Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Geneva: ITU-R Recommendations. 2022. 30 p.
16. *Obeidat H. A. N., Asif R., Obeidat O. A. et al.* An Indoor Path Loss Prediction Model using Wall Correction Factors for WLAN and 5G Indoor Networks. *Radio Science Journal*. 2018. V. 53(4). Pp. 544-564.

Elena V. Kokoreva

Ph.D., docent of Digital TV and Radio Broadcasting and Radio Communication Systems Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone: +7 383 2698 265, e-mail: kokoreva@sibguti.ru, ORCID ID: 0000-0002-4437-7251.

Anton S. Bragin

Postgraduate student of Digital TV and Radio Broadcasting and Radio Communication Systems Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone: +7 383 2698 265, e-mail: bragin_ant@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4437-7251.

Kseniya I. Shurygina

Master, assistant of Infocommunication Systems and Networks Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone +7 383 2698 265, e-mail: miraclele@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-1698-1918.