

Метод навигации и коллаборативного полуавтоматического построения карт сигналов Wi-Fi внутри помещений

М. С. Щекотов^а, научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-0817-6791, shekotov@iias.spb.su

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Постановка проблемы: одной из проблем, связанных с применением метода мультилатерации сигналов Wi-Fi или Bluetooth Low Energy и метода радиопечатков сигналов Wi-Fi для определения местоположения пользователя внутри помещения, является трудоемкая процедура настройки оборудования, которая включает в себя построение карты радиосигналов Wi-Fi и калибровку модели распространения сигнала Wi-Fi или Bluetooth Low Energy. **Цель:** разработка метода навигации и коллаборативного полуавтоматического построения карт радиосигналов Wi-Fi, который обеспечивает навигацию пользователя внутри помещения и одновременно с этим позволяет калибровать модель распространения сигнала Bluetooth Low Energy и строить карты радиосигналов Wi-Fi. **Результаты:** предложен метод коллаборативного полуавтоматического построения карт сигналов Wi-Fi и навигации внутри помещений, основанный на комбинации метода мультилатерации принимаемого сигнала Bluetooth Low Energy, метода радиопечатков Wi-Fi, полуавтоматической процедуры калибровки модели распространения сигнала Bluetooth Low Energy и метода коллаборативного сбора радиопечатков. Для полуавтоматической процедуры калибровки модели распространения сигнала Bluetooth Low Energy и для метода коллаборативного полуавтоматического построения карт сигналов Wi-Fi и навигации внутри помещений предложены соответственно алгоритм калибровки и алгоритм метода коллаборативного полуавтоматического построения карт сигналов Wi-Fi и навигации. Написано мобильное приложение, реализующее предложенные алгоритмы, с помощью которого проведены тестирование работы алгоритмов метода и анализ результатов. **Практическая значимость:** предложенный метод позволяет не осуществлять трудоемкие процедуры построения карты радиосигналов Wi-Fi и полуавтоматической калибровки модели распространения сигнала Bluetooth Low Energy в офлайн-фазе.

Ключевые слова – определение местоположения внутри помещений, контекстно-ориентированные системы, мультилатерация, краудсорсинг.

Цитирование: Щекотов М. С. Метод навигации и коллаборативного полуавтоматического построения карт сигналов Wi-Fi внутри помещений. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 6, с. 95–104. doi:10.31799/1684-8853-2018-6-95-104

Citation: Shekotov M. S. Method of indoor navigation and collaborative semi-automatic Wi-Fi radiomap construction. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 95–104 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-6-95-104

Введение

Сервисы определения местоположения (локализации) внутри помещений, несмотря на их малую распространенность, остаются актуальным направлением для широкого спектра исследований. Традиционно в качестве зданий, для которых решается данная задача, рассматриваются аэропорты, музеи [1], торговые центры или офисные помещения. В зависимости от поставленной задачи в качестве локализуемого объекта можно рассматривать точку доступа Wi-Fi [2], опорный узел [3], мобильное устройство, робота [4] и т. п. Кроме того, в качестве объекта рассматриваются не только здания, но и другие формы инженерных сооружений, таких как шахты и т. п. [5–7]. Также областью определения местоположения и объектом локализации может быть транспортное средство [8, 9]. Следует отметить, что методы определения местоположения вне помещений, основанные на фиксации уровня принятого сигнала, времени прихода радиосигналов от пере-

датчиков [10–12], разнице времени прибытия радиосигналов [13], времени прохождения сигнала от передатчика к приемнику [14, 15], углу приема сигнала [16, 17] и направлении приема [18], применимы к задаче определения местоположения внутри помещения.

Для помещений более традиционными являются метод радиопечатков (fingerprinting) и метод мультилатерации. Первый основывается на измерении уровней сигналов в определенных заранее точках, которое производится в офлайн-фазе, т. е. до определения местоположения пользователя. В онлайн-фазе, или фазе навигации, производится оценка местоположения объекта путем сопоставления измерений, проведенных в онлайн-фазе, с предварительно собранными измерениями в офлайн-фазе [19, 20]. Метод радиопечатков способен достичь точности локализации порядка 2,5–3 м [21]. Метод мультилатерации уровней сигналов оперирует моделью распространения сигнала в помещении, на основе которой может быть произведена оценка расстоя-

ний до источников сигнала. Основная трудность, с которой приходится сталкиваться при реализации данных методов, — это трудоемкая процедура сбора предварительных измерений уровней сигналов. При использовании метода радиоотпечатков требуется собрать измерения уровней сигналов для того, чтобы составить базу радиоотпечатков, а для метода мультилатерации, — чтобы откалибровать параметры модели распространения сигнала в конкретном помещении. Подобные шаги существенно усложняют процедуру развертывания систем определения местоположения и приводят к значительному росту стоимости их внедрения.

Для того чтобы обойтись без трудоемкой процедуры измерения уровней сигналов в офлайн-фазе, предлагается использовать коллаборативное измерение уровней сигналов внутри помещений. Данный метод предполагает сбор необходимой информации непосредственно пользователями во время их перемещений по зданию и не требует непосредственного контроля со стороны пользователей. Предполагается, что объект локализации — это человек с мобильным устройством, а область локализации — это здание, доступное для посещения широкому кругу лиц. Так как метод локализации требует наличия плана помещений, предполагается, что такая карта уже предварительно получена. Целью метода является обеспечение точной локализации в помещениях без использования предварительной калибровки модели распространения сигнала или наполнения базы радиоотпечатков. Для достижения этой цели рассматривается метод навигации на основе мультилатерации сигналов Wi-Fi и Bluetooth Low Energy (BLE) в помещениях, для которых нет данных в базе радиоотпечатков, и метод навигации на основе базы радиоотпечатков Wi-Fi и BLE в помещениях, для которых есть данные в базе радиоотпечатков. Для уточнения местоположения при навигации используется метод счисления координат (Pedestrian Dead Reckoning — PDR), использующий данные встроенных сенсоров смартфона. В свою очередь во время процесса навигации происходит автоматическое построение карты радиосигналов с помощью методов мультилатерации и счисления координат. Данный процесс производится каждым пользователем по крайней мере единожды для каждого помещения. Уточнение местоположения методом счисления координат производится посредством полуавтоматической процедуры калибровки модели распространения радиосигнала. Этот метод использует логарифмическую модель потерь уровня сигнала Wi-Fi или BLE. Данная модель имеет параметр, учитывающий особенности среды. Этот параметр можно определить эмпирически во время процедуры

калибровки для каждого источника сигнала, что поможет учесть особенности среды распространения сигнала и снизить ошибку локализации.

Самокалибрующиеся и коллаборативные системы определения местоположения внутри помещений

Существует ряд методов определения местоположения внутри помещений, обеспечивающих самокалибровку для различных целей. Однако имеется не так много методик, учитывающих корректировку модели распространения сигнала.

Предложенный в работе [22] алгоритм трилатерации основан на модели потерь уровня сигнала, зависящей от логарифма расстояния (log-distance path loss), использующей самокалибровку на основе оптимизации роя частиц (PSO) для определения параметров калибровки модели показателя потерь уровня сигнала, зависящего от логарифма расстояния. В [23] представлен метод радиоотпечатков, основанный на методе ближайшего соседа. Алгоритм использует фильтрацию Калмана для сглаживания колебаний уровня сигнала. Затем некоторые параметры представленной модели преобразования радиоотпечатков калибруются с помощью метода наименьших квадратов. В [24] рассмотрено несколько процедур автоматической калибровки (виртуальной калибровки). Процедуры учитывают количество стен, пересекаемых сигналом, и коэффициенты затухания для этих стен и полов.

Система локализации PiLoc [25, 26] использует краудсорсинг для сбора траекторий перемещения пользователей с помощью встроенных датчиков смартфонов и радиоотпечатков сигналов Wi-Fi, связанных с координатами собранных траекторий перемещения. Алгоритм кластеризации используется для объединения значений уровня сигнала Wi-Fi и траекторий перемещения в непересекающиеся наборы, охватывающие различные помещения. Сгенерированные непересекающиеся наборы используются для поиска похожих сегментов, которые совпадают на основе векторов перемещения и сигналов точек доступа Wi-Fi, а также траектории объединяются для построения поэтажных планов помещений.

Метод, описанный в [27], предназначен для калибровки логарифмической модели потерь уровня сигнала BLE. Рассматриваемыми параметрами являются показатель потерь уровня сигнала и уровень принимаемого сигнала. Оценки положения, полученные при обработке принимаемого сигнала, используются для постепенной корректировки значений параметров модели распространения сигнала.

Процедура калибровки, основанная на калибровке узлов ZigBee [28], начинается с запроса калибровки мобильного узла, который получает калибруемый узел. Отправленное сообщение имеет информацию о фиксированном узле, который нужно откалибровать. После получения запроса калибровки узел калибровки передает пакет выбранному узлу. Выбранный узел получает его и повторно передает сообщение на мобильный узел после определенной задержки. Полученный результат измерения времени передачи сообщения используется для динамической оценки задержки, которая выполняется для каждого фиксированного узла.

Метод навигации и коллаборативного полуавтоматического построения карт радиосигналов

Предлагаемый метод навигации внутри помещения и построения карт радиосигналов позволяет решать задачи навигации внутри помещения с известным планом помещения и расположением маяков Wi-Fi и BLE в условиях, когда модели распространения сигналов не откалиброваны и карты радиосигналов не построены. Так как в основе навигации лежит использование сигналов Wi-Fi и BLE, то для создания эффективного метода навигации внутри помещений необходимо рассматривать те ограничения, которые накладывает использование данных технологий. В частности, использование BLE не позволяет строить карты радиосигналов BLE и брать их как основу для метода радиоотпечатков. В связи с этим для навигации предлагается использовать мультилатерацию сигналов BLE. Для навигации на основе сигналов Wi-Fi предлагается использовать метод радиоотпечатков. Так как метод радиоотпечатков оперирует базой радиоотпечатков,

в которой хранятся данные об уровнях радиосигнала в тех или иных опорных точках помещения, имеющих координаты, то можно утверждать, что база радиоотпечатков по своей сути является картой радиосигналов, которую следует построить.

Комбинируя данные техники определения местоположения, можно добиться существенного повышения точности локализации, так как использование маяков BLE позволяет отчасти решать проблему неопределенности, возникающую в тех случаях, когда разным участкам помещения соответствуют одни и те же уровни сигналов. Кроме того, благодаря предложенному методу можно существенно упростить офлайн-фазу, исключив из нее процессы построения карты радиосигналов (наполнения базы радиоотпечатков) и калибровки модели распространения сигнала BLE.

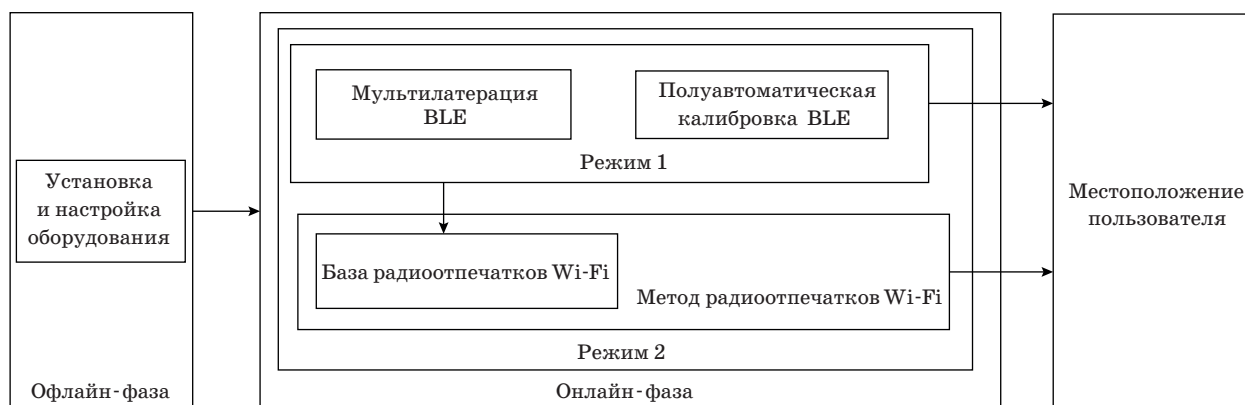
Таким образом, фазу навигации данного метода можно разделить на два режима.

Режим 1. Одновременное определение местоположения с помощью мультилатерации сигналов BLE и наполнение базы радиоотпечатков измеренными значениями уровней сигналов Wi-Fi активных точек доступа в привязке к определенным координатам. Для повышения точности мультилатерации используется процедура полуавтоматической калибровки параметров модели распространения сигнала BLE.

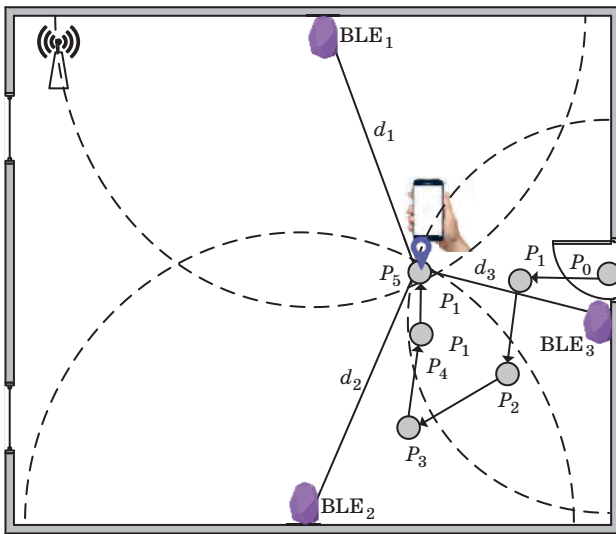
Режим 2. Определение местоположения с помощью мультилатерации сигналов BLE и метода радиоотпечатков Wi-Fi.

Концептуальная схема метода навигации и коллаборативного построения карт радиосигналов показана на рис. 1.

Рисунок 2 иллюстрирует процесс определения местоположения пользователя и сбор базы радиоотпечатков с помощью мультилатерации сигналов BLE, где точки P_1, \dots, P_5 соответствуют точкам, в которых определяется местопоже-



■ **Рис. 1.** Концептуальная схема метода навигации и коллаборативного построения карт радиосигналов
 ■ **Fig. 1.** The concept schema of the indoor navigation and collaborative radio map construction method



■ **Рис. 2.** Определение местоположения с помощью мультilaterации сигналов BLE
 ■ **Fig. 2.** Indoor localization via BLE signal multilateration

ние пользователя и проводятся измерения уровня сигнала Wi-Fi точки доступа AP. Полученные значения уровней сигнала заносятся в базу радиопечатков. Расстояния d_1, d_2, d_3 соответствуют расстояниям от пользователя до маяков BLE и определены с помощью метода мультilaterации. В ходе данного процесса используется процедура полуавтоматической калибровки модели распространения сигнала BLE. Данная процедура запускается при сближении пользователя с маяком BLE и служит для повышения точности определения местоположения. В ходе процедуры используется метод счисления координат для определения расстояния, на которое переместился пользователь, и его ориентации относительно маяка BLE. Процесс калибровки требует перемещения пользователя по прямолинейной траектории и в случае его отклонения от нее прекращается. На рис. 2 процесс калибровки модели распространения сигнала для маяка BLE₃ производится при перемещении между точками P₀ и P₁.

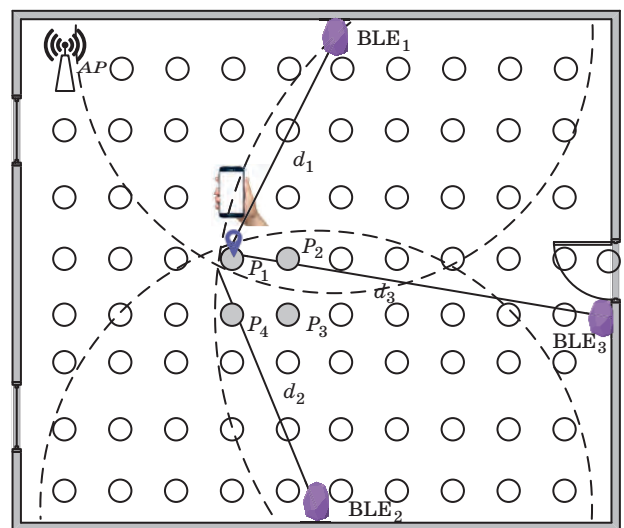
Мультilaterация — это метод локализации, который опирается на карту помещения и геометрические отношения между опорными узлами, а именно информацию о положениях опорных точек в среде и расстояний до них. Требуется по крайней мере три опорных узла, чтобы определить расстояния между целевым узлом и каждым опорным узлом. Каждый опорный узел образует окружность вокруг себя, а его радиус соответствует расстоянию до целевого узла. Пересечение этих окружностей охватывает область локализации целевого узла. В данном случае в роли опорных узлов выступают маяки BLE.

Широко используемыми подходами для обработки полученных данных являются фильтрация Калмана [11], скользящее среднее и тест Граббса, используемый для обнаружения выбросов [11]. В качестве модели распространения сигнала принимается модель потерь сигнала, зависящая от логарифма расстояния (log-distance path loss):

$$PL = P_T - P_R = PL_0 + 10n \lg \frac{d}{d_0} + X_{\sigma_{RSS}}, \quad (1)$$

где PL — показатель потерь мощности сигнала, дБ; P_T — передаваемая мощность, дБм; P_R — уровень (мощность) принимаемого сигнала, дБм; d — реальное расстояние между передатчиком и приемником; n — экспонента потерь сигнала; PL_0 — потери сигнала, дБм, на расстоянии d_0 ; величина $X_{\sigma_{RSS}}$ — случайная величина ошибки, дБм.

Процесс определения местоположения с использованием мультilaterации сигналов BLE и метода радиопечатков Wi-Fi проиллюстрирован на рис. 3. При измерении уровня сигнала Wi-Fi определяются путем поиска соответствий в базе радиопечатков точки с эквивалентным значением уровня сигнала Wi-Fi — P_1, \dots, P_4 в данном случае. С помощью метода мультilaterации сигналов BLE определяются расстояния d_1, d_2, d_3 , соответствующие расстояниям от пользователя до маяков BLE, на основе которых определяется зона, в которой находится пользователь. В качестве точек, где может находиться пользователь, рассматриваются только те точки, которые попали в эту зону. В данном случае это точки P₁, P₂.



■ **Рис. 3.** Определение местоположения с помощью мультilaterации сигналов BLE и метода радиопечатков Wi-Fi
 ■ **Fig. 3.** Indoor localization via BLE signal multilateration and Wi-Fi fingerprinting

Тогда алгоритм определения местоположения можно записать следующим образом.

1. Измерить уровень сигналов активных маяков BLE.

2. Если модель распространения сигнала для данного маяка не откалибрована, то произвести калибровку.

3. На основе уравнения (1) определить расстояния до маяков BLE и определить зону локализации объекта.

4. Измерить уровень сигналов Wi-Fi работающих точек доступа.

5. Найти соответствие в базе радиоотпечатков и получить множество опорных точек.

6. Если радиоотпечатки найдены, то исключить из рассмотрения опорные точки вне зоны, определенной по маякам BLE (см. рис. 3), и закончить выполнение алгоритма. В ином случае перейти к шагу 7.

7. Если радиоотпечатки не найдены, то на основе местоположения, определенного на шаге 3, создать радиоотпечаток сигналов Wi-Fi и поместить его в базу радиоотпечатков.

Поскольку база радиоотпечатков не наполняется предварительно в офлайн-фазе, то эта процедура происходит во время фазы навигации путем сбора информации от всех пользователей в пассивном режиме. Процесс запускается автоматически после входа пользователя в соответствующее помещение. Предварительно помещение условно разбивается на множество опорных точек P_1, \dots, P_n , в которых может быть измерен сигнал Wi-Fi. Количество точек для каждого помещения определяется из его размеров. Далее, при поступлении данных от пользователей, осуществляется усреднение значений уровня сигнала, если одной точке P_i соответствует k значений уровня сигнала.

Полуавтоматическая калибровка параметров модели распространения сигнала BLE

Идея полуавтоматической калибровки заключается в том, что человек с мобильным устройством может предоставить необходимые данные для калибровки параметров модели распространения сигнала во время перемещения внутри помещения и использования специального мобильного приложения. Калибровка необходима для обеспечения точности определения местоположения при сборе данных об уровнях сигналов для создания базы радиоотпечатков. Для выполнения данной процедуры необходимо иметь карту помещения, информацию о местоположениях размещенных маяков и технические параметры маяков: UUID, мощность передаваемого сигнала

и т. п. Показания сенсоров начинают собираться в известной точке, соответствующей ближайшей к некоторому маяку зоне близости. Для этого используются встроенные датчики смартфона, такие как акселерометр и гироскоп. Кроме того, картографическая информация и определение зоны близости к маяку BLE используются для фиксации момента начала калибровки. В конечном итоге предлагаемая полуавтоматическая процедура калибровки основана на сценарии перемещения пользователя внутри помещения, при котором пользователь может двигаться в любую сторону, но прямолинейно.

Рассмотрим важные особенности, характерные для этой процедуры. Во-первых, маяки стандартов iBeacon и Eddystone имеют несколько зон с устойчивым уровнем сигнала, окружающих маяк BLE на определенных расстояниях. Различают зону непосредственной близости (ближе 0,5 м), ближнюю зону (от 0,5 до 3 м), дальнюю зону (от 3 до 30 м) и неизвестную (когда маяк не может быть обнаружен). В рассматриваемом случае достаточно обнаружить зону непосредственной близости, так как она указывает точное местоположение пользователя. Таким образом, сила сигнала на опорном расстоянии (0,5 м) известна. На этом расстоянии сила опорного сигнала варьируется от -50 до -40 дБм. Так как опорное расстояние также известно, экспонента потерь мощности сигнала n может быть выражена из уравнения (1).

Предполагается, что если пользователь является в зоне непосредственной близости, он всегда остается на границе зоны, потому что нет цели определить местоположение пользователя точнее, чем 0,5 м, и что пользователь с мобильным устройством в руке в этом случае не будет находиться ближе 0,3–0,5 м к маяку BLE. Пользователю не нужно контролировать момент входа в эту зону близости.

Очевидно, что простое измерение экспоненты потерь мощности сигнала на ближайшем расстоянии не является надежным. Измерения в нескольких опорных точках необходимы для того, чтобы калибровать значение экспоненты потерь мощности сигнала, используя метод наименьших квадратов. Для этого необходимо рассчитать значения расстояния. Из уравнения (1) видно, что зависимость между логарифмом расстояния и мощностью принимаемого сигнала линейна. Преобразовывая уравнение (1), можно получить следующее выражение:

$$P_R = P_{R0} - 10n \lg \frac{d}{d_0} + X_{\sigma_{RSS}}, \quad (2)$$

где $P_{R0} = P_T - PL_0$ и соответствует мощности сигнала в точке d_0 .

Таким образом, экспонента потерь мощности сигнала может быть выражена следующим образом:

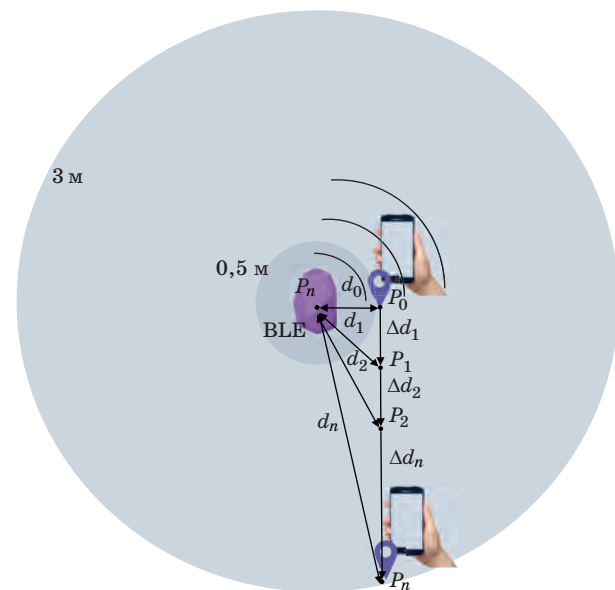
$$n = \frac{P_{R0}m - P_{Rx}}{10 \lg d} \quad (3)$$

Как было отмечено выше, измерение расстояния лежит в основе процесса калибровки. Для измерения расстояния предлагается определять шаги пользователя с помощью встроенных сенсоров смартфона (рис. 4).

Сценарий перемещения пользователя предполагает прямое движение относительно маяка BLE (см. рис. 4). Затем при измерении уровня сигнала, соответствующего ближней зоне близости, учитывается перемещение пользователя по касательной к границе зоны. Таким образом, определенные в непосредственной зоне значения расстояния d_1 до маяка и мощности сигнала P_R и определенные после нескольких шагов новые значения расстояния и мощности сигнала используются для калибровки экспоненты потерь мощности сигнала. Однако этот сценарий может иметь несколько недостатков, таких как отсутствие возможности для пользователя двигаться прямо и влияние на сигнал со стороны тела самого пользователя.

Алгоритм полуавтоматической калибровки может быть определен следующим образом.

1. Инициализация параметров d_0 и P_{R0} , относящихся к зоне непосредственной близости. Начальное расстояние $d_0 = 0,5$ м и $P_{R0} = -50$ дБм.



■ Рис. 4. Измерение уровней сигнала во время калибровки

■ Fig. 4. RSS measurements during BLE beacon semi-automatic calibration

2. Обнаружение зоны непосредственной близости маяка BLE. Если мощность принятого сигнала выше определенного порога P_{R0} , то пользователь вошел в зону непосредственной близости. Положение пользователя оценивается как находящееся на границе этой зоны. С этого шага начинается автоматическая калибровка.

3. Пользователь начинает двигаться прямо. Выполняется вычисление расстояния с помощью датчиков смартфона. Начинается отсчет шагов пользователя, которые детектируются внутренними сенсорами смартфона. Вычисленное расстояние используется для получения расстояния до маяка с помощью детектирования шагов и теоремы Пифагора.

4. Если пройденное расстояние равен 0,5 м, то измеряется уровень сигнала P_R . Полученное значение уровня сигнала используется для получения экспоненты потерь мощности по уравнению (3).

5. Если пройденное расстояние результата больше чем 3 м, что соответствует границе ближней зоны близости маяка BLE, то калибровка заканчивается. В ином случае необходимо перейти к п. 3.

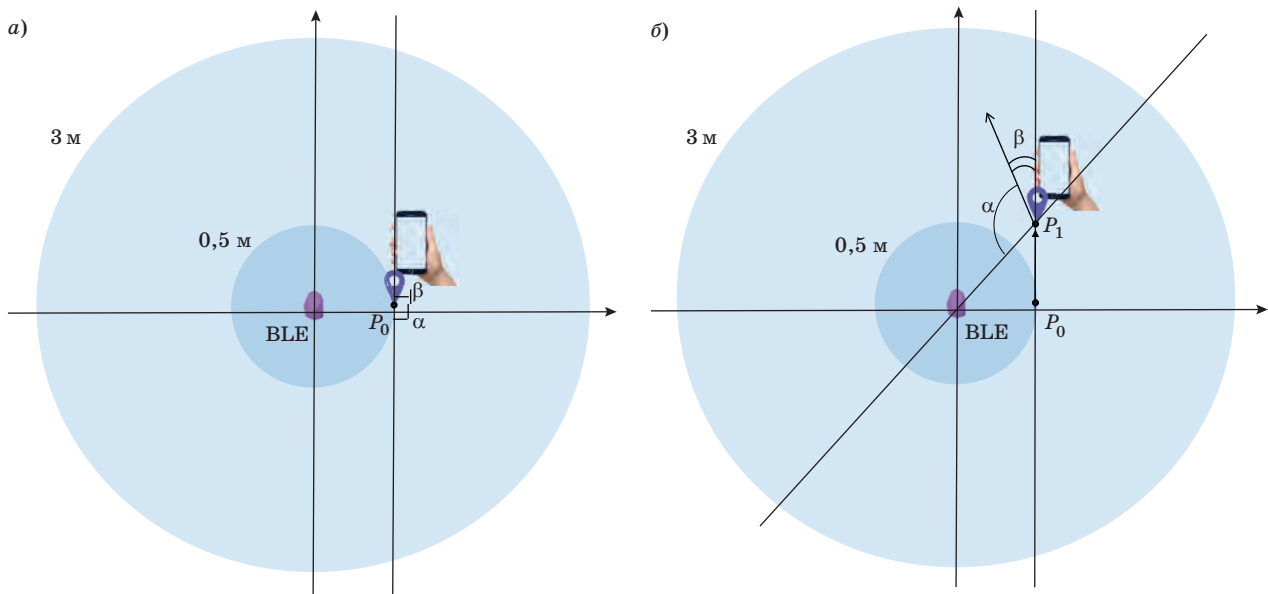
К сожалению, вышеупомянутая процедура не учитывает нескольких исключительных ситуаций, таких как не прямое перемещение, перемещения пользователей, чьи тела могут влиять на уровень сигнала, и ориентация смартфона.

Сценарий, описанный выше, рассматривает направление пользователя относительно зоны непосредственной близости маяка, но он не принимает во внимание вопросы, связанные с зависимостью экспоненты потерь уровня сигнала от направления смартфона относительно маяка (ориентации). В указанном выше случае угол между направлением перемещения пользователя и направлением на маяк составляет 90° . Однако угол после нескольких шагов в прямом направлении может иметь другое значение. Если пользователь повернется в этой новой точке, то показатель потерь уровня сигнала, очевидно, изменится. Эта проблема показана на рис. 5, а и б, где пользователь меняет ориентацию в новой точке P_1 .

Для преодоления этого недостатка необходимо откалибровать значение экспоненты потерь уровня сигнала в зависимости от ориентации пользователя относительно маяка, направления перемещения пользователя относительно общей системы координат и расчетного расстояния от пользователя до маяка. Таким образом, калибровочное измерение представляет собой кортеж M , который можно определить как

$$M = (B, d, \alpha, \beta, P_R), \quad (4)$$

где B — это идентификатор маяка; d — расстояние между пользователем и маяком; α — угол



■ **Рис. 5.** Направление пользователя на старте калибровки (а) и новое направление пользователя после нескольких шагов (б)
 ■ **Fig. 5.** User's direction at the calibration start (а) and new user's direction after several steps (б)

ориентации пользователя относительно маяка; β — угол направления перемещения пользователя относительно общей системы координат; P_R — мощность принятого сигнала.

Таким образом, результатом работы алгоритма является набор кортежей, содержащих откалиброванные значения экспонент потерь уровня сигнала в соответствии с ориентацией пользователя относительно маяка, направлением перемещения пользователя относительно общей системы координат.

Эксперименты

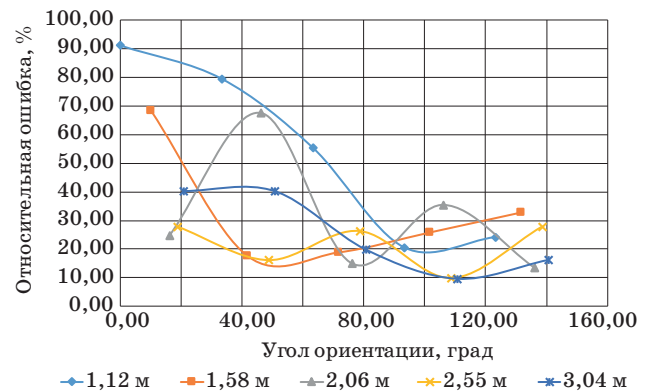
Для тестирования предложенного метода было реализовано специальное мобильное приложение для операционной системы Android. Приложение предназначено для оценки расстояния между передатчиком и приемником, а также для выполнения полуавтоматической калибровки заданного числа маяков BLE. Выбранные маяки поддерживают протокол iBeacon. Это приложение находит предварительно определенные маяки по их идентификаторам и измеряет значения уровней сигнала каждого маяка. Представленный алгоритм реализован, а оценка полуавтоматической калибровки позволяет получить кортежи откалиброванных показателей экспоненты потерь уровня сигнала, готовых к использованию в мультilaterации.

Для тестирования процедуры полуавтоматической калибровки измерялись средние значения

мощности принимаемого сигнала на заданных расстояниях от одного маяка, размещенного в пределах одной комнаты. Эти измерения производились для каждой точки в прямом направлении с интервалом 0,5 м в ближней зоне распространения устойчивого уровня сигнала BLE. Непосредственная зона близости определяется с помощью мобильного приложения автоматически.

Полуавтоматическая калибровка выполнена для сценария с прямым перемещением и с изменением ориентации пользователя относительно маяка BLE.

На рис. 6 приведены результаты калибровки с изменением ориентации пользователя в каждой



■ **Рис. 6.** Ориентация пользователя после нескольких шагов в прямом направлении
 ■ **Fig. 6.** User heading regarding the beacon after several steps in straight direction

из опорных точек траектории перемещения пользователя. Угол ориентации смартфона изменяется каждый раз на 30° . Пользователь последовательно поворачивается лицом к маяку. В результате средняя погрешность локализации ниже 1,5 м. Показано, что при малых расстояниях между пользователем и маяком BLE и малых углах ориентации пользователя относительно маяка погрешность больше, чем при больших расстояниях и малых углах.

Заключение

Благодаря предлагаемому методу навигации внутри помещения и построения карт радиосигналов можно решать задачи навигации внутри помещения с известным планом и расположением точек доступа Wi-Fi и маяков BLE в условиях, когда карты радиосигналов не построены, и строить карты радиосигналов (базы радиопечатков) путем коллаборативного сбора информации об уровнях сигналов. В основе данного метода лежит представленная полуавтоматическая процедура калибровки для мультilaterации на основе модели потерь сигнала, зависящей от логарифма расстояния (log-distance path loss). С одной сторо-

ны, процедура проводится параллельно с мультilaterацией сигналов BLE в целях улучшения точности. С другой стороны, процедура выполняется параллельно со счислением координат на основе датчиков смартфона и мультilaterацией для повышения точности определения местоположения пользователя с использованием информации о зонах с устойчивым уровнем сигнала маяков BLE. Несмотря на то что пользовательское приложение реализует мультilaterацию и предложенную процедуру, обнаруживает близость пользователя и автоматически запускает калибровку, для выполнения точной калибровки программы реализации предполагается прямое направление перемещения пользователя. В ином случае точность калибровки снижается.

Преимуществами предложенного метода являются возможность онлайн калибровки, сбора радиопечатков и обработки изменения ориентации пользователя. Погрешность определения местоположения — ниже 1,5 м (в случае прямого перемещения пользователя). Недостатками предложенного метода являются отсутствие обработки сложных траекторий перемещения пользователей при полуавтоматической калибровке, достаточно большие ошибки определения местоположения на малых расстояниях от маяка BLE.

Литература

1. Kuusik A., Roche S., Weis F. SMARTMUSEUM: cultural content recommendation system for mobile users. *Proc. of Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology*, 2009, pp. 477–482. doi:10.1109/ICCIT.2009.257
2. Tang Z., Zhao Y., Yang L., Qi S., Fang D., Chen X., Gong X., Wang Z. Exploiting wireless received signal strength indicators to detect evil-twin attacks in smart homes. *Mobile Information Systems*, 2017, vol. 4, pp. 1–14. doi:10.1155/2017/1248578
3. Mekelleche F., Haffaf H. Classification and comparison of range-based localization techniques in wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 221–227. doi:10.12720/jcm.12.4.221-227
4. Surmann H., Nüchter A., Hertzberg J. An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, vol. 45(3-4), pp. 181–198. doi:10.1016/j.robot.2003.09.004
5. Dayekh S., Affes S., Kandil N., Nerguizian C. Cooperative localization in mines using fingerprinting and neural networks. *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2010, pp. 1–6. doi:10.1109/WCNC.2010.5506666
6. Qiao G.-Z., Zeng J.-C. Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coal mine underground wireless sensor networks. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 2010, vol. 35(7), pp. 1229–1233.
7. Savic V., Wymeersch H., Larsson E. G. Simultaneous sensor localization and target tracking in mine tunnels. *Proc. of the 16th International Conference on Information Fusion*, 2013, pp. 1427–1433.
8. de Blasio G., Quesada-Arencibia A., García C. R., Molina-Gil J. M., Caballero-Gil C. Study on an indoor positioning system for harsh environments based on Wi-Fi and Bluetooth low energy. *Sensors*, 2017, vol. 17 (6), p. 1299. http://doi.org/10.3390/s17061299
9. Röhrig C., Heß D., Künemund F. Constrained Kalman filtering for indoor localization of transport vehicles using floor-installed HF RFID transponders, *Proc. of the 9th IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2015)*, 2015, pp. 113–120. doi:10.1109/RFID.2015.7113081
10. Heidari M., Alsindi N. A., Pahlavan K. UDP identification and error mitigation in ToA-Based indoor localization systems using neural network architecture. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, vol. 8, no. 7, pp. 3597–3607. doi:10.1109/TWC.2009.080415
11. Kabir Md. H., Kohno R. A hybrid TOA-fingerprinting based localization of mobile nodes using UWB

- signaling for non line-of-sight conditions. *Sensors*, 2012, vol. 12(8), pp. 11187–11204. doi:10.3390/s120811187
12. Liu D., Wang Y., He P., Zhai Y., Wang H. TOA localization for multipath and NLOS environment with virtual station. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, p. 104. doi:10.1186/s13638-017-0896-1
 13. Xinrong L., Pahlavan K., Latva-aho M., Ylianttila M. Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN. *Vehicular Technology Conference*, 2000, vol. 6, pp. 3015–3020. doi:10.1109/VETECE.2000.886867
 14. Sun Z., Farley R., Kaleas T., Ellis J., Chikkappa K. Cortina: collaborative context-aware indoor positioning employing RSS and RToF techniques. *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, 2011, pp. 340–343. doi:10.1109/PERCOMW.2011.5766901
 15. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D., Ali A. A. H. Indoor positioning in WiFi and NanoLOC networks, *Proc. of International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking Conference on Internet of Things and Smart Spaces*, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-46301-8_39
 16. Hanssens B., Plets D., Tanghe E., Oestges C., Gaillet D. P., Liénard M., Martens L., Joseph W. An indoor localization technique based on ultra-wideband AoD/AoA/ToA estimation. *Proc of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, pp. 1445–1446.
 17. Yang S.-H., Kim H.-S., Son Y.-H., Han S.-K. Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, iss. 14, pp. 2480–2485. doi:10.1109/JLT.2014.2327623
 18. Deliang L., Kaihua L., Yongtao M., Jiexiao Y. Joint TOA and DOA localization in indoor environment using virtual stations. *IEEE Communications Letters*, 2014, vol. 18, iss. 8, pp. 1423–1426. doi:10.1109/LCOMM.2014.2333006
 19. Zhao X., Xiao Z., Markham A., Trigoni N., Ren Y. Does BTLE measure up against WiFi? A Comparison of indoor location performance. *Proc. of the European Wireless 2014: 20th European Wireless Conference*, 2014, pp. 1–6.
 20. Rõbesaat J., Zhang P., Abdelaal M., Theel O. An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion: an experimental study. *Sensors*, 2017, vol. 17(5). doi:10.3390/s17050951
 21. Aleshly F., Mohd Sabri R., Sevak Z., Arslan T. Improving indoor positioning accuracy through a Wi-Fi handover algorithm. *Proc. of International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2010, pp. 822–829.
 22. Kaemarungsi K., Krishnamurthy P. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting. *Proc. of INFOCOM Conference*, 2004, vol. 2, pp. 1012–1022. doi:10.1109/INFOCOM.2004.1356988
 23. Faragher R., Harle R. Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, vol. 33, iss. 11, pp. 2418–2428. doi:10.1109/JSAC.2015.2430281
 24. Ibrahim M., Moselhi O. Self-calibrated WSN for indoor tracking and control of construction operations. *Proc. of CSCE International Construction Specialty Conference*, 2015. doi:10.14288/1.0076327
 25. Sangwoo L., Bongkwan C., Bonhyun K., Sanghwan R., Jaehoon C., Sunwoo K. Kalman filter-based indoor position tracking with self-calibration for RSS variation mitigation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, vol. 8(1), pp. 235–246. doi:10.1155/2015/674635
 26. Barsocchi P., Lenzi S., Chessa S., Giunta G. Virtual calibration for RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4. *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, 2009, pp. 512–516. doi:10.1109/ICC.2009.5199566
 27. Luo C., Hong H., Chan M. C. PiLoc: a self-calibrating participatory indoor localization system. *Proc. of 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2014, pp. 143–153. doi:10.1109/IPSNS.2014.6846748
 28. Luo C., Hong H., Chan M. C., Li J., Zhang X., Ming Z. MPiLoc: self-calibrating multi-floor indoor localization exploiting participatory sensing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, vol. 17, iss. 1, pp. 141–154. doi:10.1109/TMC.2017.2698453

UDC 621.396

doi:10.31799/1684-8853-2018-6-95-104

Method of indoor navigation and collaborative semi-automatic Wi-Fi radiomap constructionM. S. Shchekotov^a, Research Fellow, orcid.org/0000-0003-0817-6791, shekotov@ias.spb.su^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: An important and complicated problem related to the multilateration of Wi-Fi or Bluetooth Low Energy signals as well as Wi-Fi fingerprinting is the procedure of infrastructure adjustment which includes Wi-Fi radio map construction and Wi-Fi or Bluetooth Low Energy radio signal path loss model calibration. **Purpose:** Developing a method for navigation and Wi-Fi radio map construction, which would provide user's indoor navigation, Bluetooth Low Energy path loss model calibration and Wi-Fi radio map

collaborative semi-automatic construction. **Results:** The paper presents a collaborative semi-automatic Wi-Fi radio map construction method based on the combination of Bluetooth Low Energy multilateration, Wi-Fi fingerprinting, Wi-Fi radio map collaborative semi-automatic construction procedure and semi-automatic Bluetooth Low Energy path loss model calibration. For the semi-automatic calibration procedure of the Bluetooth Low Energy signal propagation model and for the method of collaborative semi-automatic construction of Wi-Fi radio map and indoor navigation, a calibration algorithm and an algorithm of collaborative semi-automatic construction of Wi-Fi radio map and indoor navigation were proposed, respectively. A mobile application has been developed which implements the proposed algorithms in order to test them and analyze the results. **Practical relevance:** The proposed method allows you to avoid time-consuming procedures of constructing a map of Wi-Fi radio signals and semi-automatic calibration of Bluetooth Low Energy signal propagation in the offline phase.

Keywords — indoor positioning, context-oriented systems, multilateration, crowd-sourcing.

Citation: Shchekotov M. S. Method of indoor navigation and collaborative semi-automatic Wi-Fi radiomap construction. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 95–104 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-6-95-104

References

- Kuusik A., Roche S., Weis F. SMARTMUSEUM: cultural content recommendation system for mobile users. *Proc. of Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology*, 2009, pp. 477–482. doi:10.1109/ICCIT.2009.257
- Tang Z., Zhao Y., Yang L., Qi S., Fang D., Chen X., Gong X., Wang Z. Exploiting wireless received signal strength indicators to detect evil-twin attacks in smart homes. *Mobile Information Systems*, 2017, vol. 4, pp. 1–14. doi:10.1155/2017/1248578
- Mekelleche F., Haffaf H. Classification and comparison of range-based localization techniques in wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 221–227. doi:10.12720/jcm.12.4.221-227
- Surmann H., Nüchter A., Hertzberg J. An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, vol. 45(3-4), pp. 181–198. doi:10.1016/j.robot.2003.09.004
- Dayekh S., Affes S., Kandil N., Nerguizian C. Cooperative localization in mines using fingerprinting and neural networks. *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2010, pp. 1–6. doi:10.1109/WCNC.2010.5506666
- Qiao G.-Z., Zeng J.-C. Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coal mine underground wireless sensor networks. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 2010, vol. 35(7), pp. 1229–1233.
- Savic V., Wymeersch H., Larsson E. G. Simultaneous sensor localization and target tracking in mine tunnels. *Proc. of the 16th International Conference on Information Fusion*, 2013, pp. 1427–1433.
- de Blasio G., Quesada-Arencibia A., García C. R., Molina-Gil J. M., Caballero-Gil C. Study on an indoor positioning system for harsh environments based on Wi-Fi and Bluetooth low energy. *Sensors*, 2017, vol. 17 (6), p. 1299. http://doi.org/10.3390/s17061299
- Röhrig C., Heß D., Künemund F. Constrained Kalman filtering for indoor localization of transport vehicles using floor-installed HF RFID transponders. *Proc. of the 9th IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2015)*, 2015, pp. 113–120. doi:10.1109/RFID.2015.7113081
- Heidari M., Alsindi N. A., Pahlavan K. UDP identification and error mitigation in ToA-Based indoor localization systems using neural network architecture. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, vol. 8, no. 7, pp. 3597–3607. doi:10.1109/TWC.2009.080415
- Kabir Md. H., Kohno R. A hybrid TOA-fingerprinting based localization of mobile nodes using UWB signaling for non line-of-sight conditions. *Sensors*, 2012, vol. 12(8), pp. 11187–11204. doi:10.3390/s120811187
- Liu D., Wang Y., He P., Zhai Y., Wang H. TOA localization for multipath and NLOS environment with virtual station. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, p. 104. doi:10.1186/s13638-017-0896-1
- Xinrong L., Pahlavan K., Latva-aho M., Ylianttila M. Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN systems. *Vehicular Technology Conference*, 2000, vol. 6, pp. 3015–3020. doi:10.1109/VETECE.2000.886867
- Sun Z., Farley R., Kaleas T., Ellis J., Chikkappa K. Cortina: collaborative context-aware indoor positioning employing RSS and RToF techniques. *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Work-*
- shops (PERCOM Workshops)*, 2011, pp. 340–343. doi:10.1109/PERCOMW.2011.5766901
- Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D., Ali A. A. H. Indoor positioning in WiFi and NanoLOC networks. *Proc. of International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking Conference on Internet of Things and Smart Spaces*, 2016. doi:10.1007/978-3-319-46301-8_39
- Hanssens B., Plets D., Tanghe E., Oestges C., Gaillot D. P., Liénard M., Martens L., Joseph W. An indoor localization technique based on ultra-wideband AoD/AoA/ToA estimation. *Proc. of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, pp. 1445–1446.
- Yang S.-H., Kim H.-S., Son Y.-H., Han S.-K. Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, iss. 14, pp. 2480–2485. doi:10.1109/JLT.2014.2327623
- Deliang L., Kaihua L., Yongtao M., Jiexiao Y. Joint TOA and DOA localization in indoor environment using virtual stations. *IEEE Communications Letters*, 2014, vol. 18, iss. 8, pp. 1423–1426. doi:10.1109/LCOMM.2014.2333006
- Zhao X., Xiao Z., Markham A., Trigoni N., Ren Y. Does BTLE measure up against WiFi? A Comparison of indoor location performance. *Proc. of the European Wireless 2014: 20th European Wireless Conference*, 2014, pp. 1–6.
- Röbesaat J., Zhang P., Abdelaal M., Theel O. An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion: an experimental study. *Sensors*, 2017, vol. 17(5). doi:10.3390/s17050951
- Alsehly F., Mohd Sabri R., Sevak Z., Arslan T. Improving indoor positioning accuracy through a Wi-Fi handover algorithm. *Proc. of International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2010, pp. 822–829.
- Kaemarungsi K., Krishnamurthy P. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting. *Proc. of INFOCOM Conference*, 2004, vol. 2, pp. 1012–1022. doi:10.1109/INFCOM.2004.1356988
- Faragher R., Harle R. Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, vol. 33, iss. 11, pp. 2418–2428. doi:10.1109/JSAC.2015.2430281
- Ibrahim M., Moselhi O. Self-calibrated WSN for indoor tracking and control of construction operations. *Proc. of CSCE International Construction Specialty Conference*, 2015. doi:10.14288/1.0076327
- Sangwoo L., Bongkwan C., Bonhyun K., Sanghwan R., Jaehoon C., Sunwoo K. Kalman filter-based indoor position tracking with self-calibration for RSS variation mitigation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, vol. 8(1), pp. 235–246. doi:10.1155/2015/674635
- Barsocchi P., Lenzi S., Chessa S., Giunta G. Virtual calibration for RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4. *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, 2009, pp. 512–516. doi:10.1109/ICC.2009.5199566
- Luo C., Hong H., Chan M. C. PiLoc: a self-calibrating participatory indoor localization system. *Proc. of 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2014, pp. 143–153. doi:10.1109/IPSNS.2014.6846748
- Luo C., Hong H., Chan M. C., Li J., Zhang X., Ming Z. MPiLoc: self-calibrating multi-floor indoor localization exploiting participatory sensing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, vol. 17, iss. 1, pp. 141–154. doi:10.1109/TMC.2017.2698453