

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Метод позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей

А.В. Астафьев¹, Д.В. Титов², А.Л. Жизняков¹, А.А. Демидов¹

¹ Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет, имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Муром, Россия,

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Россия

Аннотация

В работе рассматривается разработка метода позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей. Целью работы является разработка метода позиционирования средств малой механизации на промышленных предприятиях для построения систем безлюдного контроля движения изделий. Работа разделена на четыре основные части: синтез данных, фильтрация сигнала, выбор BLE-маяков, перевод значений уровней сигналов RSSI в расстояние и мультилатерация. Предложен упрощенный фильтр Калмана для фильтрации входного сигнала для подавления гауссовского шума. Приведено описание двух подходов к переводу уровня сигнала RSSI в расстояние: экспоненциальная функция аппроксимации с коэффициентом детерминации 0,6994 и искусственная нейронная сеть прямого распространения. Сравнение результатов работы этих подходов производилось на нескольких тестовых выборках: обучающей, тестовой на известном расстоянии (0–50 метров) и тестовой на неизвестном расстоянии (60–100 метров). В результате искусственная нейронная сеть показала лучший результат во всех экспериментах, кроме тестовой выборки на известном расстоянии (0–50 метров), уступив функции аппроксимации на 0,02 м² среднеквадратичной ошибки, чем можно пренебречь. Предложен алгоритм позиционирования мобильного устройства на основе метода мультилатерации. Экспериментальные исследования разработанного метода показали, что ошибка позиционирования не превышает 0,9 метра в контролируемом помещении размером 5 × 5,5 метров. Точность позиционирования мобильного устройства с использованием предлагаемого метода в проведенном эксперименте выше на 40,9%. Также проведены экспериментальные исследования в помещении 58,4 × 4,5 м, показавшие более точные результаты по сравнению с аналогичными исследованиями.

Ключевые слова: позиционирование внутри помещений, Bluetooth Low Energy, фильтр Калмана, аппроксимация, искусственная нейронная сеть.

Цитирование: Астафьев, А.В. Метод позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей / А.В. Астафьев, Д.В. Титов, А.Л. Жизняков, А.А. Демидов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 277-285. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-826.

Citation: Astafiev AV, Titov DV, Zhiznyakov AL, Demidov AA. A method for mobile device positioning using a sensor network of BLE beacons, approximation of the RSSI value and artificial neural networks. Computer Optics 2021; 45(2): 277-285. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-826.

Введение

В настоящее время большое количество стран уделяют внимание вопросам построения так называемых безлюдных производств. Концепция безлюдного производства заключается в построении роботизированных производств, в которых большинство манипуляций производится без участия человека. Такое «вытеснение» человека из сферы исполнительно-технологических функций возможно лишь при полной автоматизации всех производственных процессов на предприятии, связанных с производственной деятельностью [1].

Совершенствование технических средств, методов построения непрерывных и безлюдных производств требует новых методов и алгоритмов обработки информации, необходимой для автоматизации производственных процессов предприятия. Исходя из этого разработка методики позиционирования средств малой механизации на промышленных предприятиях для построения систем безлюдного контроля движения изделий является актуальной научно-технической задачей.

Работа посвящена решению одной из наиболее значимых проблем в данном направлении – ограниченности в информации о текущем местоположении

средств малой механизации в реальном масштабе времени для построения систем контроля движения продукции. Для производств, построенных на основе конвейерных линий, уже разработано большое количество методов, алгоритмов и систем отслеживания состояния в реальном масштабе времени. Однако для производств со сложными логистическими путями все еще остается нерешенной проблема автоматического контроля движения. В редких случаях на таких производствах используются системы, включающие в себя подсистемы контроля движения, однако их работа ограничивается оборудованием, в комплекте с которым они поставляются. Например, производители мостовых кранов включают в состав программного обеспечения системы отслеживания положения траверсы крана, что позволяет строить системы контроля движения. Остальная же часть производственного процесса остается не автоматизированной и требует привлечения сотрудников предприятия.

Целью работы является создание метода позиционирования средств малой механизации на промышленных предприятиях для построения систем безлюдного контроля движения изделий.

В настоящее время в области позиционирования навигации используется большое количество технологий и методов. К технологиям построения систем позиционирования можно отнести: GSM [2, 3], UMTS [4, 5], GPS [6, 7], GLONASS [8–10], WLAN [11, 12], Bluetooth [13–15], Bluetooth Low Energy [13–15] и т.д.

Большое количество современных научных исследований направлено на совершенствование методов и алгоритмов построения систем позиционирования внутри помещений в режиме реального времени. Практически все можно отнести к одному из следующих классов [16–18]:

1. Ближайшая точка доступа (Proximity). Позиция устройства определяется исходя из координат ближайшего маяка.
2. Центроид (Centroid). Позиция устройства определяется исходя из вычисления центра геометрической фигуры, образованной маяками в зоне видимости.
3. Центр масс (Weighted centroid). Алгоритм основан на подходе центроида, но в отличие от него учитывает мощность сигналов от маяков, образующих геометрическую фигуру.
4. Сопоставление с образцом (Fingerprinting). Позиция устройства определяется путем сравнения измерения параметров сигнала и их сопоставления со значениями из базы данных.
5. Латерация (Lateration). Позиция устройства определяется путем геометрических вычислений с использованием расстояний минимум трёх маяков.
6. Навигационное счисление (Deduced reckoning). Позиция устройства определяется путем прогнозирования на основе предыдущей позиции, направления движения и скорости.

7. Алгоритм Handover. Алгоритм предполагает определение направления и скорости перемещения устройства на основе данных об изменении уровней сигналов от маяков в зоне видимости.
8. Триангуляция (Triangulation). Позиция устройства определяется путем оценивания углов между устройством и маяками.
9. Измерение мощности сигнала (Received Signal Strength Indicator). Позиция устройства определяется исходя из полученных устройством данных о расстоянии между устройством и приемником с учетом потерь в пути.
10. Нейронные сети и интеллектуальный анализ (Neural network). Позиция устройства определяется путем использования заранее обученной нейронной сети.
11. Гибридные (Hybrid). Позиционирование осуществляется на основе сочетания двух или более методов, описанных выше.

Одной из самых актуальных в настоящее время технологий для организации систем контроля движения внутри помещений в режиме реального времени является Bluetooth Low Energy (BLE). Еще одним преимуществом BLE является тот факт, что в начале 2017 года Bluetooth Special Interest Group (SIG) представила спецификацию Bluetooth 5.0, использование которой позволяет повысить радиус действия маяков в 4 раза и увеличить срок службы. Таким образом, можно сделать вывод, что проведение дополнительных исследований в области построения систем безлюдного контроля производственных процессов на основе технологии BLE с использованием спецификации Bluetooth 5.0 является актуальной научно-технической задачей. Однако использование BLE-маяков для позиционирования промышленных изделий в реальном времени не решает все имеющиеся проблемы. Одной из основных проблем использования радиосигналов является их высокая зависимость от среды распространения. В зависимости от плотности окружающей среды, количества людей в помещении и прочих физических преград, «слышимость» может варьироваться. Например, маяк, расположенный дальше от считывающего устройства, может давать более сильный сигнал, чем маяк поблизости. Также на «слышимость» маяков может влиять изменчивость окружающей среды, наличие помех, выбросов, неопределенностей, неполноты, а также противоречивости и динамичности, получаемых с датчиков данных, что приводит к необходимости постоянной калибровки оборудования.

В работе предлагается метод позиционирования мобильного устройства, повышающий точность систем навигации внутри помещений. Работа разделена на четыре основные части: синтез данных, фильтрация сигнала, выбор BLE-маяков, перевод значений уровней сигналов RSSI в расстояние и мультилатерация.

1. Описание лабораторного стенда

Выполнение работы было проведено с использованием лабораторного стенда, основной технологией в котором выступают Bluetooth Low Energy (BLE) маяки на основе спецификации Bluetooth 5.0. Работа с маяками и получение уровня сигнала RSSI проводилась на основе формата данных iBeacon (табл. 1).

Табл. 1. Формат данных iBeacon

Номер байта	Значение по умолчанию	Описание
0	0 × 02	Длина
1	0 × 01	Тип
2	0 × 06	Значение типа
3	0 × 1a	Длина
4	0 × ff	Тип
5-6	0 × 4с00	Идентификатор производителя
7	0 × 02	Подтип
8	0 × 15	Длина подтипа
9-24		UUID
25-26		Классификатор 1
27-28		Классификатор 2
29		Уровень сигнала

Для получения временного ряда уровней сигналов RSSI на разных расстояниях и синтеза обучающей выборки для аппроксимации и обучения нейронных сетей были использованы устройства на базе операционной системы Android. Для обработки данных, их аккумуляции и анализа было разработано кроссплатформенное клиент-серверное приложение с использованием языков программирования Java и C#. Для реализации стенда были использованы BLE-маяки фирмы Feasycot.

Исходя из того, что рабочее расстояние BLE-маяка составляет около 100 метров, измерения производились на половине длины в контролируемом помещении размером 50 × 3 метра.

Суть эксперимента заключалась в сборе временных рядов данных об уровне сигнала RSSI с конкретной метки до устройства на базе операционной системы Android. В результате сформирована выборка данных, включающая в себя: UUID-метки, значение уровня сигнала RSSI и реальное расстояние до нее.

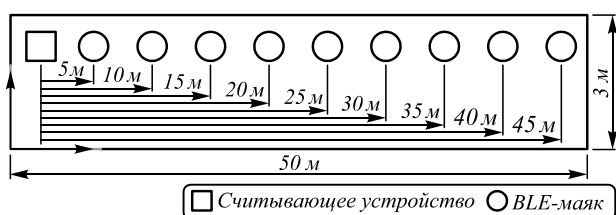


Рис. 1. Схема контролируемого помещения

2. Синтез данных

Предположим, что имеется контролируемая территория, покрытая сенсорной сетью BLE-маяков. Так как пространство представлено двумя декартовыми координатами, множество BLE-маяков M можно представить следующим образом:

$$M = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \end{Bmatrix}^T, \quad (1)$$

где координата (x_i, y_i) является физической координатой i -го BLE-маяка на контролируемой территории.

В ходе работы BLE-маяки постоянно передают по беспроводному каналу связи собственный идентификатор и значение уровня сигнала (received signal strength indicator, RSSI) [19]. Множество необработанных значений уровней сигналов обозначается следующим образом:

$$R = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_L], \quad (2)$$

где r_i – значение уровня сигнала от i -го BLE-маяка.

Множество измеренных расстояний от мобильного устройства до BLE-маяка обозначим как:

$$D = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_L], \quad (3)$$

где d_i – значение расстояния i -го BLE-маяка.

3. Фильтрация сигнала

Одной из основных сложностей, влияющих на результат позиционирования, является большой разброс получаемого уровня сигнала. Для компенсации этого разброса в работе предлагается использование фильтра Калмана. Фильтр Калмана предполагает два основных этапа: прогнозирование и корректировку. Корректировка производится на основании предшествующих данных, а прогнозирование строится на основе математической модели.

Прогнозирование по фильтру Калмана производится по формуле 4.

$$p_{i+1} = p_i + e_i dt + \xi_i, \quad (4)$$

где p_{i+1} – прогнозируемое значение, p_i – текущее показание датчика, e_i – известное изменение показания согласно математической модели, ξ_i – случайная величина.

Однако с точки зрения прогнозирования невозможно предсказать, как будет вести себя подвижный объект, поэтому (4) в настоящем исследовании примет вид:

$$p_{i+1} = p_i + \xi_i. \quad (5)$$

Использование (5) позволит фильтровать данные, поступающие со считывающего устройства, и тем самым повысить достоверность получаемых показаний. Вычисление оптимального значения осуществляется по (6).

$$r_{i+1}^{opt} = K \cdot r_{i+1} + (1 - K)(r_i^{opt} + \xi_i), \quad (6)$$

где r_{i+1}^{opt} – полученное отфильтрованное значение, r_i^{opt} – предыдущее отфильтрованное значение, K – коэффициент Калмана. Коэффициент Калмана имеет значение в диапазоне от 0 до 1 и выбирается эмпирически.

Пример фильтрации данных об уровнях сигналов RSSI от BLE-маяка фильтром Калмана представлен на рис. 2.

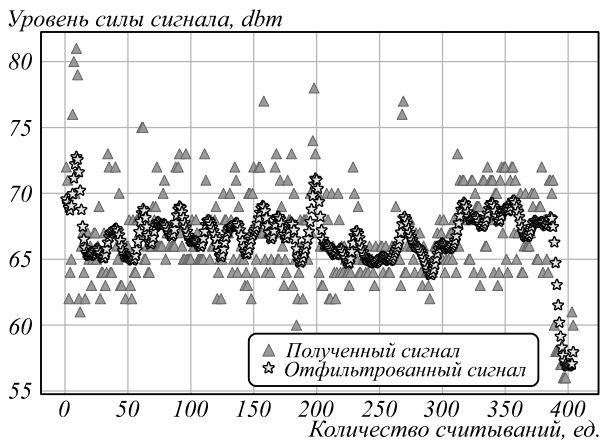


Рис. 2. Пример работы фильтра Калмана

4. Перевод значений уровней сигналов RSSI в расстояние

Исходя из анализа современных методов позиционирования можно сделать вывод, что для получения более точных результатов необходимо знать реальное расстояние до каждого из маяков. Одним из самых простых и эффективных способов является перевод уровня сигнала RSSI в расстояние с использованием специализированных методов. К таким методам можно отнести методы аппроксимации, теорию распространения радиоволн и нейронные сети.

В работе планируется провести сравнительный анализ двух гибридных методов:

1. Измерение мощности сигнала RSSI до маяка, аппроксимация полученных данных для получения математического инструмента перевода получаемого уровня сигнала в расстояние в метрах.
2. Измерение мощности сигнала RSSI до маяка, применение нейронных сетей прямого распространения для получения интеллектуального инструмента перевода получаемого уровня сигнала в расстояние в метрах.

5. Построение функции аппроксимации

Статистический анализ временных рядов значений уровней сигналов с BLE-маяков показал, что наиболее подходящей функцией для их аппроксимации является экспонента. Была получена экспоненциальная функция аппроксимации с коэффициентом детерминации 0,6994 (7) (рис. 3).

$$y = 0,1508 \cdot e^{0,0577 \cdot r_i^{opt}}. \quad (7)$$

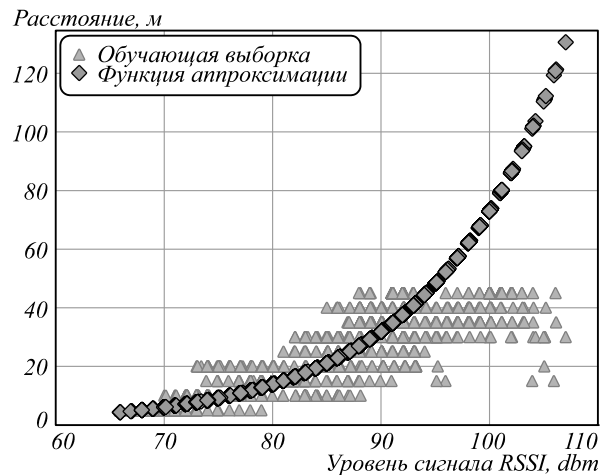


Рис. 3. Результат аппроксимации экспоненциальной функцией

6. Анализ нейронными сетями

Для обучения нейронной сети были использованы: среда разработки python, программная библиотека TensorFlow и библиотека глубокого обучения Keras.

Для обучения искусственной нейронной сети (ИНС) была использована выборка, полученная в ходе синтеза данных, где множество R было использовано в качестве множества значений уровня сигнала текущего BLE-маяка, а множество D – как множество значений расстояния до текущего BLE-маяка. Для эксперимента была использована ИНС модель с двумя скрытыми слоями и 10 узлами в каждом из них. Для оптимизации модели была применена эффективная версия Адама по стохастическому градиентному спуску с учетом среднеквадратичных потерь. Внешний вид обучаемой искусственной нейронной сети представлен на рис. 4. Результат обучения ИНС на 1000 эпохах приведен на рис. 5.

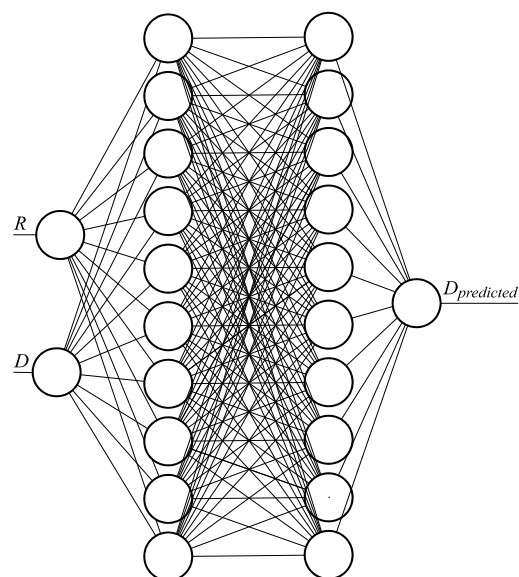


Рис. 4. Внешний вид обучаемой искусственной нейронной сети

В результате была получена ИНС, показавшая значение среднеквадратической ошибки в $43,071 \text{ м}^2$.

7. Сравнение полученных данных

В результате обработки исходных данных математическими методами и с использованием нейронных сетей были получены инструменты перевода значений уровней сигнала в расстояние до маяка. Результаты обработки исходных данных приведены на графике (рис. 6).

Из графика видно, что оба метода хорошо адаптировались к диапазону известных данных, однако имеет место кардинальное различие в обработке значений, не входящих в обучающую выборку – более 45 метров.

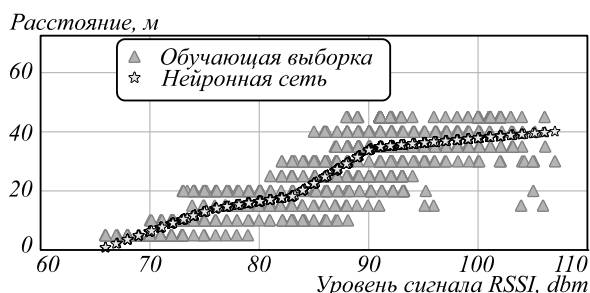


Рис. 5. Результат обучения ИНС на 1000 эпохах

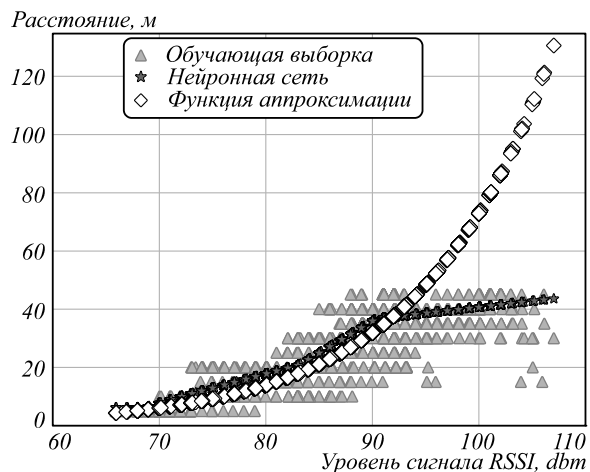


Рис. 6. Сравнение результатов аппроксимации и ИНС

Для того, чтобы выбрать метод для обработки данных уровня сигнала RSSI, было принято решение использовать характеристику среднеквадратичного отклонения (СКО):

$$СКО = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (d_i - d_i^{\text{predicted}})^2. \quad (8)$$

Помимо обучающей выборки, были произведены замеры в помещении на расстоянии в 100 метров с шагом в 10 метров. Полученная тестовая выборка была дополнительно разделена на 2 части по 50 метров. Первая часть (10–50 метров) используется для оценки поведения на схожих с обучающей выборкой данных, а вторая часть (60–100) – на неизвестных. Результаты сравнения СКО на обучающей и тестовой выборках представлены в табл. 2.

Табл. 2. Показатели СКО по обучающей выборке

	Нейронная сеть, м ²	Функция аппроксимации, м ²
Обучающая выборка	43,07	79,64
Тестовая выборка	23,12	23,14
Тестовая выборка 10–50 метров	20,38	20,08
Тестовая выборка 60–100 метров	36,98	38,64

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. По результатам тестирования на обучающей выборке лучший результат показала нейронная сеть.
2. По результатам тестирования на полной тестовой выборке оба подхода показали практически идентичные результаты. Немного лучше себя показала нейронная сеть.
3. При тестировании на «известной» половине тестовой выборки (10–50 метров) лучше себя проявила функция аппроксимации.
4. При тестировании на «неизвестной» половине тестовой выборки (60–100 метров) лучше себя проявила нейронная сеть.

На рис. 7 представлен график распределения ошибки позиционирования.

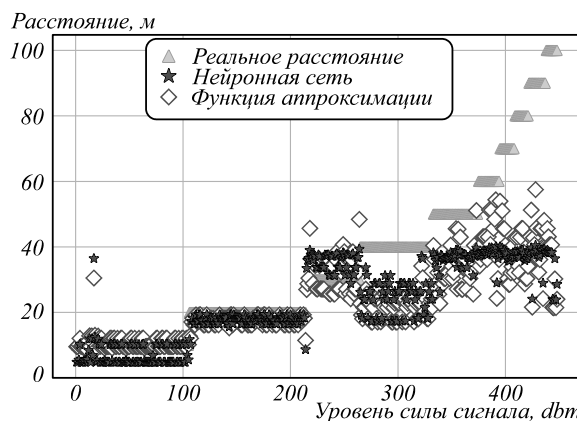


Рис. 7. График распределения ошибки позиционирования

8. Разработка алгоритма позиционирования мобильного устройства на основе сенсорных сетей из BLE-маяков

Исходя из того, что благодаря методу RSSI возможно получать расстояние до маяков, можно применить метод мультilaterации, который заключается в нахождении координат объекта относительно трех и более маяков. Для его использования необходимо знать точное расположение маяков на контролируемой территории, а к сенсорным сетям предъявить следующие требования (рис. 8):

- заранее знать размеры контролируемого помещения или территории;
- рассчитать смещение маяков относительно плана помещения или территории для определения величин d, i, j для (9);

– определить количество маяков и их расположение в контролируемом помещении исходя из его размеров и среды распространения радиосигнала.

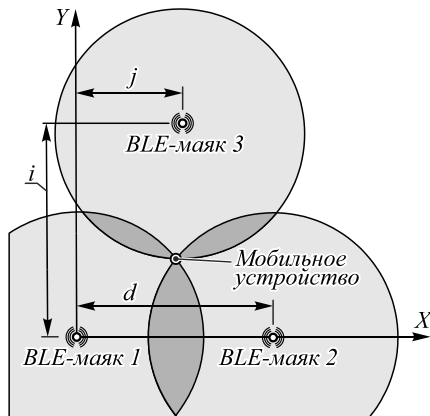


Рис. 8. Построение сенсорной сети из 3 BLE-маяков для позиционирования методом мультilaterации

Для организации позиционирования по трем BLE-маякам необходимо:

1. Получить список BLE-устройств в зоне видимости считывающего устройства.
2. Отобрать устройства, работающие по технологии iBeacon, согласно формату данных, представленному на рис. 1.
3. Получить данные о состоянии iBeacon-маяков.
4. Отсортировать iBeacon-маяки по уменьшению дистанции до них.
5. Построить координатную плоскость (рис. 8) исходя из того, что:
 - а) iBeacon-маяк, расстояние до которого является минимальным, должен являться началом координат;
 - б) следующий за ним по удаленности от считывающего устройства iBeacon-маяк должен располагаться на оси OX;
 - в) третий по удаленности iBeacon-маяк должен быть расположен в одной плоскости с первыми двумя.
6. Исходя из известных заранее смещений (d, i, j) и расстояний до iBeacon-маяков r_k, r_l, r_m необходимо рассчитать относительные координаты (x, y) (при $z = \text{const}$) считывающего устройства. Для этого используем систему уравнений (9).

$$\begin{cases} x_{Оmn} = \frac{r_k^2 - r_l^2 + d_{k,l,m}^2}{2d_{k,l,m}}, \\ y_{Оmn} = \frac{r_k^2 - r_m^2 - x^2 + (x - i_{k,l,m})^2 + i_{k,l,m}^2}{2j_{k,l,m}}. \end{cases} \quad (9)$$

Использование большого количества маяков позволит получать более точные результаты позиционирования. Однако при увеличении числа маяков в определенный момент времени будет достигнут оптимальный результат. Дальнейшее наращивание ко-

личества маяков будет негативно влиять на результат позиционирования.

9. Разработка алгоритма адаптации к среде передачи данных

Исходя из того, что позиционирование по радиосигналу очень сильно зависит от среды распространения, в большом количестве работ [11, 14, 15, 24] предлагается пересчитывать математическую модель, полученную в процессе аппроксимации и обучения ИНС для каждого конкретного случая. Это подход довольно трудоемок и не универсален. Связано это с изменением расчета уровня сигнала на самом радиомаяке с помощью формулы:

$$RSSI = A - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (10)$$

где $RSSI$ – рассчитанный уровень сигнала, A – уровень сигнала на расстоянии d_0 , d – расстояние до принимающего устройства, n – коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде.

В (10) за описание параметров среды распространения отвечают переменные A и d_0 . Для упрощения расчетов многие принимают значение переменной d_0 , равное 1 метру, тогда остается только получить значение переменной A .

В работе предлагается отказаться от произведения новых измерений при каждом изменении параметров среды распространения сигнала, а воспользоваться системой опорных маяков. Идея алгоритма заключается в установке одного или нескольких дополнительных опорных маяков на расстоянии d_0 от контролируемого маяка, как показано на рис. 9. Имея в сенсорной сети опорные маяки, можно регистрировать изменения параметров среды распространения сигнала и вносить изменения не в имеющуюся математическую модель, а в алгоритм расчета уровня сигнала самого маяка.

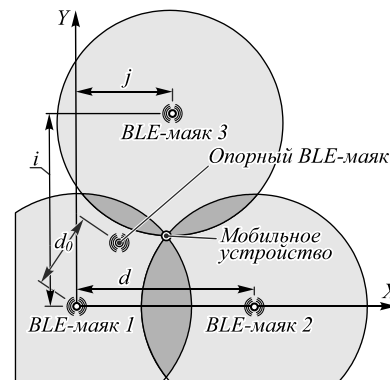


Рис. 9. Схема размещения опорных маяков.

Использование системы опорных маяков позволит адаптировать имеющуюся математическую модель под изменяющиеся параметры среды распространения

Для корректировки маяков необходимо выполнить следующие действия:

1. Контролируемый маяк измеряет уровень сигнала до опорного маяка и принимает его за текущие параметры среды распространения сигнала.
2. Контролируемый маяк постоянно измеряет уровень сигнала до опорного маяка, получая временной ряд значений RSSI.
3. Когда среднее значение уровня сигнала превышает определенное пороговое значение (в работе был использован порог 2 дБм), производится замена текущего значения переменной A на контролируемом маяке на новое, рассчитанное значение.

10. Экспериментальные исследования работы алгоритма позиционирования и сравнение с аналогами

Экспериментальные исследования разработанного алгоритма содержали следующую последовательность шагов:

1. Обозначение контролируемой территории четырьмя маяками BLE.
2. Определение контрольных точек (КТ) (выбраны 4 точки с шагом 1 метр).
3. Измерение расстояния от всех отметок до всех КТ.
4. Проведение замеров по всем КТ с помощью разработанного приложения [20] и аналога.

Результаты представлены в виде табл. 3, 4 и рис. 10.

Табл. 3. Сравнение измеренных расстояний

	Маяк 1	Маяк 2	Маяк 3	Маяк 4
	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог
КТ 1	2,73	4,2	5	3,9
	2,75	4,2	5	4
	2,6	2	4	2,1
КТ 2	3,5	3,3	4,3	4,4
	3,6	3,4	3,5	4,5
	3,7	4	3,7	4,7
КТ 3	4,4	2,6	3,7	5,1
	4,3	2,6	3,8	5
	4,8	2,6	2,15	4,7
КТ 4	5,4	2	3,36	5,9
	5	2,2	3,34	5
	5,8	3,1	2,8	6,00

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ошибка позиционирования с использованием предлагаемого метода составляет 0,1–0,9 метра на расстоянии до 6 метров, когда погрешность аналога составляет 0,1–2,2 метра. Таким образом, можно сделать вывод о том, что точность позиционирования мобильного устройства с использованием предлагаемого метода в проведенном эксперименте выше на 40,9 %.

За последние годы было опубликовано большое количество работ [21–24], показывающих успехи в области позиционирования внутри помещений. Подавляющее число работ описывают эксперименты,

проведенные внутри помещений на расстояниях протяженностью от 50 до 70 метров. Проведенный анализ точности позиционирования методов, освещенных в публикациях, представлен в виде табл. 5. Коллективом также проведены экспериментальные исследования предлагаемого метода в помещении $58,4 \times 4,5$ м. При проведении эксперимента было задействовано 18 маяков, 4 из которых были опорными. Расстояние между маяками составило 7 метров. Схема размещения представлена на рис. 11.

Табл. 4. Разница измеренного расстояния

	Маяк 1	Маяк 2	Маяк 3	Маяк 4
	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог	Реальное значение, предлагаемый метод, аналог
КТ 1	2,73 0 0,13	4,2 0 2,2	5 0 1	3,9 -0,1 1,8
	3,5 -0,1 -0,2	3,3 -0,1 -0,7	4,3 0,8 0,6	4,4 -0,1 -0,3
	4,4 0,1 -0,4	2,6 0 0	3,7 -0,1 1,55	5,1 0,1 0,4
КТ 4	5,4 0,4 -0,4	2 -0,2 -1,1	3,36 0,02 0,56	5,9 0,9 -0,10

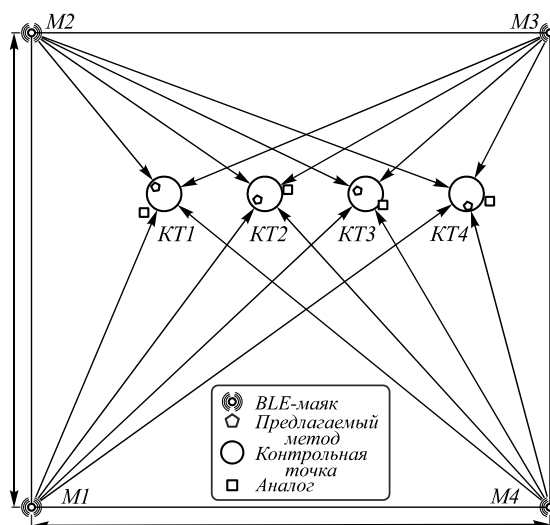


Рис. 10. Результаты эксперимента по позиционированию мобильного устройства

В результате проведенного эксперимента можно сделать вывод, что предложенный алгоритм позволяет более точно производить позиционирование мобильного устройства в закрытом помещении за счёт небольшой избыточности BLE-маяков.

Заключение

В статье предложен метод позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней

сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей. Метод состоит из четырех этапов: синтез данных, фильтрация сигнала, перевод значений сигналов RSSI в расстояние и мультилатерация.

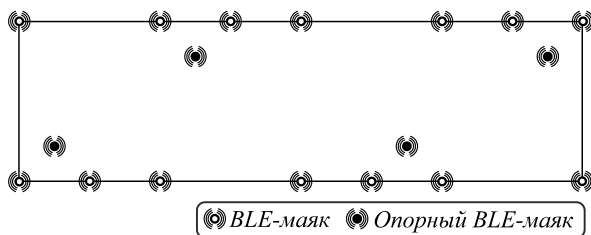


Рис. 11. Схема расположения BLE-маяков

Табл.5. Результат экспериментальных исследований

Метод позиционирования	Погрешность, м.		
	Минимальная	Максимальная	Средняя
Инерциальная навигация [21]	0,419	4,4	2,68
MCRT [22]	0,07	3,25	1,19
Метод отпечатков [23]	0,53	5,85	2,58
Метод WiFi CSI [24]	0,79	5,35	3,41
Предложенный метод	0,13	1,27	0,98

Предложен упрощенный фильтр Калмана для фильтрации входного сигнала для подавления гауссовского шума. Приведено описание двух подходов к переводу уровня сигнала RSSI в расстояние: экспоненциальная функция аппроксимации с коэффициентом детерминации 0,6994 и искусственная нейронная сеть прямого распространения. Сравнение результатов работы этих подходов производилось на нескольких тестовых выборках: обучающей, тестовой на известном расстоянии (0–50 метров) и тестовой на неизвестном расстоянии (60–100 метров). В результате искусственная нейронная сеть показала лучший результат во всех экспериментах, кроме тестовой выборки на известном расстоянии (0–50 метров), уступив функции аппроксимации на 0,02 м² среднеквадратичной ошибки, чем можно пренебречь. Предложен алгоритм позиционирования мобильного устройства на основе метода мультилатерации.

Экспериментальные исследования разработанного метода показали, что ошибка позиционирования не превышает 0,9 метра в контролируемом помещении размером 5×5,5 метров. Точность позиционирования мобильного устройства с использованием предлагаемого метода в проведенном эксперименте выше на 40,9%.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Госзадание ВлГУ ГБ-1187/20).

Литература

1. **Orlov, A.A.** Methods and algorithms of automated two-stage visual recognition of metal-rolling billets / A.A. Orlov, A.V. Provotorov, A.V. Astaf'ev // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77, Issue 6. – P. 1099-1105. – DOI: 10.1134/S000511791606014X.
2. **Smith, K.** Beyond GSM-R: the future of railway radio [Electronical Resource] / K. Smith // International Railway Journal. – 2017. – URL: <http://www.railjournal.com/index.php/telecoms/beyond-gsm-r-the-future-of-railway-radio.html> (request date 9.08.2018).
3. **Sneps-Sneppe, M.** Digital railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R-whether it takes place? [Electronical Resource] / M. Sneps-Sneppe, [et al.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Vol. 5, Issue 1. – P. 71-80. – URL: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/view/379> (request date 9.08.2018).
4. **Suleyman, N.** Comparison of field measurement data with propagation models, and modification of COST 231-Hata and Cost 231-Walfisch-Ikegami propagation models for UMTS2100 mobile network in Ashgabat, Koshi / N. Suleyman. – In: Digitalization and industry 4.0: Economic and societal development / ed. by H.C. Brauweiler, V. Kurchenkov, S. Abilov, B. Zirkler. – Wiesbaden: Springer Gabler, 2020. – DOI: 10.1007/978-3-658-27110-7_6.
5. **Laassiri, F.** Handover and QoS parameters a performance assessment on 3G based SDN / F. Laassiri, M. Moughit, N. Idboufker. – In: ICT for an inclusive world / ed. by Y. Baghdadi, A. Harfouche, M. Musso. – Cham: Springer, 2020. – DOI: 10.1007/978-3-030-34269-2_9.
6. **Kien, N.T.** Displacement monitoring using GPS at an unstable steep slope and the performance of a new low-cost GPS sensor / N.T. Kien, S. Nakashima, N. Shimizu. – In: Geotechnics for sustainable infrastructure development / ed. by P. Duc Long, N. Dung. – Singapore: Springer, 2020.
7. **Nakashima, S.** Accuracy enhancement of GPS displacements measured on a large steep slope and results of long-term continuous monitoring / S. Nakashima, Y. Furuyama, Y. Hayashi, T.K. Nguyen, N. Shimizu, S. Hirokawa // Journal of the Japan Landslide Society. – 2018. – Vol. 55, Issue 1. – P. 13-24.
8. **Mendonça, M.** Assessment of a GNSS/INS/Wi-Fi tight-integration method using support vector machine and extended Kalman filter / M. Mendonça, M.C. Santos. – In: International association of geodesy symposia. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 1-7. – DOI: 10.1007/1345_2020_120.
9. **He, K.** A method to correct the raw Doppler observations for GNSS velocity determination / K. He, T. Xu, C. Förste, Z. Wang, Q. Zhao, Y. Wei. – In: International association of geodesy symposia. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – DOI: 10.1007/1345_2020_119.
10. **Vana, S.** Enhancing navigation in difficult environments with low-cost, dual-frequency GNSS PPP and MEMS IMU / S. Vana, S. Bisnath. – In: International association of geodesy symposia. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – DOI: 10.1007/1345_2020_118.
11. **Ali, R.** Deep reinforcement learning paradigm for dense wireless networks in smart cities / R. Ali, Y.B. Zikria, B.S. Kim, S.W. Kim. – In: Smart cities performability, cognition, & security. EAI/Springer innovations in communication and computing / ed. by F. Al-Turjman. – Cham: Springer, 2020. – DOI: 10.1007/978-3-030-14718-1_3.

12. **Ali, R.** Channel observation-based scaled backoff mechanism for high-efficiency WLANs / R. Ali, N. Shahin, Y. Kim, B. Kim, S.W. Kim // *Electronics Letters*. – 2018. – Vol. 54, Issue 10. – P. 663-665.
13. **Sun, M.** Application of bluetooth low energy beacons and fog computing for smarter environments in emerging economies / M. Sun, K.M. Kamoto, Q. Liu, X. Liu, L. Qi. – In: *Cloud computing, smart grid and innovative frontiers in telecommunications* / ed. by X. Zhang, G. Liu, M. Qiu, W. Xiang, T. Huang. – Cham: Springer, 2020. – P. 101-110. – DOI: 10.1007/978-3-030-48513-9_8.
14. **Nagarajan, B.** Localization and indoor navigation for visually impaired using bluetooth low energy / B. Nagarajan, V. Shanmugam, V. Ananthanarayanan, S.P. Bagavathi. – In: *Smart systems and IoT: Innovations in computing* / ed. by A. Somani, R. Shekhawat, A. Mundra, S. Srivastava, V. Verma. – Singapore: Springer, 2020. – P. 249-259. – DOI: 10.1007/978-981-13-8406-6_25.
15. *Encyclopedia of GIS* / ed. by S. Shekhar, H. Xiong, X. Zhou. – Cham: Springer, 2008.
16. *RF positioning: Fundamentals, applications and tools* / R.S. Campos, L. Lovisolo. – Boston, London: Artech House, 2015.
17. **Kriz, P.** Improving indoor localization using bluetooth low energy beacons / P. Kriz, F. Maly, T. Kozel // *Mobile Information Systems*. – 2016. – Vol. 2016. – 2083094. – DOI: 10.1155/2016/2083094.
18. **Zafari, F.** A survey of indoor localization systems and technologies / F. Zafari, A. Gkelias, K.K. Leung // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. – 2019. – Vol. 21, Issue 3. – P. 2568-2599.
19. **Astafiev, A.V.** Development of indoor positioning algorithm based on Bluetooth Low Energy beacons for building RTLS-systems / A.V. Astafiev, A.L. Zhiznyakov, D.G. Privezentsev // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2019). – 2019. – 8867751. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867751.
20. Программа обнаружения радиомаяков на основе технологии Bluetooth Low Energy / Астафьев А.В., Демидов А.А., Привезенцев Д.Г., Шардин Т.О.; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661059. Зарегистрирована 19.08.2019.
21. **Wen, L.** Coordinate-based clustering method for indoor fingerprinting localization in dense cluttered environments / L. Wen, F. Xiao, D. Zhongliang // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, Issue 12. – 2055.
22. **Liu, W.** A calibrated-RSSI/PDR/Map integrated system based on a novel particle filter for indoor navigation / W. Liu, J. Li, Z. Deng, X. Fu, Q. Cheng // 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). – 2019. – P. 1-8.
23. **Koo, B.** PDR/fingerprinting fusion indoor location tracking using RSSI recovery and clustering / B. Koo, S. Lee, M. Lee, [et al.] // 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). – 2014. – P. 699-704.
24. **Wang, J.J.** A novel indoor ranging algorithm based on received signal strength and channel state information / J.J. Wang, J.G. Hwang, J.G. Park // 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). – 2019. – P. 32-39.

Сведения об авторах

Астафьев Александр Владимирович, 1989 года рождения, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник кафедры программной инженерии МИ ВлГУ. Область научных интересов: обработка сигналов, интеллектуальный анализ данных, компьютерное зрение. E-mail: Alexandr.Astafiev@mail.ru.

Титов Дмитрий Витальевич, 1986 года рождения, д.т.н., директор Института международного образования Юго-Западного государственного университета. Область научных интересов: обработка изображений, компьютерное зрение. E-mail: umsswsu@gmail.com.

Жизняков Аркадий Львович, 1975 года рождения, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой программной инженерии МИ ВлГУ. Область научных интересов: компьютерное зрение, цифровая обработка изображений, САПР. E-mail: lvovich1975@mail.ru.

Демидов Антон Александрович, 1998 года рождения, студент кафедры физики и прикладной математики МИ ВлГУ. Область научных интересов: обработка сигналов, интеллектуальный анализ данных. E-mail: AADemidov@list.ru.

ГРНТИ: 28.23.29

Поступила в редакцию 28 октября 2020 г. Окончательный вариант – 2 февраля 2021 г.

A method for mobile device positioning using a sensor network of BLE beacons, approximation of the RSSI value and artificial neural networks

A.V. Astafiev¹, D.V. Titov², A.L. Zhiznyakov¹, A.A. Demidov¹

¹ Murom Institute (branch), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Murom, Russia,

² Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract

The paper considers the development of a method for positioning a mobile device using a sensor network of BLE-beacons, the approximation of RSSI values and artificial neural networks. The aim of the work is to develop a method for positioning small-scale industrial mechanization equipment for building unmanned systems for product movement tracking. The work is divided into four main parts: data synthesis, signal filtering, selection of BLE beacons, translation of the RSSI values into a distance, and multilateration. A simplified Kalman filter is proposed for filtering the input signal to suppress Gaussian noise. A description of two approaches to translating the RSSI value into a distance is given: an exponential approximation function with a coefficient of determination of 0.6994 and an artificial feedforward neural network. A comparison of the results of these approaches is carried out on several test samples: a training one, a test sample at a known distance (0–50 meters) and a test sample at an unknown distance (60–100 meters). The artificial neural network is shown to perform better in all experiments, except for the test sample at a known distance (0–50 meters), for which the r.m.s. error is higher by 0.02 m² than that for the approximation function, which can be neglected. An algorithm for positioning a mobile device based on the multilateration method is proposed. Experimental studies of the developed method have shown that the positioning error does not exceed 0.9 meters in a 5×5.5-m room under monitoring. The positioning accuracy of a mobile device using the proposed method in the experiment is 40.9% higher. Experimental studies are also conducted in a 58.4×4.5 m room, showing more accurate results compared to similar studies.

Keywords: indoor positioning, bluetooth low energy, Kalman filter, approximation, artificial neural network.

Citation: Astafiev AV, Titov DV, Zhiznyakov AL, Demidov AA. A method for mobile device positioning using a sensor network of BLE beacons, approximation of the RSSI value and artificial neural networks. *Computer Optics* 2021; 45(2): 277-285. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-826.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the government project VISU GB-1187/20.

References

- [1] Orlov AA, Provotorov AV, Astafiev AV. Methods and algorithms of automated two-stage visual recognition of metal-rolling billets. *Autom Remote Control* 2016; 77(6): 1099-1105. DOI: 10.1134/S000511791606014X.
 - [2] Smith K. Beyond GSM-R: the future of railway radio. *Int Railway J* 2017. Source: (<http://www.railjournal.com/index.php/telecoms/beyond-gsm-r-the-future-of-railway-radio.html>).
 - [3] Sneps-Sneppe M, et al. Digital railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R-whether it takes place? *Int J Open Inf Technol* 2017; 5(1): 71-80. Source: (<http://injoit.ru/index.php/j1/article/view/379>).
 - [4] Suleyman N. Comparison of field measurement data with propagation models, and modification of COST 231-Hata and Cost 231-Walfisch-Ikegami propagation models for UMTS2100 mobile network in Ashgabat, Koshi. In Book: Brauweiler HC, Kurchenkov V, Abilov S, Zirkler B, eds. *Digitalization and industry 4.0: Economic and societal development*. Wiesbaden: Springer Gabler; 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-27110-7_6.
 - [5] Laassiri F, Moughit M, Idboufker N. Handover and QoS parameters a performance assessment on 3G based SDN. In Book: Baghdadi Y, Harfouche A, Musso M, eds. *ICT for an inclusive world*. Cham: Springer; 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-34269-2_9.
 - [6] Kien NT, Nakashima S, Shimizu N. Displacement monitoring using GPS at an unstable steep slope and the performance of a new low-cost GPS sensor. In Book: Duc Long P, Dung N, eds. *Geotechnics for sustainable infrastructure development*. Singapore: Springer; 2020.
 - [7] Nakashima S, Furuyama Y, Hayashi Y, Nguyen TK, Shimizu N, Hirokawa S. Accuracy enhancement of GPS displacements measured on a large steep slope and results of long-term continuous monitoring. *Journal of the Japan Landslide Society* 2018; 55(1): 13-24.
 - [8] Mendonça M, Santos MC. Assessment of a GNSS/INS/Wi-Fi tight-integration method using support vector machine and extended Kalman filter. In Book: International association of geodesy symposia. Berlin, Heidelberg: Springer; 2020. DOI: 10.1007/1345_2020_120.
 - [9] He K, Xu T, Förste C, Wang Z, Zhao Q, Wei Y. A method to correct the raw Doppler observations for GNSS velocity determination. In Book: International association of geodesy symposia. Berlin, Heidelberg: Springer; 2020. DOI: 10.1007/1345_2020_119.
 - [10] Vana S, Bisnath S. Enhancing navigation in difficult environments with low-cost, dual-frequency GNSS PPP and MEMS IMU. In Book: International association of geodesy
-

-
- symposia. Berlin, Heidelberg: Springer; 2020. DOI: 10.1007/1345_2020_118.
- [11] Ali R, Zikria YB, Kim BS, Kim SW. Deep reinforcement learning paradigm for dense wireless networks in smart cities. In Book: Al-Turjman F, ed. Smart cities performability, cognition, & security. EAI/Springer innovations in communication and computing. Cham: Springer; 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-14718-1_3.
- [12] Ali R, Shahin N, Kim Y, Kim B, Kim SW. Channel observation-based scaled backoff mechanism for high-efficiency WLANs. *Electron Lett* 2018; 54(10): 663-665.
- [13] Sun M, Kamoto KM, Liu Q, Liu X, Qi L. Application of bluetooth low energy beacons and fog computing for smarter environments in emerging economies. In Book: Zhang X, Liu G, Qiu M, Xiang W, Huang T, eds. Cloud computing, smart grid and innovative frontiers in telecommunications. Cham: Springer; 2020: 101-110. DOI: 10.1007/978-3-030-48513-9_8.
- [14] Nagarajan B, Shanmugam V, Ananthanarayanan V, Bagavathi SP. Localization and indoor navigation for visually impaired using bluetooth low energy. In Book: Somani A, Shekawat R, Mundra A, Srivastava S, Verma V, eds. Smart systems and IoT: Innovations in computing. Singapore: Springer; 2020: 249-259. DOI: 10.1007/978-981-13-8406-6_25.
- [15] Shekhar S, Xiong H, Zhou X, eds. Encyclopedia of GIS. Cham: Springer, 2008.
- [16] Campos RS, Lovisolo L. RF positioning: Fundamentals, applications and tools. Boston, London: Artech House; 2015.
- [17] Kriz P, Maly F, Kozel T. Improving indoor localization using bluetooth low energy beacons. *Mob Inf Syst* 2016; 2016: 2083094. DOI: 10.1155/2016/2083094.
- [18] Zafari F, Gkelias A, Leung KK. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Commun Surv Tutor* 2019; 21(3): 2568-2599.
- [19] Astafiev AV, Zhiznyakov AL, Privezentsev DG. Development of indoor positioning algorithm based on Bluetooth Low Energy beacons for building RTLS-systems. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2019) 2019: 8867751. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867751.
- [20] Astafiev AV, Demidov AA, Privezentsev DG, Shardin TO. Radio beacon detection program based on Bluetooth Low Energy technology [In Russian]. Certificate of state registration of the computer program No. 2019661059 of August 19, 2019.
- [21] Wen L, Xiao F, Zhongliang D. Coordinate-based clustering method for indoor fingerprinting localization in dense cluttered environments. *Sensors* 2016; 16(12): 2055.
- [22] Liu W, Li J, Deng Z, Fu X, Cheng Q. A calibrated-RSSI/PDR/Map integrated system based on a novel particle filter for indoor navigation. 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2019: 1-8.
- [23] Koo B, Lee S, Lee M, et al. PDR/fingerprinting fusion indoor location tracking using RSSI recovery and clustering. 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2014: 699-704.
- [24] Wang JJ, Hwang JG, Park JG. A novel indoor ranging algorithm based on received signal strength and channel state information. 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2019: 32-39.
-

Authors' information

Alexandr Vladimirovich Astafiev (b. 1989), PhD, assistant professor, leading researcher of Software Engineering department of MI VISU. Research interests: signal processing, data mining computer vision. E-mail: Alexandr.Astafiev@mail.ru.

Dmitry Vitalievich Titov (b. 1986), doctor of engineering, director of the Institute of International Education of SWSU. Research interests: image processing, computer vision. E-mail: umsswsu@gmail.com.

Arkady Lvovich Zhiznyakov (b. 1975), doctor of engineering, professor, head of Software Engineering department of MI VISU. Research interests: computer vision, image processing, CAD. E-mail: lvovich1975@mail.ru.

Anton Aleksandrovich Demidov (b. 1998), student of Physics and Applied Mathematics department of MI VISU. Research interests: signal processing, data mining. E-mail: AADemidov@list.ru.

Received October 28, 2020. The final version – February 2, 2021.
