

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УЧЕТА ПРЕПЯТСТВИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ЛОКАЦИИ В СИСТЕМАХ БЛИЖНЕГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

М. Н. Крижановский

Целью статьи является разработка и проведение моделирования алгоритма учета препятствий при расчете локации в системах ближнего позиционирования. А также рассмотрение существующих алгоритмических подходов к определению координат позиционируемого устройства в системе локального позиционирования. В ходе написания статьи была разработана математическая модель с графическим интерфейсом, демонстрирующая результаты работы по определению координат позиционируемого объекта для общепринятого алгоритма и результаты для спроектированного при написании статьи алгоритма. В ходе моделирования было выяснено, что разработанный алгоритм дает более точные результаты расчета координат позиционируемого аппарата.

Ключевые слова: локальное позиционирование, RSSI, базовая станция, площадь покрытия, трилатерация.

Введение

Существуют различные технологии и алгоритмы, используемые в ближнем позиционировании аппаратов. Технологии ближнего позиционирования можно разделить, согласно применяемым физическим принципам, на оптические, звуковые и радиочастотные технологии. Как правило, основой системы ближнего позиционирования выступает расставленная в рабочем пространстве сеть маяков/базовых станций, по взаимодействию с которыми устанавливаются координаты объекта. В практике наибольшее распространение получил радиочастотный метод за счет меньшей зависимости корректности работы от наличия препятствий, а также по причине большего покрытия пространства одним маяком при низком потреблении мощности [1]. Базовыми станциями могут выступать модули Bluetooth Low Energy, точки доступа Wi-Fi, базовые станции LoRa и др.

Методы определения координат

Существуют два основных алгоритма для определения координат: трилатерация и триангуляция [2]. Алгоритм триангуляции состоит в определении координат позиционируемого объекта путем измерения углов к нему от опорных точек с известными координатами. Трилатерация же подразумевает измерение расстояний от объекта до опорных точек с известными координатами и дальнейшее определение координат в ходе поиска точки пересечения сфер описанных вокруг точек с радиусами, равными измеренным расстояниям. Также существует метод определения координат по алгоритму Nearest Neighbors in Signal Space Algorithm (NNSS). Использование алгоритма NNSS предполагает предварительное составление карты измерений интенсивности сигналов от опорных

станций в позиционируемом пространстве. Алгоритм NNSS дает меньшую точность, так как при составлении карты измерений помещение приходится делить на фрагменты, каждому из которых соответствует комбинация интенсивностей [3]. Так как триангуляция в условиях радиочастотных методов позиционирования доступна к использованию только в условиях применения систем направленных антенн, наиболее часто применяется именно метод трилатерации.

Вычисление дистанции до опорных точек

Как было отмечено выше, метод трилатерации подразумевает знание расстояний до трех не лежащих на одной прямой точек с известными координатами. Расстояния до базовых станций, расположения которых известны, определяется либо времяпролетным методом, либо рассчитывается исходя из измерения величины Received Signal Strength Indicator (RSSI), несущей информацию об интенсивности принятого от конкретной станции сигнала.

Учитывая тот факт, что системы времяпролетного позиционирования обеспечивают точность в среднем до 6 метров, в противном случае имеют высокую стоимость, для позиционирования в ближней зоне, как правило, предпочтение отдается системам, работающим по методу измерения RSSI с последующим определением координат.

В случае с позиционированием в ближней зоне дистанция по измерению RSSI рассчитывается согласно отношению [4]:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \frac{d^n}{d_0^n},$$

где d_0 – калибровочное расстояние составляющее, как правило, 1 метр; $P_r(d_0)$ – RSSI, получаемый при-

емником на калибровочном расстоянии; $P_r(d_0)$ – RSSI, получаемый приемником при измерении; d – измеряемое расстояние; n – коэффициент потери мощности сигнала для воздуха, его значение изменяется от 2 до 4, в зависимости от наличия препятствий.

Из этого равенства можно выразить ожидаемое значение RSSI на расстоянии d :

$$RSSI = RSSI_{d_0} - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) [\text{дБм}];$$

$$d = d_0 10^{\frac{RSSI_{d_0} - RSSI}{10n}} [\text{м}].$$

При наличии препятствий в виде массивных стен можно использовать модель Montley-Keenan, которая подразумевает знание о количестве пересекаемых сигналом стен [5], согласно данной модели мощность сигнала вычисляется следующим образом:

$$P(d) = P_M + 10n \lg(d) + k_w P_w, [\text{дБм}],$$

где P_M – измеренная потеря мощности сигнала на расстоянии 1 м; k_w – количество пройденных однотипных препятствий (стен); P_w – потеря мощности сигнала при прохождении через однотипное препятствие (стену).

Но, к сожалению, данная модель имеет высокий уровень неточности, из-за чего не получила большого распространения на практике.

Определение координат методом трилатерации

Имея значения дистанций до конкретных станций можно предположить, что позиционируемый объект находится на описанной вокруг станции

окружности с радиусом, соответствующим полученной дистанции. Если отобразить три таких окружности, соответствующие трем ближайшим станциям (рис. 1), то точка пересечения всех трех окружностей будет совпадать с координатами позиционируемого объекта в идеальных условиях [6].

В действительности ввиду наложения на принимаемый сигнал различных помех, окружности не сходятся в одной точке и возможны две приведенные на рис. 2 конфигурации расположений окружностей друг относительно друга. На рис. 2 точки пересечения окружностей, по которым в итоге происходит расчет позиции, обозначены как ρ_1, ρ_2, ρ_3 .

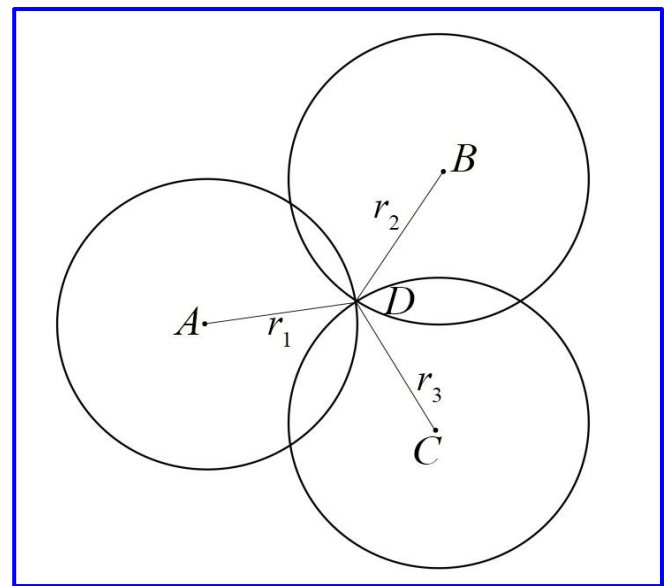


Рис. 1. Конфигурация пересечения окружностей вокруг базовых станций в идеальном случае

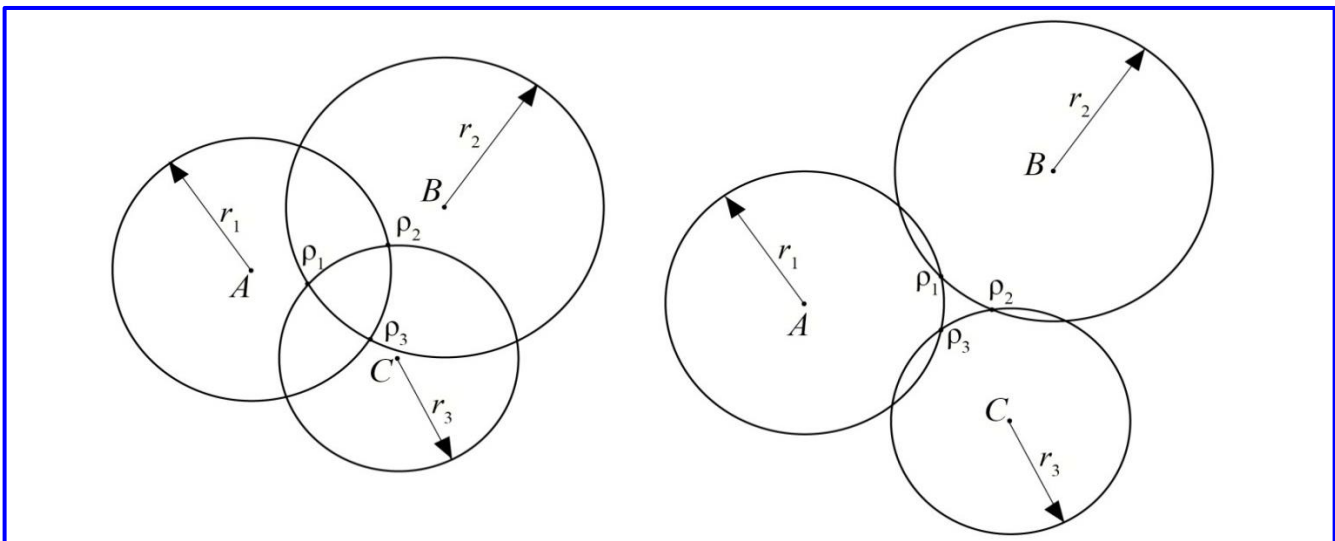


Рис. 2. Конфигурация пересечения окружностей вокруг базовых станций в реальном случае

Для двумерного случая координаты искомой точки в общем случае можно вычислить согласно уравнениям:

$$a_i = -2x_i, b_i = -2y_i, c_i = x_i^2 + y_i^2 - r_i^2, i = 1, 2, 3;$$

$$x = \frac{(c_1 - c_3)(b_1 - b_2) - (c_1 - c_2)(b_1 - b_3)}{(a_1 - a_2)(b_1 - b_3) - (a_1 - a_3)(b_1 - b_2)};$$

$$y = \frac{(c_1 - c_3)(a_1 - a_2) - (c_1 - c_2)(a_1 - a_3)}{(b_1 - b_2)(a_1 - a_3) - (b_1 - b_3)(a_1 - a_2)},$$

где x_i, y_i – соответственно координаты станций, участвующих в расчете позиции аппарата, а x и y – искомые координаты позиционируемого объекта. Базовые станции, как правило, равномерно распределяются по зоне покрытия, и в расчете позиции участвуют три станции с наибольшей интенсивностью доходящего от них сигнала.

Учет влияния помех, создаваемых препятствиями

Встречающийся в научных статьях алгоритм расчета координат, например, система, работающая на базовых станциях Wi-Fi [7], пример с использованием модулей BLE [8] рассчитан в первую очередь на работу в отсутствие препятствий. В то время как самой насущной для позиционирования по RSSI проблемой является влияние препятствий на затухание сигнала в зависимости от дальности приемника сигнала от источника. Для вычисления координат используются измерения сигналов от нескольких ближайших станций, которые в свою очередь являются сигналами с наибольшим значением RSSI. До тех пор, пока все станции, учитываемые в расчете координат, находятся по одну сторону от препятствия с позиционируемым объектом, расстояния до них рассчитываются по формуле с одинаковым коэффициентом. Когда одна из станций с наибольшим сигналом оказывается относительно позиционируемого аппарата за препятствием, если расчет дистанции будет также производиться без внесения корректировок в формулу расчета, это приведет к некорректному результату, так как реальная дальность до станции, находящейся за препятствием, окажется значительно меньше рассчитанной. Для решения данной проблемы был разработан алгоритм позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности. Особенность алгоритма заключается в введении дополнительных базовых станций, используемых в первую очередь

для индикации расположения позиционируемого объекта относительно известных заранее и учитываемых системой препятствий.

Чем дальше от позиционируемого устройства находится базовая станция, тем выше вероятность наличия препятствия на линии связи. По этой причине рассматривать для измерения координат в первую очередь необходимо именно расстояние до ближайших станций, дающих максимальный RSSI. Но не стоит опускать вероятность наличия препятствия и на пути к ближайшим базовым станциям. В таком случае необходимо внести поправку в формулу расчета дальности, подкорректировав коэффициент потери мощности сигнала.

Для принятия решения о внесении корректировки в формулу расчета необходимо знать заранее карту препятствий в зоне покрытия. А также предполагать по какую сторону от ближайшего препятствия находится позиционируемый аппарат.

Карту основных имеющихся в зоне позиционирования препятствий можно внести на этапе монтажа системы, произведя предварительные измерения их местоположений. Для вынесения предположения о примерном положении устройства относительно конкретного препятствия предлагается внести дополнительные базовые станции, размещенные приблизительно в центрах не занятых препятствиями областей. В таком случае выделяется отдельная группа базовых станций, необходимая в первую очередь для определения в какой из свободных областей находится позиционируемый объект. Это позволит обнаруживать события, при которых необходимо вносить изменения в коэффициент потери сигнала при расчете дистанции.

Моделирование алгоритма учета препятствий

На основе выдвинутого решения была разработана математическая модель с графическим интерфейсом на языке CSharp. На рис. 3 приведено изображение программного окна.

Математическая модель реализует расчет и отображение координат объекта, позиционируемого в рабочем пространстве (отмечено серым цветом на рис. 3). Моделирование предусматривает наличие в рабочем пространстве препятствий и учитывает влияние, оказываемое на пространственное затухание сигнала от станций, не находящихся в зоне прямой видимости позиционируемого объекта. Препятствия на графическом интерфейсе отображены коричневыми линиями (рис. 4).

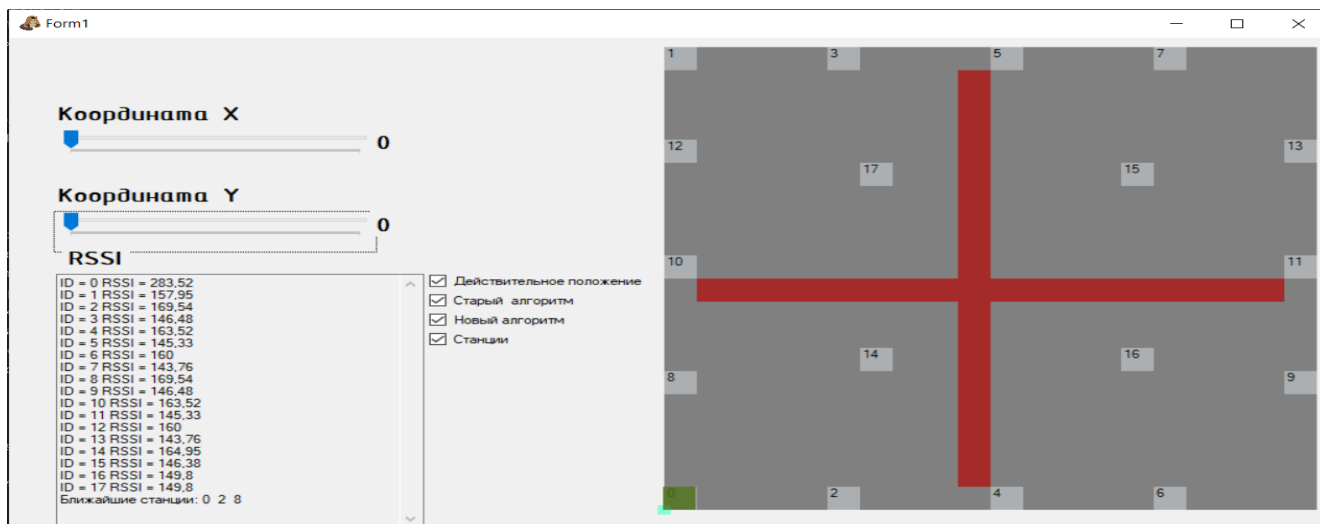


Рис. 3. Окно разработанной программы



Рис. 4. Карта рабочей области с препятствиями

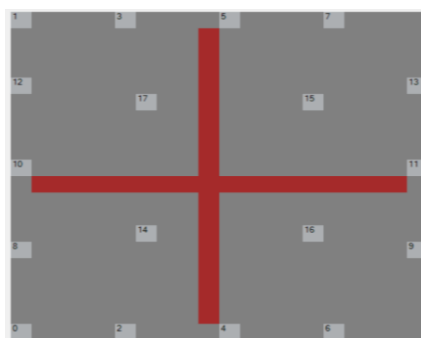


Рис. 5. Карта рабочей области с базовыми станциями

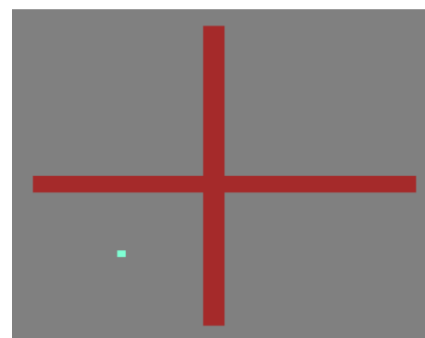


Рис. 6. Карта рабочей области с отмеченным реальным положением позиционируемого объекта

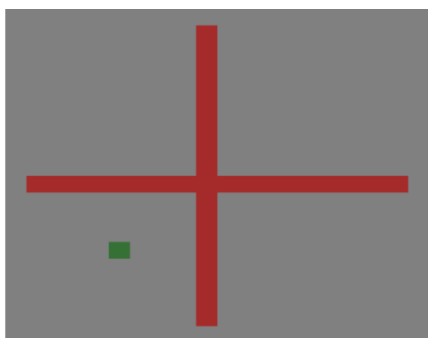


Рис. 7. Карта рабочей области с отмеченным положением позиционируемого объекта согласно старому алгоритму

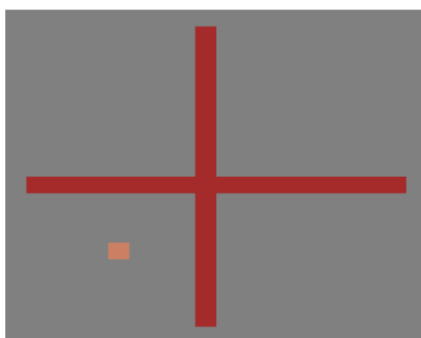


Рис. 8. Карта рабочей области с отмеченным положением позиционируемого объекта согласно разработанному алгоритму

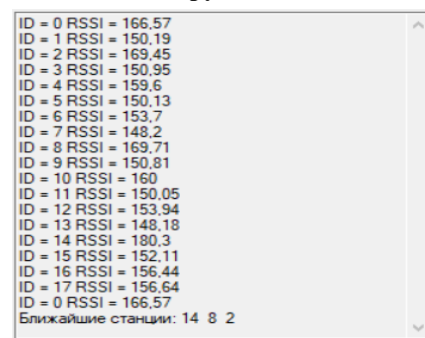


Рис. 9. Окно вывода текущих значений RSSI от каждой базовой станции, замеренных в точке нахождения объекта

Функционал разработанного графического интерфейса позволяет отобразить и при необходимости скрыть следующие обозначения:

- размещение на карте рабочей зоны базовых станций системы позиционирования и их нумерацию (рис. 5);
- реальное положение объекта (рис. 6);
- положение объекта, рассчитанное алгоритмом, не учитывающим наличие препятствий (рис. 7);

– положение объекта, рассчитанное алгоритмом учитывающим наличие препятствий (рис. 8).

Координаты реального расположения позиционируемого объекта в математической модели устанавливаются с помощью двух слайдеров в левом верхнем углу. Также в рабочем окне приводится информация о замеряемых в текущем расположении значений RSSI от всех имеющихся базовых станций (рис. 9).

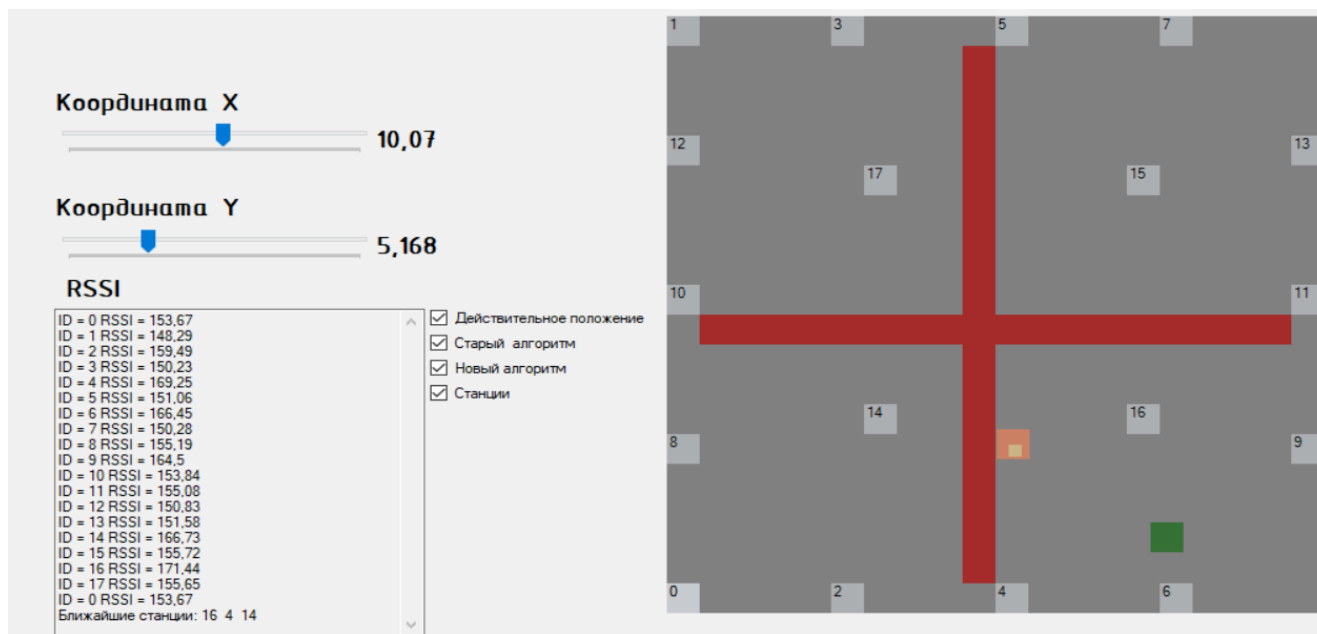


Рис. 10. Пример некорректного определения местоположения старым алгоритмом

При каждом изменении координат алгоритм рассчитывает расстояние до каждой базовой станции, а также определяет наличие препятствия на линии прямой видимости между позиционируемым объектом и конкретной станцией. На основе данных о дистанции и о наличии на пути сигнала препятствий рассчитывается RSSI сигнала от каждой имеющейся в рабочем пространстве станции. Далее на основе стандартного алгоритма трилатерации и разработанного алгоритма трилатерации, учитывающего наличие заранее известных препятствий, происходит расчет двух версий координат позиционируемого объекта.

Согласно логике математической модели, для определения наличия препятствий между позиционируемым объектом и каждой из станций система определяет от какой из четырех (14, 15, 16, 17) центральных (они же опорные) станций сигнал имеет наибольшее, в сравнении с остальными тремя, значение. Каждому из четырех номеров центральных станций соответствует группа станций, которые с высокой вероятностью находятся в зоне прямой видимости при условии, что конкретная центральная станция является самой близкой из опорных. Предполагается что размещение и выбор опорных станций, а также определение для них групп станций прямой видимости происходит индивидуально для каждого варианта размещения препятствий.

В случае, когда между объектом и учитываемыми в расчете положения тремя станциями с наибольшим RSSI отсутствуют препятствия, оба

алгоритма выдают сходные, близкие к реальному положению результаты. Однако, если хотя бы одна из станций находится через препятствие, то результат, высчитываемый первым алгоритмом, является некорректным, в то время как разработанный алгоритм работает верно. Пример такой ситуации приведен на рис. 10.

Тремя станциями с наибольшим RSSI, по которым происходит расчет искомых координат в данном случае являются станции с номерами 16, 4 и 14. При этом станция 14 находится за препятствием. Первый алгоритм определяет координаты объекта, не учитывая подавления сигнала от 14 станции при прохождении сквозь препятствие, следовательно, рассчитанная дистанция от положения объекта до станции оказывается сильно завышена.

Заключение

Корректное использование обычного алгоритма трилатерации на отображенной графическим интерфейсом карте возможно только при условии добавления большего количества базовых станций для избегания ситуаций, в которых обычный алгоритм трилатерации выдает некорректный результат. Таким образом, алгоритм позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности, учитывающий препятствия позволяет использовать меньшее количество базовых станций, что выгоднее как с экономической точки зрения при монтаже системы, так и с точки зрения общей отказоустойчивости всей системы.

Литература

1. An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion: An experimental study / J. Röbesaat et al. // *Sensors*, 2017. – Т. 17. – № 5. – С. 951.
2. Development of self-localizer using collaboration of trilateration and triangulation / B. Lee et al. // 2014 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). – IEEE, 2014. – С. 729 – 733.
3. Human counting and indoor positioning system using wifi technology / A. Zourmand et al. // 2018 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). – IEEE, 2018. – С. 142 – 147.
4. Botta M., Simek M. Adaptive distance estimation based on RSSI in 802.15. 4 network // *Radioengineering*, 2013. – Т. 22. – № 4. – С. 1162 – 1168.
5. Хмелев И. А. Обзор моделей распространения радиосигналов в помещениях // Новые информационные технологии в научных исследованиях: Материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина, 2019. – С. 99 – 101.
6. Zheng W. et al. Design of indoor object searching and positioning system based on ibeacon // 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – IEEE, 2020. – С. 1 – 5.
7. Андреев Р. А., Остроумов С. И., Федоров А. С. Методы позиционирования в сетях Wi-Fi // Экономика и качество систем связи, 2021. – № 3 (21). – С. 50 – 63.
8. Метод позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей / Астафьев А. В. и др. // Компьютерная оптика, 2021. – Т. 45. – № 2. – С. 277 – 285.

Поступила в редакцию 01.02.2023

Михаил Николаевич Крижановский, ассистент кафедры РЭСК, т. +7 (499) 600-80-80 (доб. 20532), e-mail: mihakri007@mail.ru. (МИРЭА – Российский технологический университет).

MODELING OF THE ALGORITHM FOR TAKING INTO ACCOUNT OBSTACLES IN THE CALCULATION OF LOCATION IN SHORT-RANGE POSITIONING SYSTEMS

M. N. Krizhanovskiy

The purpose of the article is to develop and conduct modeling of an algorithm for taking into account obstacles when calculating location in short-range positioning systems. As well as consideration of existing algorithmic approaches to determining the coordinates of the positioned device in the local positioning system. As a result of the work, a mathematical model with a graphical interface was developed, demonstrating the results of work on determining the coordinates of the positioned object for the generally accepted algorithm and the results for the algorithm developed when writing the article. During the simulation, it was found out that the developed algorithm gives more accurate results of calculating the coordinates of the positioned device.

Keywords: local positioning, RSSI, base station, coverage area, trilateration.

References

1. An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion: An experimental study / J. Röbesaat et al. // *Sensors*, 2017. – Т. 17. – № 5. – P. 951.
2. Development of self-localizer using collaboration of trilateration and triangulation / B. Lee et al. // 2014 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). – IEEE, 2014. – P. 729 – 733.
3. Human counting and indoor positioning system using wifi technology / Zourmand A. et al. // 2018 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). – IEEE, 2018. – P. 142 – 147.
4. Botta M., Simek M. Adaptive distance estimation based on RSSI in 802.15. 4 network // *Radioengineering*, 2013. – Т. 22. – № 4. – P. 1162 – 1168.
5. Hmelev I. A. Obzor modelej rasprostraneniya radiosignalov v pomeshcheniyah // Novye informacionnye tekhnologii v nauchnyh issledovaniyah: Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference of students, young scientists and specialists. Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, 2019. – P. 99 – 101.
6. Design of indoor object searching and positioning system based on ibeacon / W. Zheng et al. // 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – IEEE, 2020. – P. 1 – 5.
7. Andreev R. A., Ostroumov S. I., Fedorov A. S. Metody pozicionirovaniya v setyah Wi-Fi // *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2021. – № 3 (21). – P. 50 – 63.

8. Metod pozicionirovaniya mobil'nogo ustrojstva s ispol'zovaniem sensornoj seti BLE-mayakov, approksimacii znachenij urovnej signalov RSSI i iskusstvennyh neyronnyh setej / A. V. Astaf'ev i dr. // Komp'yuternaya optika, 2021. – T. 45. – № 2. – P. 277 – 285.

*Mikhail Nikolaevich Krizhanovsky, Assistant of the Department of RSC,
tel. +7 (499) 600-80-80 (add 20532), e-mail: mihakri007@mail.ru.
(MIREA – Russian Technological University)*