

УДК 527.62

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-68-75>

EDN LSCIAO



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разбиение множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы

М.Н. Крижановский [®],
О.В. Тихонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: mihakri007@mail.ru

Резюме

Цели. Актуальной проблемой систем локального позиционирования при отсутствии доступа к глобальным навигационным спутниковым системам является низкая точность позиционирования, связанная, как правило, с неравномерным покрытием рабочей зоны в связи с ее геометрическими особенностями или наличием в ее пределах массивных препятствий и стен. Обычно эта проблема решается путем размещения в рабочей зоне избыточного числа базовых станций системы позиционирования. Подобный подход порождает высокую стоимость таких систем, что в свою очередь препятствует их распространению. Поэтому исследования и разработки, направленные на повышение точности локальных систем позиционирования при использовании минимального числа станций, имеют большую актуальность. Ранее автором был предложен метод повышения точности локального позиционирования путем учета препятствий, известных на этапе проектирования системы. Учет таких препятствий при расчете местоположения реализуется за счет механизма предварительного разбиения радиомаяков на группы и выделения опорных станций этих групп среди базовых станций. Целью работы является усовершенствование этого алгоритма за счет автоматизации этапа подготовки информации о группировке станций.

Методы. Использован метод компьютерного моделирования для подтверждения работоспособности алгоритма разбиения станций системы позиционирования на пересекающиеся группы.

Результаты. Разработаны критерии автогруппировки станций и универсальный алгоритм разбиения станций на группы, позволяющий в автоматизированном режиме подготовить минимально необходимые начальные данные для программы, реализующей алгоритм позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности.

Выводы. Моделирование предложенного алгоритма подтвердило его работоспособность. Полученные результаты могут использоваться как существенное дополнение к предложенному ранее алгоритму учета препятствий при расчете расстояний до базовых станций.

Ключевые слова: локальные системы позиционирования, алгоритм группировки станций, RSSI, трилатерация

• Поступила: 22.12.2023 • Доработана: 15.07.2024 • Принята к опубликованию: 20.11.2024

Для цитирования: Крижановский М.Н., Тихонова О.В. Разбиение множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):68–75. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-68-75>, <https://elibrary.ru/LSCIAO>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Formation of a database of auxiliary information for positioning in an environment with heterogeneous radio transparency

Mikhail N. Krizhanovsky[@],
Olga V. Tikhonova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: mihakri007@mail.ru

Abstract

Objectives. A pressing problem for indoor positioning systems in the absence of access to global navigation satellite systems is low positioning accuracy. This is usually associated with uneven coverage of the work area due to its geometric features or the presence of massive obstacles and walls within its boundaries. This problem is frequently resolved by placing an excessive number of positioning system base stations in the work area. This approach generates a high cost for such systems, which in turn prevents their deployment. Therefore, research and development aimed at improving the accuracy of indoor positioning systems using a minimum number of stations is of great relevance. The author previously proposed a method of increasing the accuracy of indoor positioning by taking into account obstacles known at the design stage of the system. Consideration of such obstacles in calculating the location is achieved through the mechanism of preliminary splitting of radio beacons into groups, and the allocation of reference stations of these groups among the base stations. The aim of the work is to improve this algorithm by automating the stage of preparing information about the grouping of stations.

Methods. A computer simulation method was used, in order to confirm the operability of the algorithm to divide the stations of the positioning system into overlapping groups.

Results. The criteria for automatic station grouping and a universal algorithm for dividing stations into groups were developed, enabling the automated preparation of the minimum necessary initial data for a program implementing an algorithm for positioning in a zone of heterogeneous radio transparency.

Conclusions. Modeling of the proposed algorithm has confirmed its operability. The results obtained can be used as a significant addition to the previously proposed algorithm for taking into account obstacles when calculating distances to base stations.

Keywords: indoor positioning systems, station grouping algorithm, RSSI, trilateration

• Submitted: 22.12.2023 • Revised: 15.07.2024 • Accepted: 20.11.2024

For citation: Krizhanovsky M.N., Tikhonova O.V. Formation of a database of auxiliary information for positioning in an environment with heterogeneous radio transparency. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):68–75. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-68-75>, <https://elibrary.ru/LSCIAO>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Задача позиционирования объектов в замкнутых пространствах стала очень распространенной в связи с набирающей популярность роботизацией различных сфер жизни. Ее решают различными способами, используя разнообразные комбинации комплектующих и алгоритмических решений определения координат. Как правило, такие системы реализуются на базе одного из распространенных интерфейсов беспроводной передачи данных, таких как Wi-Fi [1–3], BLE¹ [4–6], ZigBee [7–9], UWB² [10–14] и других.

В локальном позиционировании проблема повышения точности является наиболее актуальной, подтверждением чему служит тот факт, что именно ей посвящено наибольшее количество публикаций по данной теме. Например, в [15] предлагается увеличение точности за счет приобретения более дорогих компонентов, что часто не является экономически целесообразным для потребителя, а в [16] повышение точности обеспечивается за счет использования сразу двух протоколов (Wi-Fi и BLE) и двух алгоритмов вычисления координат (трилатерация [17] и сопоставление [18]).

Еще одно решение было предложено в работе [19], где рассматривается возможность уменьшения среднего значения погрешности позиционирования за счет учета потерь мощности сигнала при пересечении препятствий, информация о расположении в рабочей зоне которых заранее известна. Предлагается на стадии разработки системы индивидуально подходить к каждому частному случаю рабочей зоны, в которой планируется осуществлять позиционирование каких-либо объектов. Для учета препятствий предлагается заранее, исходя из известных данных о координатах препятствий, все базовые

станции системы, используемые для позиционирования, условно разделить на группы и выделить среди них опорные. Деление на группы проводится по принципу нахождения группы по одну сторону от препятствий. Опорная станция выделяется исходя из непосредственной ее близости к геометрическому центру области, занимаемой конкретной группой станций, ограниченной не обязательно замкнутым контуром препятствий. Позиционируемое устройство, согласно предлагаемому в статье алгоритму, вначале сравнивает уровни сигналов от опорных станций различных групп. После определения наиболее сильного сигнала при расчете дистанций на основании измерения показателя уровня принимаемого сигнала (англ. RSSI – received signal strength indicator) позиционируемое устройство сможет принять решение о том, что все станции, принадлежащие к группе, от опорной станции которой исходит самый сильный сигнал, находятся по одну сторону от препятствий с объектом. Таким образом, расчет расстояния до этих станций осуществляется как до находящихся в прямой видимости.

Дистанция до находящихся в прямой видимости станций по измеренному значению RSSI рассчитывается согласно соотношению:

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

где d_0 – калибровочное расстояние, составляющее, как правило, 1 м; $P_r(d_0)$ – величина RSSI, определяемая приемником на калибровочном расстоянии; $P_r(d)$ – величина RSSI, определяемая приемником при измерении; d – измеряемое расстояние; n – коэффициент потери мощности сигнала, составляющий для воздуха от 2 до 4 в зависимости от наличия препятствий

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

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \text{ дБм},$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10n}} \text{ м}.$$

¹ Bluetooth low energy – технология Bluetooth с низким энергопотреблением. [Bluetooth low energy – Bluetooth technology with low power consumption.]

² Ultra-wide band – беспроводная технология связи на малых расстояниях при низких затратах энергии, использующая в качестве несущей сверхширокополосные сигналы с крайне низкой спектральной плотностью мощности. [Ultra-wide band – a short-range, low-power wireless communication technology that uses ultra-wideband signals with extremely low power spectral density as a carrier.]

Для станций, относящихся к другим группам, дистанцию от объекта необходимо рассчитывать в соответствии с математической моделью Мотли – Кинана [20]. Тогда принимаемая мощность и дистанция до источника сигнала будут вычисляться по следующим формулам:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - k_W P_W - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \text{ дБм,}$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{P_r(d_0) - k_W P_W - P_r(d)}{10n}} \text{ м,}$$

где k_W – количество пройденных однотипных препятствий (стен), P_W – потеря мощности сигнала при прохождении через однотипное препятствие (стену).

Моделирование, проведенное в [19], подтвердило значительное улучшение точности позиционирования методом трилатерации. Стоит отметить, что разбиение на группы и выделение опорных станций проводилось «вручную» по усмотрению разработчика.

Целью данной статьи является усовершенствование предложенного в [19] алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности за счет автоматизации процесса разбиения базовых станций на группы, выделения опорных станций и введения дополнительных параметров для реализации этих действий. Также ставится задача разрешить возможные неоднозначности при вынесении решения о прямой видимости со станциями, возникающие при нахождении объекта на границе двух групп станций.

КРИТЕРИИ ГРУППИРОВКИ СТАНЦИЙ

Критерии для вынесения решения об объединении нескольких станций в одну группу должны обеспечивать формирование групп, состоящих из станций, находящихся в области, образующей выпуклый многоугольник, не содержащий внутри себя препятствий, таким образом, чтобы находящийся в области, занимаемой конкретной группой станций, позиционируемый объект имел взаимную прямую видимость со всеми станциями этой группы. Если разбить пространство на непересекающиеся секторы, занимаемые группами, как на рис. 1, то при использовании описанного в [19] способа определения прямой видимости исходя из принадлежности станций к группе, от опорной станции которой принимается сигнал наибольшей амплитуды, возможны случаи некорректного определения прямой видимости при нахождении объекта на границах таких областей.

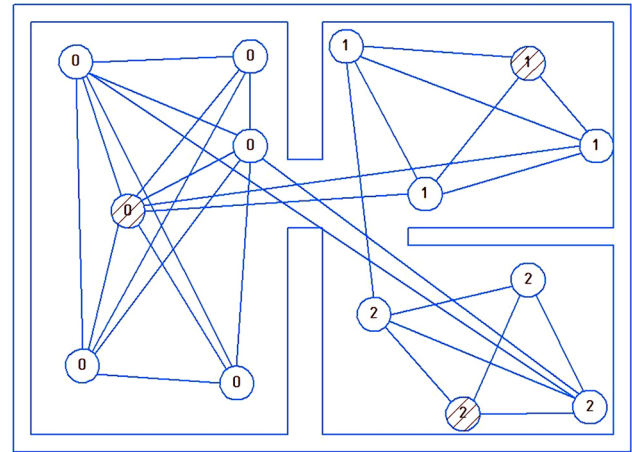


Рис. 1. Пример карты рабочей зоны со станциями, разбитыми на группы: заштрихованные станции являются опорными; станции, соединенные линиями, находятся в прямой видимости

Причиной этого является то, что среди станций, от которых на объект поступают самые сильные сигналы и которые участвуют в расчете координат, могут оказаться станции из группы, относительно которых будет принято некорректное решение об отсутствии прямой видимости. Пример такой ситуации приведен на рис. 2, где позиционируемый объект, находящийся между двумя группами станций, обозначен как ПО.

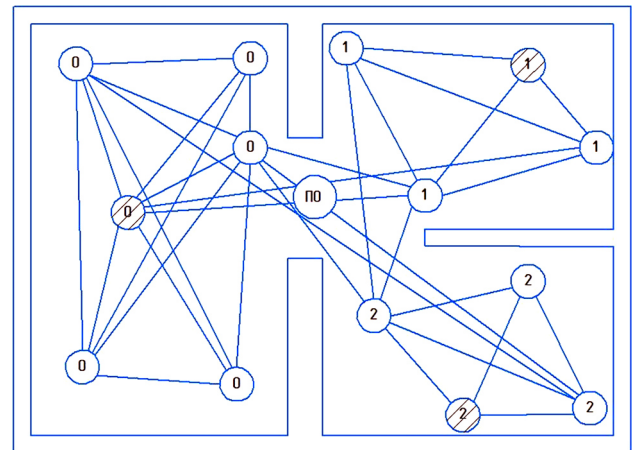


Рис. 2. Пример неоднозначности в определении прямой видимости со станциями

На рис. 2 видно, что ближайшей опорной станцией является станция группы 0, но при этом тремя ближайшими являются станции из трех разных групп.

В такой ситуации дальность от некоторых учитываемых в расчете станций будет рассчитываться неверно, что приведет к существенным ошибкам в позиционировании. Реализация пересекающихся групп позволит устранить эту проблему, т.к. исключит саму возможность пограничного состояния.

Например, в ситуации, представленной на рис. 3, данной ошибки в позиционировании не будет. На схеме появляется дополнительная группа «3» (обозначение «3» отмечено рядом со станциями, входящими в эту группу). Данная группа включает в себя граничные станции из трех других групп, за счет чего и устраняется неоднозначность определения станций, с которыми есть прямая видимость.

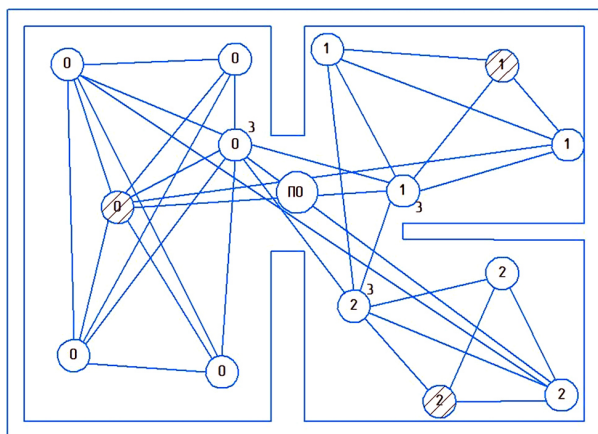


Рис. 3. Пример устранения неоднозначности в определении прямой видимости со станциями

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что соблюдение условия нахождения групп станций внутри областей, не имеющих внутри своих границ препятствий, обеспечивается при взаимной прямой видимости станций. Также, чтобы каждая группа была в состоянии самостоятельно обеспечивать позиционирование объекта, в ней должно быть не менее трех станций (для случая двумерного позиционирования). Две станции, находящиеся в прямой видимости, считаться группой не могут, т.к. по сигналам от двух станций не всегда возможно определить однозначно местоположение объекта.

Что касается создания условий для формирования проектируемым алгоритмом пересекающихся групп, было экспериментально выяснено, что, если заложить в алгоритм ограничение на максимальную дальность друг от друга входящих в группы станций, то при варьировании этого ограничения можно подобрать его оптимальное значение, которое будет соответствовать условиям для автогруппировки станций с созданием пересекающихся групп. Это ограничение обеспечит отсутствие условий для формирования излишне протяженных групп, например, как на рис. 4. Группа 3 в данном случае имеет большую протяженность, что повышает риск неверного определения диапазона станций, находящихся в прямой видимости от объекта позиционирования.

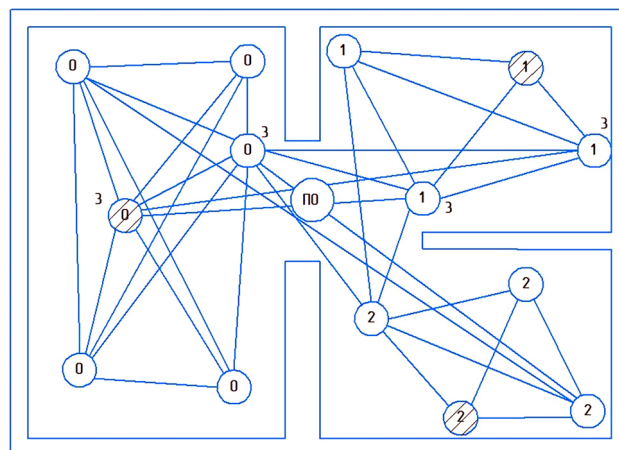


Рис. 4. Пример возможной излишне протяженной группы – группа 3

Таким образом, можно выделить три принципа, которые должны быть заложены в алгоритм автоматической группировки станций:

- 1) взаимная прямая видимость всех станций, входящих в группу;
- 2) группа не может содержать меньше трех станций;
- 3) станции в группе не должны находиться друг от друга на расстоянии, превышающем заданную максимальную дальность.

АЛГОРИТМ АВТОГРУППИРОВКИ СТАНЦИЙ ПО ПРЕДЛОЖЕННЫМ ПРИНЦИПАМ

На базе предложенных принципов был разработан алгоритм автогруппировки базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы. Разработанный алгоритм формирует набор групп станций, а также выделяет в каждой группе опорную станцию. Отдельно стоит отметить, что данный алгоритм подразумевает наличие картографической информации о расположении препятствий в потенциальной рабочей зоне позиционирования.

Алгоритм автогруппировки станций разбит на следующие этапы:

1. Расчет таблицы наличия и отсутствия прямой видимости между станциями.
2. Формирование двумерного массива, каждая строка которого является списком, ранжированным по дальности от станций с идентификатором, соответствующим номеру столбца, до станции, чей идентификатор соответствует номеру строки двумерного массива.
3. Исключение из каждой строки двумерного массива станций с отсутствующей прямой видимостью относительно станции, чей идентификатор равен номеру строки.

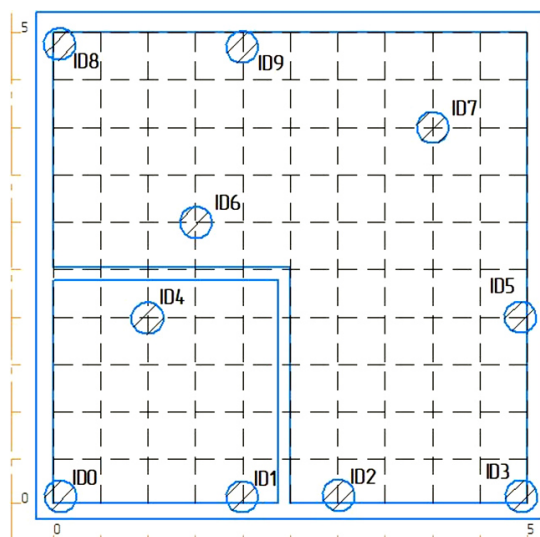


Рис. 5. Карта рабочей зоны для иллюстрации принципов работы программы

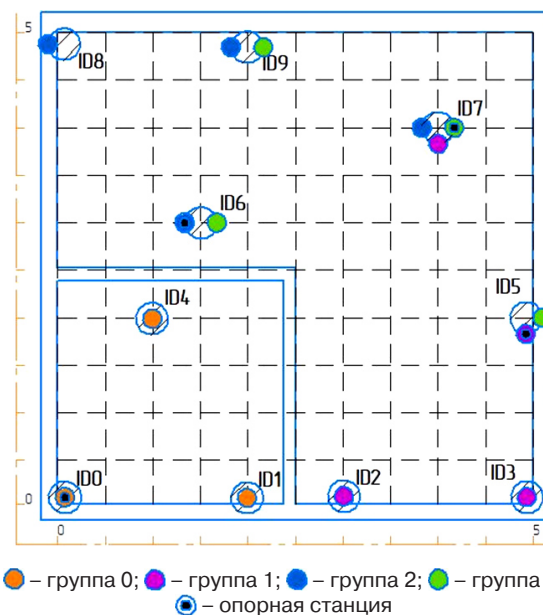


Рис. 6. Карта рабочей зоны с результатами проведенной группировки

4. Исключение из каждой строки двумерного массива станций с дистанцией, превышающей заданное разработчиком ограничение по дальности до станции, чей идентификатор равен номеру строки.
5. Исключение строк, содержащих менее трех станций.
6. Исключение повторяющихся строк.
7. Определение совпадений между строками, удаление строк с наборами станций, имеющимися в составах других строк и формирование групп.

Для иллюстрации работы алгоритма была взята карта помещения $5 \times 5 \text{ м}^2$, имеющего внутри две дополнительные перегородки, отделяющие часть комнаты. Карта с расставленными станциями и отмеченными идентификаторами станций приведена на рис. 5.

В результате работы программы, реализующей предложенный алгоритм, была проведена автоматическая группировка. На рис. 6 приведена карта рабочей зоны с отметками на станциях о принадлежности группе, полученными в результате выполнения алгоритма. Помимо этого, в каждой группе была выделена опорная станция (на рис. 6 такие станции обозначены черной точкой).

Как видно, на рис. 6 исключена возможность неоднозначности определения станций прямой видимости на границе групп 1 и 2 за счет пересечения групп, а также за счет создания промежуточной группы 3.

Таким образом, алгоритм автоматической группировки станций в условиях рабочей зоны

с препятствиями, логически дополняет и совершенствует алгоритм, приведенный в [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложены принципы автогруппировки станций и универсальный алгоритм разбиения станций на группы, позволяющий в автоматизированном режиме подготовить минимально необходимые начальные данные для работы приведенной в статье программы для реализации алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности. В ходе разработки программы автогруппировки путем внедрения метода взаимного перекрытия групп по станциям был дополнен предложенный ранее алгоритм, что позволило решить проблему неоднозначного определения прямой видимости между станциями на границах групп. В дальнейших работах планируется дополнить данный комплекс программных решений интеллектуальным алгоритмом оптимальной расстановки станций системы локального позиционирования в помещениях. Это даст возможность создать полный программный комплекс, позволяющий производить предварительную расстановку и группировку станций в проектируемой системе локального позиционирования.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в научную работу.

Authors' contribution

All the authors have equally contributed to the research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ninh D.B., He J., Trung V.T., Huy D.P. An effective random statistical method for Indoor Positioning System using WiFi fingerprinting. *Future Gener. Comput. Syst.* 2020;109:238–248. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.043>
2. Qin F., Zuo T., Wang X. Ccpas: Wifi fingerprint indoor positioning system based on CDAE-CNN. *Sensors*. 2021;21(4):1114. <https://doi.org/10.3390/s21041114>
3. Bellavista-Parent V., Torres-Sospedra J., Perez-Navarro A. New trends in indoor positioning based on WiFi and machine learning: A systematic review. In: *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE; 2021. <https://doi.org/10.1109/IPIN51156.2021.9662521>
4. Bai L., Ciravegna F., Bond R., Mulvenna M. A low cost indoor positioning system using bluetooth low energy. *IEEE Access*. 2020;8:136858–136871. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012342>
5. Essa E., Abdullah B.A., Wahba A. Improve performance of indoor positioning system using BLE. In: *2019 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. IEEE; 2019. P. 234–237. <https://doi.org/10.1109/ICCES48960.2019.9068142>
6. Spachos P., Plataniotis K.N. BLE beacons for indoor positioning at an interactive IoT-based smart museum. *IEEE Syst. J.* 2020;14(3):3483–3493. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2969088>
7. Dong Z.Y., Xu W.M., Zhuang H. Research on ZigBee indoor technology positioning based on RSSI. *Procedia Comput. Sci.* 2019;154:424–429. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.060>
8. Ainul R.D. An enhanced trilateration algorithm for indoor RSSI based positioning system using ZigBee protocol. *J. INFOTEL (Informatics, Telecommunication, and Electronics)*. 2022;14(4):301–306. <https://doi.org/10.20895/infotel.v14i4.822>
9. Cheng C.H., Syu S.J. Improving area positioning in ZigBee sensor networks using neural network algorithm. *Microsyst. Technol.* 2021;27(1):1419–1428. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04309-2>
10. Tian D., Xiang Q. Research on indoor positioning system based on UWB technology. In: *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. IEEE; 2020. P. 662–665. <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141707>
11. Li B., Zhao K., Sandoval E.B. A UWB-based indoor positioning system employing neural networks. *J. Geovis. Spat. Anal.* 2020;4(2):18. <https://doi.org/10.1007/s41651-020-00059-2>
12. Che F., Ahmed Q.Z., Fontaine J., et al. Feature-based generalized Gaussian distribution method for NLoS detection in ultra-wideband (UWB) indoor positioning system. *IEEE Sensors J.* 2022;22(19):18726–18739. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3198680>
13. Lopes S.I., Vieira J.M.N., Reis J., Albuquerque D., Carvalho N.B. Accurate smartphone indoor positioning using a WSN infrastructure and non-invasive audio for TDoA estimation. *Pervasive and Mobile Computing*. 2015;20:29–46. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.09.003>
14. Zourmand A., Sheng N.W., Hing A.L.K., AbdulRehman M. Human Counting and Indoor Positioning System Using WiFi Technology. In: *2018 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2018.8603690>
15. Zhao M., Chang T., Arun A., Ayyalasomayajula R., Zhang C., Bharadia D. ULoc: Low-Power, Scalable and cm-Accurate UWB-Tag Localization and Tracking for Indoor Applications. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2021;5(3):1–31. <https://doi.org/10.1145/3478124>
16. Renault S., Akbar Sheikh-Akbari, Ofogbu E. Low Cost and Energy Efficient Hybrid Wireless Positioning System Using Wi-Fi and Bluetooth Technologies for Wearable Devices. *Preprints*. 2023. 2023092061. <http://doi.org/10.20944/preprints202309.2061.v1>
17. Астафьев А.В., Титов Д.В., Жизняков А.Л., Демидов А.А. Метод позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей. *Компьютерная оптика*. 2021;45(2):277–285. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-826>
[Astafiev A.V., Titov D.V., Zhiznyakov A.L., Demidov A.A. A method for mobile device positioning using a sensor network of BLE beacons, approximation of the RSSI value and artificial neural networks. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2021;45(2):277–285 (in Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-826>]
18. Subedi S., Pyun J.-Y. Practical fingerprinting localization for indoor positioning system by using beacons. *J. Sensors*. 2017;2017:9742170. <https://doi.org/10.1155/2017/9742170>
19. Крижановский М.Н. Моделирование алгоритма учета препятствий при расчете локации в системах ближнего позиционирования. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2023;192(1):14–20. <https://www.elibrary.ru/evdpoc>, URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/192/14-20.pdf>
[Krizhanovskiy M. Modeling of the algorithm for taking into account obstacles in the calculation of location in short-range positioning systems. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM = Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2023;192(1):14–20 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/evdpoc>, URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/192/14-20.pdf>]
20. Obeidat H.A., Khan R., Obeidat O.A., et al. An indoor path loss prediction model using wall correction factors for WLAN and 5G indoor networks. *Radio Science J.* 2018;53(4):544–564. <https://doi.org/10.1002/2018RS006536>

Об авторах

Крижановский Михаил Николаевич, ассистент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: krizhanovskij@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3063-6513, <https://orcid.org/0009-0009-2710-0128>

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, SPIN-код РИНЦ 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

About the authors

Mikhail N. Krizhanovsky, Assistant, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: krizhanovskij@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3063-6513, <https://orcid.org/0009-0009-2710-0128>

Olga V. Tikhonova, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, RSCI SPIN-code 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>