

Прогнозирование местоположения мобильного абонента в сети Wi-Fi

Ю. С. Лизнева, Е. В. Кокорева, А. Е. Костюкович¹

Для позиционирования в сети Wi-Fi наиболее распространён механизм трилатерации, основанный на измерении уровня мощности принимаемого сигнала RSSI и вычислении расстояний от абонентского устройства до видимых точек доступа. Применение этого механизма требует полного представления о конфигурации помещений, количестве и материале препятствий, разделяющих передающую и приёмную антенны, которое невозможно получить из значений RSSI. В данной статье исследуются возможности таксонометрического метода принятия решений для прогнозирования местоположения мобильных объектов в сети Wi-Fi внутри помещений с целью восполнения недостающих данных о параметрах помещений и препятствий, разделяющих точки доступа и мобильные объекты.

Ключевые слова: Wi-Fi, позиционирование, таксонометрический метод, принятие решений, квазирасстояние.

1. Введение

Для реализации системы определения местоположения, в частности, для повышения точности вычисления координат мобильного объекта необходимо тщательное территориально-частотное планирование сети Wi-Fi [1]. На сегодняшний день не имеется методики территориально-частотного планирования локальной беспроводной сети, которая подходила бы для эффективной работы системы определения местоположения, поскольку все существующие методики нацелены на построение сети Wi-Fi, предназначенной для доставки интернет-контента клиентам с заданной пропускной способностью.

Одним из наиболее точных методов определения местоположения мобильного объекта в сети Wi-Fi является метод трилатерации или мультитлатерации [2–6]. Этот метод позволяет по расстояниям от мобильного объекта до каждой из трёх или более точек доступа AP (англ. *Access Point*) вычислять координаты местоположения этого объекта относительно конкретных помещений внутри зданий [7–8].

Расстояния от мобильного объекта до каждой из точек доступа определяются по результатам измерения уровня мощности сигнала на входе приёмного устройства RSSI (англ. *Received Signal Strength Indicator*) и последующего их вычисления с помощью моделей распространения радиоволн внутри помещений [9–12].

Для корректного применения моделей распространения радиоволн требуется полное представление о конфигурации помещений, количестве и материале препятствий, разделяющих передающую и приёмную антенны мобильных устройств и точек доступа. В большинстве случаев это невозможно, и измерение только уровня мощности не позволяет получить эти данные, поскольку множество случайных факторов влияют на уровень RSSI и все полу-

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций в рамках НИОКТР АААА-А20-120070290025-0.

чаемые оценки расстояний и координат объекта имеют статистический (вероятностный) характер [13–14]. Предлагается использовать для позиционирования комбинированную методику, включающую в себя методы интеллектуального анализа данных на карте измерения параметров сигнала и латерации.

Применение статистических или эвристических методов принятия решений в системах позиционирования позволяет частично преодолеть отсутствие необходимой для применения механизма латерации информации о параметрах помещения. Данные методы служат для того, чтобы получить грубую (предварительную) оценку местоположения мобильного клиента относительно каждой из видимых для него точек доступа, чтобы на этапах применения трилатерации можно было подобрать подходящие модели распространения радиоволн внутри помещений, а также параметры, входящие в математические выражения, описывающие эти модели [15].

Перед разработчиками стоит задача выбрать критерий принятия решений, позволяющий получить более достоверную оценку расстояний и местоположения мобильного клиента. В данной статье для получения такой оценки с заданной вероятностью рассмотрено применение *таксонометрического* метода [16–17].

Под термином таксонометрия в рамках данной статьи будем понимать математический метод ранжирования и группировки множества помещений по расстояниям до множества точек доступа в сети Wi-Fi и по уровням мощности радиосигнала RSSI. Таксонометрический метод позволяет ввести понятие квазирасстояний, используемых в качестве весовых коэффициентов при учёте уровней мощности радиосигнала RSSI, например, в центре каждого помещения относительно каждой точки доступа.

Таксонометрический анализ включает в себя совокупность математических методов, предназначенных для формирования относительно отдалённых друг от друга групп объектов, близко расположенных или тесно связанных между собой.

Далее рассматривается применение таксонометрического метода при прогнозировании местоположения точки приёма сигнала на основе экспериментально полученных уровней RSSI для конкретной конфигурации помещений.

2. Формирование матриц, содержащих параметры помещений

Таксонометрический метод опирается на работу с матрицами. В данном случае матрицы будут содержать различные параметры, являющиеся характеристиками зданий и помещений, внутри которых осуществляется процесс позиционирования, например, расстояния между центрами отдельных комнат здания и точками доступа сети Wi-Fi.

На рис. 1 представлен план конкретных помещений и размещения точек доступа, а также предварительно составленные тепловые карты радиопокрытия для этих помещений.

Для каждой комнаты, представленной на рис. 1, по теореме Пифагора рассчитывается расстояние между точками доступа AP и центром соответствующей комнаты:

$$R = \sqrt{(X_c - X_{AP})^2 + (Y_c - Y_{AP})^2}, \quad (1)$$

где X_c, Y_c – координаты центра комнаты, а X_{AP}, Y_{AP} – координаты точки доступа.

В табл. 1 представлены координаты AP. Координаты объекта задаются в метрах и измеряются относительно угла здания, который будем считать началом координат.

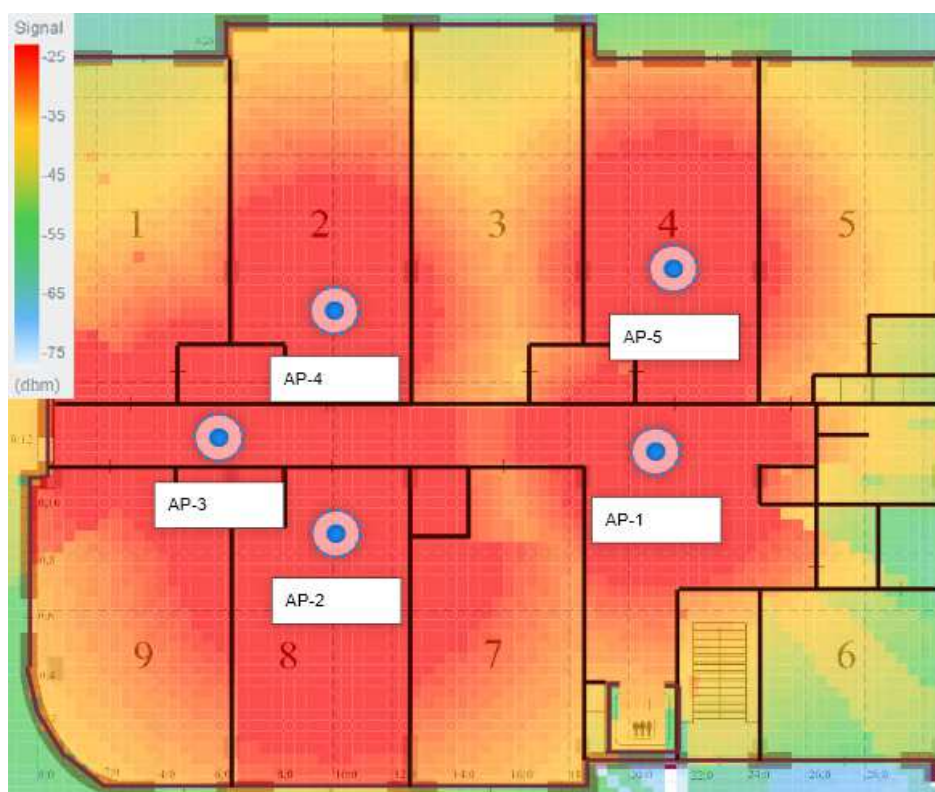


Рис. 1. План помещений и размещения точек доступа

Таблица 1. Координаты точек доступа

AP	X_{AP} , м	Y_{AP} , м
AP ₁	20.0	11.5
AP ₂	9.0	8.0
AP ₃	5.8	12.2
AP ₄	9.0	15.0
AP ₅	22.0	17.5

В табл. 2 приведены координаты центров соответствующих комнат. Координаты также заданы относительно угла здания.

Таблица 2. Координаты центров комнат

№ комнаты \ Координаты	X_C , м	Y_{AP} , м
1	3.6	18.6
2	9.6	18.6
3	15.6	18.6
4	21.6	18.6
5	27.6	18.6
6	27.6	6.0
7	15.6	6.0
8	9.6	6.0
9	3.6	6.0

Табл. 3 содержит результаты вычисления расстояний между точками доступа и центрами помещений с помощью формулы (1).

На основании вычисленных расстояний, представленных в табл. 3, определяются весовые коэффициенты a_{ij} сравнительной значимости сигнала от AP_j в соответствующей комнате, здесь i – номер комнаты, j – номер точки доступа. При этом наименьшему расстоянию между точкой приёма и точкой доступа соответствует значение коэффициента 1, а наибольшему – 5. Полученное распределение весов сведено в табл. 4. В эксперименте были задействованы девять помещений и пять точек доступа.

Таблица 3. Результаты вычисления расстояний между точками доступа и центрами помещений

№ комнаты \ № AP	AP ₁	AP ₂	AP ₃	AP ₄	AP ₅
1	17.9	11.9	6.8	6.5	18.4
2	12.6	10.6	7.4	3.7	12.5
3	8.4	12.5	11.7	7.5	6.5
4	7.3	16.5	17.1	13.1	1.2
5	10.4	21.4	22.7	18.9	5.7
6	9.4	18.7	22.7	20.7	12.8
7	7.0	6.9	11.6	11.2	13.2
8	11.8	2.1	7.3	9.0	16.9
9	17.3	5.8	6.6	10.5	21.7

Таблица 4. Весовые коэффициенты, соответствующие расстояниям от центров комнат до точек доступа

№ комнаты \ № AP	AP ₁	AP ₂	AP ₃	AP ₄	AP ₅
1	4	3	2	1	5
2	5	3	2	1	4
3	3	5	4	2	1
4	2	4	5	3	1
5	2	4	5	3	1
6	1	3	5	4	2
7	2	1	4	3	5
8	4	1	2	3	5
9	4	1	2	3	5

3. Формирование образцовых карт помещений

На данном этапе по результатам экспериментальных данных измерений уровня RSSI необходимо сформировать образцовые карты для указанных на рис. 1 помещений.

В ходе эксперимента было проведено более 500 измерений в центре каждого помещения. Обработка экспериментальных результатов показала, что уровень RSSI, характеризующий радиообстановку помещений, описывается нормальным распределением, поэтому в табл. 5 для описания образцовой карты каждой комнаты достаточно двух параметров выборочной совокупности уровней сигнала:

- среднее арифметическое, или математическое ожидание (МО);
- среднеквадратическое отклонение (СКО).

Результаты расчета, которые можно наблюдать в табл. 5 и на рис. 2, представляют собой радиообразы, характеризующие электромагнитную обстановку в каждой комнате.

Таблица 5. Радиообразы комнат по уровню средней мощности принимаемого сигнала

№ комнаты	Показатель, дБм	AP ₁	AP ₂	AP ₃	AP ₄	AP ₅
1	МО	–70.5	–59.9	–50.6	–51.2	–63.4
	СКО	3.1	3.7	3.8	2.7	3.4
2	МО	–66.9	–51.3	–51.8	–42.0	–56.5
	СКО	3.5	4.4	3.9	4.7	2.9
3	МО	–59.5	–62.2	–59.6	–48.4	–51.8
	СКО	2.9	4.3	3.4	5.7	4.9
4	МО	–52.3	–65.8	–69.0	–57.4	–40.0
	СКО	6.2	3.7	2.1	3.2	2.5
5	МО	–58.4	–74.7	–73.9	–64.9	–50.1
	СКО	3.6	3.3	3.4	4.3	2.6
6	МО	–54.3	–70.2	–75.8	–73.2	–60.6
	СКО	5.1	5.8	2.3	2.8	2.8
7	МО	–55.6	–50.8	–59.4	–57.8	–58.5
	СКО	4.4	4.5	4.3	5.6	3.5
8	МО	–62.6	–39.7	–51.3	–53.9	–68.7
	СКО	3.1	7.5	4.9	5.5	3.1
9	МО	–66.2	–49.1	–48.3	–64.2	–71.8
	СКО	2.8	2.6	4.5	2.8	3.9

4. Тестирование таксонометрического метода

Для тестирования таксонометрического метода были использованы данные об уровнях RSSI, полученные экспериментальным путём в конкретных помещениях здания, изображённого на рис. 1.

На рис. 2 приведена тепловая карта покрытия пяти точек доступа, совмещённая с диаграммами радиообразов помещений, полученными в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Поскольку радиообразы комнат, выведенные из средних значений уровня RSSI относительно каждой из пяти точек доступа (табл. 5, рис. 2), уникальны, существует возможность однозначного определения каждого помещения. Однако, исходя из значений СКО (табл. 5), следует заметить, что нельзя полностью исключить ошибочное определение помещения.

Результаты тестирования метода в описанных помещениях приведены ниже.

4.1. Этапы реализации таксонометрического метода

На сервер определения местоположения мобильным клиентом был отправлен набор (вектор) измерений RSSI сигналов, полученных от всех видимых устройством точек доступа:

$$x_{\mathcal{Q}} = \begin{bmatrix} x_{AP_1} & x_{AP_2} & x_{AP_3} & x_{AP_4} & x_{AP_5} \end{bmatrix}.$$

Полученные сервером значения должны быть нормализованы относительно математического ожидания и среднеквадратического отклонения RSSI из табл. 5, вычисленных для каждой комнаты с использованием формулы:

$$z_{ij} = \frac{x_{APj} - \bar{X}_{ij}}{\sigma_{ij}}, \quad (2)$$

где $\bar{X}_{ij}$ – среднее арифметическое RSSI в i -й комнате от j -й AP;

σ_{ij} – среднеквадратическое отклонение.

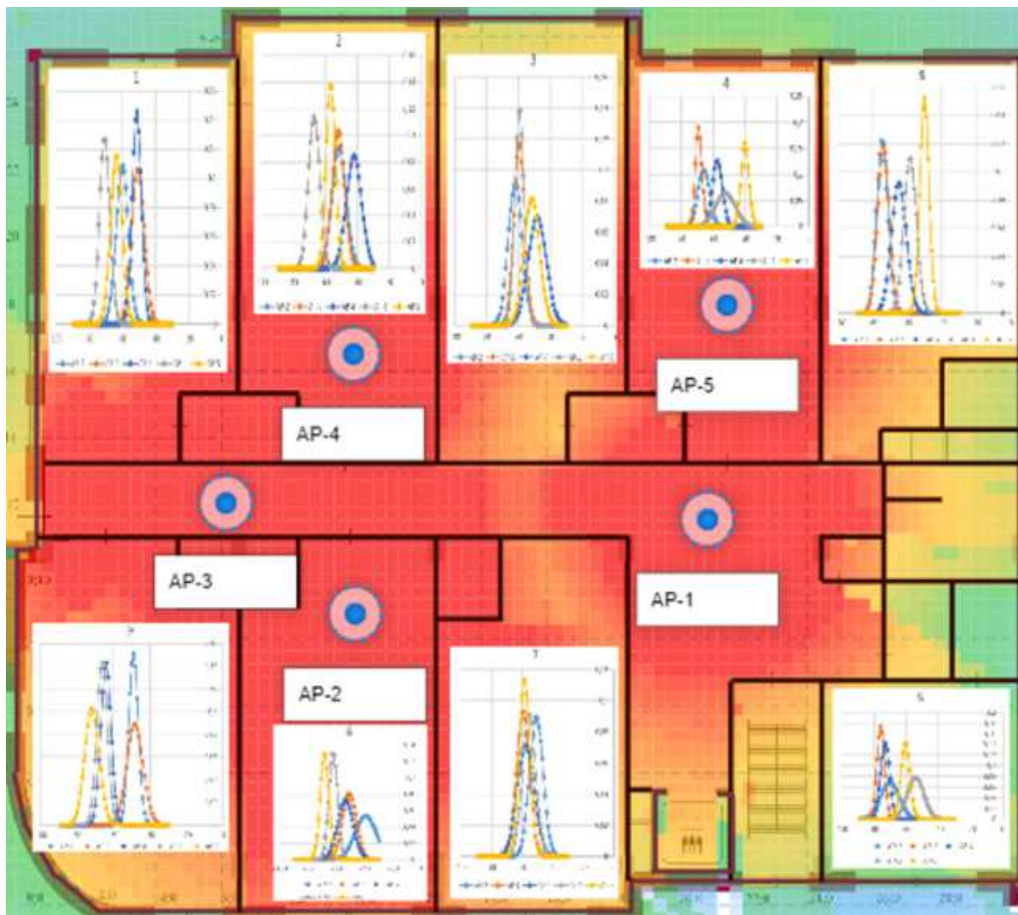


Рис. 2. Радиообразы помещений для пяти точек доступа

Проведение процедуры нормализации исключает влияние абсолютных величин и вариации значений самих показателей.

Из нормализованной матрицы производится формирование вектора эталонных или ближайших точек доступа, определённых по наименьшему нормированному значению в каждой строке, которое соответствует определённой комнате.

Вектор ближайших AP выглядит следующим образом:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix}.$$

Все полученные результаты сводятся в таблицу, подобную табл. 6.

Таблица 6. Нормализованная матрица и вектор ближайших AP

№ комнаты \ № AP	AP ₁	AP ₂	AP _j	AP _n	Z
1	z ₁₁	z ₁₂	...	z _{1n}	Z ₁
2	z ₂₁	z ₂₂		z _{2n}	Z ₂
i	...			...	...
4	z _{k1}	z _{k2}		z _{kn}	Z _k

Теоретическое определение комнаты, в которой находится мобильный абонент, осуществляется на основе расчёта квазирасстояний (рейтинговых значений комнаты относительно точки приёма сигнала) R_i по формуле:

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_{ij}, \quad (3)$$

где

$$r_{ij} = a_{ij} \cdot (z_{ij} - Z_j)^2. \quad (4)$$

В формулах (3)–(4) r_{ij} – квазирасстояния относительно j -х точек доступа, а a_{ij} – весовые коэффициенты из табл. 4.

Полученное в результате наименьшее квазирасстояние R_i должно соответствовать местонахождению искомого объекта.

4.2. Результаты применения таксонометрического метода

Чтобы оценить достоверность результатов таксонометрического анализа, рассмотрены конкретные примеры статистической обработки параметров, измеренных в некоторой точке рассмотренного выше здания.

Например, сервером определения местоположения получен вектор измерений RSSI:

$$x_{\mathcal{Z}} = [-68 \quad -52 \quad -58 \quad -45 \quad -55].$$

Известно, что $x_{\mathcal{Z}}$ – это результат измерений, произведённых в комнате № 2.

Элементы вектора нормируются относительно математических ожиданий и средних квадратических отклонений уровней мощности сигнала в каждой комнате, взятых из табл. 5.

Нормализованная матрица помещается в табл. 7, в последнем столбце которой располагается вектор эталонных AP, соответствующих минимальным значениям строк данной матрицы.

По формулам (3)–(4) рассчитываются квазирасстояния для нормализованных уровней сигнала от каждой точки доступа и общие квазирасстояния по всем комнатам. Результаты расчета сведены в табл. 8.

Анализ последней колонки табл. 8 показывает, что минимальное значение вектора квазирасстояний более всего соответствует комнате №2.

Таблица 7. Нормированные значения текущих измерений от всех точек доступа

№ комнаты \ AP	AP ₁	AP ₂	AP ₃	AP ₄	AP ₅	Z
1	0.8	2.2	-2.0	2.3	2.5	-2.0
2	-0.3	-0.2	-1.6	-0.6	0.5	-1.6
3	-3.0	2.3	0.5	0.6	-0.7	-3.0
4	-2.5	3.7	5.3	3.9	-6.0	-6.0
5	-2.6	7.0	4.7	4.6	-1.9	-2.6
6	-2.7	3.1	7.8	10.0	2.0	-2.7
7	-2.8	-0.3	0.3	2.3	1.0	-2.8
8	-1.8	-1.6	-1.4	1.6	4.4	-1.8
9	-0.6	-1.1	-2.2	6.9	4.3	-2.2

Таблица 8. Вычисленные квазирасстояния
(рейтинговые значения относительно AP и точки приёма сигнала)

№ комнаты \ № AP	r_{AP_1}	r_{AP_2}	r_{AP_3}	r_{AP_4}	r_{AP_5}	R_i
1	30.8	51.6	0.0	18.1	97.9	198.4
2	8.3	6.1	0.0	0.9	18.2	33.6
3	0.0	142.7	48.3	25.8	5.5	222.2
4	24.2	381.6	635.6	297.4	0.0	1338.9
5	0.0	370.4	270.2	157.7	0.6	798.9
6	0.0	102.0	548.3	647.7	44.3	1342.3
7	0.0	6.6	40.5	79.0	73.5	199.5
8	0.0	0.0	0.3	34.5	193.2	227.9
9	9.2	1.1	0.0	246.5	209.2	466.0

Так как исходные данные во время проведения эксперимента поступили из 2-й комнаты и решающее устройство также определило 2-ю комнату, то можно считать, что комната определена верно.

Теперь, зная, в каком помещении находится мобильный абонент, а также количество и материал перегородок, разделяющих приёмную и передающую антенны, можно подобрать параметры моделей распространения радиоволн таким образом, чтобы с помощью механизма латерации определить точные координаты объекта.

Аналогичным образом была проведена оценка работы таксонометрического метода для различных помещений. Результаты экспериментов с применением таксонометрического метода при прогнозировании местоположения мобильного клиента до уровня помещения показали, что более чем в 80 % случаев помещение было определено верно, что позволило корректно применять модели распространения радиоволн, соответствующие конфигурации препятствий между мобильным объектом и точками доступа при вычислении расстояний, используемых в методе трилатерации.

Однако приблизительно 20 % помещений были определены с ошибкой, особенно в тех местах, которых может достигать радиосигнал не более чем от двух AP, что можно объяс-

нить несовершенным территориально-частотным планированием при размещении точек доступа.

5. Заключение

В ходе экспериментальных и аналитических исследований применения таксонометрического метода принятия решений было установлено, что данный метод дает положительные результаты при обоснованном радиопланировании сети Wi-Fi.

Метод предоставляет предварительную грубую оценку местоположения мобильного клиента, которая в дальнейшем будет использоваться для определения его точных координат с помощью механизма трилатерации на основе измерения уровня принимаемого сигнала RSSI.

Таким образом, имея недостаточные знания о предмете исследований, в нашем случае – это местонахождение мобильного абонента внутри помещения со сложной конфигурацией, можно воспользоваться таксонометрическим методом принятия решений, который продемонстрировал приемлемые результаты с точки зрения достоверности, адаптивности и вычислительной сложности.

Выражение благодарности

Авторы выражают благодарность аспирантам Дощинскому И. В., Брагину А. С., Плужникову А. Ф и магистранту Шурьгиной К. И. за помощь в проведении и статистической обработке измерений, а также за разработку и тестирование необходимого программного обеспечения.

Литература

1. *Krzysztofik W. J.* Radio Network Planning and Propagation Models for Urban and Indoor Wireless Communication Networks. Wroclaw, Poland: IntechOpen, 2018. P. 77–114.
2. Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide. San Jose, CA. Americas Headquarters Cisco Systems, Inc. 2008. 206 p.
3. *Bensky A.* Wireless Positioning Technologies and Applications. 2nd Ed. Boston. London: Artech House, 2016. 450 p.
4. *Кокорева Е. В., Костюкович А. Е., Дощинский И. В.* Оценка погрешности измерений местонахождения абонента в сети Wi-Fi // Программные системы и вычислительные методы. 2019. № 4. С. 30–38.
5. *Kokoreva E. V., Kostyukovich A. E., Doshchinsky I. V.* Analysis of the error in determining the location inside the logistics warehouse complexes // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Verlag, TransSiberia, 2020. Vol. II. 106. P. 1086–1094.
6. *Mukhopadhyay A., Mallissery A.* TELIL: A Trilateration and Edge Learning based Indoor Localization Technique for Emergency Scenarios // Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2018. P. 6–10.
7. *Kokoreva, E. V., Kostyukovich, A. E., Doshchinsky, I. V., Shurygina, K. I.* A Combined Location Method with Indoor Signal Strength Measurement // Proc. IEEE 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), 2021.
8. *Kostyukovich A. E., Shurygina K. I., Kokoreva E. V., Doshchinsky I. V.* Locating an Object Inside a Room under Line-of-Sight Conditions Between Transmitter and Receiver // Proc. IEEE 15th International Conference of Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2021. P. 290–294.
9. *Andrade C. B., Hoefel R. P. F.* IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models [Электронный ресурс] // Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/221279961_IEEE_

- 80211_WLANs_A_comparison_on_indoor_coverage_models/download (accessed on 10.07.2022).
10. *Saunders S. R.* Antennas and propagation for wireless communication systems. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 554 p.
 11. *Seidel S. H., Rappaport T. S.* 914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings / IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1992. V. 40, № 2. P. 207–217.
 12. *Seybold J. S.* Introduction to RF Propagation // Hoboken, New Jersey: Wiley–Interscience, 2005. 349 p.
 13. *Kokoreva E., Kostyukovich A., Shurygina K., Doshchinsky I.* Experimental Study of the Positioning System in the Centralized Wi-Fi Network // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Springer, 2022. V. 107. P. 346–357.
 14. *Kokoreva E. V., Shurygina K. I.* An Assessment of the Local Positioning System Effectiveness // Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, 2022. V. 246. P. 436–443.
 15. *Roos T., Myllymäki P., Tirri H., Misikangas P.* A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation // International Journal of Wireless Information Networks. 2002. № 9 (3). P. 155–164.
 16. *Лапченко Д. А.* Теория принятия решений. Минск: БНТУ, 2021. 62 с.
 17. *Решетняк Е. И., Лободин Р. О.* Методы многомерного сравнительного анализа при оценке конкурентоспособности предприятия // Бізнесінформ. 2016. № 9. С. 100–105.

*Статья поступила в редакцию 13.08.2022;
переработанный вариант – 31.08.2022.*

Лизнева Юлия Сергеевна

к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных систем и сетей СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-241, e-mail: ktm5r@rambler.ru.

Кокорева Елена Викторовна

к.т.н., доцент кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-362, e-mail: kokoreva@sibguti.ru.

Костюкович Анатолий Егорович

к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных систем и сетей СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-379, e-mail: aek1954@gmail.com.

Predicting the location of the mobile subscriber in the Wi-Fi network

Lizneva Julia S.

Candidate of technical sciences, Assistant professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), ktm5r@rambler.ru.

Kokoreva Elena V.

Candidate of technical sciences, Assistant professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), kokoreva@sibguti.ru.

Kostyukovich Anatoliy E.

Candidate of technical sciences, Assistant professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), aek1954@gmail.com.

A method of trilateration based on measuring the received signal's level RSSI and calculating the distance from the subscriber's device to the visible access points is the most common locating mechanism in the Wi-Fi network. The application of this mechanism requires a complete understanding of the premises configuration, the number and material of obstacles separating the transmitting and receiving antennas which is not possible to obtain from RSSI. In this paper, the capabilities of the taxonomic decision-making method for predicting the location of mobile objects in an indoor Wi-Fi network in order to fill in the missing data on the parameters of the premises and obstacles separating access points and mobile objects are considered.

Keywords: Wi-Fi, positioning, taxonomic method, decision-making, quasi-distance.

References

1. Krzysztofik W. J. Radio Network Planning and Propagation Models for Urban and Indoor Wireless Communication Networks. *Antennas and Wave Propagation*, 2018, pp. 77–114.
2. *Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide*. San Jose, CA, Americas Headquarters Cisco Systems, Inc., 2008, 206 p.
3. Bensky A., *Wireless Positioning Technologies and Applications*. Boston, London, Artech House, 2016, 450 p.
4. Kokoreva E. V., Kostyukovich A. E., Doshchinsky I. V. Otsenka pogreshnosti izmerenii mestonakhozhdeniya abonenta v seti Wi-Fi [Estimation of the subscriber location measurement error in Wi-Fi network]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2019, no. 4, pp. 30–38.
5. Kokoreva E. V., Kostyukovich A. E., Doshchinsky I. V. Analysis of the error in determining the location inside the logistics warehouse complexes. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. II.106, pp. 1086–1094.
6. Mukhopadhyay A., Mallissery A. TELIL: A Trilateration and Edge Learning based Indoor Localization Technique for Emergency Scenarios. *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2018, pp. 6–10.
7. Kokoreva, E. V., Kostyukovich, A. E., Doshchinsky, I. V., Shurygina, K. I. A Combined Location Method with Indoor Signal Strength Measurement. *1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE)*, 2021, pp. 281–286.
8. Kostyukovich A. E., Shurygina K. I., Kokoreva E. V., Doshchinsky I. V. Locating an Object Inside a Room under Line-of-Sight Conditions Between Transmitter and Receiver. *IEEE 15th International Conference of Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2021, pp. 290–294.
9. Andrade C. B., Hoefel R. P. F. IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models, available at: https://www.researchgate.net/publication/221279961_IEEE_80211_WLANs_A_comparison_on_indoor_coverage_models/download (accessed 10.07.2022).
10. Saunders S. R. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. England, John Wiley & Sons Ltd, 2007, 554 p.
11. Seidel S. H., Rappaport T. S. 914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 2, 1992, pp. 207–217.
12. Seybold J. S. *Introduction to RF Propagation*. Hoboken, New Jersey, Wiley-Interscience, 2005, 349 p.
13. Kokoreva E., Kostyukovich A., Shurygina K., Doshchinsky I. Experimental Study of the Positioning System in the Centralized Wi-Fi Network. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 107, 2022, pp. 346–357.
14. Kokoreva E. V., Shurygina K. I. An Assessment of the Local Positioning System Effectiveness. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 246, pp. 436–443.
15. Roos T., Myllymäki P., Tirri H., Misikangas P. A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2002, no. 9(3), pp. 155–164.
16. Lapchenko D. A. *Teoriya prinyatiya reshenii* [Decision theory]. Minsk, Belorusskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2021, 62 p.
17. Reshetnyak O. I., Lobodin R. O. The Methods of Multidimensional Comparative Analysis in Evaluating Competitiveness of Enterprise. *Business Inform*, 2016, no. 9, pp. 100–105.