



УДК 004.896

DOI 10.52575/2712-746X-2024-51-1-232-240

Локализация сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях

¹ Аль-Обайди А.М.Ж., ² Заливин А.Н., ³ Бабаринов С.Л.

¹ Компания «Zuhoor Al_Ameer general contracting», Ирак, 10070, Багдад, ул. Джадриа

² Белгородский университет кооперации, экономики и права,

Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, 116А

³ ООО «Русагро Тех», Россия, 308002, Белгород, пр-т Б. Хмельницкого, 111

E-mail: alobaydi85@mail.ru, zalivin@bsu.edu.ru, babarinov@bsu.edu.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема локализации сенсорных узлов в беспроводной сенсорной сети (БСС). Сенсорные узлы играют ключевую роль в обеспечении сбора информации, связи и передачи данных в таких сетях, и их правильное размещение имеет важное значение для функционирования сети. Но в некоторых случаях расположение сенсорных узлов может носить случайный характер, например при их размещении дистанционным способом, в этом случае определение их положения представляет большой интерес для приложений БСС. Решение задачи локализации сводится к определению расстояния между сенсорными узлами и последующим вычислением относительного положения. Для определения расстояний между сенсорными узлами рассматривается два метода: на основе измерения уровня принимаемого сигнала и определения разницы во времени приема сигналов. Данные методы являются относительно простыми и не требуют значительных вычислительных ресурсов, что делает их привлекательными для использования в реальных приложениях.

Ключевые слова: сенсорные сети, самоорганизующиеся сети, развертывание, локализация, показатель уровня принимаемого сигнала

Для цитирования: Аль-Обайди А.М.Ж., Заливин А.Н., Бабаринов С.Л. 2024. Локализация сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях. Экономика. Информатика. 51(1): 232–240. DOI 10.52575/2712-746X-2024-51-1-232-240

Localization of Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks

¹ Al-obaidi M.ZH. Amir, ² Alexander N. Zalivin, ³ Sergey L. Babarinov

¹ The company "Zuhoor Al_Ameer general contracting", Jadriya str., Baghdad 10070, Iraq

² Belgorod University of Cooperation, Economics and Law,

116A Sadovaya str., Belgorod, 308023, Russia

³ Rusagro Tech LLC, B. Khmelnsky Avenue, 111, Belgorod, 308002, Russia

E-mail: alobaydi85@mail.ru, zalivin@bsu.edu.ru, babarinov@bsu.edu.ru

Abstract. This article delves into the issue of localizing sensor nodes within a wireless sensor network (WSN). Sensor nodes are pivotal for information gathering, communication, and data transmission in WSNs, and their strategic placement is crucial for network operation. However, in scenarios where sensor nodes are randomly positioned, such as remote locations, ascertaining their locations becomes paramount for BSS applications. The proposed solution to the localization predicament involves establishing inter-node distances and subsequently computing relative positions. Two primary methods for distance determination are examined: signal strength-based measurement and signal reception time differential analysis. These approaches are relatively straightforward and do not demand substantial computational resources, rendering them appealing for practical implementation in real-world scenarios. The conducted studies on the proposed distance estimation methods demonstrate their ability to address the localization challenges encountered in wireless sensor networks. By utilizing these approaches, not only the efficiency and accuracy of localization for sensor nodes can be improved, but it is also possible to ensure the operation of wireless sensor networks under various operating conditions.

Keywords: sensor networks, self-organizing networks, deployment; localization; indicator of the received signal level

For citation: Al-Obaidi A.M.Zh., Zalivin A.N., Babarinov S.L. 2024. Localization of Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks. Economics. Information technologies. 51(1): 232–240. DOI 10.52575/2712-746X-2024-51-1-232-240

Введение

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) может состоять из тысяч сенсорных узлов, которые развернуты в зоне мониторинга, обладающей возможностями обнаружения, вычислений и беспроводной связи. Узлы, положение которых известно в сети, называются опорными узлами, а узлы, положение которых неизвестно, называются целевыми узлами или неизвестными узлами. Основные цели развертывания сети сенсорных узлов это – мониторинг и передача данных. “Мониторинг” означает процесс отслеживания и анализа данных, полученных от сенсорных узлов в контролируемой области, с целью получения информации о состоянии этой области [Ефименко, Клымов, Саткенов, 2018]. Передача данных относится к топологии сети, в которой осуществляется маршрутизация информации.

Существуют сценарии, при которых сенсорные узлы невозможно разместить вручную, поэтому они могут сбрасываться воздушными судами случайным образом, следовательно, такие узлы не знают информации о своем местоположении. Поэтому требуется проводить оценку местоположения таких датчиков.

Среди подходов к локализации сенсорных узлов можно выделить методы, основанные на показателе уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator (RSSI)), времени прибытия (Time of Arrival (ToA)), разнице во времени прибытия (Time Difference of Arrival (TDoA)) и угле прибытия (Angle of Arrival (AoA)) [Boukerche, Oliveira, Nakamura, Loureiro, 2007; Пиев, Папроtny, 2015]. Метод на основе RSSI является наиболее предпочтительным, так как не требует больших вычислительных мощностей. К тому же в большинстве используемых в сенсорных сетях приемопередатчиков измерение уровня RSSI реализовано на аппаратном уровне. RSSI используется для оценки расстояния между опорными и целевыми узлами на основе уровня принятого сигнала. Целевой узел посылает сигнал, мощность которого ослабевает по мере прохождения определенного расстояния до опорного узла. Если расстояние между опорным и целевым узлом велико, то и уровень сигнала будет меньше из-за потерь при распространении и наоборот. Для преобразования уровня сигнала в расстояние используется модель распространения.

Постановка задачи

Для приложения беспроводных сенсорных устройств указывается рабочая область. Целевой узел попадает в зону действия сенсорного узла, только если евклидово расстояние между целевым и сенсорным узлом меньше расстояния передачи данных. Каждый узел может подключаться только к тем узлам, которые находятся поблизости или находятся в пределах его дальности связи.

В данной работе для оценки расстояния между целевым и опорным узлом рассматриваются два подхода на основе RSSI и TDoA. Поскольку сигнал распространяется на определенное расстояние, то уровень сигнала будет изменяться из-за потери при распространении. Для определения уровня сигнала предлагается использовать модель распространения [Ibrahim, Rahim, Mohamad, 2015], которая представлена в виде

$$PL(d) = PL(d_0) - 10\eta \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - X_{\sigma}, \quad (1)$$

$PL(d)$ – мощность принимаемого сигнала на расстоянии d , где d – евклидово расстояние между

целевым и сенсорным узлом, $PL(d_0)$ обозначает мощность принимаемого сигнала на расстоянии d_0 , принятом за 1 м, η – показатель потерь на пути, X_σ – это нормальная (гауссова) случайная величина с нулевым средним значением, отражающая затухание (в децибелах), вызванное плавным замиранием. В случае отсутствия замирания эта переменная равна 0.

Показатель потерь на пути η , зависит от среды распространения. Значения показателя потерь на пути в зависимости от окружающей среды приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Значения показателя потери на пути
Values of the attenuation index during signal propagation

Окружающая среда	Показатель потери пути η
Вакуум, свободное пространство	2
Городская застройка	2.7-3.5
Городская застройка с зонами тени	3-5
Зона прямой видимости внутри здания	1.6-1.8
Внутри здания при наличии препятствий	4-6
Внутри заводских построек	2-3

Искомое расстояние d_e может быть определено путем измерения RSSI, при известных η и X_σ [Haiqiang, Hejun, Hualiang, Xiongxiang, 2014]

$$d_e = 10^{\frac{PL(d) - PL(d_0) - X_\sigma}{10\eta}}. \quad (2)$$

Расстояние d_e оценивается от целевого и до каждого опорного узла. Если оцененное расстояние меньше дальности связи целевого узла, то сигнал принимается целевым узлом, как показано на рис.1, это означает, что целевой узел находится ближе к тем опорным узлам, которые попадают в зону его действия, а если оцененное расстояние больше дальности связи, то сигнал не принимается целевым узлом, как показано на рис. 2.

В TDoA узел i передает два разных сигнала одновременно узлу j , как показано на рис.3. При этом сигналы должны иметь разную скорость распространения, что можно реализовать путем одновременной передачи радиочастотного и ультразвукового сигнала [Luo, Li, Lin, 2012].

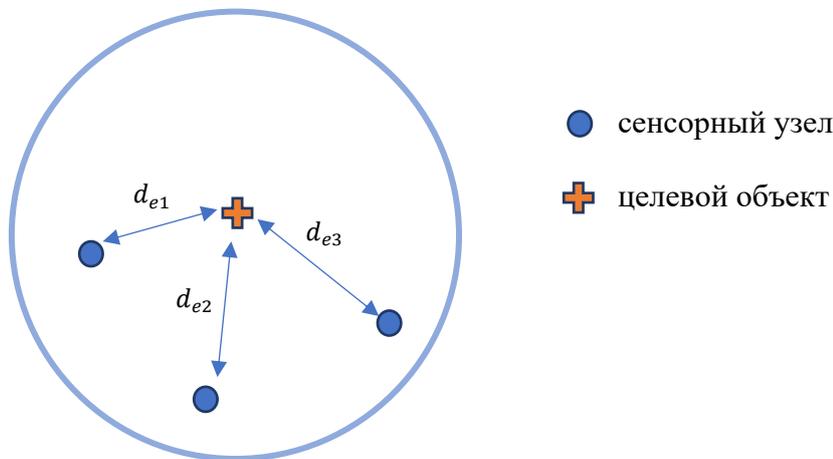


Рис. 1. Опорные узлы расположены в зоне действия целевого узла
Fig. 1. The support nodes are located in the area of operation of the target node

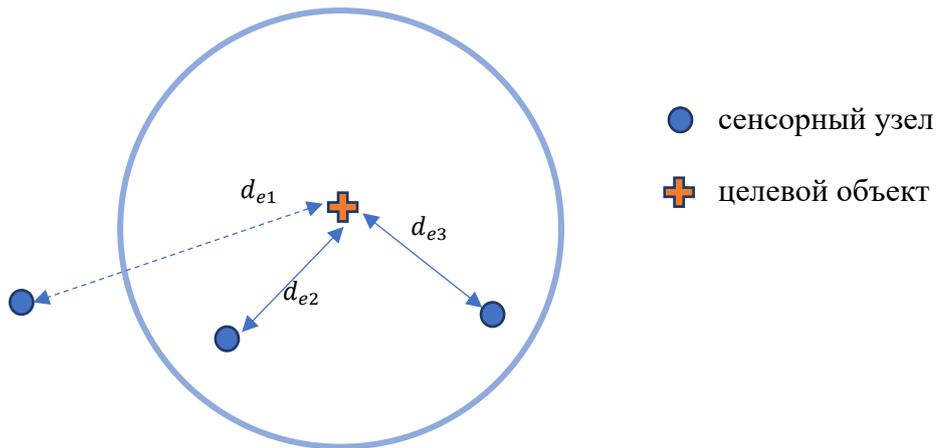


Рис. 2. Один из опорных узлов находится вне зоны действия связи целевого узла
Fig. 2. One of the reference nodes is located outside the communication area of the target node

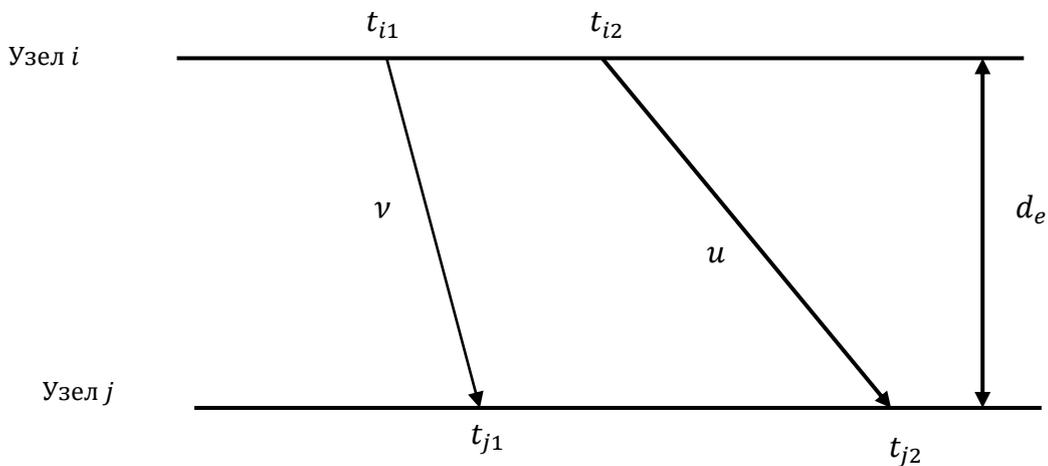


Рис. 3. Время распространения сигнала при использовании метода оценки расстояния на основе TDoA
Fig. 3. Signal propagation time when using the TDoA-based distance estimation method

Время, при котором узел i отправляет радиочастотный сигнал, равно t_{i1} , а время отправки ультразвукового сигнала, равно t_{i2} . Скорость распространения ультразвукового сигнала во много раз меньше по сравнению с радиочастотным сигналом. Радиочастотный сигнал достигает узла j быстрее, чем ультразвуковой сигнал в момент времени t_{j1} , и ультразвуковой сигнал принимается узлом j в момент времени t_{j2} . Расстояние между узлами можно оценить, используя время приема сигналов. Если скорость распространения радиочастотного сигнала равна v , а скорость распространения ультразвукового сигнала равна u , то расстояние между узлом i и узлом j определяется как [Priyantha, Chakraborty, Balakrishnan H, 2000].

$$d_e = (t_{j2} - t_{j1})(v - u) \quad (3)$$

Локализация на основе вычисления взаимных расстояний

Решение задачи локализации сводится к оценке положения целевого узла. Для нахождения оптимального положения целевого узла можно воспользоваться методом роя частиц (МРЧ) [Kulkarni, Kumar, 2011]. Для этого делается путем инициализации области поиска. Пусть N – размерность, а P – количество частиц в совокупности. Случайная инициализация частиц совокупности как $x_{ik} = [x_{i11}, x_{i21}, \dots, x_{i1i}; x_{i12}, x_{i22}, \dots, x_{i2i}; \dots; x_{i1k}, x_{i2k}, \dots, x_{ik}]$, где

$i=1,2,\dots,P, k=1,2,\dots,N$. На каждой итерации каждая частица обновляет два наилучших значения: личное наилучшее (pb) – наилучшее положение, достигнутое частицей на данный момент, и глобальное наилучшее (gb) – наилучшее значение, отслеживаемое всей совокупностью частиц на данный момент. После нахождения двух наилучших значений частица обновляет свою скорость и положение [Kulkarni, Kumar, 2011] следующим образом

$$v_{ik} = w \times v_{ik} + c_1 \times r_1 (pb_{ik} - x_{ik}) + c_2 \times r_2 (gb_k - x_{ik}) \quad (4)$$

$$x_{it} = x_{ik} + v_{ik} \quad (5)$$

где $t=1,2,\dots,N$, w – масса инерции, c_1 и c_2 – коэффициент ускорения, r_1 и r_2 – однородное случайное число.

Пусть имеется n опорных узлов и m целевых узлов. Необходимо оценить положение целевых узлов. Для предлагаемой реализации необходимо найти d_i – евклидово расстояние от каждого опорного узла до целевого узла в виде

$$d_i = \sqrt{(x + x_i)^2 + (y + y_i)^2}, \quad (6)$$

где (x_i, y_i) – координаты опорного узла, а (x, y) – координаты целевого узла. Значение расчетного расстояния d_e определяется из (2) и (3) для RSSI и TDoA соответственно. Целевая функция для задачи локализации задана в виде,

$$f(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x + x_i)^2 + (y + y_i)^2} - d_e)^2 \quad (7)$$

где $n > 3$ – количество опорных узлов в пределах диапазона целевого узла. Решение задачи заключается в минимизации целевой функции и оценки местоположения целевого узла с использованием метода роя частиц. Для этого первоначально производится инициализация параметров МРЧ w , c_1 и c_2 . Набор частиц распределяется случайным образом в области поиска. Вычисляется целевая функция для каждой частицы, значение pb обновляется с учетом начального положения частицы, а значение gb обновляется с учетом положения, в котором значение целевой функции является минимальным среди всех частиц. После этого скорость и положение частицы обновляются в соответствии с (4)–(5) для каждой частицы. Этот процесс повторяется для оценки целевой функции с обновленными значениями. Данный процесс продолжается, пока он не достигнет максимальной итерации. Конечным значением gb в конце максимальной итерации является вычисленное положение целевого узла.

Результаты моделирования

Моделирование выполнено с использованием программного пакета MATLAB. Решение задачи локализации выполнялось для двумерного вида, при размерности $N=2$. Для моделирования на основе RSSI задавалось 15 фиксированных опорных узлов, расположены в области размером 10 м x 10 м, и целевых узлов $n=50$, случайным образом распределённых в зоне мониторинга с дальностью связи 5 м, как показано на рис. 4. Для следующего эксперимента увеличили количество целевых узлов n до 200. Результат представлен рис. 5.

Для моделирования на основе TDoA использовалось 15 фиксированных опорных узлов, размещенных в области размером 10 м x 10 м, и 50 целевых узлов, случайным образом распределенных в зоне мониторинга с дальностью связи 5 м, показанной на рис. 6. В следующем эксперименте количество целевых узлов увеличили до 200, как показано на рис. 7.

При моделировании для всех экспериментов были использованы следующие параметры МРЧ: $P=20$, $w=0,7$, $c_1=c_2=1,4$ и максимальное число итераций=100. Также была вычислена среднеквадратичная ошибка, значения которой приведены в таблице 2. Как показано в таблице 2, среднеквадратичная ошибка увеличивается при увеличении количества целевых узлов. При этом ошибка определения положения имеет большие значения для узлов, расположенных ближе к границам зоны мониторинга.

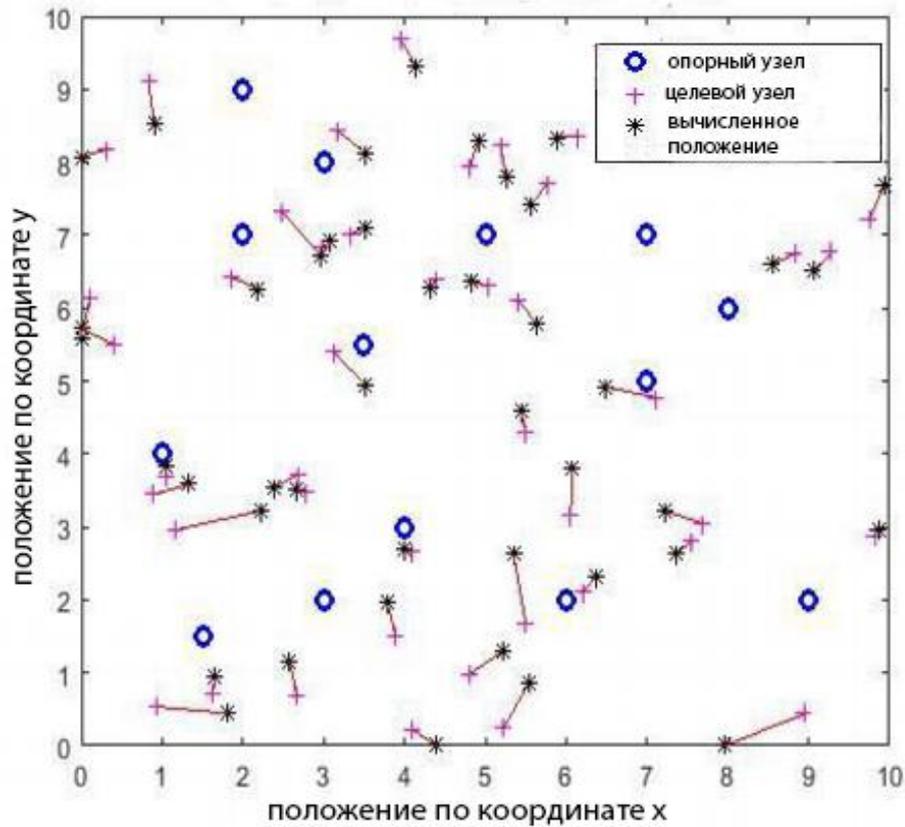


Рис. 4. Локализация с использованием RSSI, при $n=50$
Fig. 4. Localization using RSSI, at $n=50$

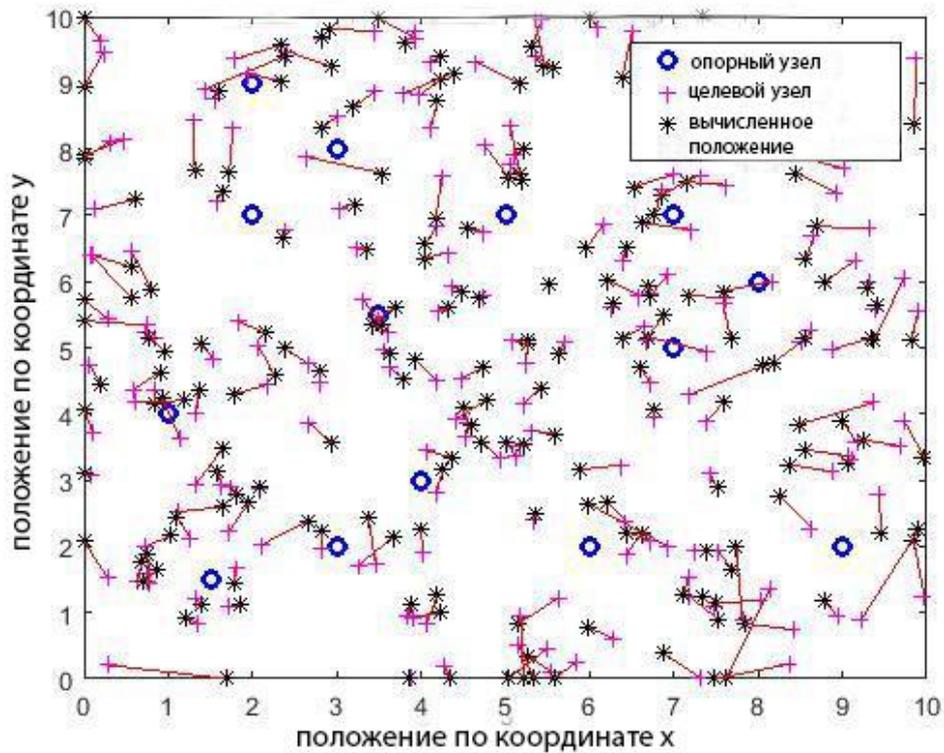


Рис. 5. Локализация с использованием RSSI, при $n=200$
Fig. 5. Localization using RSSI, at $n=200$

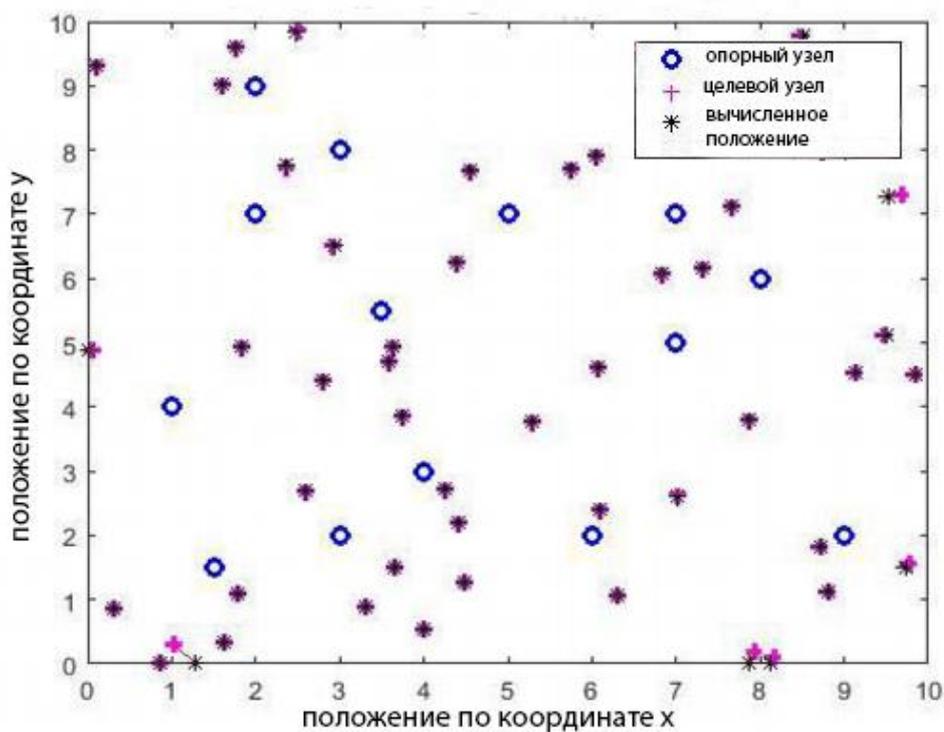


Рис. 6. Локализация с использованием TDoA, при $n=50$
Fig. 6. Localization using TDoA, at $n=50$

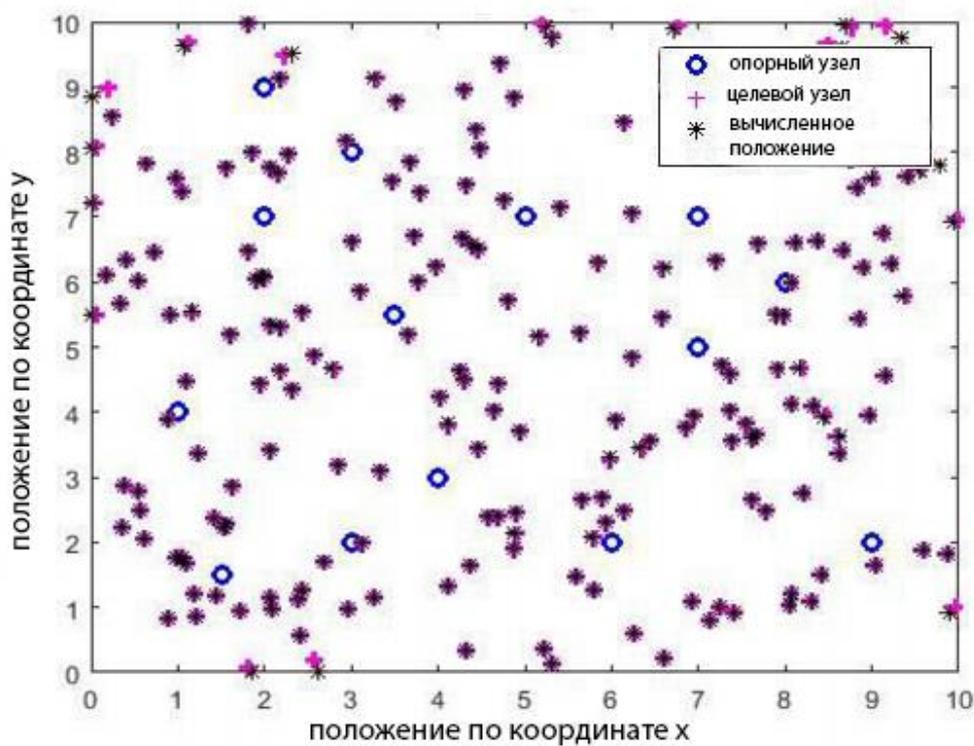


Рис. 7. Локализация с использованием TDoA, при $n=200$
Fig. 7. Localization using TDoA, at $n=200$

Таблица 2
Table 2

Значения среднеквадратической ошибки определения местоположения
The values of the RMS error of location determination

Количество целевых узлов	RSSI (м)	TDoA (м)
50	2,3	0,2
200	4,6	0,65

Из данных, представленных в таблице, можно видеть, что при использовании метода определения расстояния на основе TDoA среднеквадратичная ошибка определения положения меньше, чем для метода определения расстояния на основе RSSI для того же количества узлов. Анализ результатов также показывает, что измеренные значения RSSI имеют значительные вариации. В ситуациях, когда два сенсорных узла находятся на расстоянии менее 10 метров друг от друга, измеренные значения RSSI находились в диапазоне от 200 до 250 дБм. Однако было замечено, что разница значений RSSI, измеренных на расстояниях около 1 метра, могут быть малы. Следовательно, это вносит ошибку в оценку расстояния между двумя сенсорными узлами, и не позволяет обеспечить хорошую точность при определении местоположения на основе дальности, используя измерения RSSI.

Заключение

В данной работе были проанализированы подходы к локализации сенсорных узлов с использованием метода определения расстояния на основе TDoA и RSSI, а с помощью метода роя частиц происходило определение координат целевого узла. Результаты показали эффективность данного подхода в решении задач локализации и определении положения сенсорных узлов. Результаты, полученные на основе моделирования, показывают, что метод определения имеет меньшую среднеквадратическую ошибку, чем метод RSSI. Но использование метода определения расстояния на основе TDoA требует более сложного устройства сенсорного узла и дополнительных вычислительных затрат.

Выводы

1. Проведенный анализ результатов показал работоспособность выбранного подхода в решении задач локализации и определения положения сенсорных узлов.
2. Экспериментальные исследования показали, что метод определения расстояния на основе TDoA обладает меньшей среднеквадратической ошибкой по сравнению с методом RSSI.

Список литературы

- Ефименко М.С., Клымив С.И., Саткенов Р.Б. 2018. Беспроводные сенсорные сети. Молодой ученый. 51 (237): 40–42.
- Boukerche A, Oliveira H.A.B.F., Nakamura E.F., Loureiro A.A.F. 2007. Localization systems for Wireless Sensor Networks. IEEE journals in Wireless Communications. 6(6): 6–12.
- Iliev N., Paprotny I., 2015. Review and Comparison of Spatial Localization Methods for Low Power Wireless Sensor Networks. IEEE Sensors Journal. 15(10): 5971–5987.
- Haiqiang D., Hejun C., Hualiang Z., Xiongxiang H. 2014. Localization in WSN using Maximum Likelihood Estimation with Negative Constraints based on Particle Swarm Optimization. Proceeding of 12th International Conference on Signal Processing, Hangzhou, China, pp. 2185–2189, doi: 10.1109/ICOSP.2014.7015382.
- Luo X.L., Li W., Lin J.R. 2012. Geometric Location Based on TDOA for Wireless Sensor Networks. International Scholarly Research Network (ISRN) Applied Mathematics. 2: 1–10.
- Ibrahim A., Rahim S.K.A., Mohamad H. 2015. Performance Evaluation of RSS-based WSN Indoor Localization Scheme using Artificial Neural Network Schemes. IEEE 12th Malaysia International



Conference on Communications (MICC), Kuching, Malaysia, pp. 300–305, doi: 10.1109/MICC.2015.7725451.

Kulkarni R.V., Kumar G.V. 2011. Particle Swarm Optimization in Wireless Sensor Networks: A Brief Survey. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 41(2): 262–267.

Priyantha N.B., Chakraborty A., Balakrishnan H. 2000. The Cricket Location-Support System. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Mobicom*, pp. 32–43.

References

Efimenko M.S., Klymiv S.I., Satkenov R.B. 2018. Wireless sensor networks. *Young Scientist*. 51(237): 40–42.

Boukerche A., Oliveira H.A.B.F., Nakamura E.F., Loureiro A.A.F. 2007. Localization systems for Wireless Sensor Networks. *IEEE journals in Wireless Communications*. 6(6): 6–12.

Iliev N., Paprotny I., 2015. Review and Comparison of Spatial Localization Methods for Low Power Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*. 15(10): 5971–5987.

Haiqiang D., Hejun C., Hualiang Z., Xiongxiang H. 2014. Localization in WSN using Maximum Likelihood Estimation with Negative Constraints based on Particle Swarm Optimization. *Proceeding of 12th International Conference on Signal Processing, Hangzhou, China*, pp. 2185–2189, doi: 10.1109/ICOSP.2014.7015382.

Luo X.L., Li W., Lin J.R. 2012. Geometric Location Based on TDOA for Wireless Sensor Networks. *International Scholarly Research Network (ISRN) Applied Mathematics*. 2: 1–10.

Ibrahim A., Rahim S.K.A., Mohamad H. 2015. Performance Evaluation of RSS-based WSN Indoor Localization Scheme using Artificial Neural Network Schemes. *IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Kuching, Malaysia*, pp. 300–305, doi: 10.1109/MICC.2015.7725451.

Kulkarni R.V., Kumar G.V. 2011. Particle Swarm Optimization in Wireless Sensor Networks: A Brief Survey. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 41(2): 262–267.

Priyantha N.B., Chakraborty A., Balakrishnan H. 2000. The Cricket Location-Support System. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Mobicom*, pp. 32–43.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 06.02.2024

Received February 06, 2024

Поступила после рецензирования 01.03.2024

Revised March 01, 2024

Принята к публикации 04.03.2024

Accepted March 04, 2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аль-Обайди Амир Мохаммед Жасим, Менеджер проектов, Компания «Zuhoor Al_Ameer general contracting», Багдад, Ирак

Al-obaidi M.ZH. Amir, Project manager, «Zuhoor Al_Ameer general contracting» company, Baghdad, Iraq

Заливин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Белгородский университет кооперации, экономики и права, г. Белгород, Россия

Alexander N. Zalivin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of Information Security, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod, Russia

Бабаринов Сергей Леонидович, кандидат технических наук, главный инженер, ООО «Русagro Тех», г. Белгород, Россия

Babarinov L. Sergey, Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer, Rusagro Tech LLC, Belgorod, Russia