

УДК 004.8

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.062831

Є. Ю. МІТІН, аспірант;

Д. В. МИРОНОВ, канд. техн. наук,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Можливості сучасної мікроелектроніки та безпроводових мережних технологій відкривають великі перспективи для створення різноманітних мережних комплексів із широкою сферою застосування. У цьому дослідженні розглянуто концепцію Інтернету речей, технологічною основою якою у її застосунках стали безпроводові сенсорні мережі, йдеться передусім про принципову зміну кількісних характеристик мережі. Автором описано основні проблеми проектування сенсорних мереж, алгоритми визначення місця знаходження пристроїв сенсорної мережі та досліджено точність позиціонування за різної кількості опорних вузлів. Як метод дослідження було вибрано обчислювальний експеримент. Зроблений аналіз дасть змогу підвищити ефективність керування безпроводовою сенсорною мережею та раціональне використання її ресурсів.

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа; давач; позиціонування; мобільний вузол; навігація в приміщенні.

Вступ

Постановка проблеми. Створення масштабних безпроводових сенсорних мереж із великою кількістю дешевих та енергоємних давачів пов'язане з досягненнями в мініатюризації та інтеграції сенсорних технологій та технологій зв'язку. У безпроводових сенсорних мережах, сотні чи навіть тисячі крихітних вузлів, оснащених батарейками, розкидано місцевістю дослідження. Кожен вузол збирає інформацію. Вузли передають зібрану інформацію сусіднім вузлам і потім до зазначеного місця призначення, де ці дані обробляються. Ці дані використовуються для опису околиць у даний час.

За останні десятиліття ми стали свідками розвитку інтернету, який надає нам можливості передавати різні види інформації і це революціонує бізнес, виробництво, науку, освіту та наш спосіб життя. Безпроводові сенсорні мережі замінили стандартні комп'ютерні мережі. Вони були передбачені як профілактичний комп'ютерний світ, в якому з'єднані мережею вузли автоматично в режимі сьогодні отримують інформацію про середовище. Сучасний телекомунікаційний ринок пропонує широкий асортимент технологій безпроводових сенсорних мереж, сотні компаній пропонують свої рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження і розроблення у сфері сенсорних мереж інтенсивно ведуться за межами нашої держави, причому результати останніх вже використовуються в конкретних програмах. Одними з найуспішніших досліджень у цій галузі були наукові праці професора Каліфорнійського університету Крістофера Пістера. Тематика робіт охоплювала сфери від вузькоспеціальних питань, пов'язаних із створенням окремих компонентів об'єктів мере-

жі з низькою ціною та низьким енергоспоживанням, до проблем, що постають у процесі експлуатації сенсорних мереж [1].

Результатом праць зі стандартизації безпроводових сенсорних мереж стало сімейство стандартів IEEE 802.15.4.

Дослідженню енергоспоживання і створенню програмних та апаратних засобів безпроводових сенсорних мереж велику увагу приділяє американська компанія Texas Instruments (радіомодулі CC2530 тощо). Також на виробництві радіомодулів зосереджені компанії Atmel, Digi International, Ember, Freescale, Samsung, STMicroelectronics, Microchip Zigbee [2].

Отже, комплексне та якісне вирішення науково-прикладної проблеми позиціонування та навігації в приміщенні набуває все більшої актуальності для побудови якісних програмних продуктів, які використовують інформацію про місцезнаходження користувача в приміщеннях, застосовують широкий спектр взаємозв'язаних інформаційно-комунікаційних технологій.

Найпопулярнішою технологією позиціонування та навігації користувача на відкритому просторі є GPS, але її не можна використовувати в приміщенні, оскільки рівень GPS-сигналу істотно знижується під час проходження через стелю та стіни приміщення [3]. Менш поширені сьогодні інформаційно-комунікаційні технології навігації користувачів у приміщеннях, що ґрунтуються на обробленні візуальних зображень та відео [4-6], а також QR-кодів [7].

Постановка завдання. Цю статтю присвячено дослідженню безпроводових сенсорних мереж, методів позиціонування мобільних об'єктів, а також дослідженням підвищення точності позиціонування зп різних умов.

Основна частина

Сенсорна мережа — розподілена мережа, яка складається з пристроїв, що не обслуговуються, і давачів, які збирають дані і передають їх на базову станцію за допомогою ретрансляції від одного вузла до іншого. Сенсор — це давач, тобто їх можна встановити для вимірювання температури, вологості, вібрації тощо. Функціонально сенсорні давачі охоплюють три види вузлів: функціональні, що збирають інформацію навколо точки розміщення цього вузла; транзитні, які виконують лише передавання інформації та керують маршрутизацією; базові станції, котрі здійснюють тотальну координацію, організацію та встановлення параметрів мережі.

Основним бар'єром для розвитку сенсорних мереж є складність проектування, коли якась мережа потребує окремого підходу з великою кількістю проміжних етапів. Непросто вибрати алгоритм та протокол взаємодії об'єктів мережі, оскільки всі протоколи ефективні тільки для вирішення одного завдання. Напрошується висновок, що кожна мережа — це індивідуальна система.

Під час використання протоколу взаємодії елементів класичних мереж позитивного результату немає, оскільки відбувається децентралізація мережі без постійної структури, що з десятка тисяч вузлів із автономним живленням. Проблема полягає у відмовах вузлів, які трапляються через несправність апаратних компонентів, з яких і складається вузол, або через розрядження батарейки, тому виникають різні протоколи та алгоритми взаємодії компонентів мережі. Постає питання, як давачам одночасно почати працювати і передавати інформацію, а потім зупинити цей процес, щоб не витратити дорогоцінну енергію.

Завдання високої відмовостійкості буде розв'язано введенням неупорядкованої структури, а завдання самоорганізації та тривалості життя мережі — в разі введення надмірності (за кількістю вузлів, за кількістю маршрутів, підпрограм тощо).

Потрібно виокремити два класи завдань, що стосуються фактора зв'язності мережі:

1) оцінювання зв'язності вузлів сенсорної мережі;

2) Розміщення вузлів із метою збільшення зв'язку.

Вузли потрібно розміщувати в особливий спосіб, щоб збільшити зону покриття сенсорної мережі, загальний час і точність вимірювання даних.

Локально згруповані вузли утворюватимуть між собою мережу, де через один або кілька шлюзів будуть передаватися дані, які потім потрібно обробити (мережа загального користування). Наявність з'єднань між сенсорними мережами та мережами зв'язку загального користування потребує провести розрахунки параметрів шлюзів,

тобто необхідно вивчити природу навантаження, яке існує в безпроводових сенсорних мережах.

Для збільшення зв'язності існують алгоритми чи стратегії, які можна поділити на наведені далі групи.

1. Алгоритм кластеризації сенсорних мереж — розбиття безлічі вузлів на групи, де всередині кожної групи розміщується координатор або шлюз; має місце велика віддаль передавання радіосигналу. Такий алгоритм дає змогу використовувати обчислювальні ресурси базової станції для підвищення ефективності розподілу вузлів між кластерами та конфігурування мережі.

2. Алгоритм надмірного розміщення вузлів — відбувається додавання вузлів у структуру сенсорної мережі для збільшення зв'язності. Цей алгоритм формує необхідну кількість шляхів від кожного вузла до базової станції.

3. Алгоритм базового розміщення вузлів — наявна базова структура сенсорної мережі, де для кожного вузла існує хоча б один шлях передавання повідомлення базової станції. Недолік третього алгоритму — під час формування такої сенсорної мережі деякі вузли можуть бути видаленими.

4. Стратегія використання вузлів із різними характеристиками збільшення зв'язності сенсорною мережі за допомогою цієї стратегії здійснюється завдяки збільшенню віддалі зв'язку окремих вузлів сенсорної мережі, що призведе до зменшення кількості ненадійних вузлів.

5. Алгоритм резервування транзитних вузлів, де враховується інтенсивність енергоспоживання цих вузлів. За такого резервування збільшується час роботи сенсорної мережі до відмови.

Завдання позиціонування може розглядатися як самостійне, наприклад, якщо потрібно зробити якусь систему навігації на території покриття, а може бути під завданням під час забезпечення безпеки, моніторингу тощо.

Сенсорні мережі можуть бути проводовими та безпроводовими. Позиціонування має сенс у безпроводових мережах. Зона покриття подібної мережі може становити від кількох метрів до кількох кілометрів завдяки можливості ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого. Для позиціонування на території розміщують стаціонарні вузли, координати яких відомі. З огляду на них можна визначати координати мобільних вузлів.

Існує кілька видів побудови мережі, її можна організувати як з одним головним вузлом, так і з кількома головними вузлами. Від організації мережі залежатиме метод позиціонування в ній.

У процесі використання централізованих алгоритмів вузол приймає сигнал про місцезнаходження в мережі, далі інформація надходить у центральний вузол, де визначаються координати

ти, потім дані повертаються. Такий спосіб потребує великих обчислювальних ресурсів, оскільки чим більша кількість вузлів буде звертатися, тим швидше буде зростати трафік.

Під час застосування методу AOA (*Angle of arrival*) мобільний вузол вимірює кути приходу сигналів від стаціонарних вузлів та за ними визначає своє місцезнаходження. Точність такого методу залежить від відбиття сигналу та його затінення на змінній апертурі.

Наступний метод — TOA (*Time of arrival*) або TOF (*Time of flight*). У цьому методі вимірюється час поширення сигналу від передавача до приймача, для цього потрібно синхронізувати годинник.

У разі використання методу RSSI (*Received-signal strength indication*) вимірюється сила прийнятого сигналу. Сила сигналу може змінюватися через зовнішні фактори, наприклад людина, що перебуває між приймачем і передавачем, тому вимірюється сигнал із кількох вузлів. Такий метод потребує підготовки. Потрібно спочатку скласти картку потужності сигналів від стаціонарних точок, потім мобільні вузли, звертаючись до неї, можуть визначити своє місце.

Для встановлення місцезнаходження важливою є точність, яка залежить від таких факторів: кількість стаціонарних вузлів, місця їх розміщення, інтервали часу між пересиланням пакетів. Причому чим більша кількість стаціонарних вузлів розташовано, тим більше відбувається втрата пакетів через колізій.

Для приміщень краще використовувати RSS, абсолютна похибка такого методу 2,5 м. TOA не підходить для застосування в закритому просторі. У приміщенні площею 50–70 м² похибки визначення відстані становлять від 5 до 10 м. TOA має більш високу точність у відкритому просторі.

Для дослідження точності позиціонування об'єктів безпроводових сенсорних мереж було спроектовано мережу офісу, яка складалася з восьми опорних вузлів. На наступному етапі кількість опорних вузлів було збільшено до чотирнадцяти. Сліпі вузли були позначені від 1 до 4. Вузли від А до Н — початкові опорні точки, від І до N — додаткові опорні вузли (для експерименту з чотирнадцятьма опорними точками).

Результати вимірювання координат наведено в табл. 1. Їх було здобуто як результат усереднення двадцяти вимірювань у кожному положенні.

Для експерименту була розраховано абсолютну похибку і середньоквадратичне відхилення для кожного випадку:

$$\delta_x = |X_f - X_i|, \quad (1)$$

$$\delta_y = |Y_f - Y_i|, \quad (2)$$

де X_f — фактичне положення об'єкта за віссю X; X_i — виміряне положення об'єкта за віссю X;

Y_f — фактичне положення об'єкта за віссю Y; Y_i — виміряне положення об'єкта за віссю Y.

Також було визначено середньоквадратичне відхилення:

$$\Delta x = (X_f - X_i)^2, \quad (3)$$

$$\Delta y = (Y_f - Y_i)^2. \quad (4)$$

Також було визначено помилку, яка вимірювалася через усереднення помилок за віссю X та віссю Y для точки:

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2}. \quad (5)$$

Таблиця 1

Результати вимірювань координат по восьми опорних точках

Номер вузла	Фактичне положення за X, м	Фактичне положення за Y, м	Виміряне положення за X, м	Виміряне положення за Y, м	δ_x , м	δ_y , м	$(X - x)^2$	$(Y - y)^2$	Помилка, %
1	19,0	6,0	17,7	10,5	1,3	4,5	1,7	20,3	40,9
2	16,5	10,0	20,3	9,5	3,8	0,5	14,4	0,3	14,0
3	19,0	15,5	21,0	13,5	1,98	2,0	3,9	4,2	10,0
4	27,0	9,0	22,7	9,3	4,26	0,3	18,1	0,1	9,4

З табл. 1 випливає, що значення абсолютної похибки δ_x і δ_y для кожного вимірювання, середньоквадратичне відхилення і відсоток помилок досить великі в межах спроектованої системи на досліджуваному об'єкті.

На наступному етапі дослідження було проведено експеримент, коли в мережу було додано ще шість опорних вузлів. Результати вимірювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати вимірювань координат по 14 опорних точках

Номер вузла	Фактичне положення за X, м	Фактичне положення за Y, м	Виміряне положення за X, м	Виміряне положення за Y, м	δ_x , м	δ_y , м	$(X - x)^2$	$(Y - y)^2$	Помилка, %
1	19,0	6,0	18,5	9,3	0,5	3,3	0,2	10,8	28,6
2	16,5	10,0	18,5	9,1	2,0	1,9	3,9	3,7	15,7
3	19,0	15,5	18,3	13,7	0,7	1,8	0,5	3,2	7,7
4	27,0	9,0	24,5	9,2	2,5	0,2	6,3	0,1	5,5

Як унаочнює табл. 2, додавання ще шести опорних вузлів зумовила збільшення точності позиціонування для всіх сліпих вузлів у середньому в півтори рази.

Отже, можна дійти висновку, що збільшення кількості опорних точок веде до зниження помилки вимірювання в кожному конкретному випадку і збільшує точність вимірювання в півтора рази.

Висновки

Перспективність розвитку безпроводових сенсорних мереж очевидна. Уже сьогодні в багатьох галузях починають використовувати бездротові сенсорні мережі. З удосконаленням технологій й ускладненням різних виробництв потреба в безпроводових сенсорних мережах буде тільки рости. Отже, безпроводові технології стають все більш і більш популярними через свою низьку вартість і простоту використання. Тому в багатьох випадках використання безпроводових систем стало дешевшим, ніж використання альтернативних проводових мереж. В експериментальній частині роботи була визначено точність локалізації при кількості опорних вузлів вісім і чотирнадцять. Було виявлено, що значення помилок системи позиціонування об'єктів у мережі з чотирнадцятьма опорними вузлами менше в півтора рази.

Список використаної літератури

1. **Тимков А. В.** Оптимізація безпроводових сенсорних систем за допомогою мурашиних алгоритмів: автореф. квал. роб. магістра: 01.12.10. Донецьк, 2010. 15 с.
2. **Галкін П. В.** Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в безпроводових сенсорних мережах // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 5, №9(71). С. 24–30.
3. **A simple ultrasonic GSM system for indoor mobile robot system using Kalman filtering** / K.-H. Hwang, D.-E. Kim, D.-H. Lee, T.-Y. Kue // *SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, 2006*. P. 2915–2918.
4. **Idrees A., Iqbal Z., Ishfaq M.** An efficient indoor navigation technique to find optimal route for blinds using QR codes // *Proceedings of Industrial Electronics and Applications*. Auckland. 2015. P. 690–695.
5. **Chen Z., Birchfield S.** Qualitative vision-based path following. *Robots*. 2009. Vol. 25. No. 3. P. 749–754.
6. **Rajakaruna N., Murray I.** Efficient and adaptive generic object detection method for indoor navigation // *Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. France, 2013.
7. **Simple yet stable bearing only navigation** / T. Krajník, J. Faigi, V. Vonasec [et al.] // *Field Robot*. 2010. Vol. 27. No. 5. P. 511–533.

Y. Y. Mitin, D. V. Mironov

INVESTIGATION OF THE POSITIONING ACCURACY OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

The creation of large-scale wireless sensor networks with a large number of cheap and energy-intensive sensors is associated with advances in miniaturisation and integration of sensor and communication technologies. In wireless sensor networks, hundreds or even thousands of tiny nodes equipped with batteries are scattered over the study area. Each node collects information. The nodes transmit the collected information to neighbouring nodes and then to a specified destination where the data is processed. This data is used to describe the neighbourhood in real time.

Over the past decades, we have seen the rise of the Internet, which provides us with the ability to transmit various types of information and this is revolutionising business, manufacturing, science, education and our way of life. Wireless sensor networks have replaced standard computer networks. They were envisaged as a preventive computer world in which networked nodes automatically receive information about the environment in real-time. The modern telecommunications market offers a wide range of wireless sensor network technologies, with hundreds of companies offering their solutions.

The capabilities of modern microelectronics and wireless networking technologies open up great prospects for creating various network complexes with a wide range of applications. This study examines the concept of the Internet of Things, the technological basis of which in its applications is wireless sensor networks, meaning, first of all, a fundamental change in the quantitative characteristics of the network. The author describes the main problems of designing sensor networks, algorithms for determining the location of sensor network devices, and investigates the positioning accuracy with a different number of reference nodes. A computational experiment was chosen as a research method. The analysis will help to improve the efficiency of wireless sensor network management and rational use of its resources.

Keywords: wireless sensor network; sensor; positioning; mobile node; indoor navigation.