

**РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ В
БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ**

В статті розроблено розподілений алгоритм визначення координат для застосування в умовах бездротових сенсорних мереж при наявності помилок у вимірах відстаней. Запропоновано новий механізм ітераційної оцінки координат на основі калманівської фільтрації. При оцінці координат аналітично враховується точність проведених вимірювань. На відміну від інших алгоритмів, для визначення координат використовуються тільки ті дані, які доступні за стандартом бездротового зв'язку.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, ітераційна оцінка, вузли мережі, алгоритм, координати, фільтрація, триангуляція, сигнал.

I.V. MULYAR, V.S. ZELENKA
Khmelnysky natsionalny universitet

DEVELOPING AN ALGORITHM DETERMINING THE COORDINATES OF OBJECTS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

In the article a distributed algorithm for determining the coordinates for use in wireless sensor networks in the presence of errors in measurements of distances. A new mechanism for iterative estimation of coordinates based on Kalman's filtering. In assessing the coordinates analytically accounted accuracy of the measurements. Unlike other algorithms for determining coordinates using only the data that are available under standard wireless.

Keywords: wireless sensor networks, iterative evaluation, network nodes, the algorithm coordinates, filtering, triangulation signal.

Вступ

В даний час розподілені системи все ширше входять в наше життя. Одним з напрямків сучасних розподілених систем є бездротові сенсорні мережі (БСМ). Область покриття подібної мережі може становити від декількох метрів до декількох кілометрів за рахунок здатності ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого.

Говорячи про визначення місця розташування окремих об'єктів мережі, постає питання пов'язане з оцінкою координат для вимірюваннями відстані до сусідніх об'єктів мережі.

Типова сенсорна мережа складається з безлічі ідентичних елементів, які називаються сенсорами (інша назва - інтелектуальний давач), а також базової станції (БС). Призначенням сенсора є контроль стану об'єкта шляхом вимірювання його окремих параметрів (наприклад, температури, вологості навколишнього середовища і т. д.), первинна обробка результатів вимірювання, а також передача відповідних повідомлень через бездротовий зв'язок. Повідомлення, надіслані сенсорами, збираються на БС. Таким чином, логічною структурою сенсорної мережі є "все-до-одного".

Окрім прив'язки, отриманих мережею в процесі роботи даних, до карти місцевості, інформація про координати об'єктів буде задіяна в процесі функціонування самої мережі: побудова ефективних, з точки зору енергоспоживання, алгоритмів маршрутизації, збір зібраних даних.

У зв'язку з цим розробка алгоритмів визначення координат об'єктів в сенсорній мережі стає вельми актуальним завданням.

Математична постановка задачі

Визначення координат в сенсорній мережі зазвичай виглядає наступним чином. Припустимо в деякій області простору S розміром $S = \{i1, i2, \dots, in\}$ (де n - число сенсорів в мережі) випадковим чином однорідно розподілені об'єкти безпровідної сенсорної мережі $\{i\}$, де $i \in U = [1, \dots, U]$:

Ці об'єкти мають радіозасоби, завдяки яким кожен об'єкт може спілкуватися і визначати відстані d до найближчих «сусідів» (об'єкти з якими є зв'язок в радіусі L), при цьому (з способу визначення відстаней) відома точність проведених вимірювань. Кожен об'єкт i збирає інформацію про відстані до всіх доступних "сусідів" j і заносить її в таблицю $T_i = \{j, d_{ij}\}$. Виходячи з цих даних потрібно визначити координати об'єктів \vec{r}_i . Іншими словами потрібно вирішити систему рівнянь такого вигляду:

$$|\vec{r}_i - \vec{r}_j| = d_{ij} \quad (1)$$

де d_{ij} - виміряна відстань від i до j , як правило містить похибку виміру описану розподілом $F(d_{ij}, \sigma_{ij})$, де $i, j = [1, \dots, U], i \neq j$. Як правило, в якості функції розподілу F використовується нормальний розподіл $N(0, \sigma_{ij})$, при цьому дисперсія помилки вимірювання d визначається способом оцінки відстані, і може бути оцінена апіорі теоретично, на основі імітаційного моделювання або з експерименту. Для

зручності викладок краще використовувати двовимірний випадок ($\vec{r}_i = |x_i, y_i|^T$, мережа розгорнута на плоскій поверхні) - це допущення не впливає на загальність міркувань, що приводяться, але спрощує теоретичний розгляд і подальшу практичну реалізацію алгоритмів визначення координат.

Результат вирішення поставленого завдання незалежно від алгоритму визначення координат залежить від ряду початкових умов: наявності базису СК (об'єктів з апріорі відомими координатами), точності виконуваних вимірювань відстаней σ , рівномірності і щільності розподілу об'єктів мережі $i \in U$.

Базис СК зазвичай задається набором об'єктів $i \in Q$, які можуть визначити свої координати самостійно, наприклад за допомогою GPS. Економічно доцільно, щоб частка таких об'єктів була невелика, $Q \ll U$. Звичайно передбачається $0.1U \leq Q \leq 0.3U$.

Точність вимірювань відстаней σ залежить від способу оцінки відстані. Найбільш часто згадуються в літературі такі способи:

1. Вимірювання відстаней на основі вимірювання часу поширення сигналу від передавача до приймача - ToA (Time-of-Arrival).

2. Вимірювання відстаней на основі вимірювання потужності прийнятого сигналу RSSI - (Received-Signal-Strength-Indicator).

Ми досліджуємо можливість вимірювання відстаней в мережі стандарту IEEE 802.15.4, тому для визначення відстаней будемо використовувати рівень прийнятого сигналу, так як всі наявні передавачі по стандарту апаратно підтримують таку можливість. Оцінка відстані відбувається з співвідношення

$$P(d) = P(d_0) - 10n \log_{10}(d / d_0), \quad (2)$$

P - рівень сигналу, що приймається в децибелах відносно мілівата, дБм, n - показник послаблення. Показується, що у вільному просторі відносна помилка оцінки відстані $\Delta d / d_0$ повинна мати однаковий розподіл незалежно від відстані між передавачем і приймачем, яка зазвичай апроксимується нормальним розподілом. Дисперсія відповідного нормального розподілу σ_d може бути визначена або за допомогою імітаційного моделювання, або за допомогою експерименту. Для цього можна провести аналітичний розгляд передачі сигналу в мережі стандарту IEEE 802.15.4 в тракті "передавач-канал-приймач".

Для оцінки рівномірності і щільності розподілу об'єктів мережі пропонується використовувати усереднене число "сусідів" для всієї мережі m , яке нескладно визначити на основі інформації з таблиць маршрутизації

$$m = \frac{1}{U} \sum_i U_i \quad (3)$$

де M_i - число сусідів об'єкта i . Теоретично мінімально можливе значення m при фіксованих параметрах S, U, L виходить при максимально однорідному розподілі і може бути обчислено з співвідношення

$$m_{\min} = \int_S \frac{U}{S} d(S \cap S_i) \quad (4)$$

де S_i - область "видимості" об'єкта i (круг радіуса L з центром в точці \vec{r}_i). У разі топології мережі $S = A \times A$ при $A \gg L$ значення m_{\min} очевидно визначається за формулою

$$m_{\min} = m_1 = \frac{U\pi L^2}{A^2} \quad (5)$$

При $A \approx L$ при взятті інтегралу (4) отримаємо вираз

$$m_{\min} = m_2 = \frac{U\pi L^2}{A^4} \left((A-L)^2 + \frac{(A-L)L^3}{A^2} \left(\pi - \frac{5}{3} \right) + L^2 \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{17}{24} \right) \right) \quad (6)$$

При цьому цілком очевидно що $m_2 \rightarrow m_1 - 0$, $A/L \rightarrow \infty$

Таким чином судячи з відхилення величини m , розрахованої на основі співвідношення (3) від мінімально можливого при фіксованих S, U, L значення, отриманого з (4) - (6) можна судити про рівномірність розподілу об'єктів мережі. Розглядаються топології з $m_{\min} \leq m \leq 1.6m_{\min}$. Додатково слід зазначити що сама величина m у такому випадку також є мірою щільності розподілу об'єктів мережі.

Після того як поставлена задача пошуку координат, виконані початкові умови, потрібен алгоритм, який дозволяє на основі вихідних даних зробити перетворення $\{d_{ij}\} \rightarrow \{\vec{r}_i\}, i, j \in [1, \dots, U]$. Запропонуємо такий алгоритм, який володіє наступними властивостями:

1. Кожен об'єкт оцінює свої координати самостійно, в якості вхідних даних використовуються відстані і координати безпосередніх довколишніх "сусідів";

2. Крім самих координат, кожен об'єкт мережі паралельно обчислює і підтримує в актуальному стані точність поточної оцінки. Таким чином сукупна оцінка координат об'єкту i складається з наступної інформації:

$$\{\bar{r}_i, p_i\}, \quad (7)$$

де $\bar{r}_i = |x_i y_i|^T$, $p_i = |\text{cov } \bar{r}_i|$ - ковариційна матриця, що характеризує апроксимовану нормальним розподілом точність \bar{r}_i .

Для отримання початкової оцінки координат використовується процедура триангуляції: за наявності 3-5 вимірювань складається система рівнянь виду $|\bar{r}_i - \bar{r}_j| = d_{ij}$, яка може бути зведена до надлишкової лінійної системи рівнянь виду (тут і далі індекс поточного об'єкта i опущений)

$$A\bar{r} = B, \quad (8)$$

з якої можна знайти початкову оцінку координат, що задовольняє критерію мінімуму величини $(A\bar{r} - B)^T (A\bar{r} - B)$ у вигляді

$$\bar{r}^0 = (A^T A^{-1}) A^T B, \quad (9)$$

Після цього по мірі надходження інформації будується послідовність оцінок

$$\{\bar{r}^1, p^1\}, \{\bar{r}^2, p^2\} \dots \{\bar{r}^n, p^n\}, \quad (10)$$

з якої можна отримати одну загальну інтегральну оцінку координат $\{\bar{r}^n, p^n\}$. Для отримання такої оцінки пропонується використовувати процедуру калманівської фільтрації. Такий підхід дозволяє не зберігати в умовах обмеженості ресурсів всю послідовність оцінок (10), а тільки оновлювати по мірі надходження інформації останню оцінку координат.

За умови відсутності пересувань об'єктів сенсорної мережі відповідні співвідношення будуть виглядати наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{r}^{n-} &= \bar{r}^{n-1} \\ p^{n-} &= p^{n-1} \end{aligned} \quad (11)$$

На етапі поновлення при отриманні чергового "виміру" \bar{r}^n з помилкою $z^n = N(\bar{r}, p^n)$:

$$\begin{aligned} \bar{r}^n &= \bar{r} + \bar{z}^n \\ \bar{r}^n &= \bar{r}^{n-} + K_n (\bar{r}^n - \bar{r}^{n-}) \\ p^n &= p^n (p^{n-} + p^n)^{-1} p^{n-} \\ K_n &= p^{n-} (p^{n-} + p^n)^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

Висновки.

Таким чином виходить досить простий в реалізації розподілений алгоритм визначення координат, що володіє невисокою обчислювальною складністю, що використовує при оцінці координат об'єкту тільки інформацію від довколишніх сусідів.

На сьогоднішній день простим і доступним методом перевірки та дослідження алгоритмів взаємодії елементів мережі або функціонування мережі в цілому є імітаційне моделювання на ПК. Для цього можуть використовуватися готові програмні продукти, або створюватися нові, що враховують специфічні вимоги. Наявні симулятори БСМ не вирішують задачу емуляції фази ініціалізації та визначення місцезнаходження об'єктів сенсорної мережі, а тільки моделюють стек протоколів (включаючи маршрутизацію), енергоспоживання, приймач, канал зв'язку (у тому числі ландшафтні особливості) і взаємодію між об'єктами. Симулятор позиціонування БСМ, має широку функціональність і моделює 6 алгоритмів позиціонування, але не містить модель позиціонування за алгоритмом RSSI і реалізація алгоритму уточнення важка і недоцільна.

Як видно на наведеному рис. 1, відхилення обчислених координат в середньому становить 43,47 м. Затвердження, що у відкритому просторі (поза приміщенням) точність алгоритму RSSI становить приблизно 0,5d, підтверджує адекватність моделі та її відповідність теоретичним даними. за результатами моделювання можна зробити висновок, що застосування способу дозволяє отримати точність координат 0,65-0,98 м вже на етапі ініціалізації мережі без застосування допоміжних модулів визначення місця розташування, маяків і без додаткових енергозатрат (не потрібно безліч ітерацій взаємодії елементів).

Незважаючи на те, що метод RSSI характеризується збільшенням похибки в залежності від віддалення від позиціонуемого елемента мережі, запропонований метод з поєднаним експериментально-аналітичним циклом, заснований на методі RSSI, не має такої залежності. Як видно з результатів моделювання, похибка рівномірна на всьому сенсорному полі.

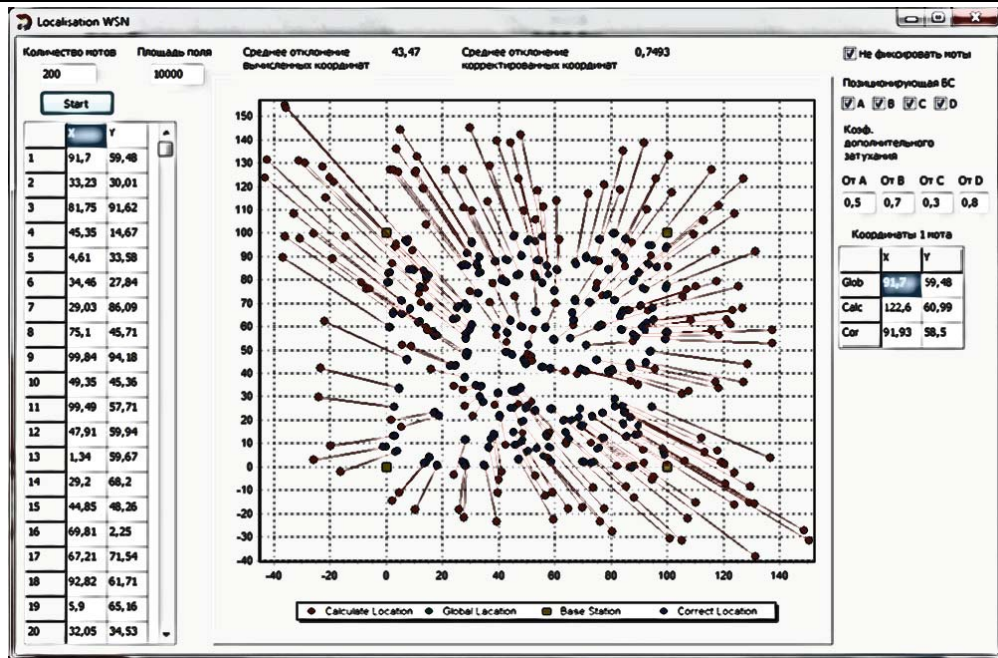


Рис. 1. Результат моделювання процесу позиціонування

Література

1. Восков Л.С. Энергоэффективный комбинированный метод локализации в беспроводных сенсорных сетях / Л.С. Восков, Р.О. Курпатов. // Журнал «Датчики и системы», №4, 2011. – М. : ООО «СенСиДат-Контрол», 2011, 153 с.
2. Иванов Е.В., Козлов В.Н., Курикша В.А. "Экспериментальное определение координат в сетях стандарта IEEE 802.15.4" // Труды 63-й научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, 2008, 256 с.
3. IEEE Std. 802.15.4-2003. IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) / IEEE Computer Society. – NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003. – 670 p.
4. Зеленин А.Н. Фаза инициализации в беспроводных сенсорных сетях [Текст]/ А.Н. Зеленин, В.А. Власова// Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – №26 – С. 55-61.
5. Qi, Y. On relation among time delay and signal strength based geolocation methods / Y. Qi, H. Kobayashi// Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE. – Dec. 2003. – Vol. 7. – P. 4079-4083.

References

1. L. S. Voskov, R. O. Kurpatov. Energy-efficient combined method of localization in wireless sensor networks // Magazine "Sensors and systems", №4, 2011. - Moscow: ООО "SenSiDat control", 2011, 153 p.
2. E. V. Ivanov, V. N. Kozlov, V. A. Kuriksha "Experimental determination of the coordinates in the network standard IEEE 802.15.4" // Proceedings of the 63th Scientific Session of RNTORES them. A. S. Popov, Moscow, 2008, 256 p.
3. IEEE Std. 802.15.4-2003. IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)/ IEEE Computer Society. - NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003. - 670 p.
4. Zelenin, A. N. Initialization phase in wireless sensor networks / AN Zelenin, VA Vlasov // News Natsionalnogo tehnicnogo universitetu "KhPI." Zbirnik Naukova Pratzhen. Tematicnosti vipusk: Novi Reforms in Suchasna tehnologiyah. - 2012. - №26 - S. 55-61.
5. Qi, Y. On relation among time delay and signal strength based geolocation methods [Text] / Y. Qi, H. Kobayashi // Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE. - Dec. 2003. - Vol. 7. - P. 4079-4083.

Рецензія/Peer review : 20.12.2014 p.

Надрукована/Printed :29.12.2014 p.