

УДК 621.584.9

Прищепя Т.О., ст.. викладач;  
Лень В.Є., магістр,  
НТУУ «КПІ»

## МЕТОД І АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ В БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ZIGBEE

*Розроблено метод і алгоритми визначення координат об'єктів в бездротовій сенсорній мережі, що дозволяє зняти деякі обмеження на топологію, що використовується в мережі, обчислювальну здатність мотів, наявність об'єктів із заздалегідь відомими координатами.*

*Разработан метод и алгоритмы определения координат объектов в беспроводной сенсорной сети, который позволяет снять некоторые ограничения на топологию, которая используется в сети, вычислительную способность мотив, наличие объектов с заранее известными координатами.*

*The algorithm for determining the coordinates of the wireless sensor network's object was found. It allows to remote some restrictions on topology used in WSN, computing environment motes, the presence of objects with known coordinates.*

**Вступ.** Актуальним питанням на сьогодні є необхідність оперативної організації мережі моніторингу різноманітних параметрів навколишнього середовища в районах, де сталися надзвичайні ситуації природного чи техногенного характеру. Це можливо шляхом розгортання бездротових сенсорних мереж з самоорганізацією, об'єкти яких можуть працювати тривалий час завдяки ефективному енергозбереженню. Такі мережі мають широке коло застосування: рятувальні операції МНС, тактичні мережі військового призначення, дистанційний збір інформації з віддалених сенсорів, зв'язок між транспортними засобами та ін. Однак специфіка сфери призначення сенсорних мереж потребує визначення координат об'єктів мережі, оскільки під час техногенної катастрофи чи бойових дій потрібно не тільки передавати інформацію з сенсорів на сервер, де ці дані будуть оброблені, а й знати точне місце, з якого їх було отримано.

Існуючі сьогодні алгоритми локалізації об'єктів сенсорної мережі потребують частку мотів, які оснащені датчиками глобального позиціонування, або існування в мережі стаціонарних об'єктів, координати яких задано заздалегідь. Це збільшує вартість та енергоспоживання мережі пропорційно частці оновлених мотів, наслідком чого є зменшення часу праці окремих об'єктів. Отже, є потреба в створенні алгоритму, який би

використовував лише системну інформацію сенсорної мережі та не залежав від стороннього обладнання (сенсорів GPS чи GLONASS).

**Постановка завдання.** Формально задача пошуку координат об'єктів встановлюється наступним чином: припустимо, що в деякій області простору розміром  $A * B$  випадковим чином однорідно розподілені об'єкти бездротової сенсорної мережі  $\{i\}$ , де  $i = [1, \dots, M]$  (рис.1).

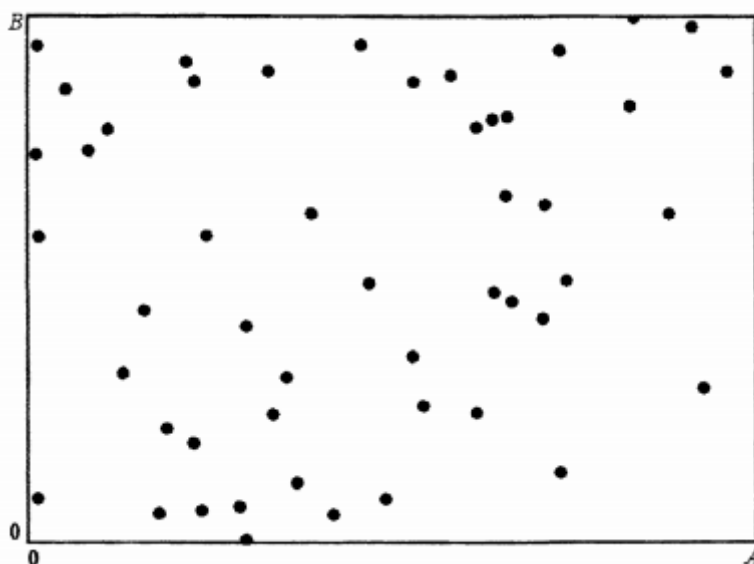


Рис.1. Однорідна сенсорна мережа

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), при цьому (виходячи зі способу визначення відстаней) відома точність проведених вимірювань. Кожний об'єкт *і* збирає інформацію про відстані до всіх доступних "сусідів" *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:

$$|\vec{r}_i - \vec{r}_j| = d_{ij}, \quad (2)$$

де  $d_{ij}$  – виміряна відстань від  $i$  до  $j$ , як правило містить похибку вимірювання описувану розподілом  $F(d_{ij}, \sigma_{ij})$ , де  $i, j = [1, \dots, M], i \neq j$ . Як правило, в якості функції розподілу  $F$  використовується нормальний розподіл  $N(0, \sigma_{ij})$ . У двовимірному випадку  $\vec{r}_i = |x_i y_i|^T$ , в тривимірному – відповідно:  $\vec{r}_i = |x_i y_i z_i|^T$ . Для зручності всіх наступних викладок в даній роботі передбачається двовимірний випадок (мережа розгорнута на плоскій поверхні) – це допущення не впливає на спільність міркувань, що приводяться, але спрощує теоретичний розгляд і подальшу практичну реалізацію алгоритмів визначення координат.

Вимір відстаней в свою чергу яка правило здійснюється або на основі часу розповсюдження сигналу від передавача до приймача (TimeofArrival - ToA), або на основі оцінки рівня прийнятого сигналу (ReceivedSignalStrengthIndicator–RSSI). При дослідженні мережі було встановлено, що алгоритм ToA дає меншу похибку в вимірі відстані, але оскільки приймачі стандарту ZigBee підтримують метод RSSI апаратно, то він є більш доцільний в використанні.

Вирішення поставленої задачі можна шукати 2-ма способами: перший полягає в зведенні розглянутої нелінійної задачі якимось чином до лінійної, другий – вирішення нелінійної задачі, наприклад:

$$f = \sum_i f_i = \sum_i \sum_j (|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - d_{ij})^2 \quad (2)$$

Алгоритм вирішення даної задачі окрім алгоритма визначення координат залежить й від інших факторів, зокрема:

1. Однорідність розподілення об'єктів всередині мережі
2. Щільність розподілу об'єктів мережі
3. Точність виміру відстаней

Для оцінки якості роботи алгоритму і оцінки результатів можна використовувати критерії, зокрема:

1. Процентне співвідношення числа об'єктів, координати яких вдалося визначити до загального числа об'єктів залежно від щільності мережі і точності вимірювання відстаней
2. Середньоквадратичне відхилення оцінок відстаней, отриманих в результаті роботи алгоритму визначення координат від відповідних оцінок відстаней, отриманих на основі RSSI (2).
3. Відхилення оцінок відстаней, отриманих в процесі роботи мережі від результатів роботи алгоритму визначення координат  $\max \left| |\vec{r}_i - \vec{r}_j| - d_{ij} \right|$ .

### Наявні варіанти вирішення поставленої задачі

Самий очевидний спосіб вирішення поставленого завдання – це оснащення всіх об'єктів мережі модулями зовнішньої радіонавігаційної системи (GPS, ГЛОНАСС). Проте стосовно до даної задачі таке рішення має ряд таких же недоліків: вартість модулів, їх розміри, високе енергоспоживання тощо.

Одним з найпоширеніших підходів до вирішення завдання пошуку координат на основі інформації, зібраної в процесі роботи мережі, є система APS. APS являє собою набір алгоритмів визначення координат в сенсорній мережі, при цьому кожний об'єкт шукає свої координати самостійно. Передбачається, що невелика частина об'єктів (орієнтири) здатна визначити свої координати на основі інформації ззовні (за допомогою наземної або супутникової навігаційної системи).

Система APS складається з наступних алгоритмів: DV-hop,

**Алгоритм «DV-hop»** становить собою послідовність наступних дій:

1. Кожний об'єкт намагається оцінити відстань до орієнтирів в числі «кроків» (проміжних об'єктів) і заносить ці дані до таблиці  $\{\vec{r}_i, h_i\}$ , де  $\vec{r}_i$  – координата орієнтира  $i$ ,  $h_i$  – число кроків до  $i$ . Після чого вони обмінюються отриманими даними з найближчими сусідами і підтримують інформацію в таблиці в актуальному стані.
2. Після того як кожний орієнтир забрав достатній об'єм даних, відбувається оцінка середньої довжини одного «кроку»:

$$c_i = \frac{\sum_j |\vec{r}_i - \vec{r}_j|}{\sum_k h_k} \quad (3)$$

Далі розраховується значення  $c = \bar{c}_i$  усереднювання по всій мережі і передається всім об'єктам. В подальшому ця величина періодично оновлюється і підтримується в актуальному положенні.

3. Коли об'єкт має відстань в «кроках» до декількох орієнтирів і середня довжина одного кроку, він в змозі оцінити відстані до декількох орієнтирів в одиницях довжини і вирахувати свої координати на основі існуючих даних. Даний алгоритм краще всього працює в однорідних мережах, де відстані між об'єктами приблизно однакові. В іншому випадку цей алгоритм в результаті усереднювання дозволяє отримати лише грубі оцінки координат.

**Алгоритм «ABC»** полягає в тому, що якщо серед сусідів є три об'єкти з відомими координатами, то на основі цієї інформації можна записати систему рівнянь:

$$\{|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - d_{ij}\}, \quad (4)$$

яка вирішується відносно невідомої змінної  $\vec{r}_i$ . Після цього  $\vec{r}_i$  служить джерелом інформації для інших об'єктів. Якщо кількість орієнтирів в околиці  $i$  більше, то можна знайти рішення, що приводить до мінімуму

$$\sum_{i < j} |\vec{r}_i - \vec{r}_j| - \hat{d}_{ij} \quad (5)$$

Даний алгоритм працює при відсутності помилок виміру відстаней і в тих випадках, коли об'єкти розподілені рівномірно і з достатньою щільністю.

**Алгоритм «MDS-MAP»** полягає в послідовності дій:

1. Для кожної пари об'єктів оцінюється найкоротша відстань один до одної. Коли об'єкти є безпосередніми сусідами один одного, цією оцінкою є безпосередній вимір відстані. В інших випадках в якості оцінки приймається найкоротший шлях (отриманий, наприклад, на основі алгоритму Дейкстри). В результаті будується матриця виду:

$$A = \begin{vmatrix} \hat{d}_{11} & \cdots & \hat{d}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{d}_{M1} & \cdots & \hat{d}_{MM} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

Головна діагональ матриці  $A$  – нульова.

- Після того як побудовано матрицю  $A$  пошук координат окремих об'єктів  $\vec{r}_i, j = [1, \dots, M]$  йде за допомогою рішення задачі багатомірної оптимізації функціоналу:

$$f = \sum_{i < j} (|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - \hat{d}_{ij})^2, \quad (6)$$

- Отримане рішення є інваріантним відносно перетворення системи координат, тому потребує перетворення до глобальних координат. Для цього потрібно 3-4 об'єкти з невідомими координатами.

Даний алгоритм має особливості, які необхідно зазначити:

- Централізоване визначення координат
- Потреба в наявності базової станції в мережі
- Алгоритм MDS пропонує найкращу оцінку координат об'єктів внаслідок того, що він використовує всі дані мережі. Отже, він може бути еталоном в порівнянні з іншими алгоритмами, але його реалізація має складнощі.

Отже, приведені алгоритми мають ряд особливостей:

- Оснащення частки об'єктів датчиками системи глобального позиціонування
- Необхідність проведення великого об'єму обчислень для вирішення оптимізаційних задач для визначення координат
- Використання об'єктом даних про координати інших об'єктів, які не є безпосередніми сусідами

Указані особливості та вищенаведені алгоритми дозволяють сформулювати основні вимоги до радіонавігаційної системи, призначеної для використання в сенсорній мережі.

- Децентралізоване визначення координат, коли кожний об'єкт мережі визначає свої координати самостійно
- Використання лише системної інформації мережі, відсутність додаткового оснащення у вигляді GPS датчиків

**Вирішення поставленої задачі за допомогою розробленого методу і алгоритму визначення координат об'єктів бездротової сенсорної мережі**

Запропонований метод визначення координат об'єктів полягає в тому, що в процесі роботи мережі кожний об'єкт до кожного відправленого повідомлення додає дані про своє місцезнаходження (якщо вони відомі з достатньою точністю) і всі ближні сусіди, які отримують це повідомлення використовують інформацію і оцінку відстані до передавача для

отримання і уточнення даних про свої координати. Таким чином в методі використовується лише та інформація, яка отримана об'єктом мережі в процесі роботи самостійно від безпосередньо ближніх сусідів. В цілому метод визначення координат можна поділити на 3 етапи:

1. Сбір даних
2. Визначення координат
3. Уточнення координат

**Сбір даних** передбачає накоплення інформації про координати та про відстані до ближніх сусідів в таблицях  $T_i$  наступного вигляду:

$$T_i = \{ \{\vec{r}_a, p_a, d_a\}, \{\vec{r}_b, p_b, d_b\}, \dots \}, \quad (7)$$

де  $a, b \dots \in M_i$  – ідентифікатори об'єктів, що знаходяться в радіусі  $L$  до  $i$ .

**Алгоритм збору даних.** Швидкість заповнення таблиці  $T_i$  і кількість елементів в ній залежить від кількості ближніх сусідів, які можуть визначити свої координати самостійно, тобто:

$$Q_i = M_i \cap Q,$$

де  $Q$  – процентне відношення об'єктів в мережі, які в змозі визначити свої координати самостійно.

При цьому елементи матриць  $p_a, p_b, \dots: \sigma_{jk} \equiv 0$ , оцінка відстаней  $d$  містить помилки вимірювань з відомими другими центральними моментами  $\sigma_d$ .

При отриманні об'єктом  $i$  декількох повідомлень від об'єкту  $a$  з невеликим інтервалом за часом в розпорядженні  $i$  виявляється декілька відліків:

$$\{\vec{r}_{a1}, p_{a1}, d_{a1}\}, \{\vec{r}_{a2}, p_{a2}, d_{a2}\}, \dots, \quad (8)$$

де оцінки координат  $\{\vec{r}_a, p_a\}$  – однакові, а оцінки відстаней  $d_a$  можуть бути різними. Тим не менш з набору  $d_{a1}, d_{a2} \dots$  не може бути отримана більш точна оцінка  $d_a$ , оскільки дані величини не є статистично незалежними.

Якщо в процесі роботи виявляється, що  $T_i > 3$  і в таблиці присутні дані про трьох сусідів, що не знаходяться на одній прямій  $\{\{\vec{r}_a, p_a\}, \{\vec{r}_b, p_b\}, \{\vec{r}_c, p_c\}\}$ , то ці дані можуть бути використані для отримання власної оцінки  $\{\vec{r}, p\}$ . По закінченню цієї процедури використані дані з таблиці вилючаються. Отриманий результат може бути переданий в якості вихідних даних для розрахунку і уточнення координат.

**Визначення координат.** Для оцінки координат треба вирішити систему з декількох рівнянь виду:

$$\{|\vec{r} - \vec{r}_j| = d_j\}. \quad (9)$$

**Алгоритм визначення координат.** Лінійна система рівнянь при  $k > 3$  надлишкова, тому треба знайти таке рішення  $\vec{r}_0$  таке, при якому різниця між лівими та правими частями системи рівнянь була мінімальна, тобто:

$$f(\vec{r}) = \sum_j f(\vec{r}_j) = \sum_j (|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - d_{ij})^2 > f(\vec{r}_0), \quad \forall \vec{r}' \neq \vec{r}_0: f(\vec{r}') > f(\vec{r}_0) \quad (10)$$

Після піднесення до квадрату цих частей:

$$|\vec{r}| + |\vec{r}_j| - 2(\vec{r}, \vec{r}_j) = d_j^2 \quad (11)$$

З  $k$  квадратних рівнянь можна отримати  $(k-1)$  лінійних відніманням першого рівняння з всіх інших:

$$|\vec{r}_j|^2 - |\vec{r}_1|^2 - 2(\vec{r}, \vec{r}_j - \vec{r}_1) = d_j^2 - d_1^2 \quad (11)$$

Враховуючи асоціативність скалярного добутку векторів і переносючи всі відомі доданки в праву частину отримаємо:

$$2(\vec{r}_j - \vec{r}_1)^T (\vec{r}) = (|\vec{r}_j|^2 - |\vec{r}_1|^2) - (d_j^2 - d_1^2) \quad (12)$$

Введемо позначення:

$$A_j = 2(\vec{r}_j - \vec{r}_1)^T \text{ і } B_j = (|\vec{r}_j|^2 - |\vec{r}_1|^2) - (d_j^2 - d_1^2)$$

Рівняння (11) приймає вигляд:

$$A_j(\vec{r}) = B_j \quad (13)$$

Після введення матричних позначень:  $A = |A_2, \dots, A_{k-1}|^T, B = |B_2, \dots, B_{k-1}|^T$ , виходить лінійна система вигляду:

$$A\vec{r} = B \quad (14)$$

Вирішення заданої системи, що задовольняє умовам (9)-(10) існує при умові, що ранг матриці  $A$  перевищує розмірність  $\vec{r}$  і при цьому це виражається наступним співвідношенням:

$$\vec{r}' = (A^T A^{-1}) A^T B \quad (15)$$

Подана величина  $\vec{r}' = \vec{f}(\{\vec{r}_j, p_j, d_j\}), j \in [1, \dots, k]$  буде становити оптимальну оцінку координат, отриману на основі зібраної інформації.

Точність величини (15) описується діагональною коваріаційною матрицею з елементами:

$$\sigma^2 = \max \left\{ \frac{1}{\sin \widehat{r_i r_j}} (\sigma_i^2 + \sigma_j^2) \right\} \quad (16)$$

**Уточнення координат.** Розглянемо ситуацію, коли на основі декількох вимірів вже зроблена оцінка координат  $\vec{r}^0$ , точність якої описується матрицею  $p^0$ . Припустимо, що із накопиченням відстаней до сусідів з відомими координатами аналогічним чином, але на основі нових вихідних даних з часом з'являються нові оцінки:

$$\vec{r}, \vec{r}^2, \vec{r}^n, \quad (17)$$

точність яких описується коваріаційними матрицями:

$$p^0, p^1, \dots, p^n \quad (18)$$

відповідно. В такій ситуації бажано мати в кожний момент часу загальну інтегральну оцінку координат  $\vec{r}^n$  і відповідну їй точність в вигляді коваріаційної матриці  $p^n$

$$\begin{aligned} \vec{r}^n &= f(n, \vec{r}^0, p^0, \dots, \vec{r}^n, p^n) \\ p^n &= g(n, \vec{r}^0, p^0, \dots, \vec{r}^n, p^n) \end{aligned} \quad (19)$$

**Алгоритм визначення координат.** Зберігання і використання для отримання чергової оцінки всієї сукупності точок при використанні в умовах обмежених обчислювальних ресурсів не є доцільним. В такій ситуації найбільш зручні і практичні процедури рекурентної оцінки, в якій в кожний момент часу в пам'яті об'єкта зберігається поточна інтегральна оцінка координат  $\{\vec{r}, p\}$  і для отримання наступної оцінки до наявної інформації  $\{\vec{r}, p\}$  додається чергове зміна  $\{\vec{r}, p\}$ :

$$\begin{aligned} \vec{r}^n &= f(\vec{r}^{n-1}, p^{n-1}, \vec{r}^n, p^n) \\ p^n &= g(\vec{r}^{n-1}, p^{n-1}, \vec{r}^n, p^n), \end{aligned} \quad (20)$$

Де для обчислення  $f$  і  $g$  вже треба значно менша кількість операцій ніж у випадку (17). З цією метою використовується процедура калмановської фільтрації.

Оцінку точності доцільно почати з аналізу рівнянь (7), яка містить рівняння другого степеню, отже вона має два розв'язки  $\vec{r}_{1,2}$ . Точність цих розв'язків виражається коваріаційними матрицями  $p_{1,2}$ . Для прийняття відповідного рішення треба оцінити наступні ймовірності:

$$\begin{aligned} P_1 &= P(\vec{r}_1, \vec{r}^{n-1}) \\ P_2 &= P(\vec{r}_2, \vec{r}^{n-1}) \end{aligned} \quad (21)$$

При такій ситуації задається функція вартості помилки й вибір правильного рішення виходить із співвідношення  $\frac{P_i}{P_{3-i}} > \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – порогова величина  $\varepsilon \gg 1$ . Якщо жодне зі значень  $i$  не задовольняє критерію, то обидві гіпотези можуть бути відкинуті, або може продовжувати з'являтися додаткова інформація (оцінок відстаней і координат).

**Висновки.** В даній статті запропонований метод і алгоритми визначення координат, призначений для використання в бездротових мережах зв'язку з рівномірним розподіленням об'єктів всередині мережі, оснований на оцінці відстаней між об'єктами в умовах помилок, припускаючи наявність всередині мережі частки об'єктів з відомими координатами. Запропонований метод і алгоритми відносяться до класу ітераційних методів і алгоритмів з розповсюдженням довіри. При цьому метод і алгоритми мають наступні переваги:

1. Можливість використання в будь-яких умовах



2. Простота реалізації
3. Невелика обчислювальна складність алгоритму
4. Можливий для мереж з високою щільністю розподілення об'єктів

*Використані джерела інформації:*

1. Иванов Е. В., Козлов В. Н., Курикса В. А., "Экспериментальное определение ошибки измерения расстояний между устройствами стандарта IEEE802.15.4/ ZigBee", "Радиолокация и Связь" (журнал в журнале), 2008
2. В. С. Шебшаевич, "Сетевые спутниковые радионавигационные системы", Изд-во "Радиоисвязь", 1993
3. Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Golatowski, Dirk Timmermann, Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks, University of Rostock, 2012
4. N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", IEEE Personal Communications Magazine, 7(5):28–34, October 2000.