

МЕТОД ПОБУДОВИ k - ПОКРИТТЯ ПЛОЩІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ В БЕЗПРОВОДОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ З НЕОДНОРІДНИМИ ВУЗЛАМИ

У статті запропоновано децентралізований метод побудови непересічних покриваючих підмножин, які гарантують забезпечення k - покриття області спостереження (k - зв'язність) та враховують остаточну енергію вузлів. Метод дозволяє визначити якість побудованого k - покриття області спостереження та можливість його динамічної зміни, кількість покриваючих підмножин, визначити критичні області покриття та рівномірно розподілити витрати енергії вузлів. Для реалізації методу запропонована нові метрики та правила перевірки якості покриття (критичні області, витрати енергії вузлів). Метод дозволяє підвищити тривалість функціонування сенсорної мережі на 10 – 15 %.

Жук А.В. Метод построения \hat{e} - покрытия площади наблюдения в беспроводных сенсорных сетях с неоднородными узлами. В статье предложен децентрализованный метод построения непересекающихся покрывающих подмножеств, которые гарантируют обеспечение k - покрытия области наблюдения (k - связность) и учитывают остаточную энергию узлов. Метод позволяет определить качество построенного k - покрытия области наблюдения и возможность его динамического изменения, количество покрывающих подмножеств, определить критические области покрытия и равномерно распределить затраты энергии узлов. Для реализации метода предложены новые метрики и правила проверки качества покрытия (критические области, расход энергии узлов). Метод позволяет повысить продолжительность функционирования сенсорной сети на 10 – 15 %.

A. Zhuk The method of constructing k - coverage of the monitoring area in wireless sensor networks with heterogeneous nodes. The article proposes a decentralized method for constructing disjoint covering subsets that guarantee the coverage of the observation area (k -connectivity) and take into account the final energy of the nodes. The method allows determining the quality of the built-up coverage of the observation area and the possibility of its dynamic change, the number of covering subsets, to determine the critical areas of coverage, and evenly distribute the energy costs of the nodes. For implementation of the method, new metrics and rules for checking the quality of coverage (critical areas, energy costs of nodes) are proposed. The method allows increasing the duration of functioning of the sensor network by 10 – 15 %.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, k - покриття, тривалість функціонування.

Постановка завдання. Безпроводові сенсорні мережі (Wireless Sensor Network) – розподілені мережі, що складаються з маленьких вузлів (сенсорів) з інтегрованими функціями моніторингу параметрів навколишнього середовища, обробки і передачі даних [1]. Переваги технологій безпроводових сенсорних мереж (БСМ) можуть бути ефективно використані для вирішення прикладних задач в різних сферах людської діяльності: моніторингу навколишнього середовища, критичної інфраструктури, медицині, розвідці і т.д.

Наприклад, БСМ військового призначення призначені для збору та ідентифікації інформації про стан об'єктів та параметрів поля бою (факти перетину зон охорони та застосування зброї, маршрути переміщення, координати знаходження техніки і військовослужбовців, рівні хімічного або радіоактивного зараження і т.п.), охорони об'єктів, віддаленого спостереження за полем бою, забезпечення ситуаційної обізнаності командирів тощо. Вузли цих мереж повинні адаптуватися до частих змін умов покриття, топології мережі та маршрутів передачі даних, інтенсивності трафіка та ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. В таких умовах забезпечити покриття сенсорами області моніторингу та інформаційний обмін з заданою якістю неможливо без ефективної системи управління мережею [2]. Основними функціями системи управління БСМ є: розгортання, покриття, моніторинг та передача даних. Однією з основних задач функціонування БСМ є задача покриття, яка в залежності від типу покриття поділяється на покриття цілі (точки), площі (зони, сектора), бар'єру.

Аналіз останніх публікацій. Задачам покриття цілей БСМ присвячена значна кількість робіт [3 – 12]. У статтях [4, 5] запропонований широкий огляд різних моделей покриття, математичних постановок задач і загальні алгоритми розв'язання задач покриття зон, цілей, бар'єрів в БСМ. В [4, 6] показано, що задача пошуку максимальної кількості множин

покриття є NP-складною, запропонований ряд евристик при використанні жадібно алгоритму її рішення. В [7] проводиться аналіз обчислювальної складності жадібних алгоритмів пошуку множин покриття при різних евристичних пошуку рішень. Представлені результати проведених експериментів. В [8] для збільшення часу функціонування мережі запропонований алгоритм складання плану активності/пасивності множин покриття вузлів. В [9] розглядається математична постановка оптимізації часу функціонування покриття мережі з секторальною діаграмою спрямованості моніторингу у вузлах. В [10] авторами розглядається алгоритм пошуку покриття цілей з ймовірнісним розташуванням вузлів та ймовірнісною моделлю моніторингу. В [11] запропоновано генетичний, а в [12] мурашиний алгоритми пошуку множин покриття.

Мета статті: розробка децентралізованого методу побудови непересічних покриваючих підмножин, які гарантують забезпечення k -покриття області спостереження (k -зв'язність), враховують остаточну енергію вузлів та перерозподіляють витрати енергії між вузлами для максимізації тривалості функціонування.

Виклад основного матеріалу.

Введемо наступні визначення.

Визначення 1. Точка області Π вважається покритою сенсорним вузлом s_i , якщо вона знаходиться в радіусі моніторингу вузла s_i . Точка області Π вважається k – покритою, якщо вона знаходиться в радіусі моніторингу не менш ніж k – сенсорних вузлів. Площа моніторингу Π вважається k – покритою, якщо кожна точка всередині неї k – покрита.

Визначення 2. Тривалості функціонування мережі. Тривалості функціонування сенсорної мережі – час роботи сенсорної мережі, протягом якого вся область Π k - покрита.

Задано: – площа покриття Π ; – безпроводова сенсорна мережа S , яка складається з n сенсорних вузлів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ і координати їх розміщення на місцевості (x_i, y_i) . Вузли сенсорної мережі розгорнуті випадковим чином. Сенсорна мережа може бути однорідною або неоднорідною, використовувати однакові або різні радіуси моніторингу; радіус моніторингу r_i і радіус передачі r_i сенсорного вузла.

Теорема 1. Задача знаходження НП є NP-повною [13].

Модель зв'язності: $r_{\text{вд}} \geq 2r_{\text{ін}}$ (якщо є k - покриття, то існує k - зв'язність).

Допущення: сенсорні вузли мають синхронізовані часи початку часу роботи t_0 (включення синхронізоване), після початкового розгортання кожна точка області моніторингу Π не менш k – покрита ([13] и [14]), відсутні обмеження на початкову енергію батареї сенсорного вузла і радіус моніторингу, немає двох сенсорних вузлів розташованих в одному і тому самому місці.

Необхідно: розрахувати (побудувати) максимальну кількість непересічних підмножин (НП), які задовольняють різним цільовим функціям: забезпечення k - покриття області спостереження та максимізації тривалості функціонування за рахунок збалансування витрат енергії вузлів.

1. Математична постановка задачі

Вихідні дані: m – кількість виявлених непересічних покриваючих підмножин; k – рівень покриття, заданий користувачем; $C_j (j=1\dots m)$ – j та покриваюча підмножина; $\text{пок}_j (j=1\dots m)$ – рівень покриття покриваючої підмножини C_j для забезпечення покриття всієї контрольованої області; $E_i (i=1\dots N)$ – початкова енергія батареї сенсорного вузла i , $e_{ij} (i=1\dots N; j=1\dots m)$ – кількість енергії що використовується сенсором i при роботі в активній покриваючій підмножині C_j ; $e_{ij} = 0$, якщо підмножина C_j не містить сенсор i , $e_i^{\text{ост}}$ – залишкова енергія сенсора i в момент невиконання вимог по k – покриттю мережі.

$$\text{Max } m, \quad (1)$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N (e_i^{\text{ост}} - e_{i_2}^{\text{ост}})^2, \quad (2)$$

при умові :

$$\bigcup_{l=1}^m C_j \subseteq S, \quad (3)$$

$$\text{пок}_j \geq k \text{ для всіх } j=1\dots m, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m e_{j,i} \geq E_i \text{ для всіх } i=1\dots N. \quad (4)$$

Рівняння 1 – цільова функція знаходження максимальної кількості непересічних підмножин. целевая функция нахождения максимального количества непересекающихся подмножеств.

Рівняння 2 – намагається збалансувати споживання енергії всіх сенсорних вузлів. При зменшенні залишкової енергії різних сенсорних вузлів до $e_i^{\text{ост}}$ в певний момент часу мережа перестає виконувати вимоги по k - покриттю.

Рівняння 3 гарантує, що все покриваючи множини є підмножинами всіх сенсорних вузлів мережі.

Рівняння 4 гарантує, що вся область безперервно k - покрита. Задається рівень покриття будь-якої підмножини.

Рівняння 5 гарантує, що сенсорні вузли всіх покриваючих підмножин не зможуть витратити більше енергії, ніж їх початкова.

2. Етапи реалізації метода побудови k - покриття області спостереження

Пропонується рішення задачі побудови повного покриття площі спостереження у відповідності до заданого рівня покриття (k – покриття) і вимог до витрат енергії батарей сенсорних вузлів. Необхідно щоб кожна точка всередині області моніторингу покривалась що найменш k – активними сенсорними вузлами.

Суть методу: в знаходженні графіків спостереження перерозподілу (активності вузлів) та перевірки периметричного покриття вузлів шляхом, який забезпечує k – покриття мережі.

Основні етапи функціонування методу (рис. 1):

1. Початок роботи вузлів (фаза прийняття рішення). Збір інформації про стан вузлів мережі (обмін службовими повідомленнями) та розрахунок витрат енергії вузлів (Блоки 1 – 4).

2. Перевірка k – покриття площі за допомогою теорії периметричного покриття (Блоки 5 – 7).

3. Потім при можливості реалізації k – покриття заданої якості метод прагне побудувати максимальну кількість непересічних підмножин з врахуванням витрат енергії батарей вузлів (Блоки 8 – 9).

4. Фаза моніторингу.

3. Реалізація методу побудови непересічних підмножин

Для реалізації методу побудови k – покриття області спостереження пропонується децентралізований алгоритм (п. 3).

Алгоритм вимагає тільки інформацію про найближчі сенсорні вузли, розраховує і будує графіки роботи непересічних підмножин, які гарантують k – покриття області моніторингу з врахуванням витрат енергії вузлів. Математично моделюється час очікування сенсорного вузла для прийняття рішення про свій статус (активний, пасивний), використовуючи параметри α і β (вимоги користувача до витрати енергії вузлів). Якщо вимоги до витрати енергії високі, то користувач привласнює параметру α дуже високе значення, а β низьке. Навпаки, якщо вимоги до витрати енергії мінімальні, величина параметра α може бути невеликою, а β високою.

Алгоритм працює циклічно, що дозволяє сенсорній мережі автоматично регулювати рівень покриття та економити витрати енергії батарей шляхом виключення надлишкових вузлів.

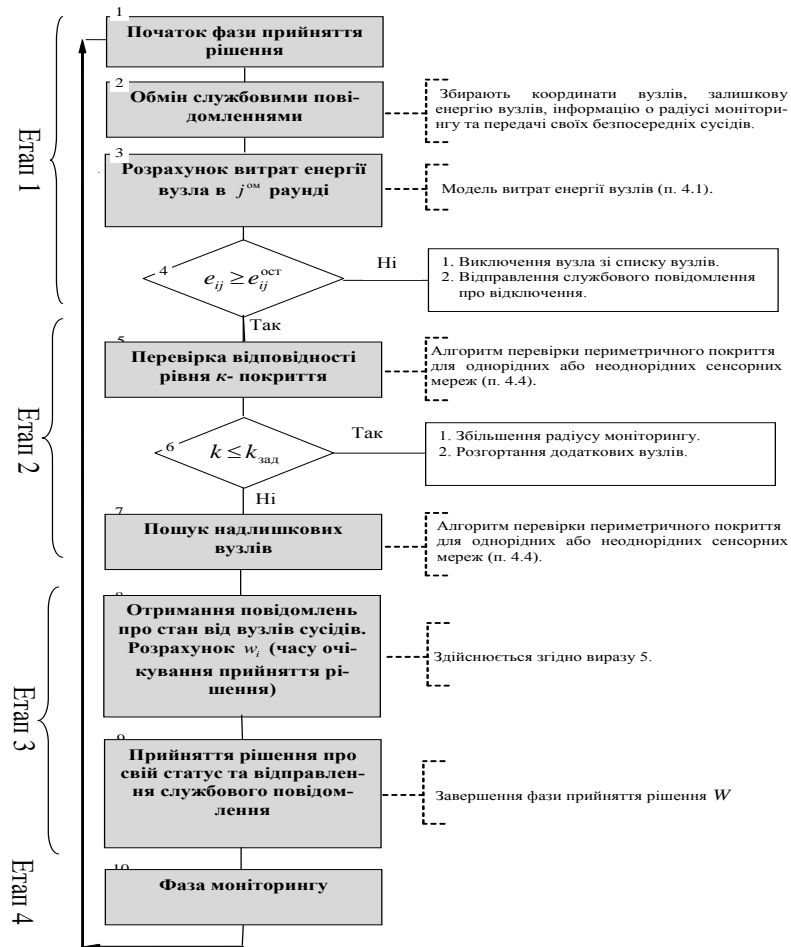


Рис. 1. Етапи реалізації методу побудови k - покриття сенсорним вузлом в одному раунді

Характеристики сенсорного вузла: w_i – таймер / тривалість часу, що визначає стан сенсора s_i (активний / сон), R_i – таймер сплячого сенсорного вузла s_i для активації в наступному раунді, n_i – поточна кількість сусідів, тобто число сусідів, які запитують сенсор s_i стати активними, N_i – кількість сусідів сенсора s_i , r_i – радіус моніторингу сенсора s_i , E_i – початкова енергія сенсора s_i , e_i – поточна залишкова енергія сенсора s_i , $e_{пор}$ – (порогова енергія): мінімальна кількість енергії для сенсорного вузла бути активним у всьому раунді, L – список сусідів, які не перебувають в стані „сон”, Δ – максимальна кількість сусідів, яку може мати сенсорний вузол.

Службові повідомлення сенсорного вузла: „АКТИВУЮСЬ” – сенсорний вузол повідомляє іншим вузлам, що він становиться активним, „НАДЛИШКОВИЙ” – сенсор повідомляє сусіда, що він може перейти в режим „сон” и не потрібен для покриття зони або її частки, „ЗАСИНАЮ” – сенсорний вузол переходить в режим „сон” (отримав від всіх сусідів повідомлення „НАДЛИШКОВИЙ”), а сам вже k - покритий.

Стан сенсорного вузла: „АКТИВНИЙ” – сенсорний вузол активний, „СОН” – сенсорний вузол переходить в режим „сон”, „СЛУХАЮ” – сенсорний вузол ще не прийняв рішення (здійснюється моніторинг).

3.1. Алгоритм побудови непересічних підмножин

1. Ввід початкових даних: множина сенсорних вузлів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ і координати їх розміщення на місцевості, рівень покриття $k_{\text{зад}}$, область моніторингу Π , радіус моніторингу r_m і радіус передачі r_p сенсорного вузла.

2. Збір інформації про стан вузлів (енергія, координати) сусідів та побудова їх списку L (найближчі сусіди).

3. Розрахунок часу очікування для прийняття рішення w_i та запуск таймера прийняття рішення.

4. Включити режим „СЛУХАЮ”. Здійснити перевірку надлишкових вузлів (п. 4.4).

ЯКЩО є надлишкові сусіди, ТО відправити їм повідомлення

„НАДЛИШКОВИЙ” і видалити їх зі списку L .

ЯКЩО $t \leq W$ ТО отримати повідомлення від сусідніх вузлів.

ЯКЩО повідомлення „АКТИВУЮСЬ” ТО оновити рівень покриття

здійснити перевірку надлишкових

сусідів та при їх наявності відправити

їм повідомлення „НАДЛИШКОВИЙ”

ЯКЩО повідомлення „НАДЛИШКОВИЙ” ТО $n_i = n_i - 1$

ІНАКШЕ $n_i > 0$ і статус „СЛУХАЮ”. Оновити w_i .

ЯКЩО „ЗАСИНАЮ” ТО видалити сенсор s_j зі списку L .

Визначення свого статусу:

ЯКЩО $t \geq w_i$ і статус „СЛУХАЮ” або немає сусідів ТО встановить таймер R_i

для включення узла s_i в наступному раунді.

Передача широковещательного

повідомлення

„ЗАСИНАЮ” найближчим сусідам

статус „СОН”

ІНАКШЕ статус „АКТИВНИЙ”.

Передача широковещательного

повідомлення „АКТИВУЮСЬ”

найближчим сусідам

ІНАКШЕ етап моніторингу.

4. Розглянемо більш детально етапи роботи алгоритму:

4.1. Алгоритм працює циклічно з довжиною раунду W (кожен сенсор запускає алгоритм у кожному раунді). На початку кожного раунду існує фаза прийняття рішення сенсорним вузлом, тривалістю W . Значення W необхідно вибирати так, що $W \ll d \text{Round}$ (рис. 2). Кожен сенсорний вузол s_i розраховує свій статус (активний/ сплячий режим) після очікування протягом часу w_i . Значення w_i може бути змінено в будь-який час через рішення „активний / сон” будь-якого з його сусідів. Крім того, значення w_i залежить від залишкової енергії вузла s_i і його вкладу c_i на рівень покриття мережі.

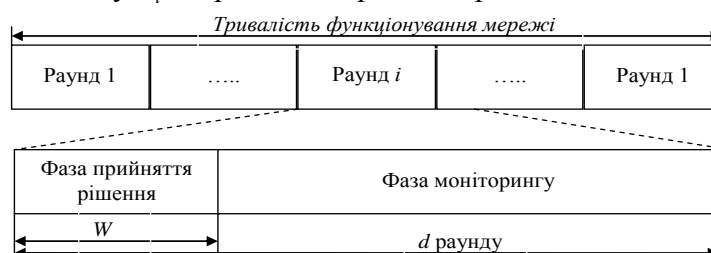


Рис. 2. Приклад роботи алгоритму побудови непересічних підмножин в одному раунді

Час очікування сенсора s_i можливо сформулювати наступним чином:

$$w_i = \begin{cases} \frac{\eta}{n_i^\alpha l(e_i, r_i)^\beta} \times W + z & \text{якщо } \geq e_{\text{пор}} \\ W & \text{інше} \end{cases} \quad (5)$$

де α , β , η – константи, z – випадкове число між $[0; d]$, де d – часовий інтервал, для уникнення випадку, коли два сенсора, що мають однакові значення w_i , будуть активні одночасно. $l(e_i, r_i)$ – функція, яка розраховує тривалість функціонування сенсора s_i в термінах його текучої енергії e_i і радіусу моніторингу r_i (функція лінійна або квадратична). Функція $l(e_i, r_i)$ буде детально розглянута в пункті 3. $e_{\text{пор}}$ і η – параметри, зависящие от состояния сети. η выбирается так, чтобы убедиться, что $w_i \leq W$ и $e_{\text{пор}}$ гарантируют, что сенсорный узел может функционировать в течение всего раунда:

$$e_{\text{пор}} \text{ задовільняє } l(e_{\text{пор}}, r_i) = W \\ \eta = d \text{ раунд}^\beta$$

4.2. Всі сенсорні вузли збирають координати, поточну залишкову енергію та інформацію про радіус моніторингу своїх безпосередніх сусідів. Вони зберігають цю інформацію в списку сусідів L в порядку збільшення $\alpha_{j,L}$ (для зручності застосування алгоритмів визначення k – покриття).

4.3. Розрахунок витрат енергії вузлів. Модель витрат енергії вузлів. Алгоритм требует учета различных видов потребления энергии, включая передачу / прием сообщений, мониторинг и энергию для расчета.

Ґрунтуючись на дослідженнях, проведених в [15], запропонована модель витрати енергії для вимірювання продуктивності алгоритму. Зазвичай сенсорний вузол включає в себе три основні блоки, що споживають енергію: блок мікроконтролера (MCU), приймач і сенсорний блок для збору інформації моніторингу. У нашій моделі кожен блок може бути включений або вимкнений в залежності від поточного стану сенсорного вузла (таблиця 1).

В таблиці 1 функція витрати енергії $f(r_i)$ залежить від радіуса моніторингу r_i сенсорного вузла s_i . Розглянемо два види функції f :

$$f(r_i) = \frac{1}{k} \times r_s \\ f(r_i) = \frac{1}{k} \times r_s^2$$

де k – коефіцієнт енергії.

Для простоти не враховується енергія, необхідна для прийому повідомлення, включення приймача, запуску сенсорного модуля, енергія необхідна для збору даних. Коли сенсорний вузол стає активним, він може відключити свій приймач, для економії енергії.

Витрати енергії сенсорного вузла

Таблиця 1

Режим сенсора	MCU	Приймачпередавач	Сенсор	Потужність (мВт)
Listening	On	On	On	$20.05 + f(r_i)$
Active	On	Off	On	$9.72 + f(r_i)$
Sleep	Off	Off	Off	0.02
Енергія, необхідная для отправки 2-битного сообщения				0.515

Оскільки алгоритм використовує тільки три різних типи повідомлень, для обміну повідомленнями досить двох біт (отримано за допомогою рівняння для розрахунку енергії запропонованого в [15]). Енергія споживана в трьох режимах роботи отримана за допомогою статистичних даних сенсорного вузла MEDUSA-II [15].

У нашій моделі залишився функціонування сенсорного вузла – це час, протягом якого сенсор може перебувати в активному режимі. Тобто, якщо сенсор працює з радіусом моніторингу в певний момент часу, коли залишкова енергія дорівнює, тоді тривалість функціонування може бути розраховане як:

$$l(e_i, r_i) = \frac{e_i}{\text{витрати енергії в активному режимі}}$$

Таким чином, рівняння для функції тривалості функціонування сенсорного вузла:

$$l(e_i, r_i) = \frac{e_i}{9.72 + f(r_i)}$$

4.4. Побудова (визначення) k – покриття сенсорної мережі. Коли сенсорний вузол s_j підключається до мережі, він передає повідомлення „АКТИВУЮСЬ”, для інформування всіх найближчих сусідів про зміну свого статусу. Потім кожен з його сусідів застосовує алгоритм перевірки периметричного покриття для повторного перерахунку свого статусу.

Для побудови та перевірки рівня k – покриття мережі введемо поняття k -периметричного покриття [16].

Теорема 1. Припустимо, що немає двох сенсорних вузлів розташованих в одному і тому ж місці. Вся область моніторингу мережі Π k – покрита тоді і тільки тоді, коли кожен сенсорний вузол в мережі k – периметрично покритий.

Ця теорема встановлює правило для перевірки рівня покриття кожної підобласті області моніторингу Π .

Основна ідея підходу полягає у визначенні покриття периметра зони (субрегіону) моніторингу кожного сенсорного вузла замість визначення покриття кожного субрегіону (як покритий периметр радіуса моніторингу визначеного сенсорного вузла). Розрахункова складність запропонованого підходу складає $O(nd \log d)$, де d – максимальна кількість сенсорів радіус (зони) моніторингу яких перетинається з радіусом (зонами) моніторингу інших сенсорів.

Завдання перевірки (побудови) k – покриття області спостереження формулюється наступним чином.

Постановка задачі: дана множина сенсорних вузлів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ в двомірній області Π . Кожен сенсорний вузол $s_i, i=1, \dots, n$ має координати розташування (x_i, y_i) всередині області Π та радіус моніторингу r_i .

Визначення 1. Кожна точка (ціль) області Π вважається покритою, якщо вона знаходиться в межах радіуса моніторингу сенсорного вузла s_i . Місцерозташування цілі (точки) в області Π вважається j – покритим, якщо воно знаходиться в межах радіусу моніторингу, по меншій мірі, j сенсорних вузлів.

Визначення 2. Зона (субрегіон) області Π – множина точок (цілей), які покриваються однаковою множиною сенсорних вузлів.

Пропонується рішення задачі k – покриття області спостереження для однорідних та неоднорідних сенсорних мереж (однакові та різні радіуси моніторингу).

Визначення 3. Дано натуральне число k , задача знаходження k – покриття в однорідній сенсорній мережі (різні радіуси моніторингу) – задача визначення рівня k – покриття всіх точок області спостереження Π , відповідно до обмежень – $r_1 = r_2 = \dots = r_n$.

Визначення 4. Дано натуральне число k , задача знаходження k – покриття в неоднорідній сенсорній мережі (різні радіуси моніторингу) – задача визначення рівня k – покриття всіх точок області спостереження Π .

4. 5. Розглянемо особливості побудови k – покриття в однорідній та неоднорідній сенсорній мережі.

4. 5. 1. Задача знаходження k – покриття в однорідній сенсорній мережі

Визначення 5. Розглянемо будь який два сенсорних вузла s_i і s_j . Точки периметру сенсорного вузла s_i вважаються покритими по периметру, якщо вони знаходяться в радіусі моніторингу сенсорного вузла s_j .

Визначення 6. Розглянемо любий сенсорний вузол s_i . Будемо стверджувати, що s_i k – периметрично покритий, якщо всі точки периметру сенсора s_i периметрично покритий щонайменш k сенсорними вузлами, відмінними від s_i . Відповідно, сегмент периметру сенсора s_i k – периметрично покритий, якщо всі точки периметру сегменту периметрично покритий щонайменш k сенсорними вузлами, відмінними від s_i .

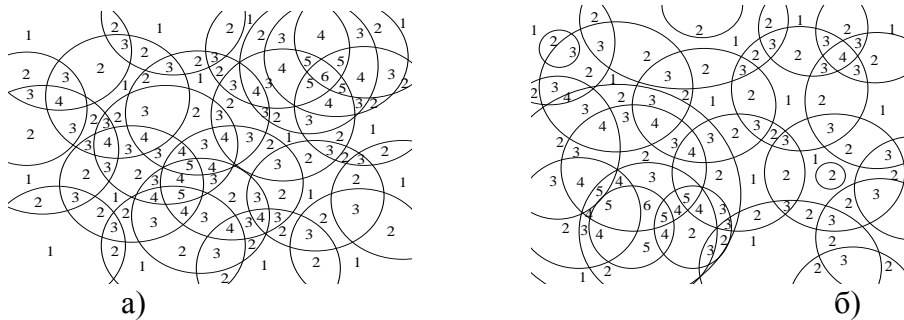


Рис. 3. Приклад побудови k - покриття: а) сенсорні вузли з однаковим радіусом моніторингу; б) сенсорні вузли з різними радіусами моніторингу (цифра в кожному субрегіоні – рівень покриття)

Алгоритм визначення k - периметричного покриття сенсорного вузла (розрахункова складність $O(d \log d)$).

Розглянемо два сенсорних вузла s_i і s_j , розташованих на позиціях (x_i, y_i) і (x_j, y_j) , відповідно. Позначимо $d(s_i, s_j) = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2}$ як відстань між сенсорними вузлами s_i і s_j .

Якщо $d(s_i, s_j) \geq 2r$, то сенсорний вузол не вносить ніякого вкладу в покриття периметра вузла s_i .

В іншому випадку радіус периметра сенсорного вузла s_i , який покривається сенсорним вузлом s_j може бути розраховано наступним чином (рис. 3а). Нехай, сенсорний вузол s_j знаходиться на заході вузла s_i (т.е. $y_i = y_j, x_i > x_j$). Кут $\alpha = \arccos\left(\frac{d(s_i, s_j)}{2r}\right)$.

Таким чином дуга сенсора s_i „падаюча” в кут $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$ периметрично покрита сенсором s_j .

Етапи алгоритму:

1. Для кожного вузла s_j , при $d(s_i, s_j) \leq 2r$ визначити кут дуги сенсорного вузла s_i позначеного $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$, це периметр покритий сенсорним вузлом s_j .

2. Для кожного сусіднього сенсорного вузла s_j сенсора s_i , при $d(s_i, s_j) < 2r$ відмітьте точки $\alpha_{j,L}$ і $\alpha_{j,R}$ (ліва та права границі) на сегменті лінії $[0, 2\pi]$, а потім відсортуйте всі ці точки в порядку зростання в списку L .

Також, необхідно правильно відмітити кожен точку, як праву або ліву границю радіуса моніторингу (рис. 3б).

3. (Креслення). Проведіть сегмент лінії $[0, 2\pi]$, відвідавши кожен елемент зі списку L зліва направо та визначіть периметр покриття сенсора s_i .

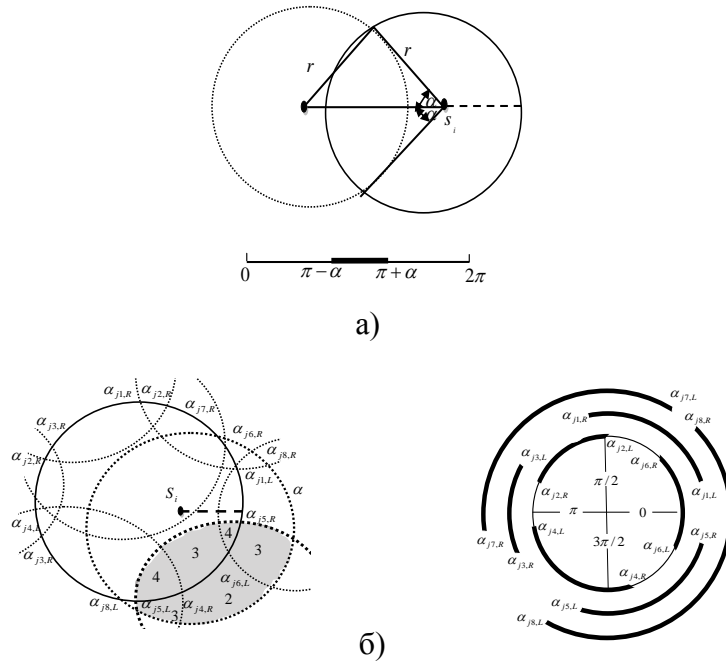


Рис. 4. Визначення: а) сегменти периметру вузла s_i , покритого вузлами s_j ;
б) покриття периметру сенсорного вузла s_i

4.5.2. Задача знаходження k – покриття в неоднорідній сенсорній мережі (різні радіуси моніторингу).

По-перше, необхідно визначити, як периметр радіуса моніторингу сенсорних вузлів покривається іншими сенсорними вузлами.

Розглянемо два сенсорних вузла s_i і s_j , які розташовані в (x_i, y_i) та (x_j, y_j) і мають радіуси моніторингу r_i та r_j відповідно. Нехай сенсор s_j знаходиться на заході від сенсора s_i . Розглянемо, як сенсор s_i покривається з сенсором s_j .

Випадок 1. Сенсорний вузол s_j знаходиться поза межами радіуса моніторингу сенсора s_i , тобто $d(s_i, s_j) > r_i$.

– Якщо $r_j < d(s_i, s_j) - r_i$, тоді сенсор s_i периметрично не покритий сенсором s_j .

– Якщо $d(s_i, s_j) - r_i \leq r_j \leq d(s_i, s_j) + r_i$, тоді дуга сенсора s_i падаюча в кут $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$ периметрично покрита сенсором s_j ,

де α знаходиться за формулою:

$$r_j^2 = r_i^2 + d(s_i, s_j)^2 - 2r_i \cdot d(s_i, s_j) \cdot \cos(\alpha). \quad (1)$$

– Якщо $r_j > d(s_i, s_j) + r_i$, тоді весь радіус $[0, 2\pi]$ сенсора s_i периметрично покритий сенсором s_j .

Випадок 2. Сенсорний вузол s_j знаходиться в середині радіуса моніторингу сенсорного вузла s_i , тобто $d(s_i, s_j) \leq r_i$.

– Якщо $r_j < r_i - d(s_i, s_j)$, тоді сенсор s_i периметрично не покритий сенсором s_j .

– Якщо $r_i - d(s_i, s_j) \leq r_j \leq r_i + d(s_i, s_j)$, тоді дуга сенсора s_i падаюча в кут $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$ периметрично покрита сенсором s_j , де α знаходиться за формулою 1.

– Якщо $r_j > d(s_i, s_j) + r_i$, тоді весь радіус $[0, 2\pi]$ сенсора s_i периметрично покритий сенсором s_j .

Вище зазначені випадки зображені на рисунку 4.

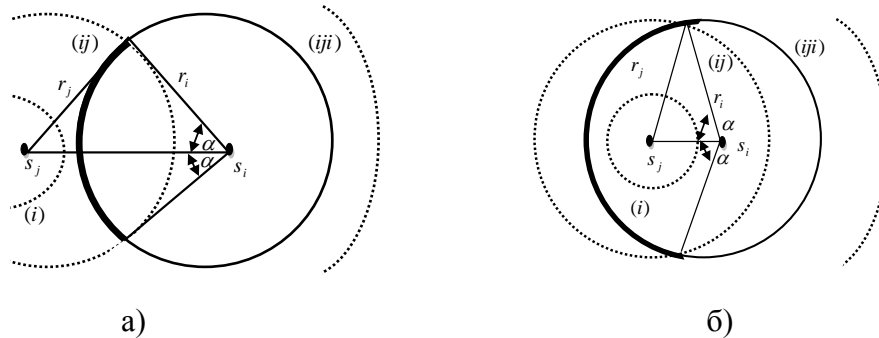


Рис. 5. Приклад визначення покриття для сенсорних вузлів з різними радіусами моніторингу: а) сегменти периметру вузла s_i , покритого вузлами s_j ; б) покриття периметру сенсорного вузла s_i

4.6. Якщо сенсорний вузол розрахує, що вузол сусід u не вносить вклад в покриття його периметра, тобто, периметр, який покриває вузол u покривається іншими активними сусідами або цим вузлом, він відправляє повідомлення „НАДЛИШКОВИЙ” цьому сенсорному вузлу. Після отримання цього повідомлення „НАДЛИШКОВИЙ”, сенсор оновлює (зменшує на 1) свій лічильник n_i , вклад в покриття s_i і перераховує час очікування w_i . Затем он проверяет, уменьшен ли счетчик (n_i) до 0 или нет.

4.7. Якщо сенсорний вузол отримує повідомлення „НАДЛИШКОВИЙ” від всіх своїх сусідів ($n_i = 0$), тоді він відправляє повідомлення „ЗАСИНАЮ” всім своїм сусідам, встановлює таймер R_i для включення в наступному раунді і переходить в режим „сон”.

4.8. При отриманні повідомлення „ЗАСИНАЮ” сенсорний вузол просто видаляє сусіда, який відправляє повідомлення зі свого списку L .

Оцінка ефективності методу часткового покриття здійснювалась в середовищі MATLAB. Проведено дослідження залежності тривалості функціонування мережі від розмірності мережі, рівня k - покриття, різних режимів витрат енергії батарей вузлів. Дослідження показали невелику розрахункову складність запропонованого методу і можливість збільшити тривалість функціонування мережі на 10 – 15 % в порівнянні з існуючими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жук О.В. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами / Жук О.В., Романюк В.А., Сова О.Я. // Тези доповідей та виступів учасників ІХ науково-практичної конференції „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”. – К.: ВІТІ. – 2016 р. – С. 34 – 44.

2. Жук О.В., Романюк В.А., Ткаченко Д.В. Функціональна модель системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами: Тези доповідей та виступів

учасників Другої IEEE Міжнародної конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки. Одеса. 2017 р. С. 134 – 135.

3. Міночкін А.І. Методологія управління тактичними сенсорними мережами / А.І. Міночкін, В.А. Романюк // IV Науково-технічна конференція ВІТІ. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – С. 15 – 25.

4. B. Wang Coverage Problems in Sensor Networks: A Survey // ACM Computing Surveys, Vol. 43, No. 4, Article 32, 2011.

5. Cardei, M., Wu, J. Coverage in wireless sensor networks. In Handbook of Sensor Networks, M. Pyas and I. Mahgoub, Chapter 19, Eds. CRC Press, 2004.

6. Cardei, M., Thai, M., T., Li, Y., Wu, W. Energy-Efficient target coverage in wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE InfoCom, 2005. pp. 1976 – 1984.

7. Babacar Diop, Dame Diongue, Ousmane Thiaré. Greedy Algorithms for Target Coverage Lifetime Management Problem in Wireless Sensor Networks International Journal of Control and Automation Vol. 8, No., 2015. pp. 232 – 250.

8. Karine Deschinkel1, Mourad Hakem1. A near optimal algorithm for lifetime optimization in wireless sensor networks. SENSORNETS 2013, pp. 197.

9. Jinglan Jia, Cailin Dong1, Xinggang He, Deying Li and Ying Yu. Sensor scheduling for target coverage in directional sensor networks International Journal of Distributed Sensor Networks 2017, Vol. 13(6).

10. Shan, A., Xu, X., Cheng, Z. Target Coverage in Wireless Sensor Networks with Probabilistic Sensors. Sensors. 2016, 16, 1372.

11. Коновалов И. С. Применение генетического алгоритма для решения задачи покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Вестник ДонГТУ, №3 (86), 2016. – С. 125 – 132.

12. Salma Begum, Nazma Tara, Sharmin Sultana. Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks Based on Modified Ant Colony Algorithm. International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC), Vol. 1, No. 4, December 2010.

13. S. Kumar, T.H. Lai and J. Balogh. On k- coverage in a Mostly Sleeping Sensor Network. In Proc of the 10th international Conference on Mobile computing and networking, Philadelphia, PA, USA, Pages 144 – 158, 2004.

14. P.J. Wan and C.W. Yi. Coverage by randomly deployed wireless sensor networks. IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 25, No. 6, June 2006.

15. V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava. Energyaware wireless microsensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, March 2002.

16. C.F. Huang and Y. Tseng. The coverage Problem in a Wireless Sensor Network. Mobile Networks and Applications 10, 519–528, 2005.