

МОДЕЛІ ПОБУДОВИ ПОКРИТТЯ І ВИЯВЛЕННЯ ЦІЛЕЙ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Проведено аналіз моделей побудови покриття і моделей виявлення цілей, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах. Показано, що правильний вибір моделі покриття дозволить побудувати оптимальну топологію, яка задовольняє вимогам покриття і зв'язності і отримати високу ймовірність виявлення цілей. Запропоновано рекомендації щодо синтезу нових і вдосконалення існуючих моделей побудови покриття і виявлення цілей.

Жук А.В., Романюк В.А., Тарасов В.В., Ткаченко Д.В. Модели построения покрытия и выявления целей в беспроводных сенсорных сетях. Проведен анализ моделей построения покрытия и моделей выявления целей, использующихся в беспроводных сенсорных сетях. Показано, что правильный выбор модели покрытия позволит построить оптимальную топологию удовлетворяющую требованиям покрытия и связности и получить высокую вероятность обнаружения целей. Предложены рекомендации по синтезу новых и усовершенствованию существующих моделей построения покрытия и выявления целей.

A. Zhuk, V. Romaniuk, V. Tarasov, D. Tkachenko Models for constructing and detection target in wireless sensor networks. The analysis of the models for the construction of coverage and models for detecting events used in wireless sensor networks is carried out. It is shown that an exact choice of the cover model will allow constructing an optimal topology that satisfies the coverage and connectivity requirements and obtain high probability of target detection. Recommendations are offered on the synthesis of new and improvement of existing models for building coverage and identifying targets.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, моделі управління покриттям, моделі виявлення подій.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Безпроводні сенсорні мережі (Wireless Sensor Network) – розподілені мережі, що складаються з маленьких вузлів (сенсорів), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних. [1].

Основним завданням сенсорної мережі є спостереження (моніторинг) за цілями на полі бою, ефективність якого залежить від якості управління покриттям сенсорними вузлами визначеного району (границі розмежування). Управління покриттям включає вирішення наступних задач: визначення *типу* покриття (покриття цілі (рис. 1 а), покриття площі (рис. 1б), бар'єрне покриття(рис. 1в)), методів розміщення вузлів [2], ступеню покриття, коефіцієнта покриття, розрахунок сесій спостереження та мережеву зв'язність.

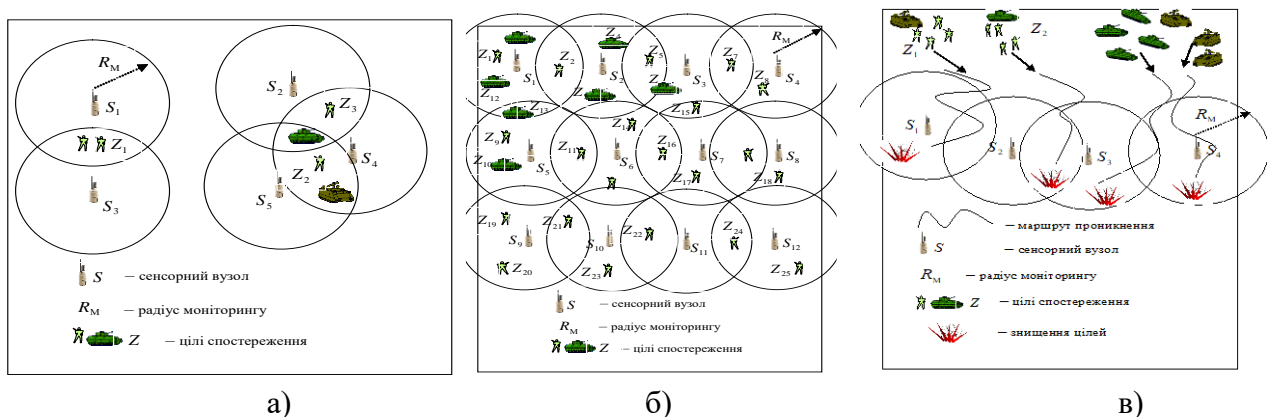


Рис. 1 Приклади типів покриття: а) покриття цілі; б) покриття площі; в) бар'єрне покриття.

Аналіз останніх публікацій. Покриття цілей в заданому районі спостереження є одним з найбільш важливих показників ефективності роботи сенсорної мережі [3]. Правильний вибір моделі покриття в залежності від області застосування мережі, типу датчиків сенсорних вузлів, цільової функції управління дозволяє побудувати оптимальну топологію

мережі, визначити *тип покриття* та отримати високу ймовірність виявлення цілей на полі бою.

В роботі [4, 5] запропоновано підхід для побудови покриття цілей за допомогою стаціонарних сенсорних вузлів оснащених направлених відеокамерами. Авторами побудовано секторальну модель покриття та пропонується корегування орієнтаційного кута сенсорних вузлів після їх розміщення.

В роботі [6] розглянуто рішення, щодо вибору активних сенсорних вузлів та побудови секторальних моделей активних вузлів для спостереження за площею за критерієм максимізації тривалості функціонування мережі в цілому.

Cardei M. та ін. [8, 9] пропонують рішення вибору та корегування радіусу спостереження для збільшення тривалості функціонування мережі. Головне припущення полягає в тому, що сенсорний вузол може мати різні радіуси спостереження але вибирається один загальний робочий радіус для всіх вузлів (дисконна модель покриття) за критерієм зменшення витрат енергії вузлів.

Zhou Z. та ін. [10] пропонують централізований та розподілений алгоритми побудови покриття площі, які засновані на надмірності сенсорних вузлів. Головна ідея – побудова зв'язного графу мережі з мінімальною необхідною кількістю сенсорних вузлів (вимоги по покриттю та зв'язності мережі). Автори пропонують вирішення NP задачі за допомогою знаходження мінімального набору сенсорних вузлів для покриття площі при змінюваному радіусі моніторингу та передачі.

В роботі [11] запропонована стратегія розгортання сенсорної мережі для побудови моделі виявлення вторгнень на основі дисконної затухаючої моделі покриття, головною метою якої є визначення оптимальної кількості вузлів для розгортання в заданій площі спостереження. Основна ідея, це пошук компромісу між продуктивності мережі та вартості розгортання сенсорних вузлів.

В роботі [12] запропонована енергозберігаюча схема збору даних моніторингу, яка заснована на пошуку компромісу між затримкою передачі та якістю покриття. Авторами запропонована схема включення відключення сенсорних вузлів (в кожному раунді вибирається оптимальна кількість вузлів) для стаціонарної сенсорної мережі, яка забезпечує вимоги покриття всіх цілей (дисконна модель покриття) при отриманні фіксованого часу доставки повідомлень.

Проведений аналіз показав, що єдиної моделі побудови покриття яку можливо використовувати для різного типу сенсорних мереж не існує.

Метою статті є проведення аналізу існуючих моделей покриття та інтеграції їх з моделями виявлення подій.

Виклад основного матеріалу

Модель покриття сенсорного вузла (далі модель) відображає якість виявлення (чутливість спостереження) і якість розрахунку (захват) геометричної залежності між ціллю та сенсорними вузлами [3]. В загальному випадку *модель* формулюється, як функція Евклідової відстані (і кута) між ціллю і сенсорними вузлами. Ввід залежності відстані (кута) між окремою ціллю та місцезнаходженням сенсорних вузлів та її розрахунок дозволяє отримати значення *коефіцієнту* покриття даної цілі. Пропонується концепція визначення функції покриття в контексті двомірної площини. Дано: ціль z та множина сенсорних вузлів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Введемо $d(s, z)$ ($d(s, z) \geq 0$) для знаходження Евклідової відстані між сенсором s та ціллю z :

$$d(s, z) = \sqrt{(s_x - z_x)^2 + (s_y - z_y)^2},$$

де (s_x, s_y) , и (z_x, z_y) – Декартові координати сенсору s і ціль z відповідно, $\varphi(s, z)$ ($0 \leq \varphi(s, z) \leq 2\pi$) кут між ними. Для сенсору s ми вичерчуємо горизонтальну лінію яка починається від сенсору і орієнтована праворуч. Далі ми з'єднуємо сенсор s та ціль z за

допомогою іншої лінії $\overline{s_z}$, $\varphi(s, z)$ кут проти часової стрілки між двома лініями, починаючи з горизонтальної лінії до лінії $\overline{s_z}$. Введемо $d_n = (d(s_1, z), d(s_2, z), \dots, d(s_n, z))$ – вектор даної відстані, і $\varphi_n = (\varphi(s_1, z), \varphi(s_2, z), \dots, \varphi(s_n, z))$ – вектор кута між множиною сенсорів і ціллю.

Сенсорна модель формулюється як функція f перетворена від (d_n, φ_n) до дійсного числа:

$$f : (d_n, \varphi_n) \rightarrow \mathbb{R}^+,$$

де \mathbb{R}^+ – набір дійсних чисел, $f(d_n, \varphi_n)$ коефіцієнт покриття цілі сенсорами s_1, s_2, \dots, s_n .

Відповідні визначення також можуть бути розглянуті в тримірному просторі з незначними модифікаціями.

На даний час широке використання отримали моделі знаходження *функції покриття* на основі Булевої алгебри:

- Секторальна модель покриття;
- Дискава модель покриття;
- Дискава затухаюча модель покриття;
- Скорочена затухаюча дискова модель.

В одних *функція покриття* визначається, як відстань та кут між ціллю і одним сенсорним вузлом, в інших між ціллю і декількома вузлами. Якщо параметри кута не включені до функції покриття, то така модель – *всенаправлена*, якщо включені то *направлена*. Розглянемо детальніше дані моделі [4 – 7].

Секторальна модель покриття (*Булева секторальна (направлена) модель*). Використовується для мереж з направленими датчиками спостереження (наприклад відеокамерами) [6]. Функція покриття даної моделі:

$$f(d(s, z), \varphi(s, z)) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d(s, z) \leq R_s \text{ і } \varphi_s \leq \varphi(s, z) \leq \varphi_s \omega; \\ 0, & \text{у іншому випадку,} \end{cases} \quad (1)$$

де $d(s, z)$ – Евклідова відстань між сенсором s і ціллю z , $\varphi(s, z)$ кут між ними.

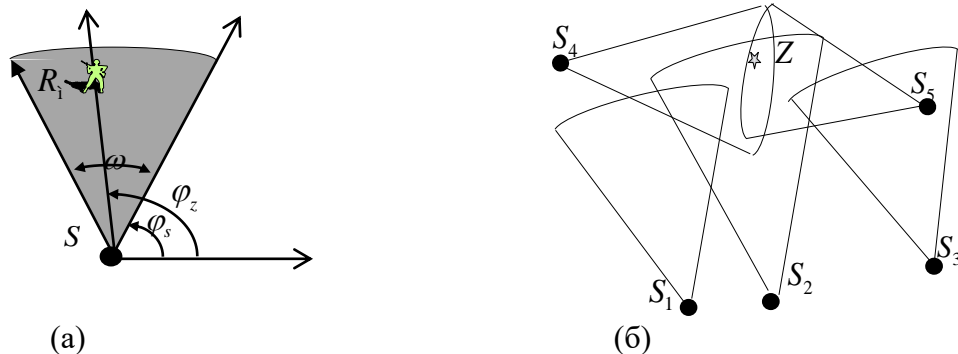


Рис. 2 Секторальна модель (φ_s – орієнтаційний кут, ω – кут спостереження та R_s – діапазон моніторингу).

Недоліки: 1. Необхідне корегування орієнтаційного кута після розміщення сенсорних вузлів. 2. Ціль повинна покриватися (рис. 2б) більш ніж одним сенсорним вузлом (коефіцієнт покриття цілі множиною сенсорів доповнюється коефіцієнтом окремих вузлів). 3. Застосовується для стаціонарних мереж.

Враховуючи вищесказаного функція покриття повинна бути модифікована, як сукупність коефіцієнтів покриття окремих сенсорних вузлів:

$$f(d_n, \varphi_n) = \sum_{i=1}^n f_i(d(s_i, z), \varphi(s_i, z)),$$

де f_i функція покриття сенсорного вузла s_i та розраховується за формулою (1). Якщо $f(d_n, \varphi_n) = k$, ($k \geq 1$), то ціль має k – покриття, у іншому випадку ($k < 1$) покриття [7].

Дискова модель покриття (Булева модель окружності). Функція покриття моделі [8]:

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d(s, z) \leq R_m; \\ 0, & \text{у іншому випадку,} \end{cases} \quad (2)$$

де $d(s, z)$ – Евклідова відстань між сенсором s та ціллю z , константа $R_m > 0$ – діапазон моніторингу. Ця функція знаходить окружність (радіус) моніторингу (рис. 3а). Модель окружності всенаправлена модель [9, 10].

Недоліки: 1. При використанні різних типів вузлів (різні діапазони моніторингу) необхідна розробка узгоджувального механізму вибору єдиного робочого діапазону. Функція покриття модифікується, як

$$f(d_n) = \sum_{i=1}^n f_i(d(s_i, z)),$$

де $f_i(\bullet)$ – функція покриття сенсора s_i та розраховується формулою 5. Якщо $f(d_n) = k$, тоді ціль покрита, інакше ($k < 1$) – непокрита [8 – 10].

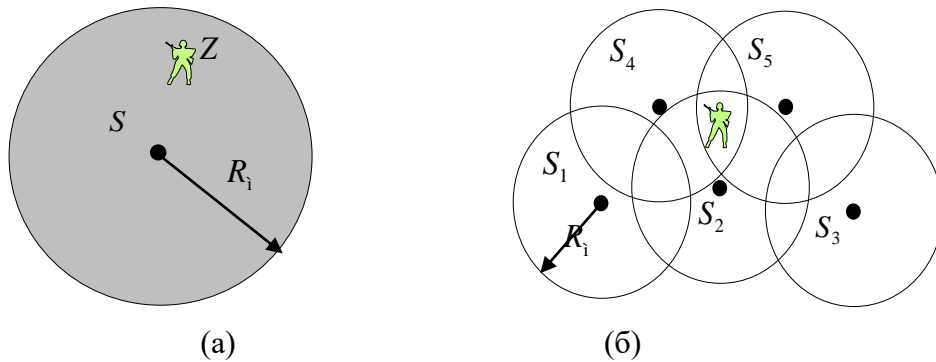


Рис. 3 Дискова модель

Дискова затухаюча модель покриття. Коефіцієнт моніторингу сенсорних вузлів знижується зі збільшенням відстані між сенсорними вузлами. Використовується захват затухаючої якості покриття (коефіцієнт покриття цілі z_1 більше ніж цілі z_2) . Модель записується (рис. 4 а):

$$f(d(s, z)) = \frac{c}{d^\alpha(s, z)},$$

де α – показник затухання, c – константа. Сенсорний вузол підлаштовує коефіцієнт покриття для всіх цілей в зоні (окружності).

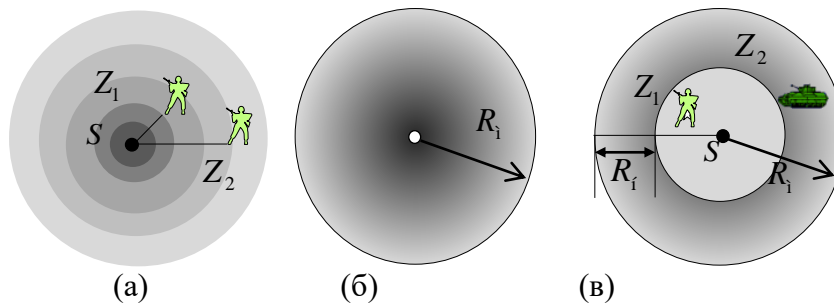


Рис. 4 Дискова затухаюча модель покриття

Формально функція покриття модифікується як:

$$f(d_n) = \sum_{i=1}^n \frac{c}{d^\alpha(s_i, z)} .$$

Скорочена затухаюча дискова модель. Заснована на використанні компромісу між якістю моніторингу і його радіусом при збільшенні відстані між сенсорними вузлами і цілями (рис. 4в).

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} Ce^{-\alpha d(s, z)}, & \text{якщо } d(s, z) \leq R_M, \\ 0, & \text{у іншому випадку,} \end{cases}$$

де α – параметри відображаючи фізичні характеристики сенсорного вузла, R_M – діапазон моніторингу [11].

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (d, z) \leq R_M - R_H; \\ e^{-\alpha(d(s, z) - (R_M - R_H))^\beta}, & \text{якщо } R_M - R_H < d(s, z) \leq R_H, \\ 0, & \text{якщо } R_H < d(s, z), \end{cases}$$

де R_M – діапазон моніторингу, R_H – нестабільний діапазон (використовується для розрахунку величини корегування не впливаючи на якість моніторингу), α і β константи (рис. 4в).

Моделі покриття для виявлення подій. Основним завданням сенсорної мережі є виявлення деякої події або виявлення цілі в будь-якому місці площі моніторингу. В контексті методів (протоколів) виявлення подій (цілей) *якість виявлення* сенсорного вузла може бути представлена у вигляді *ймовірності виявлення* (разом із іншими характеристиками залежить від відстані між вузлами). Об'єднання значень або вибір конфігурації сенсорних вузлів може бути використане для отримання величини *ймовірності виявлення*. На даний час запропоновано велику кількість моделей виявлення подій [12 – 20].

Розглянемо широко поширену модель розповсюдження сигналу, де параметр сигналу θ (наприклад, звуковий тиск джерела звуку) загасає разом з його розповсюдженням. Залежно від гіпотези про наявність цілі H_1 або її відсутності H_0 , дані сенсора s_k , задаються виразом:

$$\begin{aligned} H_0 : x_k &= n_k ; \\ H_1 : x_k &= \frac{\theta}{d_k^\alpha} + n_k, \end{aligned} \quad (4)$$

де α – коефіцієнт затухання, $d_k^\alpha = d^\alpha(s_k, z)$ – Евклідова відстань між сенсором s_k та ціллю z , n_k – вимірювальний шум (наприклад тепловий шум). Передбачається, що шум слідує по Гаусовському розподілу з нульовим середнім і дисперсією σ_k^2 .

Задано поріг A , сенсор приймає рішення, що ціль існує якщо:

$$\begin{array}{c} H_1 \\ > \\ x_k < A \\ < \\ H_0 \end{array}$$

Тобто, якщо показник більше чім поріг A , він вирішує, що ціль (подія) існує; якщо показник менший за A – ціль відсутня. Коли ціль існує в точці z площини моніторингу, ймовірність виявлення P_k^d сенсора s_k задається формулою

$$P_k^d = P \left[\frac{\theta}{d_k^\alpha} + n_k \geq A \right] = Q \left(\frac{A - \frac{\theta}{d_k^\alpha}}{\sigma_k} \right), \quad (5)$$

де $Q(\bullet)$ – Q - функція, яка визначається за формулою

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Q – функція є монотонно убиваючою функцією, ймовірність виявлення P_k^d зменшується при збільшенні відстані d_k . В дійсності формула 5, визначає дискову затухаючу модель покриття. Крім того, якщо ми визначимо поріг для ймовірності виявлення $P_{\text{нб}}^d$, і тільки ті цілі ймовірність виявлення яких дорівнюють або більше даного порога ($P_k^d \geq P_{\text{нб}}^d$) вважаються покрити цим сенсорним вузлом, то фактично отримаємо скорочену затухаючу дискову модель покриття. Якщо не виділяти цілі з ймовірністю виявлення не менш ніж поріг виявлення та визначити дані цілі покритими сенсором, то отримаємо Булеву модель покриття. В даному випадку, цілі з ймовірністю виявлення створюють окружність а їх відстані до сенсорного вузла рівні та розглядаються як радіус моніторингу R_1 .

$$Q \left(\frac{A - \frac{\theta}{R_s^\alpha}}{\sigma_k} \right) = P_{\text{нб}}^d \Rightarrow R_1 = \left(\frac{\theta}{A - \sigma_k Q^{-1}(P_{\text{нб}}^d)} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (7)$$

де $Q^{-1}(\bullet)$ – позначає зворотну функцію $Q(\bullet)$.

Коли K сенсорних вузлів використовуються для спільного спостереження за площиною, можливо використовувати методику об'єднання значень для розрахунку ймовірності виявлення цілей даними сенсорами. Нехай x_k , $k=1,2,\dots,K$ визначають показання $k^{\text{ан}}$ сенсорного вузла. При об'єднанні значень ми порівнюємо суму x_k , та поріг для прийняття рішення про наявність або відсутність цілі. Допустимо що всі шуми n_k ($k=1,2,\dots,K$), являються незалежними Гаусовськими шумами з нульовим середнім та дисперсією σ^2 . Коли ціль присутня в точці z , ймовірність виявлення даними сенсорами визначається:

$$P_k^d = P \left[\sum_{k=1}^K \left(\frac{\theta}{d_k^\alpha} + n_k \right) \geq \sqrt{K} A \right] = Q \left(\frac{\sqrt{K} A - \sum_{k=1}^K \frac{\theta}{d_k^\alpha}}{\sqrt{K} \sigma} \right),$$

де $\sqrt{K} A$ – поріг об'єднання значень. Також, ми використовуємо поріг ймовірності виявлення $P_{\text{нб}}^d$, та цілі з ймовірністю виявлення не менш ніж поріг називаються покритими даними сенсорами. В даному випадку покриття цілей K сенсорними вузлами задовольняє наступній нерівності

$$\sum_{k=1}^K \frac{1}{d_k^\alpha} \geq \frac{\sqrt{K}}{R_1^\alpha}, \quad (8)$$

де d_k – відстань між ціллю та сенсором s_k , R_1 – отримано з (7). В дійсності формула (8) визначає Булеву модель покриття для K сенсорних вузлів, так що:

$$f(d_K) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \sum_{k=1}^K \frac{1}{d_k^\alpha} \geq \frac{\sqrt{K}}{R_m^\alpha}. \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases} \quad (10)$$

На рисунку 4 відмічено цілі, які вважатимуться покритими при використанні рівняння 9 ($\alpha=1.0$) в якості моделі покриття. Розглядається покриття цілей в окружності, коли використовується тільки один сенсорний вузол, але вони можуть бути покритими при використанні біль ніж одного сенсорного вузла.

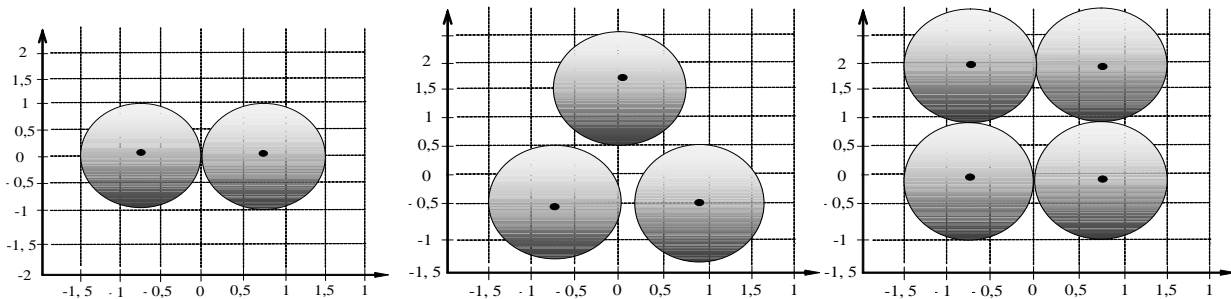


Рис. 4 Приклад покриття цілей за допомогою моделі виявлення подій: а) 2 сенсорних вузла, б) 3 сенсорних вузла, в) 4 сенсорних вузла

Існують моделі отримання *ймовірності покриття* за допомогою поєднання радіусів моніторингу множини сенсорних вузлів. Наприклад наступна формула вираховує *загальну ймовірність виявлення* множиною сенсорних вузлів

$$P_k^d = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - P_k^d),$$

де P_k^d отримано з формули 5. Відмітимо, що P_k^d , залежить від відстані між сенсорним вузлом та ціллю. Формулу 10 можливо використовувати для вибору моделі покриття (вона названа *ймовірностним покриттям*) [24, 25]. Також, ми можемо встановити поріг та визначати, що ціль покрита сенсорними вузлами, якщо загальна *ймовірність виявлення* не менша за даний поріг.

Моделі оцінки похибки покриття. Другим важливим завданням сенсорної мережі є оцінка параметрів сигналу. Якість виявлення сенсорного вузла може бути представлене у вигляді *похибки покриття*. На даний час використовуються різні моделі оцінки похибки покриття, але їх похибки теж різні [21 – 24].

Ми використовуємо простий сценарій оцінки сигналу для розгляду моделі оцінки покриття. Припустимо, що сигнал виникає в певній точці z і його параметр θ загасає разом з поширенням сигналу. Наприклад, θ викликаний амплітудою роботи двигуна автомобіля або витoku газу. Амплітуда акустичної хвилі згасає разом з поширенням сигналу. Вимірювання параметрів сигналу сенсором s_k :

$$x_k = \frac{\theta}{d_k^\alpha} + n_k,$$

де α – коефіцієнт згасання, $d_k^\alpha = d^\alpha(s_k, z)$ – Евклідова відстань між сенсором s_k та ціллю z , n_k – вимірювальний шум (наприклад тепловий шум). Передбачається, що шум слідує по Гаусовському розподілу з нульовим середнім і дисперсією σ_k^2 , заданої $N(0, \sigma_k^2)$. Відзначимо, що дана вимірювальна модель відповідає формулі 4 відповідно до гіпотези про наявність цілі. Алгоритм оцінки параметрів, оцінює θ ґрунтуючись на вимірюванні x_k , $k=1, 2, \dots, K$.

Нехай $\hat{\theta}$ та $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ позначає оцінку та похибку оцінки відповідно. Якщо похибки оцінки мала, то оцінка параметрів сигналу виходить з великим ступенем достовірності. Припустимо, що абсолютне значення оцінки менше або дорівнює заданій константі A , так що $P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right]$ – інформаційний дефект (використовується для вимірювання якості спостереження за ціллю) [25]. Наприклад, при використанні програми *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE), та однакових відхиленнях шумів – $\sigma_k^2 = \sigma^2$, для всіх $k=1, 2, \dots, K$ отримуємо:

$$P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right] = 1 - 2Q\left(\frac{A}{2\left(\sum_{k=1}^K d_k^{-2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}}\right), \quad (11)$$

де Q – функція знаходиться за формулою 15. Мы видим, что формула 11залежить від відстані між K сенсорами і ціллю зависит от расстояния между сенсорами и точкой (целью) и может использоваться как *функція покриття* при определении модели оценки покриття. Предположим, что в вычислении (измерении) используется только 1 сенсорный узел. В этом случае

$$P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right] = 1 - 2Q\left(\frac{A}{\sigma d_k^{-\alpha}}\right) \quad (12)$$

Так як $Q(\bullet)$ монотонно убиваюча функція, $\Pr\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right]$ зменшується при збільшенні відстані d_k . В дійсності 12 визначає дискову згасаючумодель. Крім того, якщо встановити поріг ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$), і цілі в $P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right]$ рівні або більші за даний поріг $P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right] \geq \epsilon$, вважаються покритими даним сенсором, тоді фактично ми отримаємо дискову згасаючу модель. Якщо не виділяти цілі, то отримаємо Булеву модель покриття. В даному випадку цілі с $P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right] = \epsilon$, створюють окружність, а відстань до сенсорного вузла дорівнює або лежить в області радіусу моніторингу R_s :

$$1 - 2Q\left(\frac{A}{\sigma R_s^\alpha}\right) = \epsilon \Rightarrow R_s = \left(\frac{A}{\sigma Q^{-1}\left(\frac{1-\epsilon}{2}\right)}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (13)$$

де $Q^{-1}(\bullet)$ – позначає зворотну функцію $Q(\bullet)$.

Також можемо визначити Булеву модель оцінки покриття K сенсорних вузлів порівнюючи $P\left[|\tilde{\theta}_k| \leq A\right]$ с порогом ϵ . В даному випадку, покриття цілей K сенсорними вузлами визначається наступною нерівністю

$$\sum_{k=1}^K \frac{1}{d_k^{2\alpha}} \geq \frac{1}{R_i^{2\alpha}} \quad (14)$$

где d_k – відстань між точкою (ціллю) та сенсором s_k , R_i – знаходиться за формулою 13. Більш того формула 14 формулює Булеву модель оцінки похібки покриття для сенсорних вузлів (модель *інформаційного покриття*):

$$f(d_k) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \sum_{k=1}^K \frac{1}{d_k^{2\alpha}} \geq \frac{1}{R_M^{2\alpha}} \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases}$$

Використання набору сенсорних вузлів для моніторингу (оцінки в нашому випадку) площі більш ефективно, ніж одиночних сенсорних вузлів.

Висновок. Проведений аналіз показав, що єдиної моделі побудови покриття яку можливо використовувати для різного типу сенсорних мереж не існує. Правильний вибір моделі покриття в залежності від області застосування мережі, типу датчиків сенсорних вузлів, цільової функції управління дозволяє побудувати оптимальну топологію мережі, визначити тип покриття та отримати високу ймовірність виявлення цілей на полі бою. Для неоднорідних мереж необхідно розробити узгоджувальний механізм вибору радіусу та сектору спостереження при використанні різних моделей побудови покриття.

Напрямок подальших досліджень буде аналіз методів та методик покриття та розробка методики побудови покриття цілей з врахуванням мережевої зв'язності та енергії батарей сенсорних вузлів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міночкін А.І. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж / А.І. Міночкін, В.А. Романюк, О.В. Жук // Збірник наукових праць. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2007. – № 4. – С. 16 – 22.
2. Жук О.В. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами. Тези доповідей та виступів учасників ІХ науково-практичної конференції [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”], (Київ, 2016 р.) / О.В. Жук, В.А. Романюк, О.Я. Сова. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2016. – С. 34 – 44.
3. Wang B. Coverage problem in sensors networks: a survey // ACM computing survey. – 2011. vol. 43. – P. 140 – 193.
4. Ai J. Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks / Ai J., Abouzeid A. // Combin Optim Journal. – 2006. vol. 11. – P. 21 – 41.
5. Cai Y. Target-Oriented scheduling in directional sensor networks / Y.Cai, W.Lou, M. Li, X. Li // In Proceedings of the IEEE Infocom Conference on Computer Communications. – 2007.
6. Liu L. On directional k-coverage analysis of randomly deployed camera sensor networks / L.Liu, H.Ma, X. Zhang // In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2008.
7. Fusco G. Selection and orientation of directional sensors for coverage maximization / G.Fusco, H. Gupta // In Proceedings of the IEEE Communications Society 6th Annual Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). – 2009.
8. Cardei M. Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges / M. Cardei, J.Wu, M.Lu, M. Pervaiz // In Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – 2005.

9. Wang J. Energy efficient coverage with variable sensing radii in wireless sensor networks / J.Wang, S. Medidi // In Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – 2007.
10. Zhou Z. Variable radii connected sensor cover in sensor networks / Zhou Z., Das S., Gupta, H. // ACM Trans. Sensor Netw. – 2009. vol. 5. – P. 1 – 36.
11. Choi W. Coverage-Adaptive random sensor scheduling for application-aware data gathering in wireless sensor networks / W.Choi, S. Das // Comput. Comm. – 2006. vol. 17, P. 3467 – 3482.
12. Clouqueur T. Sensor deployment strategy for detection of targets traversing a region / T. Clouqueur, V.Phipatanasuphorn, P.Ramanathan, K.Saluja // Mobile Netw. Appl. – 2003. vol. 4, P. 453 – 461.
13. Onur E. Sensing coverage and breach paths in surveillance wireless sensor networks / Onur E., Ersoy C., Delic H. // In Proceedings of the IEEE Monograph Sensor Network Operations. – 2004.
14. Xing G. Co-Grid: An efficient coverage maintenance protocol for distributed sensor networks / G.Xing, C.Lu, R.Pless, J.O'sullivan // In Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). – 2004.
15. Ahmed N. Probabilistic coverage in wireless sensor networks / N.Ahmed, S.Kanhere, S. Jha // In Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN). – 2005.
16. Hefeeda M. A probabilistic coverage protocol for wireless sensor networks / M.Hefeeda, H.Ahmadi // In Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). – 2007.
17. Tian Y. A distributed protocol for ensuring both probabilistic coverage and connectivity of high density wireless sensor networks / Y.Tian, S.-F.Zhang, Y.Wang // In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2008.
18. Yang G. Analytical study of collaborative information coverage for object detection in sensor networks / G.Yang, V.Shukla, D.Qiao // In Proceedings of the IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). – 2008.
19. Wang J. Sensing coverage for randomly distributed wireless sensor networks in shadowed environments / J.Wang, S.Medidi // IEEE Trans. Vehic. Technol. – 2008. vol. 1. P. 556 – 564.
20. Yang G. Barrier information coverage with wireless sensors / Yang G., Qiao D. // In Proceedings of the IEEE Infocom Conference on Computer Communicaations. – 2009.
21. Wang B. Information coverage for wireless sensor networks / B.Wang, W.Wang, V.Srinivasan, K.Chua // IEEE Comm. Lett. – 2005. vol. 9. P. 967 – 969.
22. Venkataraman J. Short noise models for the dual problems of cooperative coverage and outage in random networks / J.Venkataraman, M.Haenggi, O.Collins // In Proceedings of the 44th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). – 2006.
23. Wang R. Universal information coverage for bandwidth-constrained sensor networks / R.Wang, W.Cao // In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2007.
24. Liu L. Localization-Oriented coverage based on bayesian estimation in camera sensor networks / L.Liu, X.Zhang, H.Ma // In Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). – 2008.
25. Wang B. Worst and best information exposure paths in wireless sensor networks / B.Wang, K.Chua, W.Wang, V.Srinivasan // In Proceedings of the International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN05). – 2005.