

DOI: 10.18372/2310-5461.60.18265
УДК 004.896; 004.358

Перепеліцин С. О., канд. техн. наук, старш. наук. співр.
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
orcid.org/ 0000-0002-3705-7305
e-mail: sergpsa@inbox.lv;

Терещенко Я. В., д-р. фіз. наук, наук. співр.
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
orcid.org/ 0000-0002-8451-7634
e-mail: yter2016@gmail.com;

Шевченко А. М.,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0003-2723-0378
e-mail: viknu@univ.kiev.ua;

Лоза В. М., канд. техн. наук, старший дослідник
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0002-8050-3614
e-mail: lozich@ukr.net;

Терещенко В. М., д-р фіз.-мат. наук, професор
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
orcid.org/ 0000-0002-0139-6049
e-mail: vtereshch@gmail.com

ТАКТИЧНІ СЕНСОРНІ РАДІОМЕРЕЖІ – МУЛЬТИСЕНСОРНЕ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Вступ

В останній час США ведуть інтенсивні розробки по створенню єдиної багатофункціональної інформаційно-управляючої системи, яка інтегрує функції управління військами, зброєю, розвідкою, радіоелектронною боротьбою, а також зв'язку, навігації, орієнтування й впізнання (C4ISR). Ця система реалізується фінансуванням програми створення інформаційної мережі поля бою (WIN-T). Її метою є зменшення бойового і чисельного складу підрозділів з одночасним зростанням її бойової ефективності за рахунок підвищення мобільності, досягнення абсолютної переваги над противником в інформаційному забезпеченні і розвідувальних можливостях [1]. Застосування противником БПЛА створює реальну військову та терористичну загрозу як особового складу, так об'єктів критично важливої інфраструктури. Рівень цієї загрози з кожним днем стає дедалі вищим, що зумовлено загальною доступністю технологій виробництва та

застосування БПЛА. На даний час в системі протиповітряної оборони підрозділів сектору національної безпеки і оборони України, не зважаючи на постійне оновлення парку сучасними зразками, існуюча система виявлення повітряних цілей приземного шару не є достатньо ефективною.

Все це свідчить про наявність наукового завдання з глибокого дослідження алгоритмів та методів, які здатні ефективно забезпечувати стійкість функціонування сенсорної мережі у разі нестабільного функціонування мережного інтерфейсу, відмов обладнання, а також зовнішніх та внутрішніх впливів на функціональний стан елементів мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток технологій обміну даними, що прискорюється, за допомогою комунікаторів та їх доступність призводить до лавиноподібного зростання баз різноманітних даних, особливо відеоданих. Мініатюризація сенсорів, на базі MEMS-технологій, та їх різноманіття сприяє розвитку радіомережевих та сенсорних технологій [2–8].

Все це спонукає дослідників різних країн розробляти нові алгоритми та методи функціонування бездротових мережевих структур, ускладнювати алгоритми обробки великих баз даних за допомогою нейронно-мережевих технологій та шукати компроміси між якістю функціонування, об'ємом ресурсів, та трафіком радіомереж, в тому числі й сенсорних [9–20].

Постановка задачі дослідження

Аналіз закордонного досвіду застосування сенсорів та сенсорних радіомереж як військово-вими, так і в інших сферах показує, що найбільш розвиненими та різноманітними є технологічні рішення застосування сенсорних радіомереж у США та країнах ЄС. Отже метою статті є дослідження моделі функціонування сенсорної бездротової мережі за допомогою пасивних сенсорів. Предметом дослідження є інформаційні технології функціонування радіомережі у розумінні концепції C4ISR.

Обґрунтування функцій та структури елементів сенсорної військової радіомережі

Для опису доступу до інформації вводиться поняття узагальненої функціональної архітектури сенсорної радіомережі. У такій архітектурі визначаються функціональні компоненти мереж

та зв'язки між ними, а також те, розподіл між ними обов'язків підтримки функцій мережі – як зовнішніх, так і внутрішніх.

Стандартизацією сенсорних мереж займаються багато міжнародних організацій, серед яких ISO, IEC, ITU-T, IEEE і ін. Так дослідницька група із сенсорних мереж SGSN (Study Group on Sensor Networks) об'єднаного технічного комітету № 1 ISO/IEC JTC1 (Joint Technical Committee 1) визначила базову архітектуру сенсорної мережі і її основні інтерфейси [21].

Бездротові сенсорні радіомережі (WSN) загального так і військового призначення, складаються з набору основних компонентів, зокрема:

- платформа бездротової сенсорної мережі;
- статичні та мобільні пристрої, це автономні сенсорні вузли або моти;
- системи управління даними бездротової сенсорної мережі;
- міжшаровий дизайн;
- архітектура бездротової сенсорної мережі і стек протоколів;
- автентифікація, безпека даних і захист;
- бездротові сенсорні мережі і штучний інтелект, периферійні обчислення;
- накопичення енергії батареями пристрою живлення.

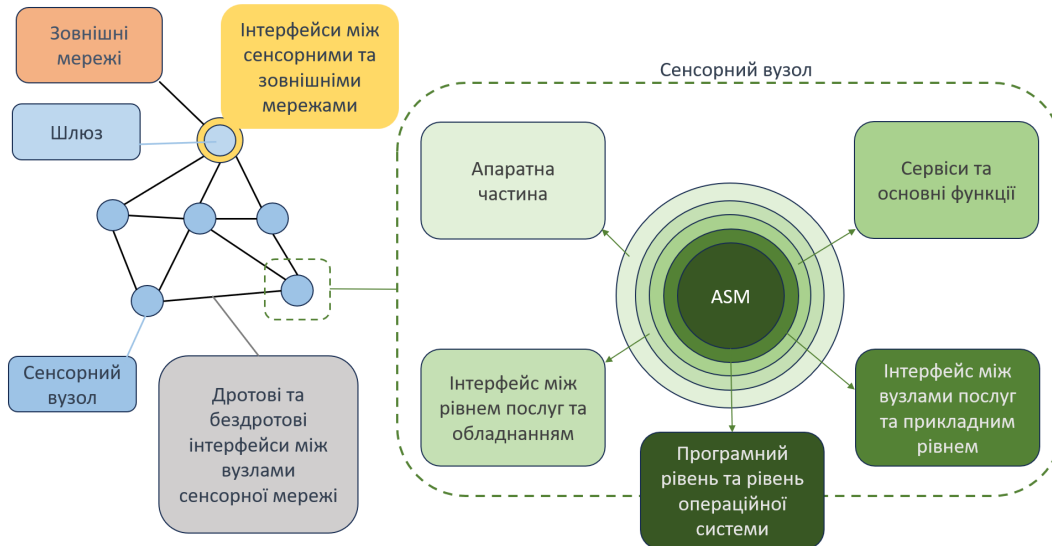


Рис. 1. Основні елементи і інтерфейси сенсорної радіомережі

У WSN використовуються два типи архітектури: багаторівнева мережева архітектура та кластерна архітектура.

Міжрівневий MAC, що використовується в бездротових сенсорних мережах це стандарт IEEE 802.11e розширює існуючий стандарт IEEE 802.11 WLAN, включаючи підтримку якості обслуговування (QoS). Він використовує міжрівневий підхід, що дозволяє MAC-рівню співпра-

цювати з вищими рівнями, такими як мережевий і прикладний рівні, для надання конкретних послуг на основі потреб програми. З іншого боку, IEEE 802.16, або WiMAX, призначений для широкосмугового бездротового доступу та також використовує міжрівневий дизайн. Ця конструкція дозволяє MAC-рівню спілкуватися з фізичним рівнем, щоб адаптуватися до мінливих умов каналу, таких як перешкоди, шум і завмирання [22].

Показники трафіка військової сенсорної радіомережі

Головні чинники, які впливають на показники трафіка військової сенсорної радіомережі мають такий вигляд:

1. Тип та кількість сенсорів. Сенсори є спеціалізованими засобами збору інформації, такими як радари, камери, сонари та інші. Кожен тип сенсора має свої власні вимоги до пропускної здатності і ресурсів.

2. Топологія. Взаємне розташування елементів мережі можуть суттєво впливати на пропускну здатність, а також надійність мережі.

3. Зони обслуговування. Розташування сенсорів та їхні зони обслуговування впливають на обсяг і характер трафіку. Сенсори, що знаходяться на великих відстанях один від одного, можуть вимагати більшої пропускної здатності для передачі даних до центрального вузла.

4. Режим роботи сенсорів. Сенсори можуть працювати в різних режимах, таких як активний, пасивний або режим очікування. Кожен режим має свої особливості і вимоги до мережі. Наприклад, активні радари можуть створювати велику кількість сигналів, які потрібно обробляти та передавати.

5. Обробка та аналіз даних. Центр обробки даних військової сенсорної радіомережі відповідає за обробку, аналіз та інтеграцію зібраних даних. Інтенсивність обробки і аналізу може впливати на обсяг трафіку, що передається до центру.

6. Захист і шифрування. Захист інформації є критичним аспектом для військових мереж. Використання шифрування і інших заходів безпеки може збільшити обсяг передачі даних, так як додаткова інформація потрібна для захисту від несанкціонованого доступу.

7. Тактика та місія. Кожне завдання та тактична ситуація може вимагати різного рівня збору даних. Такі місії, що вимагають інтенсивного збору даних, можуть створювати значний трафік в мережі.

8. Технології зв'язку. Використовуються різні технології передачі даних, такі як радіо, супутникові системи та інші. Вони мають різні характеристики, такі як швидкість передачі, дальність та стійкість до перешкод, що може впливати на показники трафіка.

9. Ефективність мережі. Рівень доступності, надійності та ефективності самої мережі може впливати на трафік. Проблеми з інфраструктурою можуть призвести до перебоїв у зборі і передачі даних.

Але *вирішальне* значення впливу на показники трафіка сенсорної радіомережі відіграє саме взаємне розташування вузлів радіомережі, яка самоорганізується, в частині її потенційних можливостей.

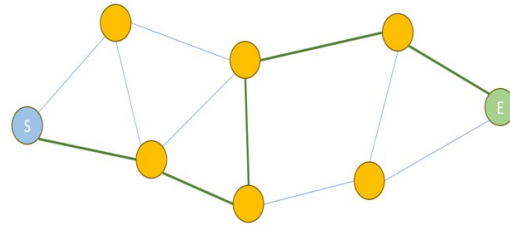


Рис. 2. Приклад шляху на мережі для СМО

Під час розгляду ймовірно-часових характеристик радіомережі, об'єктом аналізу є маршрут пропуску трафіку. Опис впливу фізичного та каналного рівнів у загальному випадку залежить від обраної технології організації бездротового зв'язку між вузлами мережі. Як приклад моделі мережного рівня може бути – система масового обслуговування (СМО, рис. 2). Процес синтезу і вибору рішення щодо маршруту передачі даних в сенсорних мережах складається з трьох етапів:

- визначення маршрутів передачі даних від вузла-відправника до вузла-отримувача як мети;
- вибір найбільш прийняттого варіанта маршруту передачі даних, який веде до досягнення мети, відповідно значення функції ціни рішення з врахуванням параметрів функціонування мережі та її елементів;
- реалізація маршруту передачі даних в сенсорній мережі як рішення (обраного варіанта дії).

На структурному рівні функціональні рішення задачі синтезу оптимального маршруту передачі даних в сенсорній радіомережі розглядаються з точки зору можливості реалізації синтезованої стратегії управління в умовах обмежень і невизначеностей значення параметрів стану елементів та і варіативності топології мережі [23], рис. 3.

Задачу синтезу та вибору оптимального управління маршрутизацією передачі даних в сенсорній радіомережі можна подати як немарківську динамічну задачу динамічної дискретної оптимізації у вигляді:

$$W_{ij} = \sum_k f_{ki}, = \sum_j f_{ij}, \forall i \in V, i \neq \{s, t\}. \quad (1)$$

В цьому разі алгоритм синтезу і вибору стратегії управління маршрутизацією ПД в СМ, як задачі дискретної динамічної оптимізації, можна представити послідовністю кроків:

1. Для усіх $y \in Y_T$ визначаємо функцію ціни для немарківської динамічної задачі $I_{t+1}(x) = j_0(t)$.

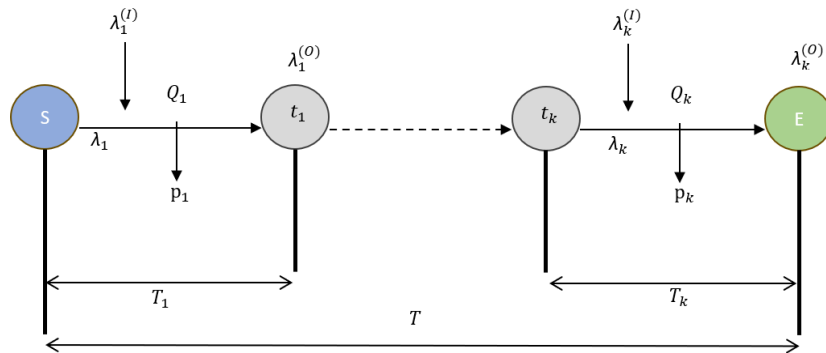


Рис. 3. Модель маршруту СМО

2. Для усіх $y \in \dot{Y}_{t-1}$ і $t = T, T-1, \dots, 1$ обчислюємо

$$J_t(y) = \min \{ j_t(y, x + J_{t+1}(W_t(y, x)) : x_t \in X_t, W_t(y, x) \in Y_t, (y, x) \in Z_t \}$$

Якщо задача $J_t(y)$ не може бути вирішена, припускаємо, що $J_t(y) : \infty$. В іншому випадку визначаємо оптимальне рішення, як $x_t(y)$.

3. $J_1(y^0)$ у є мінімальним значенням функції для немарківської динамічної задачі.

4. Визначаємо $x_1 : x_1(y^0)$ та $y_1 = W_1(y_0, x_1)$.

5. Для усіх $t = \{2, 3, \dots, T\}$ припускаємо $x_t = x_t(y_{t-1})$ та $y_t = W_t(y_{t-1}, x_t)$.

При $J_1(y^0) < +\infty$ немарківська динамічна задача має оптимальне рішення $\{x_t, y_{t-1}\}_{t=1}^T$. Кроки 4 і 5 алгоритму породжують оптимальне рішення, оскільки $x_t(y)$ визначає відповідне оптимальне управління на першому етапі процесу, який складається з етапів $t, t+1, \dots, T$ і починається зі стану y . Тим самим здійснюється перехід до нового стану $W(y, x_t(y))$, для якого відомо оптимальне управління $x_{t+1}(W(y, x_t(y)))$

першого етапу процесу, який вміщує етапи $\{t, t+1, \dots, T\}$.

Розв’язання задачі забезпечення компромісу між якістю функціонування, об’ємом ресурсів, та трафіком

Розподіл вузлів у реальній мережі може бути нерівномірним, мережа може мати різну кількість областей із різною щільністю вузлів. Форма та розміри цих областей можуть бути різні. Одними з основних завдань: балансування навантаження та виявлення аномалій в мережі. Для розв’язання завдань використовується гаусівська суміш моделей (GMM).

Нехай $p(X)$ – ймовірність спостереження X . Тоді GMM [24] для K кластерів буде описуватись:

$$p(X) = \sum_{i=1}^K \pi_i N(X | \mu_i, \Sigma_i), \quad (2)$$

де π_i – вага i -го кластера, $N(X | \mu_i, \Sigma_i)$ – гаусівський розподіл для i -го кластера з середнім μ_i та коваріаційною матрицею Σ_i .

В сенсорних мережах важливо рівномірно розподілити навантаження між сенсорами, щоб уникнути передчасного виходу з ладу окремих вузлів та забезпечити тривалу та ефективну роботу мережі, рис.4.

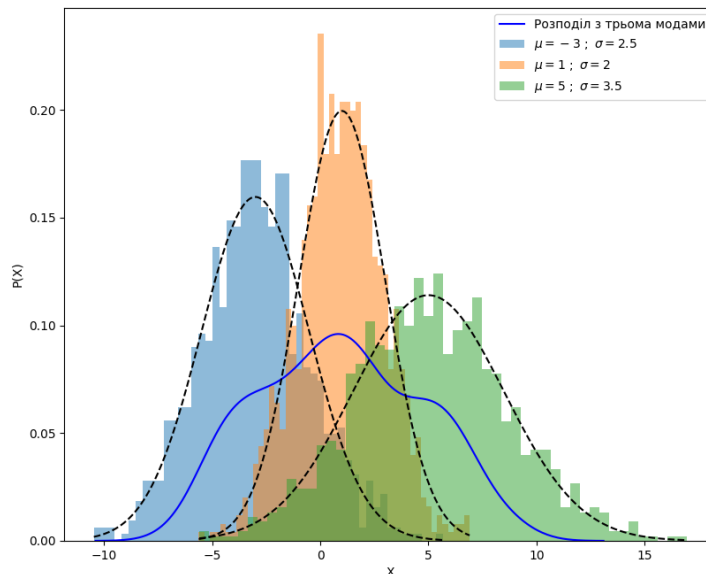


Рис. 4 Розподіл з трьома модами

Загальний алгоритм балансування навантаження має вигляд:

1. *Ініціалізація*: Вибрати кількість кластерів K та ініціалізувати параметри μ_i , Σ_i та π_i .

2. *E-крок*: Використовувати формулу E-кроку для оцінки ймовірності приналежності кожного спостереження до кожного кластера.

$$\gamma(z_{ik}) = \frac{\pi_k N(x_i | \mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^K \pi_j N(x_i | \mu_j, \Sigma_j)} \quad (3)$$

3. *M-крок*: Оновити параметри моделі відповідно до формул M-кроку.

$$\mu_k = \frac{\sum_{j=1}^K \pi_j N(x_i | \mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^K \pi_j N(x_i | \mu_j, \Sigma_j)}; \quad (4)$$

$$\Sigma_k^{new} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^N \gamma(z_{ik}) (x_i - \mu_k^{new})(x_i - \mu_k^{new})^T. \quad (5)$$

4. *Ітерації*: Повторювати E- та M-кроки до стабілізації моделі.

5. *Аналіз кластерів*: Використовувати отримані кластери для ідентифікації груп сенсорів з подібним навантаженням.

6. *Розподіл навантаження*: На основі аналізу кластерів розподілити завдання та ресурси між сенсорами.

Виявлення аномальних патернів у даних сенсорів є важливим для раннього виявлення несправностей, збоїв у мережі або незвичайних зовнішніх подій.

Аналогічно, як і для задачі рівномірного розподілу навантаження використовується GMM. Основні етапи:

1. *Навчання Моделі GMM*
2. *Розрахунок Ймовірності*

Для кожного спостереження x розраховується його ймовірність $P(x_i)$ за допомогою моделі GMM використовуючи формулу (2).

3. *Визначення порогу*

(6)

де $\mu_{p(x)}$ – середнє значення ймовірностей для навчального набору даних, $\sigma_{p(x)}$ – стандартне відхилення ймовірностей, а k – коефіцієнт, який визначає рівень чутливості.

4. *Визначення аномалій*

Якщо $P(x_i)$ нижче за встановлений поріг (6), спостереження вважається аномалією.

Довжина маршруту в мережі впливає на якість обслуговування трафіку, а саме на час доставки повідомлень. Середня довжина маршруту в мережі, а також розподіл довжини маршруту до-

зволяють характеризувати потенційні можливості аналізованої структури щодо забезпечення якості обслуговування трафіку, рис. 5.

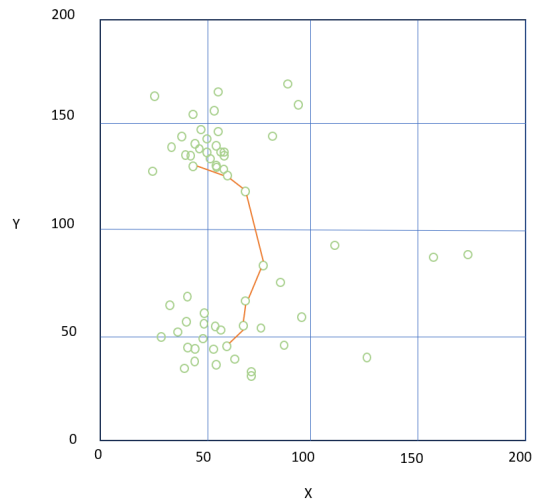


Рис. 5. Найкоротший маршрут з двома модами

Зрозуміло, що середня довжина маршруту та її розподіл залежатиме від конкретного виду мультимодального розподілу та обмежень на вибір кінцевих вузлів маршруту. Загальний алгоритм моделювання описується в рис 6.



Рис. 6. Алгоритм імітаційного моделювання

В результаті імітаційного моделювання ми отримали розподіл довжин маршрутів для 3-х модального розподілу вузлів, рис. 7.

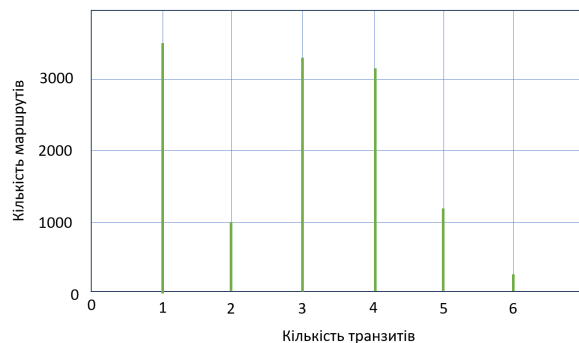


Рис. 7. Розподіл довжин маршрутів для 3-х модального розподілу вузлів

Розподіл кількості транзитів у маршруті, зафіксований протягом часу моделювання має мультимодальний характер і чисельно близький до

результатів аналітичного моделювання, що дозволяє зробити висновок про можливість застосування розробленої моделі на практиці

Однією з найважливіших категорій, що визначають структуру, є її топологія – сукупність елементів і зв'язків цієї структури, «очищених» від усіх властивостей, крім властивостей існування і зв'язності. Зв'язки між елементами або вузлами радіомережі, як правило, ілюструються топологічним графом і формалізуються використанням добре розвинутого математичного апарату теорії графів. Структура відображає здатність мережі або радіомережі до забезпечення доставлення інформації в різні її зони та пункти [25].

Висновок

В статті наводяться параметри алгоритму та результати моделювання, які мають мультимодальний характер і чисельно близькі до аналітичних результатів.

Запропоновано ефективний алгоритм визначення оптимального навантаження та розпізнавання аномалій використовуючи Гаусівську суміш моделей для сенсорної мережі.

Також проведено дослідження розподілу кількості транзитів у маршруті, який має мультимодальний характер і чисельно близький до результатів аналітичного моделювання, що дозволяє зробити висновок про можливість застосування розробленої моделі на практиці.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Думітраш В., Бондаренко О., Думітраш О., Гетьман А. Аналіз напрямків розвитку систем радіозв'язку НАТО: Збірник наукових праць ВІПІ. 2020. № 1. 22 с.
- [2] Чому засоби радіоелектронної боротьби та розвідки набувають дедалі більшого значення. *Defense Express*, 15 січня 2022, https://defence-ua.com/weapon_and_tech/oslipiti_voroga-5857.html (дата звернення 30.11.2023)
- [3] Сема Е. О. Електронні сенсори магнітного поля: технологічні і фізичні параметри: кваліфікаційна робота магістра, Суми, 2021, С. 13–17, 26–27.
- [4] Accelerometers for health & usage monitoring systems (hums), каталог компанії PCB Piezotronics, 2022. С. 3–7.
- [5] Осадчук В. С., Осадчук О. В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. Монографія – ВНТУ, 2013. С. 35–41, 240.
- [6] Засоби вимірювань (датчики) в IoT. Лекція. С. 9–18. https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/68843/mod_resource/content/1/%D0%9B-3.pdf (дата звернення 30.11.2023)
- [7] Наконечна А. В. Мультиспектральний пірометр. Дипломний проєкт, НТУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Київ, 2021. С. 24–31, 35–38.
- [8] Фастиковський П. П., Лепіх Я. І. Портативні сейсмічні системи (огляд). *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2021. Т. 18, № 4, С. 30–38.
- [9] Перепеліцин С. О. Технологія налаштування радіомережі в умовах завад інтеграцією маршрутизації та самонавчання. Кваліфікаційна наукова праця на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. НАУ, Київ. 2021, С. 58–61, 86–96.
- [10] Slyusar V. I., Perepelitsyn S. O. Analysis of the topology of multi-rank networks based on the end product of matrices. *Radio Technical Fields, Signals, Devices and Systems : IX International Scientific and Technical Conference*. 2020 November 16–22, Kyiv : NTUUKPI, p. 114–116. DOI: 10.13140/RG.2.2.26965.04329.
- [11] Слюсар В. І., Перепеліцин С. О. Аналіз топології багаторангових мереж на основі торцевого добутку матриць. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, (16–22 листопада 2020 р. Київ, Україна). С. 114–116.
- [12] Перепеліцин С. О. Аналіз можливості застосування туманних обчислень у військових бездротових мережах управління тактичного рівня. - К. Сучасна спеціальна техніка. 2020. № 2 (61). С. 47–58.
- [13] Слюсар В. І., Перепеліцин С. О., Писаренко Р. В. Вплив топології на конфігурацію рухомих мультирангових мереж. XII Міжнародна науково - практична конференція “Advancing in research and education” (07–10 грудня 2020 р., Ля-Рошель, Франція). С. 558–563.
- [14] Slyusar, V. I., Perepelitsyn, S. A. Application of the end product of matrices in problems of analysis of routing topologies of multi-rank networks. 2021. P. 56–63.
- [15] Кучеров Д. П. Реконфігурація мультисенсорної системи за умови впливу дестабілізуючих факторів. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2016. No 2. С. 101–112.
- [16] Kuchеров D.P., Tkachenko V. G., Kashkevych, I. F., Androshchuk A. O., Perepelitsyn S. O. Recognition of text phrases distorted by interference by back propagation neural network. *Electronics and Control Systems*. 2020. N 3(65). С. 46–54.
- [17] Alhmiedat T., Taleb A.Abu, Bsoul M. A Study on Threats Detection and Tracking Systems for Military Applications using WSNs. *International Journal of Computer Applications*. 2012. 0975-8887. Vol. 40. No. 15.
- [18] Alhmiedat, T. A, and Yang, S.. Tracking Mobile Targets through Wireless Sensor Networks. *Lap Lambert Academic Publishing AG & Co Kg*, ISBN 13: 9783844334609. 2011, P. 76–117.

- [19] М. Умар Афтаб, О. Ашраф, М. Ірфан, М. Маджид, А. Нісар, М. Асиф Хабиб. Оглядове дослідження безпроводових сенсорних мереж та їх безпеки. Комунікації та мережі. 2015. № 7. С. 72–179.
- [20] Винар А. А. Автоматизація розміщення датчиків системи пасивної акустичної локації на основі платонових тіл. Автореферат, Чорноморський національний університет імені Петра Могили; Миколаїв. 2021, С. 2–10.
- [21] Побудова та алгоритми функціонування бездротових сенсорних мереж. Лекція. Державний університет Житомирська політехніка – https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/206951/mod_resource/content/0/%D0%9B7_%D0%A1%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%96%20%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6.pdf (дата звернення 30.11.2023).
- [22] Сайт компанії GeeksforGeeks <https://www.geeksforgeeks.org/mac-protocol-used-in-wireless-sensor-networks/?ref=tr> (дата звернення 30.11.2023).
- [23] A. Manjeshwar, D. Agrawal. A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. Conference: Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS-01), San Francisco, CA, April 23–27, 2001.
- [24] Chen, J.; Adebomi, O.E.; Olusayo, O.S.; Kulesza, W.. The Evaluation of the Gaussian Mixture Probability Hypothesis Density approach for multi-target tracking. IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, 2010. doi:10.1109/IST.2010.5548541
- [25] Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Проективання телекомунікаційних мереж. Підручник., Київ: Техніка, 2002. 345 с.

**Перепеліцин С.О., Терещенко Я.В., Шевченко А.М., Лоза В.М., Терещенко В.М.
ТАКТИЧНІ СЕНСОРНІ РАДІОМЕРЕЖІ – МУЛЬТИСЕНСОРНЕ ВИЯВЛЕННЯ
ТА ЛОКАЛІЗАЦІЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ**

На даний час в системі протиповітряної оборони підрозділів сектору національної безпеки і оборони України, не зважаючи на постійне оновлення (поповнення) парку сучасними зразками, все ще існують недоліки в системі виявлення повітряних цілей приземного шару з малою та надмалою ефективною поверхнею розсіювання. Одним із найефективніших та маловитратних, з точки зору фінансового та часового ресурсів, підходів є створення сучасної інформаційної платформи тактичного рівня. Така платформа заснована на використанні пасивних (сейсмічних, акустичних, оптико-електронних, магнітних, інфрачервоних та інших) сенсорів у військових радіомережевих структурах сумісних із геоінформаційною системою (ГІС), для виявлення цілей приземного шару, що становлять загрози військовим та інфраструктурним об'єктам України. Дана стаття присвячена глибокому аналізу алгоритму управління маршрутизацією в сенсорних радіомережах, з акцентом на підвищення їх стійкості та надійності. Автори зосереджуються на викликах, пов'язаних зі складними умовами експлуатації мереж, такими як нестабільність мережеских інтерфейсів, відмови обладнання та різноманітні зовнішні та внутрішні перешкоди, які можуть негативно впливати на роботу мережі. Особлива увага приділяється використанню Гаусівської суміші моделей (GMM) для моделювання мультимодальних даних, що дозволяє підвищити точність та ефективність управління маршрутизацією. Результати, представлені в статті, показують, що запропонований алгоритм має високу точність, що підтверджується порівнянням з даними, отриманими за допомогою імітаційного моделювання. Це свідчить про практичну застосовність алгоритму в реальних умовах. Дослідження відкриває нові перспективи для покращення стабільності та надійності сенсорних радіомереж, що є особливо актуальним у контексті широкого використання бездротових технологій. Запропонований алгоритм може бути використаний для розробки більш надійних та ефективних систем управління маршрутизацією, що забезпечить кращу адаптацію до змінних умов та викликів, з якими стикаються сучасні бездротові мережі.

Ключові слова: тактична сенсорна радіомережа, пасивні та активні сенсори, технології штучного інтелекту, мультимодальний розподіл вузлів.

**Perepelitsyn S., Tereshchenko Y., Shevchenko A., Loza V., Tereshchenko V.
TACTICAL SENSORY RADIO MEASURES – MULTISENSORY DETECTION
AND LOCALIZATION OF AROUND OBJECTS**

Currently, in the air defense system of units of the national security and defense sector of Ukraine, despite the constant updating (replenishment) of the park with modern models, there are still shortcomings in the system of detecting air targets of the surface layer with a small and ultra-small effective scattering surface. One of the most effective and cost-effective, from the point of view of financial and time resources, approaches is the creation of a modern tactical level information platform. Such a platform is based on the use of passive (seismic, acoustic, optical-electronic, magnetic, infrared, and other) sensors in military radio network structures compatible with the geographic information system (GIS) to identify targets of the surface layer that pose threats to military and infrastructure facilities of Ukraine. This article is dedicated to a thorough analysis of the routing management algorithm in sensor radio

networks, with a focus on enhancing their stability and reliability. The authors concentrate on challenges associated with complex network operating conditions, such as instability of network interfaces, equipment failures, and various external and internal interferences that can negatively impact network performance. Special attention is given to the use of Gaussian Mixture Models (GMM) for modeling multimodal data, which allows for increased accuracy and efficiency in routing management. The results presented in the article demonstrate that the proposed algorithm has high accuracy, as confirmed by comparison with data obtained through simulation modeling. This indicates the practical applicability of the algorithm in real-world conditions. The research opens new perspectives for improving the stability and reliability of sensor radio networks, which is particularly relevant in the context of widespread use of wireless technologies. The proposed algorithm can be used to develop more reliable and efficient routing management systems, ensuring better adaptation to the changing conditions and challenges faced by modern wireless networks.

Keywords: tactical sensor radio network, passive and active sensors, artificial intelligence technologies, multimodal distribution of nodes.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2023 р.

Прийнято до друку 19.12.2023 р.