

УДК 621.396

канд. техн. наук, професор Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Думітраш О. В. ORCID: 0009-0003-9550-5377 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ХАРАКТЕРИСТИКА СПРОМОЖНОСТІ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ РАДІОЗВ'ЯЗНІСТЮ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТАКТИЧНОЇ ЛАНКИ УПРАВЛІННЯ

У статті представлено комплексний огляд сучасних підходів і рішень щодо управління радіозв'язністю у бездротових сенсорних мережах тактичної ланки управління, що функціонують в умовах бойових дій. Проведено систематизацію результатів наукових досліджень українських і зарубіжних учених, проаналізовано стан і перспективи розвитку методів забезпечення надійного зв'язку в умовах високої мобільності, впливу завад, змінної топології та обмежених ресурсів. Обґрунтовано актуальність розгляду цієї тематики у контексті положень Стратегічного оборонного бюлетеня України та стандартів НАТО, які вимагають впровадження сучасних технологічних рішень у системи військового управління.

Наведено класифікацію сенсорних мереж, архітектуру бездротових сенсорних мереж тактичної ланки управління, а також детально описано основні вимоги до мереж у тактичному середовищі. Розглянуто сучасні технології управління зв'язком, серед яких особливо виділено когнітивне радіо, MANET, гетерогенні мережі, мобільні агентні системи, самоорганізовані мережі та рішення з використанням штучного інтелекту.

У статті також проаналізовано низку прикладних систем (наприклад, ITN, Bittium Tactical Wireless IP, Thales + Persistent MANET), що використовуються у Збройних Силах провідних країн світу. Розкрито переваги та обмеження кожного з підходів і рішень, з урахуванням їх стійкості до радіоелектронної боротьби, складності впровадження, вартості, енерговитрат та ефективності функціонування в умовах бойових дій.

Узагальнення результатів дозволило визначити найбільш ефективні напрями розвитку систем управління радіозв'язністю бездротових сенсорних мереж тактичної ланки управління. Зокрема, зроблено висновок про перспективність використання інтегрованих гібридних рішень, що поєднують інтелектуальні алгоритми, адаптивну маршрутизацію та гнучкі радіотехнології. Запропоновано напрями подальших досліджень, пов'язані з розробкою математичної моделі, яка враховує стохастичний характер середовища функціонування, а також вдосконаленням алгоритмів адаптивного управління з використанням методів машинного навчання.

Ключові слова: сенсорні системи, бездротові (безпроводові) сенсорні мережі, тактична ланка управління, топологія, мобільна радіомережа, радіозв'язність, Стратегічний оборонний бюлетень, C4ISR.

H. Radzivilov, O. Dumitrash. Assessment of the capabilities of existing radio connectivity management solutions for tactical-level wireless sensor networks

The article presents a comprehensive review of modern approaches and solutions for managing radio connectivity in wireless sensor networks at the tactical level, operating under combat conditions. The results of scientific studies by Ukrainian and foreign researchers have been systematized, and the current state and development prospects of methods for ensuring reliable communication under conditions of high mobility, interference, dynamic topology, and limited resources have been analyzed. The relevance of the topic is substantiated in the context of the Strategic Defense Bulletin of Ukraine and NATO standards, which require the integration of advanced technological solutions into military command and control systems.

The article provides a classification of sensor networks, the architecture of tactical-level wireless sensor networks, and a detailed description of the core requirements for such networks in a tactical environment. Modern communication management technologies are examined, with particular attention given to cognitive radio, MANETs, heterogeneous networks, mobile agent systems, self-organizing networks, and artificial intelligence-based solutions.

The study also analyzes a number of applied systems (e.g., ITN, Bittium Tactical Wireless IP, Thales + Persistent MANET) currently deployed in the armed forces of leading countries. The advantages and limitations of each approach and solution are outlined, considering their resilience to electronic warfare, deployment complexity, cost, energy consumption, and operational effectiveness in combat environments.

The synthesis of research findings has made it possible to identify the most effective directions for the development of radio connectivity management systems in tactical-level wireless sensor networks. Specifically, the article highlights the potential of integrated hybrid solutions combining intelligent algorithms, adaptive routing, and flexible radio technologies. Future research directions are proposed, including the development of a mathematical model that accounts for the stochastic nature of the operational environment, as well as the enhancement of adaptive management algorithms using machine learning techniques.

Keywords: sensor networks, wireless sensor networks, tactical command level, topology, mobile radio network, radio connectivity, Strategic Defense Bulletin, C4ISR.

Актуальність та постановка завдання в загальному вигляді

Відповідно до Стратегічного оборонного бюлетеня України, затвердженого Указом Президента України від 17 вересня 2021 року № 473/2021, схвалено, що одним із першочергових напрямів реалізації воєнної політики в Україні є побудова системи об'єднаного керівництва силами оборони та військового управління у Збройних Силах України, яка має здійснюватися відповідно до передового досвіду, принципів і стандартів держав-членів НАТО [1–3]. Досвід російсько-української війни свідчить про те, що використання передових технологій держав-членів НАТО сприяє покращенню процесу прийняття оперативних рішень, гарантує миттєве та ефективне їх доведення до виконавців, забезпечує контроль і здатність до супроводу під час виконання поставлених бойових завдань. Прикладом однієї з таких передових технологій можна вважати гнучкі автоматизовані системи управління військами, які налаштовані за нормами концепції C4ISR (модифікації C5ISR, C6ISR, C7ISR), що означає «Command and Control, Computers, Communications, Intelligence – Surveillance – Reconnaissance» (Командування і контроль, Зв'язок, Комп'ютеризація, Розвідка – Спостереження – Рекогносцировка) і являє собою інтегрований підхід до керування й координації військових операцій у сучасних гібридних війнах [4].

Ключовим інструментом для збору, обробки та передачі даних, що забезпечують належне функціонування систем C4ISR, ситуаційну обізнаність та ефективне управління військами, є бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks, далі – БСМ), де вирішальну роль відіграє забезпечення радіозв'язності. Під радіозв'язністю в БСМ варто розуміти можливість доступності сенсорного вузла щодо інших з метою передачі інформації. БСМ мають ряд переваг для ефективного виконання оперативних завдань: здатні до швидкого розгортання та самоорганізації, адаптивні, енергоефективні, відмовостійкі, своєчасно реагують на вплив різноманітних зовнішніх факторів.

У зв'язку з цим виникає завдання дослідження існуючих рішень управління радіозв'язністю БСМ тактичної ланки управління (далі – ТЛУ), формування узагальненої характеристики сучасних підходів управління радіозв'язністю БСМ тактичного рівня та аналіз їх спроможності.

Аналіз попередніх досліджень

Упродовж 2015–2025 років спостерігається значний розвиток бездротових технологій передачі інформації, зокрема БСМ як одних із ключових складових Інтернету речей, що все більше поширюються у цивільних і військово-оборонних сферах. Огляд наукових досліджень у сфері БСМ свідчить про активну участь як українських (В. А. Романюк, О. В. Жук, О. Я. Сова, А. І. Міночкін, Р. О. Беляков, А. В. Романюк та ін.), так й іноземних (Akyildiz, Lee, Gerla, Kumaraswamy, Dohler, Prakash, Bessani та ін.) вчених у розвитку цієї галузі. Велику кількість досліджень було присвячено критеріям вибору вузлів, спрямованим на поліпшення ефективності процесу інформаційного обміну в БСМ [5–9], оскільки від цього залежатиме ефективність мережі. Проведений аналіз наукових публікацій [10–21] свідчить про те, що вчені розглядали різні підходи для підвищення ефективності використання БСМ: відновлення зв'язності між сенсорами шляхом введення додаткових вузлів, застосування функції ретрансляції, управління топологією, використання різних методів маршрутизації, збору даних чи контролю доступу тощо. Незважаючи на значний прогрес у дослідженнях, деякі аспекти управління радіозв'язністю в БСМ залишаються недостатньо вивченими: зазначені підходи не враховують динамічні зміни умов середовища функціонування БСМ (наприклад, зона ведення бойових дій), не розглядалося забезпечення надійного та стійкого зв'язку в умовах передачі великих обсягів даних, високої мобільності, впливу завад, високої щільності вузлів та змінних радіоумов, що впливають на радіозв'язність мережі та стабільність роботи мережі.

Метою статті є дослідження спроможності існуючих рішень управління радіозв'язністю БСМ в умовах стохастичного середовища та динамічної зміни топології під час проведення військових операцій.

Виклад основного матеріалу

Залежно від безлічі факторів (поставлених задач, способу організації, середовища функціонування, типу сенсорів (датчиків) тощо) сенсорні мережі класифікують за різними ознаками. На рисунку 1 наведено узагальнену класифікацію сенсорних мереж.

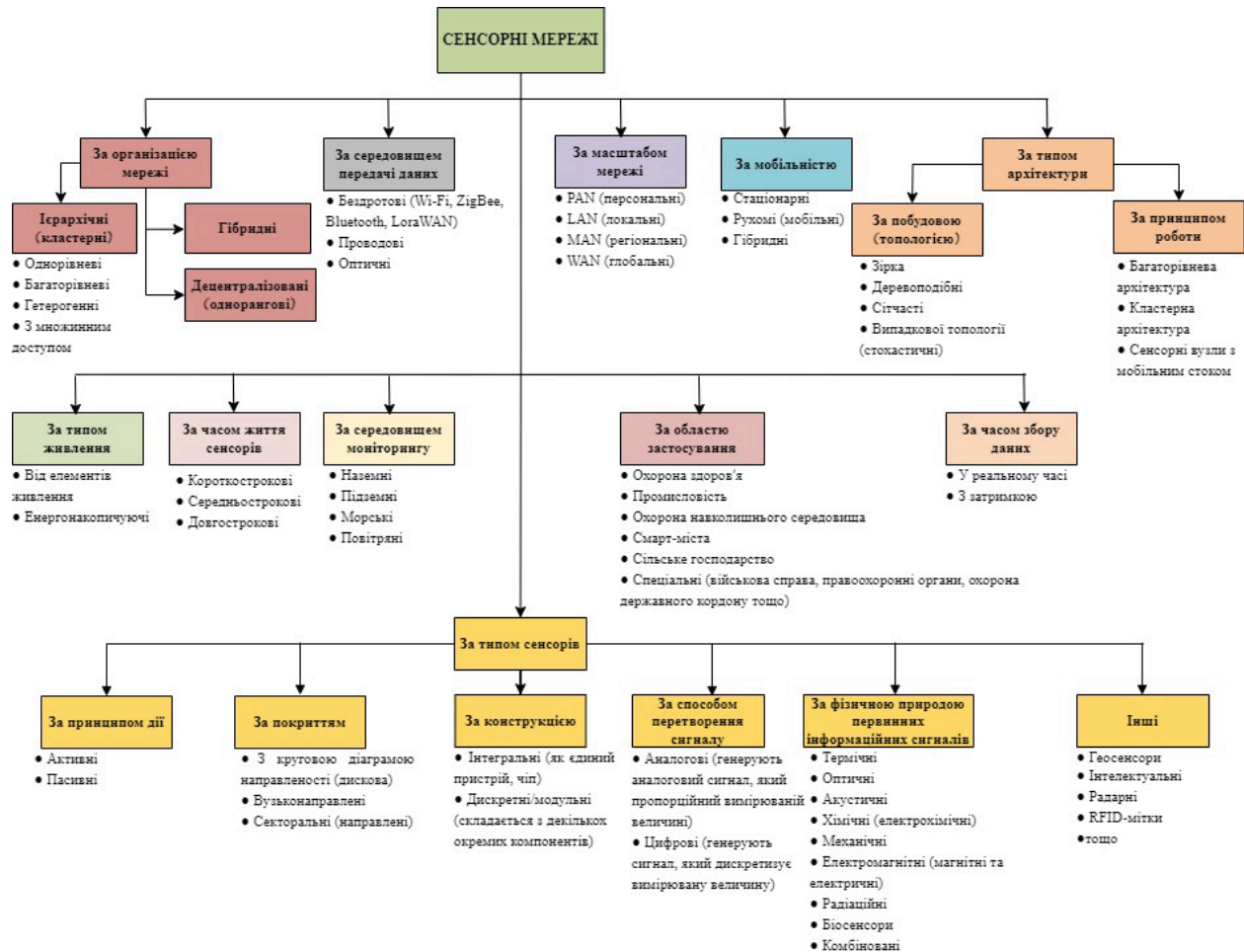


Рис. 1. Узагальнена класифікація сенсорних мереж

Оскільки БСМ можуть функціонувати з різними типами сенсорів (датчиків), при розгортанні таких мереж необхідно враховувати архітектуру побудови, яка у подальшому забезпечить стійкий та надійний зв'язок між підрозділами, високу ситуаційну обізнаність і моніторинг.

На рисунку 2 наведена архітектура БСМ ТЛУ на базі чотирирівневої моделі, яка складається з рівня сенсорів, рівня каналів передачі даних, рівня обробки даних і рівня додатків. Це забезпечує універсальний та ефективний набір інструментів для вирішення різноманітних задач спеціального призначення для військових цілей, а кожен із рівнів може бути незалежним і характеризується відносною простотою та гнучкістю оперативного розгортання або оптимізації безпосередньо на лінії зіткнення [22; 23].

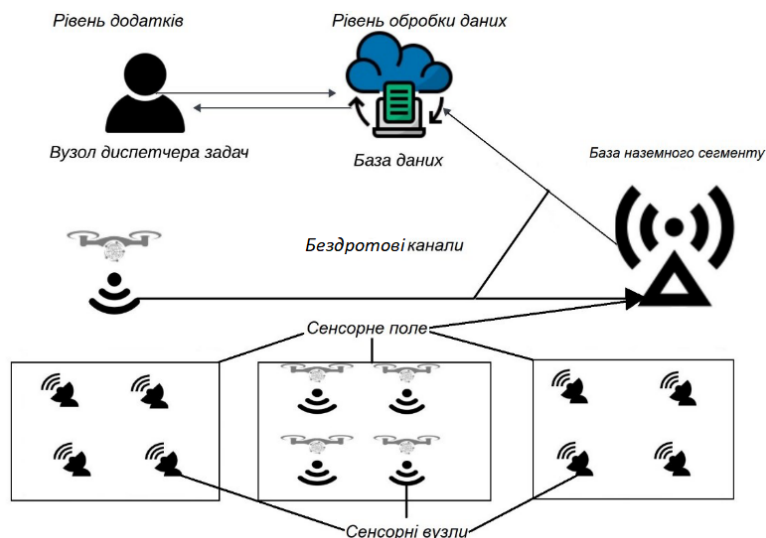


Рис. 2. Архітектура бездротової сенсорної мережі тактичної ланки управління

Окрім того, при розгортанні БСМ варто врахувати вимоги до мережі з огляду на характеристики БСМ ТЛУ, які визначено у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні вимоги до БСМ ТЛУ

№	Характеристика	Опис
1	Динамічна топологія	Топологія мережі постійно змінюється через переміщення вузлів, що потребує адаптивних протоколів маршрутизації
2	Обмежені енергетичні ресурси	Сенсори та комунікаційні модулі працюють від автономних джерел живлення, тому важливо оптимізувати споживання енергії
3	Обмежені обчислювальні ресурси	Обробка даних, криптографія та зберігання інформації обмежені через малі обсяги оперативної пам'яті та потужності процесорів вузлів
4	Вимога до безперервності зв'язку	Тактичне середовище вимагає безперервного зв'язку для забезпечення командування і контролю, у тому числі при збої окремих вузлів
5	Стійкість до дій противника	Мережа повинна функціонувати в умовах електромагнітного протистояння (РЕБ), зазнавати атак (DoS, перехоплення, підміна вузлів) та бути стійкою до них
6	Низька затримка передачі даних	Час доставки критичних даних (наприклад, сигналів тривоги) має бути мінімальним, особливо в мережах реального часу
7	Масштабованість	Мережа повинна ефективно працювати як при малій, так і при великій кількості вузлів та їх щільності, з урахуванням ієрархічної організації (рій, група, мережа тощо)
8	Автономність та самовідновлення	Мережа повинна самостійно відновлювати структуру після втрати вузлів або порушення зв'язку, без централізованого керування
9	Адаптивність до умов середовища	Повинна змінювати параметри роботи відповідно до навколишніх умов – завади, зміни висоти, швидкості руху, погодних умов тощо
10	Синхронізація часових процесів	Для коректної передачі даних і координації дій важливо забезпечити синхронізацію між вузлами в реальному часі

З огляду на вищезазначене варто зазначити, що саме забезпечення радіозв'язності є однією з ключових цільових функцій задач управління вузлами БСМ ТЛУ [24; 25]. Враховуючи високий рівень мобільності, радіоелектронної протидії та потребу в оперативній координації, виникає необхідність у надійних системах управління радіозв'язністю, здатних до адаптації в реальному часі. З цією метою застосовуються програмні методи (нечітка логіка, нейронні мережі, когнітивне радіо), апаратні рішення (MANET, COTS IoT радіо,

інтегровані IP-мережі), інтегровані підходи (ITN, системи з розподіленим управлінням топологією). У таблиці 2 наведено основні підходи управління радіозв'язністю БСМ ТЛУ.

Таблиця 2

Основні підходи управління радіозв'язністю БСМ ТЛУ

№	Тип підходу	Основна ідея	Переваги	Обмеження
1	Управління топологією	Оптимізація структури мережі для підвищення її ефективності	Економія енергії, адаптивність	Складність обчислень у реальному часі
2	Кластеризація	Поділ мережі на кластери з головними вузлами	Масштабованість, зниження трафіку	Вразливість головного вузла
3	Гетерогенні мережі	Поєднання вузлів з різними можливостями	Гнучкість, баланс навантаження	Ускладнення маршрутизації
4	Ієрархічне управління	Багаторівнева організація з координаційними вузлами	Керованість, логічна структура	Вразливість командного рівня
5	Контекстно-адаптивні	Адаптація до змін середовища (перешкоди, мобільність)	Гнучкість, висока ефективність	Потреба в сенсорній обізнаності
6	На основі штучного інтелекту / машинного навчання	Інтелектуальна маршрутизація, виявлення загроз	Самонавчання, прогнозування	Вимоги до ресурсів
7	Мобільні агентні системи	Застосування БпЛА або мобільних вузлів	Гнучкість покриття, реле	Енерговитрати, безпека
8	Самоорганізовані мережі (SON)	Автономне формування топології, маршрутизація	Висока автономність, надійність	Нестабільність при сильних змінах
9	Безпека і криптозахист	Шифрування, аутентифікація, виявлення атак	Захист інформації, довіра	Обмеженість обчислень у вузлах

Відповідно до основних підходів управління радіозв'язністю БСМ ТЛУ, наведених у таблиці 2, визначено основні технології управління радіозв'язністю, які наведено у таблиці 3 та виділено найперспективніші [26–29].

Таблиця 3

Основні рішення управління радіозв'язністю БСМ ТЛУ

№	Технологія	Протидія РЕБ	Складність розгортання	Складність функціонування	Вартість	Примітка
1	MANET	Висока	Середня	Середня	Висока	Універсальне, вже активно застосовується
2	Когнітивне радіо (CR)	Дуже висока	Висока	Висока	Дуже висока	Найперспективніше для умов РЕБ
3	Thales + Persistent MANET	Дуже висока	Дуже висока	Середня	Дуже висока	Сучасне бойове рішення НАТО
4	Bittium Tactical Wireless IP	Висока	Висока	Середня	Дуже висока	Готове комерційне рішення
5	Нечітка логіка (ретранслятори)	Середня	Низька	Висока	Низька	Ефективне для невеликих мереж
6	ANFIS (нейро-нечітка система)	Середня	Середня	Висока	Середня	Підходить для прогнозування та розподілу
7	DSA (динамічний доступ до спектра)	Дуже висока	Висока	Висока	Висока	Оптимально для зміни середовища

№	Технологія	Протидія РЕБ	Складність розгортання	Складність функціонування	Вартість	Примітка
8	Туманні обчислення	Середня	Висока	Висока	Середня	Потребує складної інфраструктури
9	IoT + COTS рішення	Низька	Дуже низька	Низька	Дуже низька	Застосування поза межами бойових дій
10	Біоінспіровані алгоритми	Середня	Середня	Середня	Низька	Перспективні в динамічних MANET
11	Self-Organizing Networks (SON)	Висока	Середня	Висока	Висока	Автономне та адаптивне середовище
12	QoS із нечіткою логікою	Середня	Низька	Середня	Низька	Добре для регулювання навантажень
13	ITN (Інтегрована тактична мережа)	Дуже висока	Дуже висока	Середня	Дуже висока	Стандартизоване військове рішення США

Висновки

У результаті проведеного аналізу встановлено, що забезпечення надійної та стабільної радіозв'язності у БСМ ТЛУ є критично важливим чинником для ефективного функціонування систем командування та контролю в умовах сучасних бойових дій. Найбільш ефективними у таких умовах виявилися рішення, що базуються на концепціях когнітивного радіо, мобільних самоконфігурованих мереж (MANET), а також інтегрованих тактичних мереж (ITN). Зазначені технології забезпечують високий рівень адаптивності до змін середовища, стійкість до дій радіоелектронної боротьби та масштабованість у складних динамічних умовах.

Водночас їх впровадження потребує значних ресурсів, що обумовлює необхідність пошуку компромісних варіантів для конкретних сценаріїв застосування. Перспективними для завдань оптимізації ресурсів і підвищення гнучкості управління є також рішення на основі методів нечіткої логіки, біоінспірованих алгоритмів і нейро-нечітких систем (ANFIS), які доцільно використовувати для інтелектуального управління трафіком, маршрутизації та контролю доступу.

Перспективним напрямком подальших наукових досліджень є розробка математичної моделі управління радіозв'язністю в умовах стохастичного середовища функціонування БСМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 травня 2016 року «Про Стратегічний оборонний бюлетень України»: Указ Президента України від 06.06.2016 № 240/2016. URL: <http://www.president.gov.ua/documents/2402016-20137> (дата звернення: 03.03.2025).
2. Про Стратегічний оборонний бюлетень України: Рішення Ради нац. безпеки і оборони України від 20.08.2021: станом на 21 верес. 2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0063525-21#Text> (дата звернення: 03.03.2025).
3. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 серпня 2021 року «Про Стратегічний оборонний бюлетень України»: Указ Президента України від 17 вересня 2021 року № 473/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473/2021#n17> (дата звернення: 03.03.2025).
4. Концептуальні підходи застосування бездротових сенсорних мереж арміями передових країн світу / В. Машталір та ін. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. Т. 47, № 2. С. 96–112. URL: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112> (дата звернення: 13.03.2025).

5. Optimization of Wireless Sensor Network and UAV Data Acquisition / D.-T. Ho et al. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2015. Vol. 78, no. 1. P. 159–179. URL: <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0175-5> (date of access: 13.03.2025).
6. Okcu H., Soyturk M. Distributed clustering approach for UAV integrated wireless sensor networks. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. 2014. Vol. 15, no. 1/2/3. P. 106. URL: <https://doi.org/10.1504/ijahuc.2014.059912> (date of access: 13.03.2025).
7. Energy Efficient Hierarchical Clustering Approaches in Wireless Sensor Networks: A Survey / B. Jan et al. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2017. Vol. 2017. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/6457942> (date of access: 13.03.2025).
8. Zhan C., Zeng Y., Zhang R. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. Vol. 7, no. 3. P. 328–331. URL: <https://doi.org/10.1109/lwc.2017.2776922> (date of access: 13.03.2025).
9. Романюк А. В. Алгоритм временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2018. Т. 2, № 33. С. 106–117. URL: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164680> (дата звернення: 13.03.2025).
10. Алгоритм пошуку топології в неоднорідній безпроводовій сенсорній мережі. / Сова О. Я. та ін. *Проблеми телекомунікацій: Матеріали IX Міжнар. науково-техн. конф. «Проблеми телекомунікацій – 2015»*, м. Київ, 20–24 квітня 2015 р. URL: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/104314> (дата звернення: 20.03.2025).
11. Методика управління топологією наземно-повітряних радіомереж / В. А. Романюк, Є. О. Степаненко *Проблеми телекомунікацій: Матеріали XIII Міжнар. науково-техн. конф. «Перспективи телекомунікацій – 2019»*, м. Київ, 15–19 квітня 2019 р. URL: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/169014> (дата звернення: 20.03.2025).
12. Управління топологією в безпроводних сенсорних мережах / О. В. Жук та ін. *Проблеми телекомунікацій: Матеріали XI Міжнар. науково-техн. конф. «Проблеми телекомунікацій – 2017»*, м. Київ, 18–21 квітня 2017 р. URL: https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/101432?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 20.03.2025).
13. Романюк А. В. Методи збору даних з безпроводних сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.02 Телекомунікаційні системи та мережі. Київ, 2021. 185 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40572> (дата звернення: 23.03.2025).
14. Міночкін А. І., Романюк В. А., Сова О. Я. Інтелектуальний метод маршрутизації в мобільних радіомережах (MANET). *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”*. 2009. № 1. С. 74–87.
15. Романюк А. В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2018. № 4. С. 84–91.
16. Wireless sensor networks: a survey / I. F. Akyildiz et al. *Computer Networks*. 2002. Vol. 38, no. 4. P. 393–422. URL: [https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4) (date of access: 27.03.2025).
17. A survey on wireless multimedia sensor networks/ I. F. Akyildiz et al. *Computer Networks*. 2006. Vol. 51, no. 4. P. 921–960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.10.002> (date of access: 27.03.2025).
18. Gerla M. Vehicular urban sensing. *the 11th international symposium*, Vancouver, British Columbia, Canada, 27–31 October 2008. New York, New York, USA. URL: <https://doi.org/10.1145/1454503.1454504> (date of access: 27.03.2025).
19. Internet of Things/ M. Dohler et al. *IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE*. 2024. Vol. 62, no. 1. P. 24–25. URL: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2024.10401870> (date of access: 23.03.2025).
20. Mahana C. B., Carvalho M. M., Prakash R. Minimal Latency and Buffer-Constrained Gathering of Data in Sensor Networks. *2024 19th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Rio de Janeiro, 14–17 July 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/ISWCS61526.2024.10639050> (date of access: 18.03.2025).
21. Alysson Bessani. The Power of Simplicity on Dependable Distributed Systems (Invited Talk). In *28th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2024)*. Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), Volume 324, p. 1:1, Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik. 2024. URL: <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.OPODIS.2024.1>.

22. Проблематика використання безпроводних сенсорних мереж у військових цілях / Д. Михалевський та ін. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Т. 331, № 1. С. 97–100. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-16> (дата звернення: 27.03.2025).
23. Mykhalevskiy D. Development of a method for assessing the effective information transfer rate based on an empirical model of statistical relationship between basic parameters of the Standard 802.11 wireless channel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5, no. 9 (107). P. 26–35. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213834> (date of access: 27.03.2025).
24. Романюк А. В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2017. Т. 28 (67). № 2. С. 49–54.
25. Objective control functions of mobile AD-HOC networks by means of UAVs / O. I. Lisenko et al. *2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 13–15 October 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/apuavd.2015.7346610> (date of access: 30.03.2025).
26. Akyildiz I. F., Lee W.-Y., Chowdhury K. R. CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*. 2009. Vol. 7, no. 5. P. 810–836. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.01.001> (date of access: 26.03.2025).
27. Maj. Matthew S. Blumberg, U.S. Army. The Integrated Tactical Network. Pivoting Back to Communications Superiority. *MILITARY REVIEW*. May-June 2020. P. 104–115. URL: <https://www.armyupress.army.mil/Portals/7/military-review/Archives/English/MJ-20/Blumberg-Int-Tactical-Network.pdf> (date of access: 26.03.2025).
28. Mitola III J. Cognitive Radio Architecture. *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*. Dordrecht. P. 43–107. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5542-3_3 (date of access: 30.04.2025).
29. Fog Computing: A Platform for Internet of Things and Analytics / F. Bonomi et al. *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments*. Cham, 2014. P. 169–186. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05029-4_7 (date of access: 30.04.2025).