

Тимофеев Є.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті розглянуто підходи до застосування технології МІМО (Multiple-Input Multiple-Output) у безпроводових сенсорних мережах (БСМ) з метою підвищення ефективності моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Технологія МІМО демонструє високий потенціал у забезпеченні стабільного та надійного зв'язку, розширенні зони покриття, підвищенні пропускної здатності й енергоефективності безпроводових систем, що робить її перспективною для використання в умовах складного середовища функціонування об'єктів критичної інфраструктури (КІ). У статті здійснено систематизацію принципів роботи, конфігурацій та типів реалізації технології МІМО (у тому числі Massive MIMO, Cooperative MIMO та Virtual MIMO), а також охарактеризовано архітектуру й особливості функціонування БСМ.

В останні роки спостерігається стрімке впровадження безпроводових сенсорних мереж у різних сферах господарства та інфраструктури для моніторингу об'єктів, розташованих на великих географічних площах. Завдяки розвитку БСМ сформувався новий підхід до побудови «розумних» систем спостереження, що дозволяють у реальному часі отримувати, передавати та аналізувати інформацію про стан навколишнього середовища, інженерних конструкцій та технічних систем. Особливої актуальності ці технології набувають у контексті забезпечення стабільності та безпеки критичної інфраструктури, до якої належать енергетичні комплекси, транспортні системи, об'єкти водопостачання, телекомунікації та інші життєво важливі елементи державного та економічного значення.

Однак традиційні методи моніторингу таких об'єктів часто є затратними, складними в масштабуванні та не здатні забезпечити безперервний контроль у режимі реального часу. Безпроводові сенсорні мережі пропонують гнучке, масштабоване та економічно ефективне рішення. Проте їх ефективне функціонування в умовах підвищених вимог до надійності, пропускної здатності, енергоспоживання та безпеки даних залишається серйозним викликом. У цьому контексті технологія МІМО, яка дозволяє паралельну передачу множинних потоків даних через кілька антен одночасно, забезпечуючи високі характеристики каналу зв'язку без збільшення потужності передавача або ширини смуги частот, стає ключовим технологічним рішенням.

Ключові слова: МІМО, безпроводові сенсорні мережі, критична інфраструктура, моніторинг, енергоефективність, безпека передачі даних.

Постановка проблеми. Забезпечення безперервного моніторингу критичних об'єктів, зокрема транспортних, енергетичних і промислових, потребує використання гнучких, масштабованих та енергоефективних рішень, здатних працювати в складних радіочастотних умовах. Традиційні методи не завжди відповідають цим вимогам, що зумовлює потребу в застосуванні інноваційних технологій, таких як МІМО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікаціях провідних наукових установ

(MITRE, MDPI, Intel, Silvus Technologies) наведено результати досліджень щодо ефективності МІМО в умовах багатопроменового поширення, зниження енергоспоживання за рахунок Cooperative/Virtual MIMO. Окремі дослідження присвячені прикладним аспектам використання МІМО для моніторингу мостів, трубопроводів і енергетичних об'єктів.

Постановка завдання. Метою статті є формулювання аналітичного бачення доцільності використання технології МІМО в БСМ для

моніторингу КІ, виявлення її основних переваг, проблем та перспектив розвитку.

У статті проаналізовано:

- теоретичні засади функціонування MIMO і його переваги для БСМ;
- приклади практичного впровадження в системах моніторингу мостів, трубопроводів та енергетичних об'єктів;
- виклики, пов'язані з апаратними та енергетичними обмеженнями сенсорних вузлів;
- тенденції розвитку, пов'язані з інтеграцією MIMO.

Виклад основного матеріалу. Технологія Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) являє собою безпроводову технологію, яка використовує множинні передавачі та приймачі для одночасної передачі більшого обсягу даних [5]. Завдяки використанню кількох антен на обох кінцях безпроводового каналу зв'язку, технологія MIMO здатна значно підвищити продуктивність та надійність передачі даних.

Основні принципи роботи технології MIMO базуються на використанні явища багатопроменевого поширення радіохвиль (multipath). У традиційних безпроводових системах багатопроменеве поширення часто призводить до інтерференції та сповільнення передачі сигналу. Однак, технологія MIMO використовує цей природний феномен на свою користь. Замість того, щоб вважати відбиті та розсіяні сигнали перешкодами, технологія MIMO застосовує спеціальні алгоритми для їх об'єднання, що дозволяє підвищити потужність прийнятого сигналу та розширити зону покриття.

Одним з ключових принципів технології MIMO є розділення сигналу на кілька

незалежних потоків даних, що передаються одночасно через різні антени (spatial multiplexing). Іншим важливим принципом є передача одного і того ж сигналу різними шляхами (diversity coding). Це забезпечує підвищену надійність зв'язку, оскільки ймовірність одночасного погіршення всіх шляхів передачі є низькою. Завдяки цьому зменшується вплив згасання сигналу (fading) та підвищується стійкість до перешкод.

Існує кілька основних конфігурацій технології MIMO (рис. 1). Традиційна система з одним передавачем та одним приймачем називається SISO (Single-Input Single-Output). Системи з одним передавачем та кількома приймачами називаються SIMO (Single-Input Multiple-Output), а системи з кількома передавачами та одним приймачем – MISO (Multiple-Input Single-Output). Повноцінна MIMO система включає кілька передавачів та кілька приймачів [2].

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) визначається як мережа просторово-розподілених датчиків, які здійснюють моніторинг та запис фізичних умов навколишнього середовища та передають зібрані дані до датацентру. Ці мережі здатні вимірювати різноманітні параметри, такі як температура, вологість, тиск, освітленість, рівень забруднення, звук, рух тощо.

Основні характеристики БСМ включають їхню структуру (рис. 2), яка зазвичай складається з вузлів (сенсорних та виконавчих), маршрутизаторів та шлюзу [8]. Сенсорні вузли є малопотужними пристроями з обмеженими обчислювальними ресурсами, пам'яттю та енергопостачанням. Для передачі даних вони використовують безпроводовий зв'язок, найчастіше

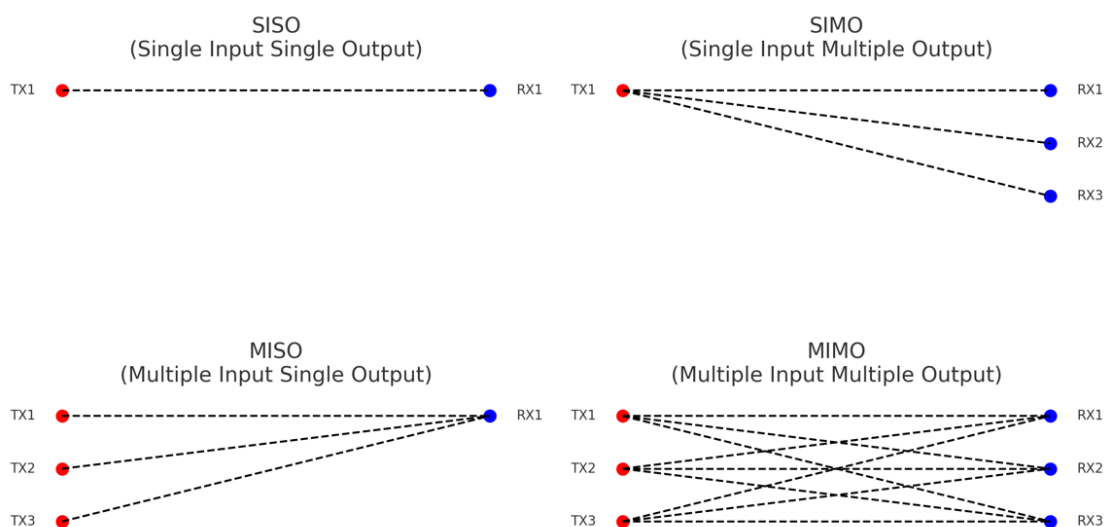


Рис. 1. Конфігурації безпроводового зв'язку

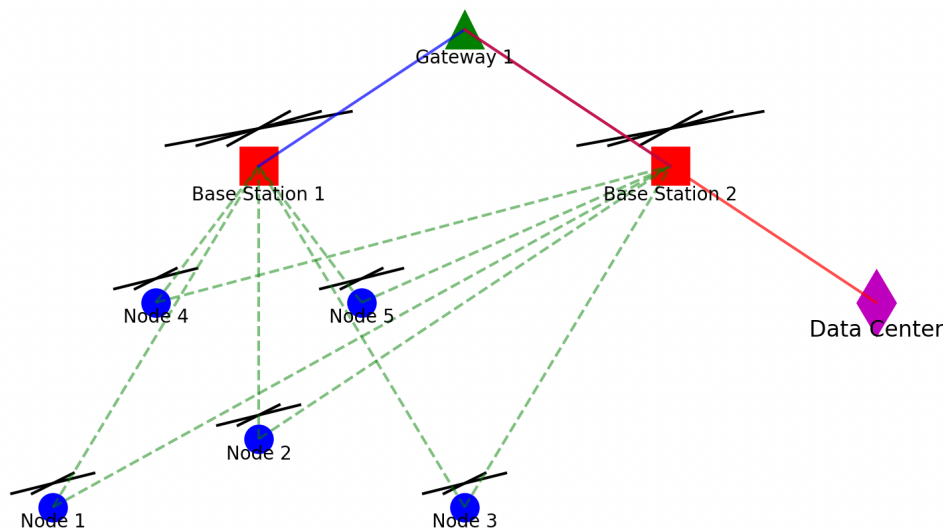


Рис. 2. Структурна схема системи мобільної сенсорної мережі із MIMO

радіочастотний [7]. Залежно від конкретного застосування, БСМ можуть мати різну топологію, включаючи зіркову, сітчасту, деревоподібну та шинну. Кожна БСМ розробляється та розгортається для виконання конкретних завдань моніторингу. Типова архітектура БСМ включає сенсорні вузли, які є основою мережі та складаються з датчиків, процесора, трансивера та джерела живлення. Маршрутизатори використовуються для розширення діапазону зв'язку або обходу перешкод [8]. Шлюз забезпечує зв'язок БСМ з іншими мережами, такими як Інтернет, дозволяючи передавати дані до віддаленої базової станції для подальшої обробки, аналізу та зберігання.

Застосування БСМ є надзвичайно широким і охоплює різні галузі. У моніторингу навколишнього середовища БСМ використовуються для контролю якості повітря, виявлення лісових пожеж та моніторингу водних ресурсів. В охороні здоров'я вони застосовуються для моніторингу стану пацієнтів та у фітнес-трекерах. У сільському господарстві БСМ допомагають контролювати умови вирощування та керувати поливом. У промисловості вони використовуються для моніторингу технологічних процесів та контролю обладнання. У транспортній галузі БСМ застосовуються для моніторингу стану мостів та дорожнього руху. В енергетиці БСМ використовуються для моніторингу трубопроводів та електростанцій. У сфері безпеки та спостереження БСМ використовуються для виявлення вторгнень та моніторингу територій [1].

БСМ характеризуються обмеженими ресурсами та орієнтованим на конкретне застосування

дизайном. Їхня здатність автономно працювати в різноманітних середовищах робить їх придатними для моніторингу критичної інфраструктури, але їхні обмеження потребують вирішення за допомогою таких технологій, як MIMO.

Критична інфраструктура охоплює об'єкти, які є невід'ємною частиною функціонування суспільства та економіки [1]. Це включає в себе транспортні мережі, енергетичні системи, комунікаційні засоби, системи водопостачання та інші життєво важливі об'єкти. Моніторинг такої інфраструктури вимагає високого рівня надійності, доступності та безпеки передачі даних [1]. Безперервний контроль є необхідним для своєчасного виявлення потенційних відмов, пошкоджень або зовнішніх загроз, таких як кібератаки або фізичні втручання [1].

Безпроводові сенсорні мережі можуть забезпечити масштабоване та економічно ефективне рішення для моніторингу географічно розподіленої критичної інфраструктури [1]. Їхня гнучкість у розгортанні та низька вартість окремих сенсорних вузлів роблять їх привабливою альтернативою традиційним дротовим системам моніторингу. Однак, безпроводові канали зв'язку є більш вразливими до різних видів перешкод, шуму та атак порівняно з дротовими мережами [1].

Забезпечення безпеки даних, включаючи їхню конфіденційність, цілісність та доступність, є критично важливим аспектом моніторингу КІ за допомогою безпроводових технологій [1]. Несанкціонований доступ до даних моніторингу може розкрити вразливості інфраструктури, що може бути використано для завдання шкоди або

порушення її функціонування [9]. Крім того, енергоефективність є ключовим фактором для тривалої та безперебійної роботи БСМ, особливо у важкодоступних місцях, де заміна або підзарядка батарей сенсорних вузлів може бути складною або неможливою [4].

Різні типи критичної інфраструктури, такі як мости, трубопроводи та енергетичні об'єкти, мають свої специфічні вимоги до моніторингу. Наприклад, моніторинг мостів може включати вимірювання вібрації та деформації, тоді як моніторинг трубопроводів може вимагати контролю тиску та виявлення витоків. Технологія МІМО пропонує потенційні рішення для покращення характеристик БСМ при моніторингу КІ, зокрема підвищення надійності зв'язку, розширення зони покриття та оптимізацію енергоспоживання.

Однією з головних переваг використання технології МІМО в безпроводових сенсорних мережах для моніторингу критичної інфраструктури є значне підвищення пропускної здатності мережі. Крім того, технологія МІМО значно покращує надійність зв'язку завдяки використанню технік просторового рознесення (spatial diversity). Передача одного і того ж сигналу різними незалежними шляхами зменшує ймовірність одночасного глибокого згасання сигналу на всіх шляхах, що підвищує стійкість до перешкод та згасань. У складних радіочастотних середовищах з великою кількістю відбивань та розсіювань сигналу, характерних для промислових об'єктів або міської забудови, технологія МІМО може забезпечити значно стабільніший та надійніший зв'язок порівняно з традиційними системами з однією антеною (SISO).

Підвищена надійність передачі даних є критично важливою для моніторингу критичної інфраструктури, де втрата інформації про стан об'єктів може мати серйозні наслідки для безпеки та функціонування важливих систем. Забезпечення своєчасної та безперебійної доставки даних від сенсорів, розташованих на об'єктах КІ, до центрального пункту моніторингу є ключовим для прийняття обґрунтованих рішень та запобігання аварійним ситуаціям. Теоретично, пропускна здатність безпроводового каналу при використанні технології МІМО визначається за допомогою детермінанти матриці каналу H і пропорційна кількості антен (n_t , n_r), що дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних без розширення смуги частот:

$$C = \log_2 \det \left(I_{n_r} + \frac{\rho}{n_t} H H^* \right) [\text{біт/с/Гц}]$$

де H – матриця каналу розміром $n_r \times n_t$,
 ρ – середнє відношення сигнал/шум (SNR),
 I_{n_r} – одинична матриця розміром n_r ,
 H^* – ермітове (спряжене транспоноване) перетворення матриці H .

Для підвищення надійності, техніки просторового рознесення забезпечують зниження ймовірності помилки пропорційно ступеню рознесення d , що критично важливо у складних радіочастотних середовищах із багатопроменевим поширенням:

$$P_e \approx \left(\frac{1}{\text{SNR}} \right)^d$$

де P_e – ймовірність помилки,

d – ступінь рознесення (кількість незалежних шляхів).

Таким чином, технологія МІМО значно підвищує стабільність зв'язку та стійкість до перешкод навіть у складних умовах міської забудови або промислових об'єктів. Технологія МІМО також сприяє розширенню зони покриття безпроводових сенсорних мереж та покращенню якості прийнятого сигналу. Завдяки використанню багатопроменевого формування (beamforming), технологія МІМО може направляти сигнал у вузькому промені в бік приймача, що дозволяє збільшити дальність зв'язку та підвищити рівень сигналу на приймальній стороні. Це особливо корисно для моніторингу великих за площею об'єктів критичної інфраструктури, таких як довгі трубопроводи або розгалужені енергетичні мережі.

Крім того, технологія МІМО ефективніше використовує явище багатопроменевого поширення радіохвиль. Замість того, щоб відбиті та розсіяні сигнали створювали перешкоди, технологія МІМО здатна їх комбінувати для покращення якості прийнятого сигналу навіть за відсутності прямої видимості між передавачем та приймачем. Це особливо важливо в умовах міської забудови або на промислових об'єктах, де можуть бути різноманітні перешкоди для прямого поширення радіохвиль. Розширення зони покриття, забезпечене технологією МІМО, може призвести до зменшення кількості необхідних сенсорних вузлів для моніторингу великих об'єктів критичної інфраструктури. Це, в свою чергу, може знизити загальну вартість розгортання та експлуатації мережі, а також спростити її архітектуру та управління. Покращена якість сигналу

також сприяє підвищенню надійності передачі даних та зменшенню кількості помилок. Теоретично, використання просторового формування променя дозволяє досягти виграшу пропорційного кількості антен N :

$$G_{\text{beamforming}} = N \text{ або } G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(N)$$

що безпосередньо призводить до підвищення відношення сигнал/шум (SNR) на приймальній стороні:

$$\text{SNR}_{\text{beamforming}} = \text{SNR}_{\text{omnidirectional}} + G_{\text{dB}}$$

Також перспективним напрямом є застосування концепції масивного MIMO (Massive MIMO), яка дозволяє суттєво збільшити зону покриття та якість обслуговування завдяки використанню великої кількості антен на передавальній стороні.

Питання енергоефективності є одним з ключових при розгортанні безпроводових сенсорних мереж, особливо для тривалого моніторингу критичної інфраструктури. Хоча традиційні системи MIMO можуть бути досить енергоємними через складність обробки сигналів та необхідність використання кількох радіочастотних ланцюгів, розвиток Cooperative MIMO (C-MIMO) та Virtual MIMO пропонує перспективні шляхи для досягнення енергоефективності в БСМ [14].

C-MIMO дозволяє кільком малопотужним сенсорним вузлам співпрацювати для спільної передачі даних, формуючи таким чином віртуальну багатоантенну систему. Завдяки цьому може бути досягнуто значне зменшення загального енергоспоживання, особливо при передачі даних на великі відстані, де традиційним одноантенним системам (SISO) потрібна більша потужність передавача. Віртуальна технологія MIMO також використовує ідею співпраці, де кілька одноантенних вузлів об'єднуються для досягнення переваг технології технології MIMO, таких як просторове рознесення та підвищена пропускна здатність, без необхідності встановлення кількох фізичних антен на кожному вузлі, що сприяє зниженню енергоспоживання [6].

Правильний вибір режимів передачі даних та рівнів потужності в системах MIMO може бути адаптований до поточних умов радіоканалу, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання мережі [5]. Наприклад, при хороших умовах зв'язку може бути використана менша потужність передавача або більш енергоефективні методи модуляції.

Загальне енергоспоживання вузла при передачі даних визначається добутком потужності передавача на тривалість передачі:

$$E_{\text{tx}} = P_{\text{tx}} \times t_{\text{tx}}$$

Використання технології Cooperative MIMO дозволяє зменшити енергоспоживання мережі завдяки збільшенню швидкості передачі даних та скороченню часу активної роботи передавача:

$$E_{\text{C-MIMO}} < E_{\text{SISO}}$$

Додатково, адаптивне налаштування режимів модуляції і рівнів потужності відповідно до поточних умов радіоканалу дозволяє мінімізувати енергоспоживання сенсорних вузлів без зниження якості зв'язку.

Безпроводові сенсорні мережі знаходять все більше застосування для моніторингу структурного стану мостів та інших транспортних споруд. Ці мережі можуть використовуватися для вимірювання різноманітних параметрів, таких як вібрація, деформація, навантаження та температура, які можуть свідчити про цілісність та безпеку конструкцій. Застосування технології MIMO в таких БСМ може значно підвищити надійність передачі даних від сенсорів, розташованих на різних елементах мосту, особливо в складних умовах експлуатації [10].

Наприклад, у роботі [11] представлено використання радарних систем MIMO для дистанційного моніторингу зміщення мостів з високою точністю. Ці системи використовують множинні антени для передачі та прийому радіохвиль, що дозволяє отримувати детальну інформацію про динамічну поведінку мостових конструкцій під впливом різних навантажень, таких як вітер, транспортні засоби та поїзди.

У дослідженні [12] описано застосування БСМ, що складається з 26 сенсорних вузлів, для безперервного сейсмічного моніторингу кабельного мосту в Японії. Мережа успішно зареєструвала структурні реакції на 63 землетруси протягом 45 місяців моніторингу, що свідчить про високу надійність та точність системи.

В одному з експериментів [13] була проведена інтеграція мобільної БСМ, встановленої на вантажівці, зі стаціонарною БСМ, розміщеною на мосту. Це дозволило одночасно вимірювати динамічну поведінку вантажівки та вібрації мосту, що надає цінну інформацію для оцінки взаємодії транспортних засобів та інфраструктури.

Безпроводові сенсорні мережі активно використовуються для моніторингу різноманітних параметрів трубопроводів, таких як температура, тиск, а також для виявлення витоків газу або рідини. Технологія MIMO може значно покращити дальність зв'язку та надійність передачі даних вздовж довгих трубопроводів, які часто пролягають у важкодоступних місцях або в складних умовах місцевості [4].

У ряді досліджень розглядаються переваги використання технології MIMO в багатоходових БСМ для моніторингу трубопроводів. Застосування технології MIMO в таких мережах може призвести до значного покращення продуктивності мережі, зокрема зменшення енергоспоживання, затримки передачі даних та підвищення стійкості мережі.

Наприклад, у роботі [13] описано використання магнітно-індукційних БСМ (MISE – PIPE) для виявлення та локалізації витоків у підземних трубопроводах. Технологія MIMO може бути використана для підвищення надійності зв'язку між сенсорними вузлами, розташованими під землею, та надземним центром моніторингу.

Також досліджується застосування технології віртуального MIMO для енергоефективного моніторингу трубопроводів [6]. У таких системах кілька одноантенних сенсорних вузлів співпрацюють для формування віртуальної багатоантенної системи, що дозволяє досягти переваг технології MIMO при одночасному зниженні енергоспоживання.

Системи віддаленого моніторингу трубопроводів з використанням БСМ можуть контролювати широкий спектр параметрів, включаючи температуру навколишнього середовища, відносну вологість, точку роси, концентрацію чадного газу, витoki зрідженого нафтового газу, рух людей поблизу трубопроводу, а також виявляти пожежі та задимлення [14]. Застосування технології MIMO в таких системах може забезпечити більш надійну та своєчасну передачу критично важливої інформації до центру управління.

Безпроводові сенсорні мережі знаходять застосування і для моніторингу стану енергетичних об'єктів, таких як електростанції, трансформаторні підстанції та інші критично важливі елементи енергетичної інфраструктури. Ці мережі можуть використовуватися для контролю температури обладнання, виявлення аномалій та несправностей, а також для оптимізації енергоспоживання.

Застосування Cooperative MIMO (C-MIMO) також досліджується для підвищення

енергоефективності в БСМ, що використовуються для моніторингу, наприклад, систем виявлення лісових пожеж поблизу енергетичних об'єктів. У таких випадках C-MIMO може забезпечити більш надійний зв'язок при одночасному зниженні енергоспоживання сенсорних вузлів.

У роботі [5] пропонуються енергоефективні протоколи кластеризації та керування потужністю для віртуального MIMO в багатоходових БСМ, що застосовуються для моніторингу. Ці протоколи спрямовані на оптимізацію використання енергії сенсорних вузлів шляхом розумного вибору вузлів-кооператорів та адаптації параметрів передачі даних.

Також пропонується схема CMIMO-SM (поєднання Cooperative MIMO та Spatial Modulation) для подальшого покращення енергоефективності в БСМ, що можуть використовуватися для моніторингу енергетичних об'єктів. Цей підхід використовує переваги обох технологій для досягнення високої енергоефективності та надійності передачі даних.

Майбутнє використання технології MIMO в безпроводових сенсорних мережах для моніторингу критичної інфраструктури, ймовірно, буде тісно пов'язане з інтеграцією цієї технології з іншими перспективними розробками [3].

Одним з ключових напрямків є інтеграція технології MIMO з технологіями Інтернету речей (IoT) для створення інтелектуальних систем моніторингу. IoT передбачає підключення великої кількості різноманітних пристроїв до мережі Інтернет, що дозволяє збирати, обмінюватися та аналізувати дані в реальному часі. Поєднання технології MIMO з IoT може забезпечити надійний та високошвидкісний зв'язок для великої кількості сенсорних пристроїв, що використовуються для моніторингу КІ.

Використання штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) також має великий потенціал для оптимізації роботи технології MIMO в БСМ [4]. Алгоритми AI/ML можуть бути використані для покращення оцінки стану каналу, оптимізації керування ресурсами мережі, виявлення аномалій у зібраних даних та прогнозування стану інфраструктури.

Застосування інтелектуальних відбивних поверхонь (Intelligent Reflecting Surfaces – IRSs) є ще однією перспективною технологією, яка може бути інтегрована з технологією MIMO для покращення якості сигналу та розширення зони покриття в складних радіочастотних середовищах [15]. IRSs являють собою поверхні, що

складаються з великої кількості пасивних відбиваючих елементів, якими можна керувати для перенаправлення радіохвиль.

Інтеграція з технологіями безпроводової передачі енергії (Wireless Power Transfer – WPT) може вирішити проблему автономного живлення сенсорних вузлів у БСМ, що особливо важливо для довготривалого моніторингу критичної інфраструктури у важкодоступних місцях.

Покращені характеристики та гнучкість, які забезпечують МІМО-базовані безпроводові сенсорні мережі, відкривають перспективи для їхнього застосування в нових сферах моніторингу критичної інфраструктури [10].

Одним з важливих напрямків є розширення застосування БСМ з підтримкою технології МІМО для моніторингу старіючої інфраструктури та прогнозування її стану. Це може допомогти своєчасно виявляти потенційні проблеми та проводити необхідне технічне обслуговування, запобігаючи аваріям та продовжуючи термін служби об'єктів.

Застосування технології МІМО в БСМ також є перспективним для моніторингу розумних міст (smart cities) та іншої міської інфраструктури [4]. Це може включати моніторинг транспортних потоків, стану будівель та споруд, систем водопостачання та енергопостачання, а також екологічного стану міського середовища.

Використання МІМО-базованих БСМ може бути корисним у системах раннього попередження про стихійні лиха, такі як зсуви ґрунту та повені. Мережі сенсорів, здатні надійно

передавати дані в складних умовах, можуть надати своєчасну інформацію для прийняття рішень щодо евакуації та запобігання людським жертвам.

Моніторинг екологічної інфраструктури, включаючи ліси та водні ресурси, також є сферою потенційного застосування технології МІМО в БСМ. Це може включати моніторинг якості води, стану лісових масивів, виявлення незаконної вирубки лісу та контроль за іншими екологічними параметрами.

Нарешті, застосування технології МІМО в БСМ є актуальним і в оборонній та безпековій сферах для моніторингу критично важливих об'єктів, таких як військові бази, стратегічні об'єкти енергетики та транспортної інфраструктури [1].

Висновки. Проведене дослідження показало значний потенціал використання технології МІМО в безпроводових сенсорних мережах для моніторингу критичної інфраструктури. Теоретичні основи технології МІМО, що включають просторове мультиплексування та просторове рознесення, забезпечують суттєве підвищення пропускної здатності та надійності зв'язку в БСМ. Це є ключовою перевагою для застосувань моніторингу КІ, де безперебійна та своєчасна передача даних має вирішальне значення. Аналіз переваг та проблем застосування технології МІМО в БСМ для КІ виявив, що, поряд з покращенням продуктивності та розширенням зони покриття, існують також певні обмеження, пов'язані з апаратними ресурсами сенсорних

Таблиця 1

Перспективи розвитку технологій Massive MIMO та інтеграції технології MIMO в БСМ для моніторингу критичної інфраструктури

Технологія / Напрямок	Опис	Переваги для БСМ
Massive MIMO	Використання сотень/тисяч антен на базових станціях	Збільшення пропускної здатності, висока надійність, обслуговування великої кількості сенсорів
Ultra Massive MIMO (UM-MIMO)	Ще більше антен, ніж у Massive MIMO	Подальше збільшення пропускної здатності, покращення якості обслуговування
Міліметрові хвилі (mmWave) + Massive MIMO	Використання широкої смуги частот для передачі даних	Надвисокі швидкості передачі, підтримка HD-відео і великих обсягів даних
Інтеграція з IoT	Підключення численних пристроїв до Інтернету	Реальний час моніторингу великої кількості сенсорних пристроїв
Використання AI/ML	Оптимізація роботи технології MIMO за допомогою машинного навчання	Краще керування мережею, виявлення аномалій, прогнозування стану КІ
Інтелектуальні відбивні поверхні (IRSs)	Поверхні з керованими пасивними елементами	Покращення якості сигналу, розширення зони покриття
Wireless Power Transfer (WPT)	Безпроводове живлення сенсорних вузлів	Забезпечення автономної роботи вузлів у важкодоступних місцях

вузлів, складністю обробки сигналів та енергоефективністю. Однак, розвиток Cooperative та Virtual MIMO пропонує ефективні шляхи для подолання цих проблем.

Дослідження застосування технології MIMO в БСМ для моніторингу різних видів КІ, таких як мости, трубопроводи та енергетичні об'єкти, продемонструвало практичну цінність цієї технології. Технологія MIMO забезпечує більш точні та надійні дані моніторингу, що є важливим для своєчасного виявлення потенційних проблем та запобігання аварійним ситуаціям.

Питання безпеки та енергоефективності MIMO-базованих БСМ для КІ потребують ретельного розгляду. Розробка енергоефективних протоколів безпеки та оптимізація енергоспоживання є важливими завданнями для забезпечення тривалої та надійної роботи систем моніторингу. Майбутні тенденції розвитку використання технології MIMO в БСМ для моніторингу КІ

пов'язані з технологіями Massive MIMO та Ultra Massive MIMO, інтеграцією з іншими перспективними технологіями, такими як IoT, AI/ML та IRS, а також розширенням застосування в нових сферах моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у визначенні потенційних переваг впровадження технології MIMO в БСМ для підвищення ефективності моніторингу КІ. Результати дослідження можуть бути корисними для інженерів та розробників систем моніторингу.

Перспективи подальших досліджень включають розробку нових енергоефективних та безпечних протоколів для технології MIMO в БСМ, дослідження можливостей використання новітніх технологій для подальшого покращення продуктивності та безпеки, а також проведення пілотних проектів та практичних впроваджень у різних сферах моніторингу критичної інфраструктури.

Список літератури:

1. Wireless Sensor Networks for Critical Infrastructure. URL: <https://surl.lu/nqwaim>
2. What is Massive MIMO Technology? How Does it Impact 5G? URL: <https://surl.li/gexbzh>
3. An Overview of MIMO Technology. URL: <https://surl.lu/uryzkm>
4. Recent Advances in Wireless Sensor Network Technology. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2753>
5. Adaptive Duty-Cycle Control in Wireless Sensor Networks. URL: <https://surl.lt/vymldr>
6. Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7033>
7. Wireless Sensor Networks. URL: <https://multitech.com/iot-wiki/wireless-sensors-network/>
8. Introduction to Wireless Sensor Networks. URL: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE521>
9. Recent Developments in Wireless Sensor Network Security. URL: <https://arxiv.org/pdf/2404.11388>
10. Application of WSN in Buildings. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/856>
11. Monitoring of Structures using WSN. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/7/2607>
12. Continuous Seismic Monitoring of Cable-Stayed Bridge. URL: <https://surl.li/fvcafl>
13. Remote Pipeline Monitoring Security System. URL: <https://surl.lu/akzapl>
14. Recent Developments in Wireless Sensor Networks. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6062>
15. Тимофеев С.М., Лисенко О.І. Strategies for Using MIMO Technology in Mobile Sensor Networks. Modern Trends in the Development of Information Systems and Telecommunication Technologies: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. 2023. С. 85–87.

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I. AN ANALYTICAL REVIEW OF APPROACHES TO THE APPLICATION OF MIMO TECHNOLOGY FOR MONITORING CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

This article discusses approaches to the application of MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology in wireless sensor networks (WSNs) to improve the efficiency of monitoring critical infrastructure facilities. The MIMO technology demonstrates high potential in providing stable and reliable communication, expanding the coverage area, increasing the throughput and energy efficiency of wireless systems, which makes it promising for use in the complex environment of critical infrastructure (CI). The article systematizes the principles of operation, configurations and types of implementation of MIMO technology (including Massive MIMO, Cooperative MIMO and Virtual MIMO), and also characterizes the architecture and features of the WSN.

In recent years, there has been a rapid introduction of wireless sensor networks in various sectors of the economy and infrastructure to monitor objects located over large geographical areas. Thanks to the development of WSNs, a new approach to building smart surveillance systems has been formed that allows

real-time acquisition, transmission and analysis of information about the state of the environment, engineering structures and technical systems. These technologies are particularly relevant in the context of ensuring the stability and security of critical infrastructure, including energy complexes, transportation systems, water supply facilities, telecommunications, and other vital elements of national and economic importance.

However, traditional methods of monitoring such facilities are often costly, difficult to scale, and unable to provide continuous real-time monitoring. Wireless sensor networks offer a flexible, scalable, and cost-effective solution. However, their effective operation in the face of increased requirements for reliability, throughput, power consumption, and data security remains a major challenge. In this context, MIMO technology, which allows for the parallel transmission of multiple data streams over multiple antennas simultaneously, providing high channel performance without increasing transmitter power or frequency bandwidth, is becoming a key technological solution.

Key words: MIMO, wireless sensor networks, critical infrastructure, monitoring, energy efficiency, data transmission security.