

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»

МЕТОД ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Стаття присвячена методу підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) шляхом інтеграції технології множинного входу-множинного виходу (МІМО) у підсистеми доступу та транспорту. Об'єкт дослідження – МБСМ з рухомими сенсорними вузлами й обмеженими радіоресурсами; предмет – методологія поєднання просторового мультиплексування, рознесення та формування променя з адаптивним керуванням мережевими параметрами. У публікації узагальнюються передумови застосування МІМО в МБСМ, формалізуються вимоги до моделей каналу та трафіку, визначаються вихідні параметри симуляцій (моделі завмирань, довжини пакетів, бітові швидкості, сценарії мобільності), а також описуються варіанти просторових конфігурацій (2×2 , 2×4 , 4×4 ; кооперативне/віртуальне МІМО для одноантенних вузлів).

Методична частина охоплює алгоритми оцінювання стану каналу (LS, MMSE, RLS/Калман), адаптивне кодування та перемикання режимів «мультиплексування $\leftrightarrow$ рознесення» залежно від SNR, рівня інтерференції та характеру мобільності. Додатково розглядаються механізми просторового розділення користувачів і рекомендації щодо налаштування протоколів доступу в умовах змінної щільності вузлів. Передбачено порівняльний імітаційний експеримент, що оцінює пропускну здатність маршрутів, наскрізну затримку, ймовірність пакетної помилки й ефективність енергоспоживання для різних топологій, а також вплив швидкості переміщення вузлів на якість сервісу в сценаріях квазімобільності.

Запропонована структура дослідження орієнтована на відтворюваність: усі кроки моделювання, вхідні дані та формат виходу планується подати у вигляді відкритих скриптів і графіків, що полегшує валідацію результатів. Практична цінність роботи полягає у можливості подальшого використання розроблених методик у прикладних інженерних системах – від промислового моніторингу, транспорту та «розумних міст» до охорони довкілля й підвищення стійкості критичної інфраструктури, а також як методологічної бази для побудови нових протоколів мобільних сенсорних мереж із підтримкою МІМО.

Ключові слова: МІМО, мобільні безпроводові сенсорні мережі, пропускна здатність, оптимізація трафіку, динамічне управління мережею, надійність зв'язку, просторове мультиплексування, критичні умови.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ), що застосовуються для моніторингу об'єктів у реальному часі, зокрема у сфері критичної інфраструктури, зумовлює необхідність підвищення їх пропускної здатності без погіршення енергоефективності та стабільності зв'язку. Ключовою технічною проблемою залишається обмежена пропускна здатність у динамічних умовах функціонування, особливо за наявності мобільних сенсорних вузлів. Це обмежує масштабованість мережі та негативно впливає на якість і своєчасність збору даних.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є впровадження технології МІМО, яка завдяки просторовому мультиплексуванню дозволяє підвищити пропускну здатність без залучення додаткового спектра або збільшення потужності передавання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективного застосування технології МІМО у мобільних безпроводових сенсорних мережах (МБСМ) активно висвітлюється в огля-

дових і прикладних роботах, де підкреслюються базові переваги просторового мультиплексування, рознесення, формування променя та попереднього кодування [3; 4; 5] для підвищення спектральної ефективності та якості зв'язку. З позиції багатокористувацького доступу наголошується на доцільності MU-MIMO і Massive-MIMO для одночасного обслуговування множини терміналів [6; 7; 8], що критично для навантажених сенсорних кластерів. Для сенсорних мереж із одноантенними вузлами активно досліджуються підходи Cooperative/Virtual MIMO, які формують «віртуальні» антенні решітки та дозволяють отримувати вигоди в ємності та надійності без апаратного ускладнення вузлів. Окремі роботи демонструють приріст пропускної здатності за рахунок адаптивних MIMO-схем (зокрема, SVD-базованих) [10] у WSN-сценаріях, а також розглядають перевантажені режими просторового мультиплексування та стійкість до варіацій антенного складу.

Разом з тим, низка джерел відзначає обмеження, важливі саме для МБСМ: додаткові енергетичні витрати на декілька радіотрактів і оцінку стану каналу [7; 8], що впливають на тривалість автономної роботи вузлів; накладні витрати та затримки, пов'язані з CSI-зворотним зв'язком [5] в умовах мобільності та швидкої зміни каналу; а також відсутність узгоджених міжрівневих (PHY-MAC-routing) політик [9; 12; 15], які б системно інтегрували можливості MIMO у механізми множинного доступу й маршрутизації сенсорних мереж. Практичні матеріали індустріальних розробників (довідники/white-papers) імітують типові вигоди SU/MU-MIMO та beamforming у Wi-Fi-подібних системах [4; 5; 8], але орієнтовані переважно на стаціонарні або помірно мобільні клієнти та не охоплюють повного стеку задач МБСМ. У вітчизняному контексті підкреслюється значущість динамічної топології й ролі інфраструктурних вузлів (ТАП) для підвищення пропускної здатності та керованості мережі; модернізація цих підходів шляхом MIMO-інтеграції виглядає логічним кроком еволюції.

Отже, попри добре опрацьовану теорію MIMO та наявні приклади її застосування у безпроводових системах загального призначення, залишається недостатньо деталізованою методологія інтеграції MIMO саме в архітектуру МБСМ з урахуванням мобільності вузлів, енергетичних обмежень, накладних витрат на CSI і вимог до QoS. Саме ця прогалина визначає актуальність подальшого дослідження, зосередженого на міжрівневій інтеграції (PHY-MAC-routing), параметризації

режимів «мультиплексування/рознесення» та відтвореному порівняльному моделюванні «без MIMO ↔ з MIMO» для типових навантажень і сценаріїв рухомості.

Метою статті є обґрунтування та формалізація методу застосування технології MIMO для підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) у динамічних умовах їх функціонування. Дослідження зосереджено на принципах конфігурації та архітектурних підходах до інтеграції MIMO у МБСМ, а також на аналізі впливу такої інтеграції на якість зв'язку, енергоефективність та стабільність передачі даних під час моніторингу об'єктів критичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. МБСМ – це множина мобільних сенсорних вузлів (МСВ), які самоорганізуються в багатоходові маршрути для збору та доставки даних у реальному часі. Типові сфери застосування: оперативний моніторинг об'єктів критичної інфраструктури (мости, трубопроводи, ЛЕП), реагування на надзвичайні ситуації, екологічний моніторинг та тимчасові тактичні мережі зв'язку. МСВ характеризуються обмеженим енергобюджетом, компактними антенами та невисокою обчислювальною потужністю; середовище поширення зазвичай багатопроменеве з істотними завмираннями та перешкодами.

Ключові показники якості: агрегована пропускна здатність і індивідуальна швидкість вузлів, наскрізна затримка та її варіабельність, імовірність пакетної помилки (PER), стабільність з'єднань (LLT), енергоефективність (біт/Дж) і справедливість доступу до ресурсу.

Виклики пропускної здатності в динамічних МБСМ:

- Багатопроменевість та зникання сигналу спричиняють флуктуації SNR, що підвищує PER і частоту повторних передач.

- Інтерференція у спільному ефірі робить роботу класичних MAC-протоколів (CSMA/CA тощо) менш ефективною зі зростанням навантаження; виникають ефекти «прихованих/відкритих» вузлів.

- Багатоходовість дробить ефірний час між ретрансляціями; вузли лімітують наскрізну швидкість.

- Мобільність призводить до частих перебудов маршрутів та доплерівських зсувів на швидких лінках, що збільшує службовий трафік і затримку.

- Периферійні вузли працюють на низькому SNR, що знижує мінімальні (нижні перцентилі)

швидкості й погіршує справедливість обслуговування.

– Енергетичні обмеження посилюють негативний вплив повторних передач і неефективних процедур доступу.

МІМО додає просторовий вимір до радіоканалу та забезпечує:

– просторову рознесеність (diversity): зменшення BER/PER за рахунок об'єднання незалежних копій сигналу (напр., MRC) [4; 5];

– просторове мультиплексування (SMX): передавання кількох потоків у тій самій смузі з теоретичним приростом $\min(N_t, N_r)$ потоків [1; 3; 5];

– формування променя/попереднє кодування: фокус енергії у бік адресата та пригнічення інтерференції, у т.ч. MU-MIMO для одночасного обслуговування кількох MCB [5; 6; 8].

У контексті МБСМ доцільно:

– використовувати 4×4 Massive MIMO на телекомунікаційних аероплатформах (ТАП) або шлюзах, де доступні більші енергетичні та апаратні ресурси;

– застосовувати 1×2 або 2×2 на MCB для рознесеності (покращення на краях покриття) або SMX за достатнього SNR;

– поєднувати МІМО-рішення з адаптивним керуванням ТАП і параметрами МАС/маршрутизації, щоб перетворювати виграші на рівні лінків у приріст наскрізної пропускної здатності, зменшення затримки та покращення справедливості.

На рисунку 1 зображено узагальнену схему інтеграції технології МІМО у мобільну безпроводову сенсорну мережу. Дані від мобільних сенсорних вузлів надходять на фізичний та каналний рівні, де динамічно обираються режими просторового мультиплексування, просторова рознесеність і формування променя. Далі трафік агрегується телекомунікаційною аероплатформою з багатоантенною конфігурацією, а система керування в ядрі мережі аналізує показники якості (пропускна здатність, затримка, ймовірність пакетної помилки) та формує керувальні дії для адаптації параметрів мережі. Стрілки показують потоки даних і зворотні сигнали керування, що забезпечують підвищення пропускної здатності та надійності в динамічних умовах.

Розглянемо математичні моделі для МБСМ з інтеграцією МІМО.

Ймовірність пакетної помилки для пакета довжини L біт:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L.$$

Для BPSK в каналі АБГШ: $BER_{AWGN} = Q(\sqrt{2\gamma})$, де γ – SNR. Для Релея без рознесеності (усереднення за завмираннями) відома оцінка:

$$BER_{Rayleigh} \approx \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}}\right).$$

За максимальною комбінованою рознесеністю порядку d (наприклад, $d = N_t N_r$ для МІМО з MRC) ефективний виграш за SNR можна подати як

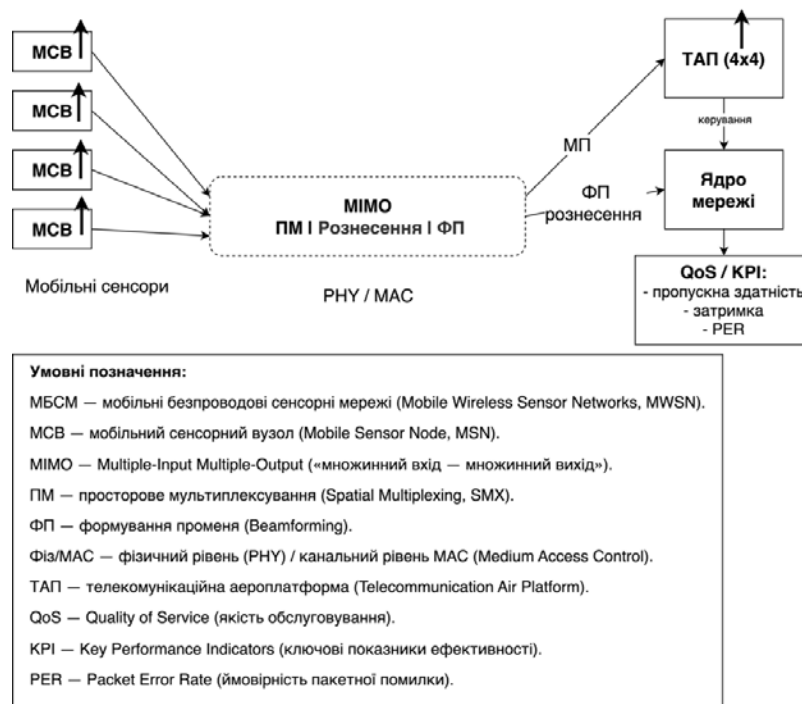


Рис. 1. Архітектура МБСМ із МІМО та ТАП

$$\gamma_{eff} = \gamma \cdot G_{div}, G_{div} \approx d,$$

а при формуванні променя – додатковий вигравш G_{bf} у децибелах (типово 3 – 6 дБ залежно від апертури та середовища). Тоді:

$$\gamma_{MIMO} = \gamma \cdot G_{div} \cdot 10^{\frac{G_{bf}}{10}}, PER_{MIMO} = 1 - (1 - BER(\gamma_{MIMO}))^L.$$

Моделюємо втрати на шляху:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \log_{10} \frac{d}{d_0}.$$

Гранична відстань d_{max} знаходиться зі співвідношення $SNR(d_{max}) = \gamma_{min}$ (потрібний мінімальний SNR для заданого PER). З урахуванням вигравшів MIMO отримаємо просту оцінку розширення радіуса:

$$d_{max}^{MIMO} = d_{max} \cdot 10^{\frac{G_{bf} + 10 \log_{10} G_{div}}{10\alpha}}$$

тобто приріст радіуса лінійно залежить від сумарного дБ-виграшу та обернено – від показника загасання α . Це напряду масштабує ефективний радіус стільника ТАП і радіус прямого з'єднання «вузол-вузол». Базові орієнтири для МБСМ без MIMO (польові/міські умови) – ~600 м для «вузол-вузол» і до ~3 км для «вузол-ТАП» за умов видимості; MIMO додає запас за рахунок $G_{div} + G_{bf}$.

За сталого радіуса покриття R та відносної швидкості v_{rel} середня тривалість з'єднання для траєкторії, що перетинає зону покриття, оцінюється як

$$LLT \approx \frac{\kappa R}{v_{rel}},$$

де $\kappa \in [1, 2]$ залежить від сценарію мобільності (для «випадкових напрямків» ближче до 1, для «блукання в полі» – вище). З урахуванням MIMO $R \rightarrow R_{MIMO}$, тож LLT зростає пропорційно до коефіцієнта розширення радіуса з попереднього підпункту [15].

Для SU-MIMO ємність каналу:

$$C = B \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right)$$

де H – матриця каналу, ρ – відношення сигнал/шум на вході приймача, B – смуга. Оцінка пропускної здатності для ідеалізованого MIMO-каналу:

$$C \approx B \sum_{i=1}^{\min(N_t, N_r)} \log_2 (1 + \rho \lambda_i).$$

а в «середній» формі:

$$C \approx B \cdot N_{str} \cdot \log_2 (1 + \gamma_{MIMO}), N_{str} \leq \min(N_t, N_r).$$

де N_{str} – кількість просторових потоків (мультиплексування). Для MU-MIMO формування вузьких променів одночасні передачі різним абонентам підвищують ефективність MAC-рівня:

$$C_{MAC} \approx \eta_{MAC} \cdot \sum_{u=1}^U C_u$$

де η_{MAC} – коефіцієнт корисного ефірного часу з урахуванням колізій/зворотних відліків,

U – число одночасно обслуговуваних користувачів. Пропускна здатність маршруту визначається «вузьким місцем»:

$$C_{path} = \min_{\ell \in \text{маршрут}} C_{\ell}$$

Завдяки просторовому розділенню та формуванню променя знижується взаємна інтерференція, отже, зростає η_{MAC} . У спрощеному вигляді:

$$\eta_{MAC}^{MIMO} \approx \eta_{MAC}^{SISO} \cdot \phi(\Delta I),$$

де $\phi(\cdot) > 1$ – зростаюча функція зменшення інтерференції ΔI через просторові ступені свободи (якісна модель для аналітичних оцінок і калібрування симулятора).

Для одного посилення з інтенсивністю надходження λ і середнім часом обслуговування $E[S]$ (включає передачу й можливі повтори) застосуємо M/G/1:

$$\rho = \lambda E[S], E[T] = E[S] + \frac{\lambda E[S^2]}{2(1 - \rho)}$$

Час обслуговування:

$$E[S] = \frac{L/B_{eff}}{1 - PER}, B_{eff} = \frac{C}{\chi},$$

де $\chi \geq 1$ відображає накладні витрати MAC/РНУ (преамбули, міжкадрові інтервали), C – ємність лінії. Сумарна наскрізна затримка маршруту – сума по лінках:

$$E[T_{e2e}] = \sum_{\ell \in \text{маршрут}} E[T]_{\ell} + T_{prop}.$$

MIMO впливає відразу на всі складові: збільшує C , зменшує PER, тим самим зменшуючи $E[S^2]$ і навантаження ρ . У результаті

$$E[T_{e2e}]_{MIMO} < E[T_{e2e}]_{SISO}$$

за однакових λ та маршрутизації, причому вигравш зростає зі збільшенням N_{str} і вигравшів G_{div}, G_{bf} .

Запропонований метод спрямований на підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж завдяки адаптивному використанню технології MIMO на фізичному та каналному рівнях із плавним перемиканням між просторовим мультиплексуванням і режимами підвищення надійності (просторова рознесеність / формування променя). У кожному контрольному інтервалі тривалості T_{ctrl} мережа, спираючись на оцінений стан каналу та стан черг, обирає кількість просторових потоків $N_s \leq \min(N_t, N_r)$ та режим: мультиплексування – коли канал має достатній ефективний ранг і забезпечує цільову якість; рознесеність/формування променя – коли спостерігається деградація через рух, завмирання чи кореляцію. Якість одиничного посилення описуємо через γ (SNR/SINR) з урахуванням великомасштабного загасання та дрібномасштабних флуктуацій. У децибелах:

$$SNR(d)_{dB} = P_{tx}^{dBm} - [PL(d_0) + 10 n \log_{10}(d/d_0)] - N_0 B + G_{MIMO}.$$

де n – показник загасання, $N_0 B$ – шум у смузі B , а G_{MIMO} – сумарний виграш за рахунок просторової обробки (орієнтовно $10 \log_{10} N_r$ дБ для MRC, $10 \log_{10} N_t$ дБ для MRT; при мультиплексуванні потужність ділиться між потоками). Миттєвий канал моделюємо матрицею $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$. Для SU-MIMO цільова ємність:

$$C = B \mathbb{E} \left[\log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right) \right],$$

а робоча оцінка через власні значення λ_i [1; 3] матриці $H H^H$ зводиться до

$$C \approx B \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 (1 + \rho \lambda_i) \approx N_s B \log_2 (1 + \gamma_{\text{per-stream}})$$

де $\gamma_{\text{per-stream}}$ – SNR одного просторового потоку. Для MU-MIMO на аероплатформі з лінійним передкодуванням (ZF/RZF) середня корисна пропускна здатність інтервалу:

$$C_{\text{MU}} \approx \eta_{\text{MAC}} B \sum_{u=1}^U \log_2 (1 + \text{SNR}_u).$$

де U – кількість одночасно обслуговуваних вузлів; $\eta_{\text{MAC}} \in (0,1)$ – коефіцієнт корисного ефірного часу з урахуванням накладних і колізій. Помилка на рівні бітів і пакетів пов'язана з SNR. Для BPSK в AWGN:

$$P_b = Q(\sqrt{2\gamma}), \text{PER} = 1 - (1 - P_b)^L \approx 1 - e^{-L P_b}$$

а для каналу Релея усереднений $\bar{P}_b = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}})$. Затримка визначається сумою часу обслуговування й очікування у черзі; для M/G/1:

$$\rho = \lambda \mathbb{E}[S], \mathbb{E}[T] = \mathbb{E}[S] + \frac{\lambda \mathbb{E}[S^2]}{2(1-\rho)}, \mathbb{E}[S] = \frac{\bar{C}_{\text{eff}}}{1 - \text{PER}}, C_{\text{eff}} = \frac{C}{\chi},$$

де $\chi \geq 1$ – накладні РНУ/MAC. Саме зв'язка « $C \uparrow \Rightarrow \text{PER} \downarrow \Rightarrow \mathbb{E}[S] \downarrow$ » забезпечує помітне зниження середньої наскрізної затримки.

Постановка експерименту – порівняння без методу підвищення пропускної здатності та з методом за однакових умов. Розглядається квадрат 1000×1000 м, $N \approx 150$ мобільних сенсорних вузлів, $A \approx 3$ телекомунікаційні аероплатформи; мобільність Random Waypoint/Random Direction зі швидкостями 1–5 м/с; час симуляції T_{sim} . Трафік вузла – пуассонівський (λ пакет/с), довжина пакета $L = 1024$ біт. Базові радіопараметри: P_{tx} вузлів/ТАП, шумова щільність N_0 , смуга B , дистанційні втрати $PL(d)$ із показником n . Без методу всі лінки SISO (1×1), параметри РНУ/MAC фіксовані (включно з χ , η_{MAC}) [3; 4].

З методом лінку вузол↔вузол та вузол↔ТАП можуть працювати як 2×2, 2×4 або 4×4; у кожному T_{ctrl} виконується вибір N_s і режиму. Рішення приймається за порогами: якщо ефективний ранг $r \geq 2$ і $\text{PER} \leq \text{PER}_{\text{ціль}}$, активуємо мультиплексу-

вання з $N_s = \min \{r, N_{s,\text{max}}\}$; інакше – формування променя (MRC/MRT). На ТАП одночасно обслуговується до U_{max} вузлів, що відбираються за пріоритетом $\pi_i = Q_i / \hat{E}[S_i]$ за умови $\text{SINR}_u \geq \text{SINR}_{\text{min}}$.

Проведено відтворюваний імітаційний експеримент на квадратній області 1000×1000 м з $N_{\text{вузлів}}$ мобільних сенсорних вузлів і $N_{\text{ТАП}}$ телекомунікаційних аероплатформ. Для кожного вузла призначається найближча ТАП; трафік вузлів – пуассонівський із інтенсивністю λ пакет/с, довжина пакета L біт. Радіоканал моделюється лог-дистанційними втратами з показником загасання n і дрібномасштабними замираннями Релея. Шумова потужність у смузі $B - N_0 B$. Для кожного лінка розраховується базовий SNR (у дБ), після чого в сценаріях із методом виконується адаптивний вибір режиму: просторове мультиплексування (до $N_s = \min(N_t, N_r)$ потоків) за умови достатнього SNR та ефективного рангу; або режим підвищення надійності (просторова рознесеність/формування променя) з еквівалентним виграшем $G_{\text{div/bf}}$ у дБ [5; 6; 8]. Миттєву ємність лінка оцінюємо наближенням Шеннона:

$$C = \eta_{\text{MAC}} B \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 (1 + \gamma_i)$$

де η_{MAC} – частка корисного ефірного часу, γ_i – SNR i -го просторового потоку з урахуванням поділу потужності при мультиплексуванні та/або виграшу рознесеності/променя. Ймовірність пакетної помилки для BPSK в AWGN апроксимуємо через BER $p_b \approx \frac{1}{2} e^{-\gamma}$ та $\text{PER} = 1 - (1 - p_b)^L$. Ефективна швидкість обслуговування μ (пакет/с) дорівнює C/L , з поправкою на $(1 - \text{PER})$. Середню наскрізну затримку оцінюємо M/M/1-наближенням $\mathbb{E}[T] \approx 1/(\mu_{\text{eff}} - \lambda)$ за $\rho = \frac{\lambda}{\mu_{\text{eff}}} < 1$; агрегований throughput – сумою успішно переданих бітів за одиницю часу. Середній час «життя» з'єднання (LLT) зв'язуємо з ефективним радіусом покриття:

$$R_{\text{MIMO}} \approx R_{\text{SISO}} \cdot 10^{G_{\text{MIMO}}/(10n)},$$

де G_{MIMO} – сумарний дБ-виграш режиму; тоді $\text{LLT} \propto R/v$.

Порівняльний імітаційний аналіз показав, що в умовах низького SNR (профіль low) адаптивний метод із використанням конфігурації 4×4 забезпечує збільшення середньої пропускної здатності приблизно у 14.8 разів відносно SISO (0.002061 проти 0.000139 Мбіт/с), при одночасному зменшенні наскрізної затримки на 37%, зниженні PER на 38.6% та збільшенні середнього часу існування з'єднання на 190%. У помірному каналі (mod) пропускна здатність для всіх конфігурацій є близькою до межі MAC і зростає незначно, проте саме

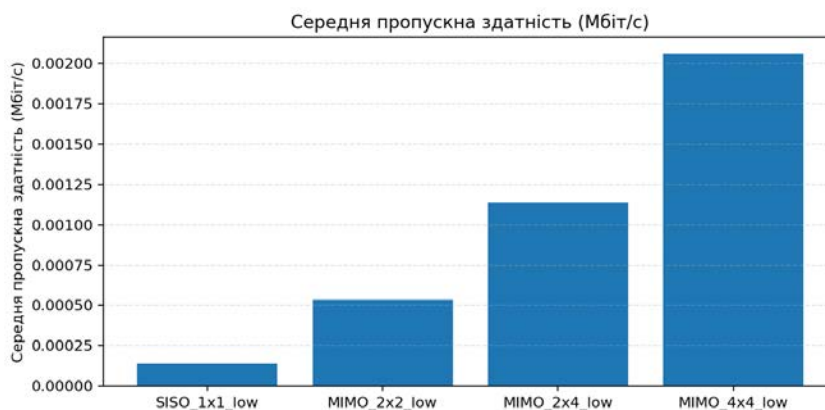


Рис. 2. Середня пропускна здатність мережі у профілі low

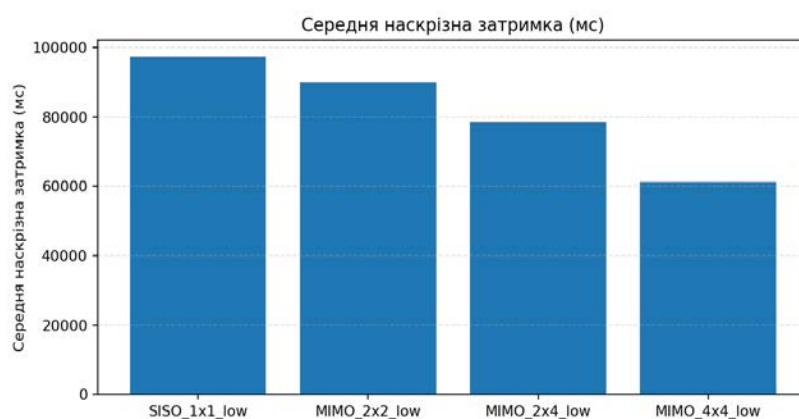


Рис. 3. Середня наскрізна затримка у профілі low

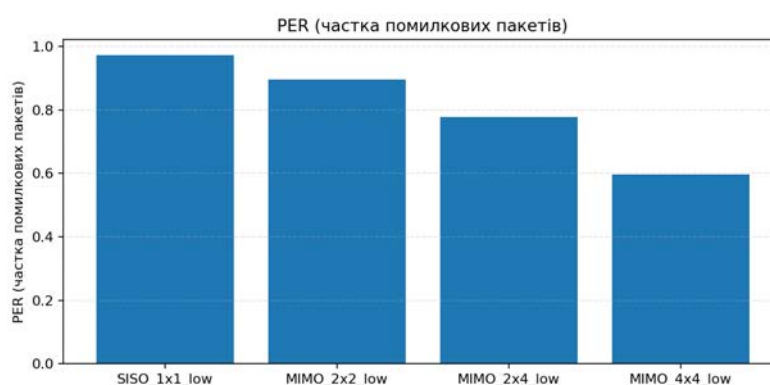


Рис. 4. Ймовірність пакетної помилки (PER) у профілі low

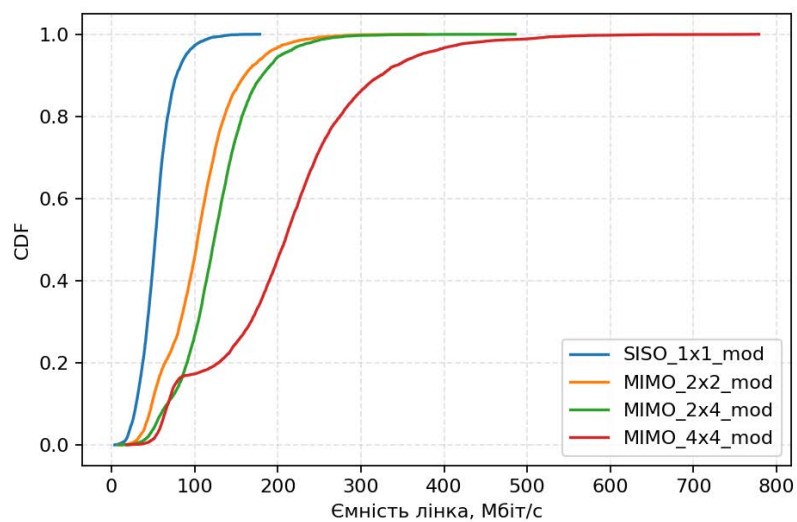


Рис. 5. Криві CDF ємності лінка у профілі low для SISO та конфігурацій MIMO

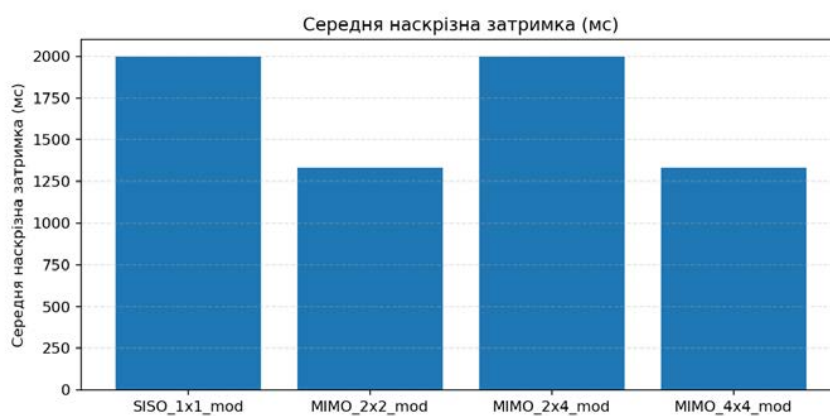


Рис. 6. Середня наскрізна затримка у профілі mod

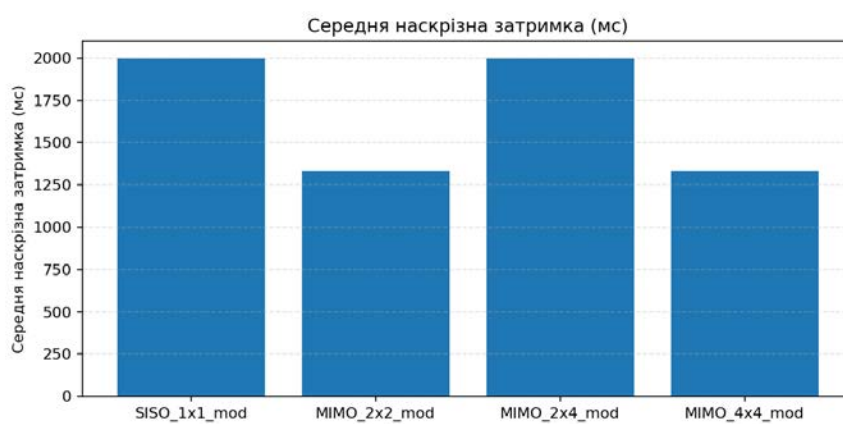


Рис. 7. Ймовірність пакетної помилки (PER) у профілі mod

за рахунок адаптивного вибору режиму (просторове мультиплексування або рознесеність/формування променя) досягається зменшення затримки на $\approx 33\%$ (2×2 та 4×4) і суттєве зниження PER (до -51.6% для 2×2), а також помітне збільшення LLT (до $+234\%$ для 4×4).

Висновки. Запропонований підхід інтегрує MIMO у МБСМ як адаптивний механізм на фізичному та каналному рівнях, що в кожному інтервалі керування обирає між просторовим мультиплексуванням і режимами підвищення надійності (рознесеність / формування променя) за критерієм очікуваного корисного *goodput* з урахуванням PER. Така постановка дає змогу переносити виграші на рівні лінки у мережеві показники QoS – зменшення затримок і втрат та підвищення стабільності з'єднань.

Імітаційні результати показали, що найбільший ефект досягається у складних радіоумовах, де адаптивний вибір режиму компенсує замирання та кореляцію каналів, а збільшення антенної конфігурації на ТАП істотно розширює область стійкого зв'язку. У помірних умовах, де система наближається до обмежень рівня доступу, метод переважно покращує надійність і затримку, зберігаючи пропускну здатність на рівні, визначеному MAC-навантаженням.

Доцільно застосовувати багатоканальні конфігурації MIMO на телекомунікаційних аероплатфор-

мах/шлюзах, а на сенсорних вузлах – легші варіанти з можливістю перемикання режимів [5; 6; 8]. Інтервал керування слід узгоджувати з часом когерентності каналу, а пороги за PER/SINR – з цільовими вимогами QoS. MU-MIMO на ТАП варто використовувати для паралельного обслуговування кількох вузлів, коли це не погіршує надійність.

Наукова новизна полягає у поєднанні: PER-орієнтованого вибору режиму (мультиплексування $\leftrightarrow$ рознесеність/формування променя) на рівні лінки; урахування MU-MIMO ефективності на ТАП для перетворення локальних виграшів у системні; зв'язування цих рішень із чергами на рівні мережі.

У моделюванні використано спрощені припущення щодо трафіку, ARQ і накладних витрат, а енергоспоживання оцінено опосередковано. Наступні кроки – включення детальної енергетичної моделі (біт/Дж), дослідження чутливості до похибок оцінювання каналу та швидкої мобільності, розширення на інші схеми модуляції/кодування й багатовантажності MAC, а також валідація на натурних/NS-3 експериментах.

У підсумку, метод є практично придатним для застосувань із жорсткими вимогами до надійності та оперативності (зокрема, моніторинг об'єктів критичної інфраструктури), оскільки забезпечує стійке покращення мережевих метрик без необхідності у додаткових частотних ресурсах.

Список літератури:

1. Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*. 1999. Vol. 10, No. 6. P. 585–595.
2. Foschini G. J. Layered space–time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*. 1996. Vol. 1, No. 2. P. 41–59.
3. Tse D., Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 564 p.
4. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 676 p.
5. Heath R. W., Lozano A. *Foundations of MIMO Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 464 p.
6. Marzetta T. L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2010. Vol. 9, No. 11. P. 3590–3600.
7. Rusek F., Persson D., Lau B. K. et al. Scaling up MIMO: The path to massive MIMO. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30, No. 1. P. 40–60.
8. Larsson E. G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T. L. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52, No. 2. P. 186–195.
9. Nguyen D. N., Krunz M. A Cooperative MIMO Framework for Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*. 2014. (preprint: University of Arizona). URL: https://wicon.arizona.edu/sites/default/files/2023-03/TOSN2014_diep.pdf
10. Channel capacity improvement for cooperative MIMO wireless sensor networks via adaptive MIMO-SVD. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/310808476_Channel_capacity_improvement_for_cooperative_MIMO_wireless_sensor_networks_via_adaptive_MIMO-SVD
11. Energy-Efficient Cooperative MIMO Formation for Underwater MI-Assisted Acoustic Wireless Sensor Networks. *MDPI (Remote Sensing)*. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/15/3641>

12. Performance Evaluation of Wireless Sensor Network Based on MIMO Relaying Channel Capacity. IEICE Transactions on Communications. 2009. Vol. E92-B, No. 12. P. 3166–3176.

13. Тимофєєв Є. М., Лисенко О. І. Аналітичний огляд підходів до застосування технології MIMO для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Одеса: Вид. дім «Гельветика», 2025. Т. 36 (75), № 3. (Прийнято до друку). URL: <http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive>

14. Тимофєєв Є. М., Лисенко О. І. Застосування технології MIMO для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних мереж. Матеріали XIX МНТК «Перспективи телекомунікацій» (ПТ-2025). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 308–311. ISSN 2663-502X (print), 2664-3057 (online).

15. Сушин І. О., Лисенко О. І., Тимофєєв Є. М. Математична модель підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії з телекомунікаційними аероплатформами дворівневого розташування. Матеріали XIX МНТК «Перспективи телекомунікацій» (ПТ-2025). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 66–69. ISSN 2663-502X (print), 2664-3057 (online).

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I. METHOD OF USING MIMO TECHNOLOGY TO INCREASE THE BANDWIDTH OF MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS

The article is devoted to a comprehensive method for significantly increasing the throughput and reliability of mobile wireless sensor networks (MWSNs) by integrating advanced multiple-input multiple-output (MIMO) technology into both the access and transport subsystems. The object of study is MWSNs with mobile sensor nodes that operate under strict energy and bandwidth constraints and limited radio resources; the subject is the methodology of combining spatial multiplexing, diversity techniques, and adaptive beamforming with flexible network parameter control. The publication summarizes the theoretical prerequisites for applying MIMO in MWSNs, formalizes the requirements for channel and traffic models, defines the initial simulation parameters (fading models, packet lengths, bit rates, node mobility scenarios, interference patterns), and presents possible spatial configurations (2×2, 2×4, 4×4, as well as cooperative or virtual MIMO for single-antenna nodes).

The methodological framework covers algorithms for accurate channel state estimation (Least Squares, Minimum Mean Square Error, Recursive Least Squares, and Kalman filtering), adaptive modulation and coding strategies, as well as dynamic switching between multiplexing and diversity transmission modes depending on SNR, interference level, and specific mobility characteristics of the nodes. In addition, mechanisms for spatial separation of simultaneous users and recommendations for configuring medium access protocols under conditions of variable node density are provided. A comparative simulation experiment is included to evaluate network performance in terms of end-to-end route throughput, average packet delay, packet error probability, and energy efficiency across different network topologies, while also analyzing the effect of node movement speed on service quality under quasi-mobility scenarios that are highly relevant for real-world deployments.

The proposed research structure emphasizes reproducibility and transparency: all modeling steps, simulation parameters, input datasets, and output formats will be presented in the form of open-source scripts, detailed instructions, and graphical results, which facilitates independent validation, peer review, and future extensions by other researchers. The practical value of the work lies in the possibility of applying the developed methodology in a wide spectrum of engineering domains – from industrial monitoring, intelligent transport systems, and smart city infrastructure to environmental protection, public safety, and the resilience of critical infrastructures. Moreover, the results can serve as a solid methodological foundation for designing next-generation protocols and architectures of mobile sensor networks with integrated MIMO support, ensuring scalability, adaptability, and long-term technological relevance.

Key words: MIMO, mobile wireless sensor networks, capacity, traffic optimization, dynamic network control, link reliability, spatial multiplexing, critical conditions.

Дата надходження статті: 28.08.2025

Дата прийняття статті: 12.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025