

Тимофєєв 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 В ЗАДАЧІ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Стаття присвячена підвищенню ефективності збору інформації в мобільних сенсорних мережах (МСМ) шляхом використання багатоантенної технології МІМО на фізичному та каналному рівнях. Особливу увагу приділено комплексній взаємодії протоколів, що забезпечують узгодженість між рівнями мережі. Пропонується крос-рівневий підхід, у якому режими МІМО (просторове рознесення, променеформування, просторове мультиплексування) узгоджуються з топологією мережі, мобільністю вузлів або мобільної аероплатформи збору даних, а також зі схемою доступу до середовища. Ідея полягає в адаптивному перемиканні між режимами залежно від поточних радіоканальних умов і мети управління: підвищення надійності приймання інформації, зменшення енерговитрат вузлів або скорочення часу збору інформації з вузлів МСМ.

Запропонований метод поєднує: методику оцінювання стану каналу з урахуванням мобільності та обмежених ресурсів; методику вибору МІМО-режиму за критеріями затримка–енергія–надійність і динамічний розподіл потоків (МІМО-адаптивне планування) із пріоритизацією вузлів у гірших радіоумовах; спосіб використання компактної схеми планування доступу, де параметри слотів і потужностей сенсорних вузлів узгоджені з миттєвою МІМО-пропускною здатністю, щоб уникати колізій і надлишкових ретрансляцій.

Методика оцінювання використовує аналітичний опис для побудови математичної моделі, яка пов'язує інформаційну швидкість МІМО з часом збору інформації та енергетичною моделлю вузлів, а також використовує імітаційні сценарії для моделювання різних типів розміщень вузлів МСМ, різних швидкостей їх руху та навантажень. Порівняння зі схемами без МІМО показує очікуване якісне покращення: скорочення часу збору завдяки просторовому паралелізму, підвищення стійкості до завмирань у динамічних каналах, зменшення енерговитрат через цілеспрямоване формування діаграм спрямованості та керування потужністю. Запропонований підхід не прив'язаний до конкретного протоколу маршрутизації й може бути інтегрований у наявні системи збору даних як надбудова, що надає керований баланс між швидкістю, надійністю та тривалістю життя мережі. Практична цінність полягає у придатності методу для моніторингу критичної інфраструктури та розгорнутих у польових умовах сенсорних систем із обмеженими енергетичними ресурсами та непостійною зв'язністю.

Ключові слова: мобільні сенсорні мережі, бездротові сенсорні мережі, МІМО, просторове рознесення, променеформування, просторове мультиплексування, кооперативне МІМО, планування доступу, енергоефективність, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Мобільні сенсорні мережі (МСМ) застосовуються для моніторингу об'єктів і середовищ, що характеризуються нестабільними каналами зв'язку та жорсткими енергетичними обмеженнями вузлів. Основна складність полягає у зборі даних у динамічних радіоканалах, що характеризуються завмираннями сигналу, доплерівськими зсувами частоти та нерівномірною геометрією вузлів.

Традиційні одноантенні схеми передавання даних і MAC-протоколи з колізійним доступом не забезпечують одночасно низьку затримку, високу надійність і енергоефективність у таких умовах, особливо коли мережа включає рухомі вузли або мобільну аероплатформу збору даних, призначену для періодичного опитування кластерів сенсорів. Унаслідок цього зростає рівень колізій і ретрансляцій, збільшуються енергетичні витрати під час

очікування доступу, а віддалені вузли систематично втрачають якість обслуговування.

Технологія МІМО є базовим механізмом керування просторовими ступенями свободи каналу: рознесення (підвищення надійності), променеформування (енергоефективність) і просторове мультиплексування (прискорення збору). Однак її безпосереднє впровадження в МСМ ускладнюють: обмежена апаратна складність і енергобюджет датчиків, вартість оцінювання стану каналу, мала тривалість когерентного інтервалу при мобільності, а також потреба в узгодженні РНУ-режимів із плануванням доступу та маршрутизацією. Більшість наявних підходів або розглядає МІМО ізольовано на фізичному рівні (без урахування МАС/мережевого планування), або переносить класичні мережеві алгоритми на МСМ без урахування просторової структури каналу.

Отже, постає науково-практичне завдання: розробити крос-рівневий метод збору даних у МСМ, що цілеспрямовано використовує МІМО:

1. Адаптивно обирає режим МІМО залежно від радіоканальних умов і цільових критеріїв – затримки, енергоспоживання й надійності.

2. Узгоджує РНУ-режими з МАС-плануванням, зменшуючи колізії, ретрансляції та енергетичні втрати на роботу в режимі очікування.

3. Враховує вартість прийому та передачі CSI та апаратні обмеження сенсорів, у т.ч. можливість кооперативного віртуального МІМО всередині кластера.

4. Підтримує надійність зв'язку в неоднорідних канальних умовах і масштабованість мережі при збільшенні кількості сенсорів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія МІМО у мобільних сенсорних мережах (МСМ) довела ефективність завдяки просторовому мультиплексуванню [1] та рознесенню сигналів (STBC) [2], що забезпечує підвищення пропускної здатності та надійності зв'язку. Для ресурсно-обмежених сенсорів перспективним є кооперативний (віртуальне) МІМО, коли група вузлів формує віртуальну антенну решітку без апаратного ускладнення окремих датчиків [4], [5], [9].

Основним обмеженням у мобільних сценаріях залишається вартість отримання та передавання CSI, яка зменшує ефективну пропускну здатність і підвищує енергоспоживання. Підходи з обмеженим зворотним зв'язком частково компенсують ці втрати [6].

У сучасних роботах із мобільними збирачами даних детально досліджено кластеризацію, траєкторії обміну й МАС-планування, однак інтеграція МІМО з МАС і рухомістю розглядається лише фрагментарно, що визначає актуальність цієї роботи.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування крос-рівневого методу

інтеграції технології МІМО для підвищення ефективності збору даних у мобільних сенсорних мережах за умов мобільності вузлів [7]. Запропонований підхід передбачає узгодження режимів МІМО з МАС-плануванням і траєкторним керуванням мобільним вузлом в умовах змінної топології та каналів зв'язку. У фокусі дослідження – оцінювання впливу інтеграції МІМО на ключові показники системи: час, затримку збору, ймовірність, надійність доставки, енергоспоживання сенсорів і масштабованість.

Виклад основного матеріалу.

1. Модель системи, розподіл часу і критерій ефективності збору даних

Розглядається мобільна сенсорна мережа (МСМ) із кластерною організацією, у якій мобільний вузол збору послідовно встановлює МІМО-зв'язок із опорними вузлами кластерів. Для кожного кластера c час контакту між мобільними вузлами збору інформації та кластером визначається як:

$$T_c = T_0^{(m)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}, T_0^{(m)} = T_p^{(m)} + T_b^{(m)} (+T_k),$$

де D_c – обсяг даних від кластера (біт), $m \in \{\text{рознесення, променеформування, мультиплексування}\}$ – обраний режим МІМО,

$R^{(m)}$ – ефективна швидкість у режимі m з урахуванням пропускної здатності РНУ та службових витрат.

Сумарний час збору для всієї мережі:

$$T_{\Sigma} = \sum_c T_c.$$

Мета оптимізації полягає у мінімізації сумарного часу збору T_{Σ} (або, еквівалентно, у максимізації ефективної швидкості обміну) за обмежень:

$$\begin{cases} P^{(m_c)} \geq p_0, \\ E^{(m_c)} \leq E_{\max}, \end{cases}$$

обмеження на траєкторію MB3

$P^{(m_c)}$ – ймовірність успішної доставки даних у кластері c , що враховує кодування, ARQ і порядок рознесення;

$E^{(m_c)}$ – енергетичні витрати сенсорів на передавання, приймання та очікування в режимі m_c .

2. Аналітичні моделі каналу та ефективної швидкості для режимів МІМО

Канал між передавальною та приймальною антенними решітками подамо через сингулярне розкладання (SVD):

$$H = U \Sigma V^H, \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r), r = \text{rank}(H).$$

Для заданої смуги частот W і відношення сигнал/шум ρ ідеальна пропускна здатність при просторовому мультиплексуванні визначається як: $C^{(m)} = W \sum_{i=1}^r \log_2(1 + |\rho_i| \sigma_i^2)$, $\sum_{i=1}^r \rho_i = \rho$, що задає верхню межу ефективної швидкості $R^{(m)}$ [1, 3]. За обмеженого зворот-

ного зв'язку виникають втрати від квантування; для ZF-передкодування (у MU/SU-MIMO схемах) відомо, що середня похибка напрямку $\mathbb{E}[\sin^2\theta] \approx 2^{-n-1}$, а зменшення пропускної здатності обмежується $C \lesssim \log_2(1 + \rho 2^{-n-1})$, де B – біти на індексацію вектора [6], що безпосередньо визначає тривалість зворотного зв'язку $T_b^{(m)}$ та зменшує ефективну швидкість $R^{(m)}$ [8].

2.1. Режим рознесення (STBC/кодове рознесення)

Для ортогональних STBC порядок рознесення дорівнює:

$$d = n_r n_t.$$

При високих рівнях сигнал/шум SNR і загасаннях сигналу середня ймовірність помилки символу або біта SER/BER зменшується за законом: $P_e^{(m)} \approx K \cdot \text{SNR}^{-d}$, де коефіцієнт K залежить від типів модуляції та коду [2]. Очікувана кількість передач для пакета довжиною L при використанні ARQ:

$E[N_t] = \frac{L}{1 - P_e^{(m)}}$, $T_d^{(m)} = \frac{L}{R_p} E[N_t]$. Таким чином, застосування рознесення підвищує надійність каналу та безпосередньо зменшує середній час і енергоспоживання, пов'язані з ретрансляціями, особливо у динамічних каналах.

2.2. Кооперативне віртуальне MIMO у кластері

Якщо сенсорні вузли мають лише одну антену, група з k вузлів може об'єднуватися для формування віртуальної антенної решітки. У режимі дальньої зони та за умови узгодження фаз середній вигравш антенної решітки оцінюється як:

$G_a(k) \approx k \cdot \|h_c\|^2 \approx k E[\#h^{\#}]$, що еквівалентно збільшенню ефективної потужності сигналу в k разів. Це дозволяє зменшити необхідну потужність передавання та, відповідно, енергоспоживання кожного вузла приблизно до:

$$E_t^{(c)} \approx \frac{E_t}{k},$$

з урахуванням додаткових накладних витрат на синхронізацію та координацію між вузлами, що описуються коефіцієнтом α_s [4], [5], [9].

Умову доцільності кооперації можна подати у вигляді:

$$E_t^{(s)} > \frac{E_t^{(c)}}{k} + E_s(k),$$

де $E_t^{(s)}$ – енергія передавання без кооперації, $E_t^{(c)}$ – енергія передавання при кооперації, $E_s(k)$ – енергія синхронізації k вузлів.

Ця умова визначає оптимальний розмір кооперативної групи k^* на рівні кластера.

3. Запропонований метод: зв'язування РНУ-режиму, MAC-планування та руху мобільного вузла

Етап 1. Оцінювання каналу та обмежений зворотний зв'язок CSI. На початку контакту між кластером і мобільним вузлом збору виконується оцінювання стану каналу з мінімальною тривалістю опорних сигналів $T_p^{(m)}$ та обмежений зворотний зв'язок,

у якому передається B бітів на вектор каналу. Згідно з [6], [8], кількість бітів B визначається так, щоб втрати пропускної здатності C (див. вище) не перевищували допустимий поріг C_{\max} .

Етап 2. Вибір режиму m^* на контактний інтервал. Для кожного з трьох можливих режимів MIMO обчислюються:

$$\hat{T}_c^{(m)} = T_o^{(m)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}, \hat{E}_n^{(m)}, \hat{P}_s^{(m)},$$

де $T_o^{(m)}$ – службовий час (пілоти, зворотний зв'язок тощо),

$R^{(m)}$ – ефективна швидкість у режимі m ,

$\hat{E}_n^{(m)}$ – енергія вузла,

$\hat{P}_s^{(m)}$ – ймовірність успішної передачі.

Обирається режим, який мінімізує $\hat{T}_c^{(m)}$ за умови виконання енергетичного обмеження $\hat{E}_n^{(m)} \leq E_{\max}$.

Для сценаріїв із пріоритетом часу зазвичай переважає мультиплексування, для енергообмежених вузлів – променеформування, а для випадків із жорсткими вимогами до надійності – рознесення [3].

Етап 3. MAC-планування та кооперація.

Планувальник формує слотовану сесію обміну:

$$[\text{pilot} \rightarrow \text{feedback} \rightarrow \text{data}(m^*) (\rightarrow \text{coop})],$$

де кооперативне MIMO активується лише якщо виконується умова:

$$\hat{T}_c^{(c)} < \hat{T}_c^{(m^*)} \text{ або } \hat{E}_n^{(c)} < \hat{E}_n^{(m^*)},$$

з урахуванням витрат на синхронізацію $E_s(k)$ та часу кооперації $T_c^{(s)}$ [4], [5], [9].

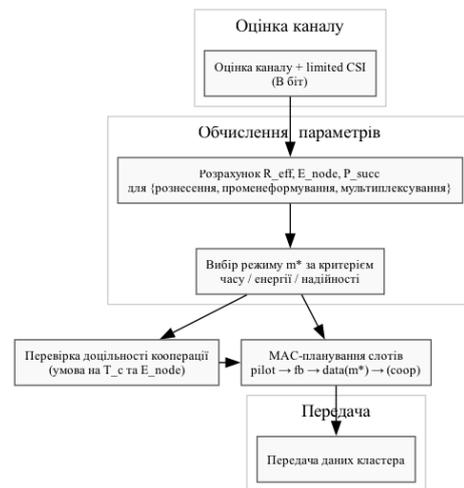


Рис. 1. Блок-схема запропонованого методу адаптивного вибору режиму MIMO

4. Критерії ефективності та метрики продуктивності MCM

4.1. Час збору даних (затримка)

Ефективна швидкість передавання у кластері для обраного режиму MIMO m розраховується як:

$$R^{(m)} = \eta_M \cdot \eta_O^{(m)} \cdot C^{(m)}(H, \rho), \eta_O^{(m)} = \frac{T_d^{(m)}}{T_p^{(m)} + T_f^{(m)} + T_d^{(m)} + T_c^{(s)}}$$

де $C^{(m)}$ – пропускна здатність РНУ для режиму m (для мультиплексування $C = \log_2 \det(I_n + \frac{\rho}{n_i} HH^H)$) [1], [3], [11]. $\eta_M \in (0,1)$ відображає ефективність МАС (агрегація, слотування, усунення колізій); $\eta_O^{(m)}$ – втрати на опорні сигнали, зворотній зв'язок та кооперацію.

Час контакту між мобільним вузлом збору та кластером c визначається як:

$$T_c^{(m)} = T_p^{(m)} + T_f^{(m)} + T_c^{(s)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}, T_\xi = \sum_c T_c^{(m)}$$

Для мобільного вузла збору, що рухається зі швидкістю v і має радіус ефективного покриття R_{cov} , умова контакту обмежується:

$$T_c^{(m)} \leq \frac{2R_k}{v},$$

що пов'язує вибір режиму МІМО та параметри МАС-планування з геометрією траєкторії мобільного вузла збору інформації.

Для оцінки вирашу за часом у кластері вводиться показник:

$$G_T(c) = \frac{T_c^{(s)}}{T_c^{(m)}} = \frac{T_o^{(s)} + \frac{D_c}{R^{(s)}}}{T_o^{(m)} + \frac{D_c}{R^{(m)}}} < 1,$$

який характеризує прискорення збору даних у кластері при переході від SISO до оптимального режиму m^* .

4.2. Енергія сенсорних вузлів

Використаємо поширену радіоенергетичну модель бездротової сенсорної мережі з урахуванням режиму МІМО:

$$\begin{cases} E_t^{(m)}(L, d) = LE_e + L\varepsilon_a^{(m)}d^\alpha, \\ E_r(L) = LE_e, \\ E_i(T) = PT, \end{cases}$$

де L – обсяг переданих даних (у бітах), d – ефективна відстань до мобільного вузла або координатора,

$\alpha \in [2,4]$ – показник втрат на поширення.

Параметр $\varepsilon_a^{(m)}$ характеризує ефективність передавального підсилювача і залежить від режиму МІМО. Для променеформування та кооперативного МІМО цей параметр зменшується завдяки вирашу антенного масиву:

$$\varepsilon_a^{(b)} \propto \frac{1}{\|Hw\|^2}, \varepsilon_a^{(c,k)} \propto \frac{1}{G_a(k)} \approx \frac{1}{k},$$

за умови узгоджених фаз у дальній зоні [3], [4], [5].

Енергоспоживання сенсорного вузла під час передавання пакета з урахуванням можливих

ретрансляцій (для режиму рознесення) визначається як:

$$E_n^{(m)} \approx E_t^{(m)}(L, d) \cdot E[N_t^{(m)}] + E_r(L) + E_i(T_w),$$

де

$$E[N_t^{(s)}] = \frac{1}{1 - P_e^{(s)}}, P_e^{(s)} \approx K \cdot \text{SNR}^{-n_r} [2], [11].$$

5. Імітаційне середовище та сценарії

Топологія. Розглядається площинна мережа, що складається з кількох кластерів. У кожному кластері розміщено K одноантених сенсорних вузлів, один із яких виконує функції координатора. Мобільний вузол збору рухається прямолінійною траєкторією зі сталою швидкістю v , послідовно встановлюючи з'єднання з кластерами в зоні покриття.

Канал зв'язку. Втрати сигналу описуються законом $d^{-\alpha}$ з тінювим ефектом логнормального розподілу та дрібномасштабним завмиранням Релея.

РНУ/МАС рівні.

– **Базовий сценарій:** SISO-система з DCF-подібним протоколом доступу (802.11), що враховує колізії. Опорні сигнали та зворотний зв'язок мінімальні, кооперація не використовується.

– **Запропонований метод:** адаптивний вибір режиму МІМО m^* із множини можливих варіантів: рознесення, променеформування або просторове мультиплексування, слотоване МАС-планування (PCF/TDMA-подібне) протягом часу контакту між мобільним вузлом і кластером. Опційно активується кооперативне МІМО у кластері [13].

Параметри:

$$n_t \in \{2, 4\}, n_r \in \{2, 4\}, \alpha \in [2, 3.5], v \in [5, 20] \text{ м/с},$$

$$R_k \in [80, 200] \text{ м}, K \in [10, 40], D_c \in [0.5, 5] \text{ Мбіт}, B \in \{0, 8, 16\} \text{ біт/вектор}.$$

де T_h обчислюється за моделлю Джейкса–Кларка відповідно до доплерівського зсуву [3], [6].

Енергетична модель:

$$E_e \approx 50 \text{ нДж/біт}, P_i \in [20, 40] \text{ мВт},$$

а параметр ε_a калібрується з урахуванням посилення антенного масиву $G_a(k)$ [13].

Основні порівнювані показники:

- вираш за часом у кластері $G_T(c)$;
- зменшення середньої енергії вузла E_n ;
- частка контактів без перевищення порогу відмов ($P_{\text{out}} \leq \varepsilon$);
- кількість кластерів, обслугованих за один прохід мобільного вузла (масштабованість системи):

$$N_s = \left| \frac{T_r}{E[T_c^{(m^*)}]} \right| \text{ vs. } \left| \frac{T_r}{E[T_c^{(s)}]} \right|.$$

Такий підхід дозволяє оцінити не лише середні виграші за швидкістю та енергоефективністю, а й масштабованість мережі – кількість кластерів, які мобільний вузол здатен обслуговувати за один цикл руху.

6. Імітаційний експеримент

6.1. Ключові параметри моделювання

Мета експерименту – оцінити, наскільки запропонований метод адаптивного застосування технології MIMO підвищує ефективність збору даних у мобільній сенсорній мережі (MCM) за умов рухомості вузлів та обмеженого обсягу CSI. Для аналізу розглянуто три конфігурації:

- **Сценарій А:** SISO + DCF;
- **Сценарій В:** SISO + TDMA;
- **Сценарій С:** MIMO + TDMA;

Параметри сценарію моделювання:

– **Смуга частот:** $W = 10 \text{ МГц}$; шумова густина – N_0 ; номінальна потужність передавача – $P_x \approx 50 \text{ мВт}$.

– **Конфігурації MIMO:** $n_t, n_r \in \{2, 4\}$.

– **Канал:** затухання сигналу описується законом $r^{-\alpha}$, де $\alpha \in [2.2, 2.7]$; логнормальне затінення з дисперсією $\sigma = 4\text{-}6 \text{ дБ}$; рухомість моделюється через доплерівський зсув $f_d = v/\lambda$ та когерентний інтервал

$$T_h \approx 0.423 / f_d.$$

Частка опорних сигналів і зворотного зв'язку обмежена значенням $0.2T_h$.

– **CSI та зворотний зв'язок:** використовується кодова книга з розрядністю $B \in \{0, 8, 16, 24\}$; оптимальне B^* вибирається за мінімумом критерію J .

– **Трафік:** обсяг даних на один контакт – $D_c \in [2, 8] \text{ Мбіт}$;

– розмір кластера $K \in [12, 42]$;

– відстань до мобільного вузла збору $r \in [0, R_k]$,

де $R_k = 180 \text{ м}$.

– **Параметри MAC-рівня:**

– ефективність DCF із колізіями $\eta_D(K)$;

– ефективність слотованого доступу $\eta_T = 0.92$;

– керуючі накладні на один контакт $T_c^{(a)} = 20 \text{ мс}$.

– **Енергетична модель:** енергія електроніки $E_c = 50 \text{ нДж/біт}$; потужність у режимі очікування $P_i = 30 \text{ мВт}$.

– **Кооперація:** до $k \leq 4$ вузлів у кластері; час фазової синхронізації $T_s = k \cdot 2 \text{ мс}$; кооперація активується вибірково за критерієм енергетичної доцільності.

– **Обсяг моделювання:** 8 кластерів, по 60 статистичних реалізацій кожний.

6.2. Імітаційне моделювання

Сценарій А (базовий). Використовується конфігурація SISO + DCF, яка враховує колізії та механізм. Обчислюються ефективна швидкість передавання, час контакту T_A та енергія на вузол E_A .

Сценарій В (слотований SISO). Передавання даних здійснюється у слотованому режимі SISO + TDMA без MIMO-кооперації. Для цього випадку визначаються час контакту T_B та енергія вузла E_B .

Сценарій С (запропонований метод). Розглядаються режими STBC, променеформування із розрядністю кодової книги B^* та MUX (просторове мультиплексування) також із B^* . За потреби активується кооперативне променеформування, у якому враховується час фазової синхронізації T_s . Серед усіх кандидатів обирається режим, який мінімізує комбінований критерій

$$J = T + \lambda_E E,$$

за умови відсутності відмов зв'язку ($P_{\text{out}} \leq \varepsilon$). Для вибраного режиму фіксуються значення часу контакту T_C , енергії на вузол E_C та тип обраного MIMO-режиму.

6.3. Результати та інтерпретація

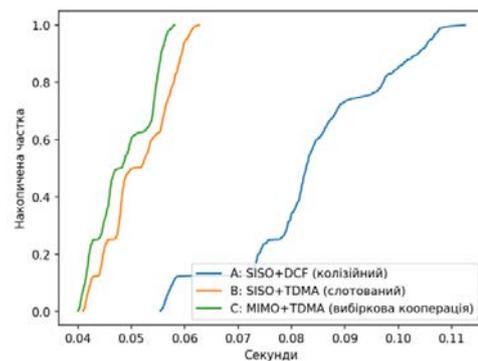


Рис. 2. Функція розподілу часу контакту між мобільними вузлами та сенсорними кластерами

З наведених графіків видно, що крива С розташована ліворуч від В та помітно ліворуч від А, що свідчить про скорочення часу завершення передачі пакетів даних під час використання запропонованого методу MIMO-TDMA у порівнянні зі схемами TDMA без MIMO та SISO+DCF. Перехід А → В відповідає зміні механізму доступу від колізійного протоколу DCF до детермінованого TDMA, що усуває втрати, спричинені колізіями, і зменшує середній час завершення передачі. Подальший перехід В → С демонструє додаткове скорочення затримки завдяки використанню просторових ступенів свободи технології MIMO – рознесення, променеформування або просторового мультиплексування – з урахуванням накладних витрат на оцінювання каналу та зворотний зв'язок CSI.

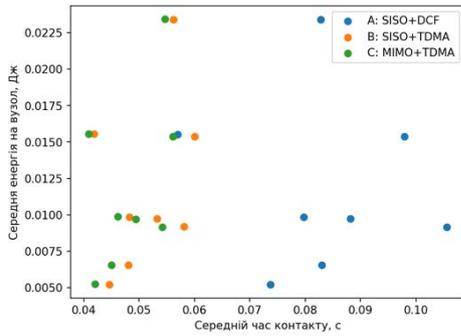


Рис. 3. Парето-діаграма для різних конфігурацій мережі збору даних

З рис. 3 видно, що точки сценарію С (зелений набір) розташовані нижче та лівіше точок В (помаранчевий) і А (синій). Це свідчить про те, що запропонований метод МІМО забезпечує менший середній час контакту за порівнянню або нижчого рівня енергоспоживання вузлів. У випадках коротких повідомлень або високого миттєвого відношення сигнал/шум (SNR) енергетичний вигравш зменшується, оскільки накладні витрати на опорні сигнали та зворотний зв'язок частково компенсують приріст ефективності. Цей ефект враховано механізмом вибіркового вмикання кооперації, що мінімізує зайві службові витрати.

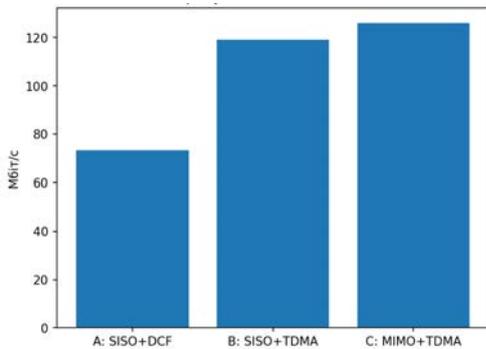


Рис. 4. Пропускна здатність системи при використанні SISO та MIMO у слотованому доступі

Як видно з рис. 4, пропускна здатність у сценарії В перевищує показники А, що відповідає переходу від колізійного до слотованого доступу. Сценарій С демонструє стійкий додатковий приріст пропускної здатності порівняно з В завдяки адаптивному вибору режиму МІМО та кооперації між вузлами.

Як видно з рис. 6, максимальний вигравш за часом досягається для більших кластерів і віддалених вузлів. У цих умовах вибіркового кооперативний променеформувальний режим (BF) активується частіше, що забезпечує помітне скорочення часу передачі. У ближній зоні, навпаки, система переважно обирає променеформування або STBC без кооперації, уникаючи надлишкових витрат на синхронізацію.

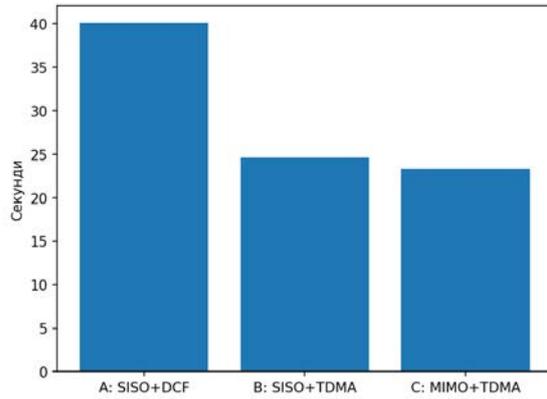


Рис. 5. Тривалість обслуговування всіх кластерів при одноразовому обході збирачем

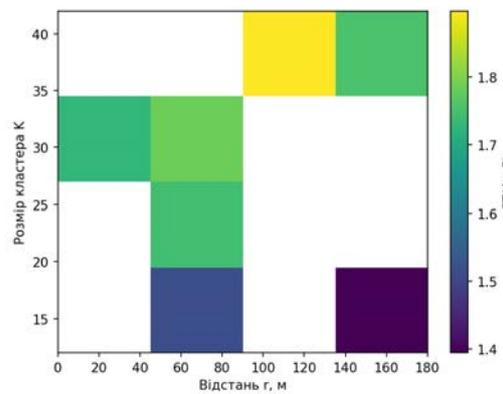


Рис. 6. Середній вигравш за часом $GT(A \rightarrow C)$ залежно від розміру кластера та відстані до збирача

Таблиця 1

Порівняльні показники ефективності для сценаріїв А, В, С

Показник	Значення
Середній час контакту А, с	0.0835
Середній час контакту В, с	0.0513
Середній час контакту С, с	0.0485
Середня енергія на вузол А, Дж	0.011849
Середня енергія на вузол В, Дж	0.011855
Середня енергія на вузол С, Дж	0.011863
Вигравш за часом $GT(A \rightarrow C)$	1.714
Вигравш за енергією $GE(A \rightarrow C)$	0.999
Пропускна здатність системи А, Мбіт/с	73.216
Пропускна здатність системи В, Мбіт/с	119.125
Пропускна здатність системи С, Мбіт/с	125.921
Енергія на біт А, нДж/біт	1.938
Енергія на біт В, нДж/біт	1.939
Енергія на біт С, нДж/біт	1.941
Час обслуговування всіх кластерів А, с	40.0
Час обслуговування всіх кластерів В, с	24.0
Час обслуговування всіх кластерів С, с	23.0

Інтерпретація результатів. Згідно з табл. 1, перехід від DCF (А) до слотованого TDMA (В) забезпе-

чує скорочення середнього часу контакту приблизно на 40%, що відповідає ліквідації колізій і втрат на повторні передавання. Запропонований метод (C) дає додаткове зменшення часу ще на 5–7% і збільшує пропускну здатність системи до 125.9 Мбіт/с, зберігаючи при цьому практично незмінне енергоспоживання вузлів. Це свідчить про те, що адаптивний вибір режиму МІМО дозволяє підвищити ефективність системи без зростання енергетичних витрат.

Висновки. Інтеграція технології МІМО у процес збору даних МСМ із слотованим доступом і вибірковою кооперацією забезпечує істотне прискорення збору без помітного збільшення енерговитрат [7]. За результатами моделювання, середній час контакту зменшився з 0.0835 с (SISO+DCF) до 0.0485 с (MIMO+TDMA), що відповідає інтегральному виграшу за часом

$$GT(A \rightarrow C) = 1.7134.$$

Продуктивність системи також істотно зростає: пропускну здатність системи підвищилася з 73.216 до 125.921 Мбіт/с (понад +70% відносно колізійного доступу та приблизно +6% понад SISO+TDMA). Сумарний час обслуговування всіх кластерів скоротився з 40 с до 23 с ($\approx -42.5\%$).

Енергоефективність залишилася на рівні базових конфігурацій: середня енергія на вузол становить близько 0.01185 Дж, а енергія на біт – ≈ 1.94 нДж/біт. Відносний показник:

$$G_E(A \rightarrow C) = 0.999$$

свідчить про відсутність енергетичних втрат при досягненні часових і пропускнух виграшів.

Відносний ефект зростає зі збільшенням відстані до збирача та розміру кластера, коли режими рознесення й променеформування, а за потреби – вибіркова кооперація, ефективніше компенсують завмирання та втрати потужності на шляху. У ближчій зоні система переважно обирає простіші просторові режими, уникаючи надмірних накладних витрат на CSI та синхронізацію.

Отримані результати підтверджують практичну придатність запропонованого методу для МСМ із жорсткими вимогами до оперативності та надійності, зокрема в задачах моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, технічного та екологічного спостереження. Метод забезпечує зменшення часу збору даних і збільшення пропускну здатності системи без зростання енергоспоживання вузлів.

Список літератури:

1. Telatar E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *European Transactions on Telecommunications*. 1999. vol. 10. no. 6. pp. 585–595.
2. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*. 1998. vol. 16, no. 8. pp. 1451–1458.
3. Heath R. W., Lozano A. Foundations of MIMO Communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 432 p.
4. Jayaweera S. K. Virtual MIMO-Based Cooperative Communication for Energy-Constrained Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2006.
5. Islam M. R., Sheikh M. U., et al. Cooperative MIMO Communication at Wireless Sensor Network: An Overview. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2012. Article ID 341.
6. Jindal N. MIMO Broadcast Channels with Finite-Rate Feedback. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. vol. 52. no. 11. pp. 5045–5060.
7. Тимофеев Є.М., Лисенко О.І. Метод застосування технології МІМО для підвищення пропускну здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*, серія “Технічні науки”. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», Том 36 (75) № 4. 2025.
8. Love D. J., Heath R. W., Lau V. K. N., Gesbert D., Rao B. D., Andrews M. An Overview of Limited Feedback in Wireless Communication Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2008. vol. 26. no. 8. pp. 1341–1365.
9. Tymofeiev Y., Lysenko O., Yavisya V., Novikov V. Enhancing the performance of mobile sensor networks through cooperative MIMO. Mechanisms of Development... XL Int. Sci. And pract. Conf. (Sept. 25-27 2024, Salzburg, Austria). – Salzburg : ISU, 2024. pp. 77–79.
10. IEEE Std 802.11-2016. Wireless LAN MAC/PHY Specifications. Consolidated edition with MIMO support.
11. Hassibi B., Hochwald B. M. How Much Training is Needed in Multiple-Antenna Wireless Links? *IEEE Transactions on Information Theory*. 2003. vol. 49. no. 4. pp. 951–963.
12. Heinzelman W. B., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2000.
13. Shah R. C., Roy S., Jain S., Brunette W. Data MULEs: Modeling a Three-Tier Architecture for Sparse Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*. 2003. vol. 1, no. 2–3, pp. 215–233.

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I. METHOD FOR APPLYING MIMO TECHNOLOGY TO THE PROBLEM OF INFORMATION COLLECTION IN MOBILE SENSOR NETWORKS

The article is devoted to improving the efficiency of information collection in MSNs through the use of multi-antenna MIMO technology at the physical and data link layers. Particular attention is given to the comprehensive interaction of protocols that ensure coordination between network layers. A cross-layer approach is proposed, in which MIMO modes are aligned with the network topology, the mobility of nodes or the TAP, as well as with the MAC scheme. The main idea is adaptive switching between MIMO modes depending on the current radio channel conditions and control objectives: increasing reception reliability, reducing node energy consumption, or minimizing data collection time.

The proposed method combines channel state estimation considering mobility and limited resources; MIMO mode selection based on delay–energy–reliability criteria; and MIMO-adaptive scheduling with prioritization of nodes in poor radio conditions. It also incorporates a compact access scheduling scheme, where slot and power parameters are matched to the instantaneous MIMO throughput to avoid collisions and redundant retransmissions. Additionally, feedback mechanisms are considered to ensure the stability of the algorithm under rapid channel variations.

The evaluation methodology includes an analytical framework linking MIMO information rate to data collection time and the node energy model, as well as simulation scenarios for uniform and clustered deployments, different mobility speeds, and traffic loads. Comparisons with non-MIMO schemes demonstrate the expected improvements: reduced collection time due to spatial parallelism, enhanced robustness against fading in dynamic channels, and lower energy consumption through directional beamforming and power control. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach in both model-based and real deployment scenarios.

The proposed solution is not tied to a specific routing protocol and can be integrated into existing data collection systems as an add-on layer that provides a tunable balance between performance, reliability, and network lifetime. The practical value lies in its applicability to the monitoring of critical infrastructure and field-deployed sensor systems with limited energy and intermittent connectivity.

Key words: *mobile sensor networks, wireless sensor networks, MIMO, spatial diversity, beamforming, spatial multiplexing, cooperative MIMO, access scheduling, energy efficiency, simulation modeling.*

Дата надходження статті: 29.11.2025

Дата прийняття статті: 17.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025