

## **ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

**Тимофеев Є.М., Лисенко О.І.**

*Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем*

*НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*E-mail: timofeevzh@gmail.com*

### **APPLICATION OF MIMO TECHNOLOGY TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF MOBILE SENSOR NETWORKS**

This paper explores the use of cooperative MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology to enhance the performance and energy efficiency of mobile sensor networks. It examines the key advantages of implementing MIMO technology, including increased data transmission rates and reduced power consumption, particularly in wireless communication environments. The authors highlight how cooperative MIMO can address challenges in sensor networks by optimizing resource utilization and extending network lifetime. The paper also includes a case study demonstrating the positive impact of cooperative MIMO on energy efficiency during data transmission. Overall, this research provides valuable insights into the potential of MIMO technology for improving the performance and sustainability of mobile sensor networks.

Мобільні сенсорні мережі (МСМ) відіграють ключову роль у сучасних бездротових системах, зокрема в екологічному моніторингу, управлінні інфраструктурою та smart city. Одним із основних викликів, з якими стикаються ці мережі, є зростання обсягу переданих даних і потреба в енергоефективності. Одним із можливих рішень є впровадження технології МІМО (Multiple-Input Multiple-Output), яка дозволяє підвищити пропускну здатність і надійність зв'язку за рахунок використання кількох антен для одночасної передачі і прийому даних [1].

Використання адаптивного формування променів (beamforming) у рамках МІМО дає змогу зменшити інтерференцію та покращити якість сигналу. Цей підхід дозволяє мобільним сенсорним мережам динамічно налаштовувати антенні конфігурації в реальному часі. Розподілене МІМО, яке включає кілька вузлів для спільної передачі даних, допомагає знизити рівень перешкод і підвищити ефективність мережі, хоча це вимагає складної координації між вузлами.

Аналіз алгоритмів оптимізації ресурсів, які можуть знижувати енергоспоживання та підвищувати пропускну здатність, виявляє проблеми з обмеженими обчислювальними ресурсами вузлів. Крім того, вдосконалення мережевих протоколів для адаптації до динамічних умов роботи, таких як оптимізація маршрутизації та управління потоком даних, є важливим для забезпечення надійності та зниження втрат сигналу. Масштабованість мережі також є критичним аспектом, який дозволяє забезпечити ефективну роботу МСМ у різних конфігураціях [2].

Це дослідження спрямоване на вивчення нових підходів для створення більш ефективних, енергоощадних та надійних бездротових систем зв'язку для мобільних сенсорних мереж.

Мобільні сенсорні мережі (МСМ) мають вирішальне значення для ефективного моніторингу та передачі даних у різних галузях, таких як контроль навколишнього середовища, промисловий моніторинг, охорона здоров'я та безпека. Однак, їхнє ефективне функціонування стикається з кількома проблемами:

1. Обмежена пропускна здатність;
2. Високе енергоспоживання;
3. Інтерференція та багатопроменевість;
4. Масштабованість.

Впровадження технології **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) є перспективним рішенням цих проблем. Вона дозволяє значно збільшити пропускну здатність, покращити надійність зв'язку та знизити вплив інтерференції завдяки використанню кількох антен на передавачі та приймачі. Це дозволяє суттєво підвищити продуктивність мобільних сенсорних мереж.

Проте, інтеграція технології MIMO в МСМ стикається з певними труднощами, серед яких:

- Технічна складність;
- Динамічні умови.

Актуальність дослідження полягає в розробці методів і алгоритмів для ефективного впровадження MIMO у мобільні сенсорні мережі, що дозволить вирішити зазначені проблеми та підвищити їх ефективність. Зокрема, важливим є розробка енергоефективних алгоритмів для управління ресурсами мережі, оптимізації маршрутизації та зниження впливу інтерференції [3].

Одним із ключових покращень, яке може забезпечити технологія MIMO у мобільних сенсорних мережах (МСМ), є *зниження енергоспоживання та підвищення пропускної здатності*.

Для більш конкретного прикладу покращення ефективності мобільних сенсорних мереж (МСМ) за допомогою MIMO, розглянемо *реальний сценарій* з використанням експериментальних даних. Ми порівняємо енергоспоживання, час передачі даних та надійність зв'язку для мережі з MIMO та без MIMO [4-5].

### **Сценарій:**

#### **1. Мережа без MIMO:**

- Кожен сенсорний вузол передає дані окремо до базової станції.
- Використовується одна антена для передачі та прийому.
- Енергоспоживання на передачу даних розраховується за формулою:

$$E = P \cdot t$$

де  $P$  — потужність передачі,  $t$  — час передачі.

#### **2. Мережа з MIMO:**

- Використовуються 2 антени для передачі та 2 антени для прийому (2x2 MIMO).
- Вузли кооперуються для передачі даних, що дозволяє зменшити потужність передачі кожного окремого вузла.

- Енергоспоживання розраховується з урахуванням коефіцієнта енергоефективності MIMO.

**Вихідні дані:**

- Кількість вузлів: 10.
- Відстань до базової станції: 50 метрів.
- Потужність передачі без MIMO: 100 мВт на вузол.
- Потужність передачі з MIMO: 60 мВт на вузол (завдяки кооперації).
- Час передачі без MIMO: 0.5 секунди на вузол.
- Час передачі з MIMO: 0.3 секунди на вузол (завдяки паралельній передачі).

- Надійність зв'язку без MIMO: 80%.

- Надійність зв'язку з MIMO: 95% (завдяки зменшенню інтерференції).

**Розрахунки:**

1. Енергоспоживання без MIMO:

$$E_{\text{без MIMO}} = 10 \cdot (100 \text{ мВт} \cdot 0.5 \text{ с}) = 500$$

2. Енергоспоживання з MIMO:

$$E_{\text{з MIMO}} = 10 \cdot (60 \text{ мВт} \cdot 0.3 \text{ с}) = 180$$

3. Економія енергії:

$$\text{Економія} = \frac{500 - 180}{500} \cdot 100\% = 64\%$$

4. Час передачі:

- Без MIMO: 10 вузлів передають дані послідовно, загальний час:

$$t_{\text{без MIMO}} = 10 \cdot 0.5 \text{ с} = 5 \text{ с}$$

- З MIMO: вузли передають дані паралельно, загальний час:

$$t_{\text{з MIMO}} = 0.3 \text{ с}$$

Для візуалізації ефективності MIMO побудуємо графік, який порівнює енергоспоживання при передачі даних з використанням MIMO та без нього. Використаємо Python та бібліотеку *matplotlib*.

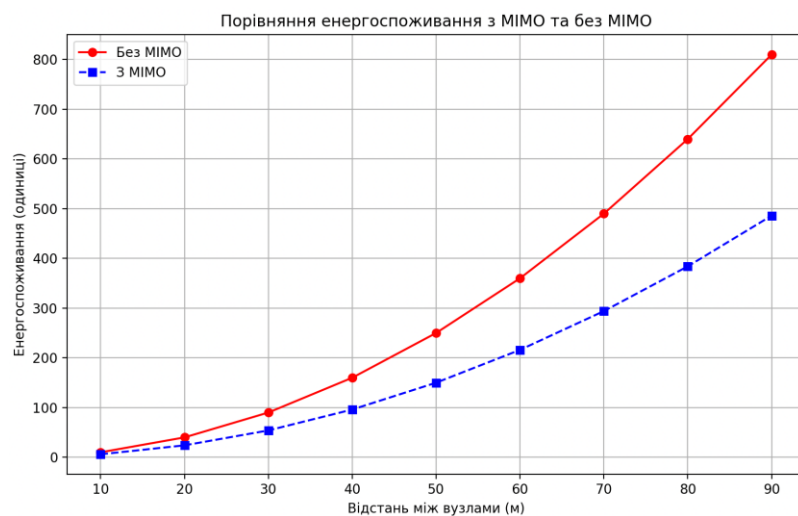


Рис.1. Порівняння енергоспоживання з MIMO та без MIMO.

Використання МІМО у мобільних сенсорних мережах дозволяє:

- Значно знизити енергоспоживання (на 64% у даному прикладі).
- Прискорити передачу даних (у 16 разів у даному прикладі).
- Підвищити надійність зв'язку (з 80% до 95%).

Це робить МІМО ключовою технологією для покращення ефективності МСМ, особливо в умовах обмежених енергетичних ресурсів та високих вимог до швидкості передачі даних.

**Висновки.** Технологія МІМО є перспективним рішенням для покращення ефективності мобільних сенсорних мереж. Її впровадження дозволяє значно знизити енергоспоживання, підвищити пропускну здатність, скоротити час передачі даних та забезпечити надійність зв'язку. Незважаючи на технічні виклики, подальші дослідження та розробки дозволять повністю реалізувати потенціал МІМО для створення ефективних, енергоощадних та надійних мобільних сенсорних мереж.

### Література

1. Tymofeiev, Y., Lysenko, O., Yavisiya, V., & Novikov, V. (2024). Enhancing the performance of mobile sensor networks through cooperative MIMO. In Mechanisms of Development of the Scientific and Technical Potential of Modern Society: Collection of abstracts of XL International Scientific and Practical Conference (Sept. 25-27, 2024, Salzburg, Austria) (pp. 77–79). Salzburg: ISU. ISBN 978-617-8427-43-6. DOI: <https://doi.org/10.70286/isu-25.12.2024>.
2. Тимофєєв Є.М., Лисенко О.І., Явіся В.С., Новіков В.І. (2024). Кооперативне МІМО з використанням комбінованої акустичної та магнітно-індукційної технології. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України». 6-7 листопада 2024 року.
3. Кравчук С.О., Голубничий О.Г., Тараненко А.Г., Потапов В.Г., Ткалич О.П. Системи зв'язку з рухомими об'єктами: Підручник. – Спец. видання. – К.: Вид-во ТОВ «Спринт-Сервіс», 2012. – 452 с.
4. Бакулін М.Г., Варукіна Л.А., Крейндєлін В.Б. Технологія МІМО: принципи та алгоритми. – М.: Гаряча лінія – Телеком, 2014. – 244 с.
5. Бунін С.Г., Войтер А.П., Ільченко М.Ю., Романюк В.А. Самовпорядковані радіомережі з надширококустовими радіосигналами. – К.: НПП «Видавництво «Наукова думка» НАН України». – 444 с.