

УДК 621.396.67

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.026312

О. М. МАРЧУК, аспірант;
ORCID: 0009-0007-3929-5095

В. С. ГЕРАСИМЧУК, аспірант,
ORCID: 0009-0003-8944-1952

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ТЕХНІКА ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ АНТЕН У МЕРЕЖАХ MIMO

У статті запропоновано метод вибору антен у системі з кількома входами та кількома виходами (MIMO), який оптимізує пропускну здатність каналу системи, отриману шляхом вибору найкращої антени. Метод вибору антени може використовуватися для зменшення енергії, що споживається ланцюгом RF та підвищення енергоефективності для досягнення максимальної пропускну здатності системи MIMO. У статті наведено результати співвідношення сигнал/шум (SNR), яке змінюється залежно від кількості передавальних антен, що мають бути обрані відповідно до умов каналу. Це забезпечує кращі показники за ймовірністю бітрової помилки (BER).

Ключові слова: MIMO, метод вибору антен, інформація про стан каналу на передавальній стороні (CSI), пропускну здатність каналу.

Вступ

Серед основних завдань майбутніх бездротових систем зв'язку - підвищення пропускну здатності каналів, покращення якості обслуговування (QoS) та використання доступних за вартістю апаратних засобів у масштабних мережах. Одним із найбільш перспективних рішень вважається технологія MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), яка забезпечує передачу кількох потоків даних через множину антен. На рис. 1 подано модель системи з NT передавальними та NR приймальними антенами, де канал H описується матрицею розміром $(NR \times NT)$. Відомо, що збільшення кількості антен передавання й приймання суттєво підвищує пропускну здатність MIMO-систем [1]. Разом з тим, основним недоліком такої архітектури є потреба у великій кількості радіочастотних (RF) трактів, що значно підвищує собівартість обладнання. До складу (RF) тракту зазвичай входять малошумний підсилювач (LNA), перетворювач частоти, аналого-цифровий перетворювач (ADC) та підсилювач потужності (PA), причому останній забезпечує до 65% енергоспоживання системи [2]. Оскільки кожна антена має власний (RF) тракт, їх збільшення неминує веде до зростання енергоспоживання [3]. Тому, пошук економічно ефективних способів реалізації MIMO залишається актуальним завданням.

Одним із таких способів є використання техніки вибору антен. Вона дозволяє скоротити кількість (RF) трактів, при цьому зберігши основні переваги MIMO. Оскільки антени зазвичай є відносно дешевими (іноді - лише металева пластина), а (RF) тракти є набагато дорожчими, доцільним є використання лише підмножини антен. У цьому випадку комутатор обирає оптимальні антени, а їх сигнали обробляються доступними (RF) трактами [4]. Пропускну здатність системи залежить як від кількості, так і від конкретного набору активних передавальних антен, тому грамотний вибір може забезпечити відчутне підвищення ефективності [5].

Використання інформації про стан каналу (CSI) на боці передавача дає змогу досягати результатів, близьких до систем з повним різноманіттям. Додатковою перевагою методу є зниження енергоспоживання завдяки меншій кількості активних передавачів [6]. Цей підхід застосовується і в масштабних MIMO-системах. Зокрема, у [7] наведено приклад експериментальних досліджень із використанням різних антенних решіток в однакових умовах реального середовища. У випадку масивного MIMO часто реалізується багатокористувацький режим

(MU-MIMO), коли базова станція з десятками або сотнями антен може одночасно обслуговувати велику кількість користувачів з однією антеною.

Метою даної роботи є підвищення пропускної здатності каналу за допомогою оптимального вибору антен.

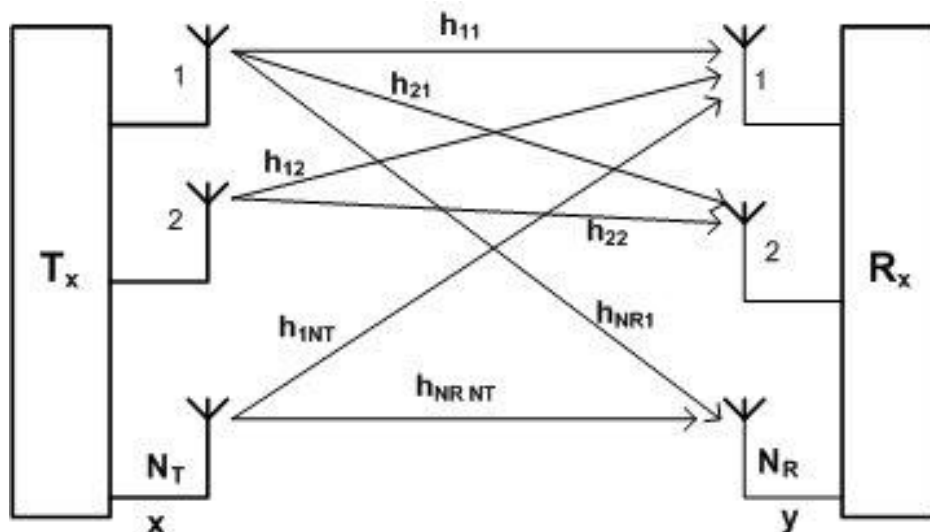


Рис. 1. Система MIMO з N_R приймальними та N_T передавальними антенами

Модель системи

Вибір антен є методом обробки сигналів, який дозволяє зменшити кількість радіочастотних (RF) трактів і споживання енергії в системах MIMO (Multiple Input Multiple Output). Водночас перевага систем MIMO полягає в тому, що вони дають змогу досягти кращої продуктивності без збільшення потужності передавання або розширення смуги пропускання.

Пропускна здатність каналу з вибором антен (N_T , N_R) змінюється залежно від кількості вибраних антен Q . Кожен стовпець у Q містить P_i , що позначає індекс i -го вибраного стовпця, де $i = 1, 2, \dots, Q$. Тоді прийнятий сигнал y можна подати у вигляді:

$$y = \sqrt{\frac{E_x}{Q}} H\{P_1, P_2, \dots, P_Q\}x + z, \quad (1)$$

де $H\{P_1, P_2, \dots, P_Q\} \in \mathbb{C}^{N_R \times Q}$ - ефективний канал, який моделюється матрицею розміром $(N_R \times Q)$, $x \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$ - переданий сигнал, $z \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ - вектор адитивного шуму, E_x позначає середню енергію кожного переданого сигналу.

Пропускна здатність системи з Q вибраними передавальними антенами визначається за формулою:

$$C\{P_1, P_2, \dots, P_Q\} = \log_2 \det \left(INR + \frac{E_x}{QN_0} HH^H\{P_1, P_2, \dots, P_Q\} \right) \text{ bps/Hz} \quad (2)$$

Щоб максимізувати пропускну здатність системи, необхідно вибрати антену (або набір антен), яка забезпечує найбільшу ємність каналу, тобто:

$$\{P_{1opt}, P_{2opt}, \dots, P_{Qopt}\} = \arg \max_{P_1, P_2, \dots, P_Q \in A_Q} C\{P_1, P_2, \dots, P_Q\}, \quad (3)$$

де A_Q - множина всіх можливих комбінацій антен із вибраною кількістю Q .

На приймальній стороні оцінювання передавальної антени здійснюється за формулою:

$$i = \max(|H^{-1}R|), \quad (4)$$

де H - матриця ($NR \times NR$) комплексних коефіцієнтів передачі каналу, R - вектор прийнятого сигналу.

Оцінка впливу просторової кореляції між антенами на ємність системи MIMO

Матриці кореляції можуть бути згенеровані з використанням моделі просторового каналу (SCM) для параметрів каналу I-METRA MIMO, визначених у стандарті 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [8], [9].

Матриці кореляції передавання (R_t) і приймання (R_r) містять інформацію про те, наскільки сигнали з різних елементів антени на передавачі та приймачі корельовані між собою. Вони визначаються як:

$$R_{tx} = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^{tx} & \alpha_{12}^{tx} & \cdots & \alpha_{1N_t}^{tx} \\ \alpha_{21}^{tx} & \alpha_{22}^{tx} & \cdots & \alpha_{2N_t}^{tx} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N_t1}^{tx} & \alpha_{N_t2}^{tx} & \cdots & \alpha_{N_tN_t}^{tx} \end{pmatrix} \quad R_{rx} = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^{rx} & \alpha_{12}^{rx} & \cdots & \alpha_{1N_r}^{rx} \\ \alpha_{21}^{rx} & \alpha_{22}^{rx} & \cdots & \alpha_{2N_r}^{rx} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N_r1}^{rx} & \alpha_{N_r2}^{rx} & \cdots & \alpha_{N_rN_r}^{rx} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Корельована матриця каналу при затримці часу τ визначається за формулою:

$$H_{\text{corr}} = (R_{x1}^{1/2}) H(\tau, t) (R_{tx1}^{1/2}) \quad (6)$$

Підставляючи модифіковану (корельовану) матрицю каналу, пропускна здатність системи MIMO визначається виразом:

$$C = \log_2 \det \left(INR + \frac{E_x}{NT N_0} R_r \frac{1}{2} H_w R_t H_w H R_r \frac{H}{2} \right), \quad (7)$$

де R_t - матриця кореляції між передавальними антенами, R_r - матриця кореляції між приймальними антенами, H - матриця коефіцієнтів підсилення каналу, H_w - матриця коефіцієнтів підсилення каналу при незалежному рівномірному затуханні Релея.

Якщо $NT = NR = N$, матриці R_r і R_t мають повний ранг, а SNR є високим. У цьому випадку зменшення ємності каналу спричинене кореляцією між передавальними та приймальними антенами.

Отже, рівень кореляції між елементами антен залежить переважно від середнього кута приходу (AoA), азимутального спектра потужності (PAS), кутового розсіювання (AS), а також відстані між антенами.

Результати дослідження

Запропонована технологія має на меті визначення оптимальної кількості активних антен, яка забезпечує найвищу енергоефективність системи та максимальну пропускну здатність каналу в межах заданого діапазону співвідношення сигнал/шум (SNR).

На рис. 2 представлено графік залежності SNR від ємності каналу (bps/Hz) для системи MIMO із застосуванням методу вибору антен за умов $NT = 10$ та $Q = 1, 2, 3, \dots, 10$. З графіка видно, що збільшення кількості вибраних передавальних антен істотно підвищує спектральну ефективність та пропускну здатність системи.

Рис. 3 ілюструє зміну ємності каналу залежно від SNR у конфігурації, де $NT = NR = 10$.

На рис. 4 показано, як визначається оптимальна кількість антен для конкретних значень SNR, що дає змогу досягти найкращих характеристик роботи системи.

Ця закономірність особливо добре спостерігається при порівнянні з результатами BER (Bit Error Rate) для каналу із завмираннями, наведеними на рис. 5.

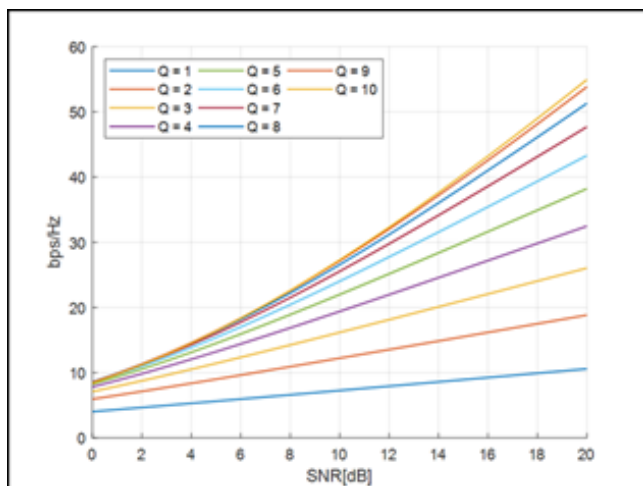


Рис. 2. Графік залежності пропускної здатності каналу від SNR при використанні методу вибору кількості антен

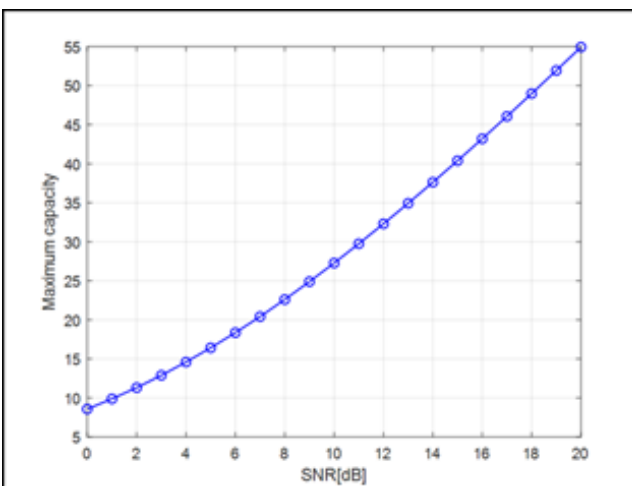


Рис. 3. Відношення SNR до максимальної пропускної здатності MIMO-каналу (bps/Hz) за умови $N_T = N_R = 10$

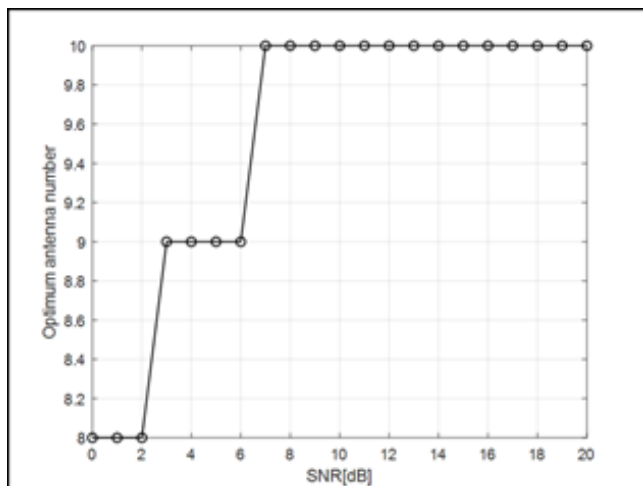


Рис. 4. Залежність SNR від оптимальної кількості вибраних антен для системи MIMO при $N_T = N_R = 10$

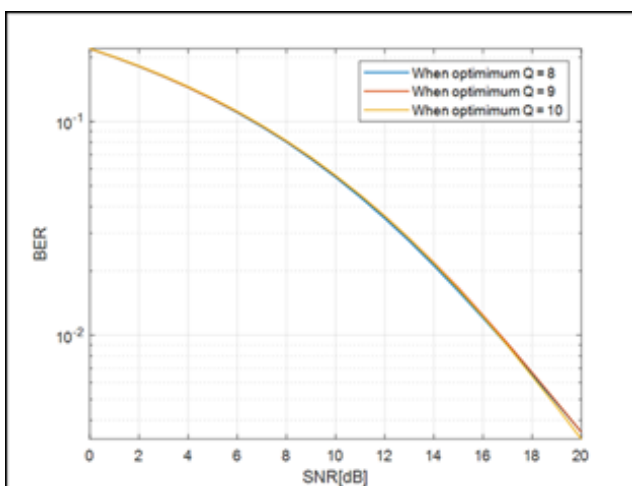


Рис. 5. Залежність BER від SNR для $Q = 8, 9, 10$ при $N_T = 10$

Висновки

У статті запропоновано вдосконалену методику вибору антен для систем MIMO з великою кількістю елементів, що базується на використанні інформації про стан каналу (CSI) на стороні передавача. Метою такого підходу є зниження апаратних витрат і споживання енергії, пов'язаних із роботою кількох радіочастотних трактів (RF chain), які залишаються однією з головних проблем у майбутніх поколіннях мобільного зв'язку. Результати комп'ютерного моделювання свідчать, що пропускна здатність каналу зростає із збільшенням кількості вибраних для активації антен у заданому діапазоні SNR, а при $SNR = 18$ дБ досягається $BER = 10^{-3}$. Отримані висновки можуть бути використані у подальших дослідженнях для розроблення енергоефективних і економічно доцільних систем MIMO наступних поколінь.

Внесок авторів

Ольга МАРЧУК – постановка наукової проблеми, формування ідеї дослідження, розроблення математичної моделі вибору антен у MIMO-системах, інтерпретація результатів моделювання, підготовка основного тексту статті; Владислав ГЕРАСИМЧУК – аналіз наукових джерел, проведення комп'ютерного моделювання в середовищі Matlab, опрацювання графічних результатів, перевірка коректності розрахунків, редагування та узгодження остаточної версії рукопису.

Декларація про штучний інтелект

Автори не використовували штучний інтелект для створення наукових результатів, висновків, математичних моделей чи інтерпретації отриманих даних.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Під час підготовки цієї статті не існувало жодних комерційних, фінансових, службових чи особистих взаємовідносин, які могли б вплинути на результати дослідження, їх трактування або подання. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності та етичних норм проведення наукових досліджень.

Список використаної літератури

1. Y. Cho, J. Kim, W. Yang, C. Kang, "MIMO- OFDM wireless communications with MATLAB", John Wiley & Sons (Asia) Pvt. Ltd, Singapore, 2010.
2. Tse, D., Viswanath, P. *Fundamentals of Wireless Communication*. — Cambridge University Press, 2005. — 564 p.
3. Paulraj, A., Nabar, R., Gore, D. *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. — Cambridge University Press, 2003. — 469 p.
4. Molisch, A. F. *Wireless Communications*. — 2nd ed. — Wiley-IEEE Press, 2011. — 884 p.
5. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations*. — 3GPP TR 25.996, Release 17, 2022.
6. Shuvabrata .B, Kishore K. G, " Adaptive Antenna Selection Technique for MIMO System," *IEEE 2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*.
7. X. Gao, F. Tufvesson, O. Edfors, and F. Rusek, "Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz," in *2012 4th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 2012, pp. 295–299.
8. G. T. S. Group, *Spatial Channel Model, Spatial Channel Model AHG (Combined ad-hoc from 3GPP and 3GPP2)*, 3GPP Std. SCM-134 text V6.0, April 22, 2003.
9. 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, pp. 186–195.
10. Y. Cho, J. Kim, W. Yang, C. Kang, "MIMO- OFDM wireless communications with MATLAB", John Wiley & Sons (Asia) Pvt. Ltd, Singapore, 2010.
11. Tse, D., Viswanath, P. *Fundamentals of Wireless Communication*. — Cambridge University Press, 2005. — 564 p.
12. Paulraj, A., Nabar, R., Gore, D. *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. — Cambridge University Press, 2003. — 469 p.
13. Molisch, A. F. *Wireless Communications*. — 2nd ed. — Wiley-IEEE Press, 2011. — 884 p.
14. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations*. — 3GPP TR 25.996, Release 17, 2022.
15. Shuvabrata .B, Kishore K. G, " Adaptive Antenna Selection Technique for MIMO System," *IEEE 2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*.
16. X. Gao, F. Tufvesson, O. Edfors, and F. Rusek, "Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz," in *2012 4th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 2012, pp. 295–299.
17. G. T. S. Group, *Spatial Channel Model, Spatial Channel Model AHG (Combined ad-hoc from 3GPP and 3GPP2)*, 3GPP Std. SCM-134 text V6.0, April 22, 2003.
18. 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, pp. 186–195.

O. Marchuk, V. Herasymchuk

TECHNIQUE OF OPTIMAL ANTENNA CHOICE IN MIMO NETWORKS

This paper addresses an antenna selection method in multiple-input multiple-output (MIMO) systems, aimed at optimizing channel capacity and improving energy efficiency. It is well known that

increasing the number of transmit and receive antennas in MIMO systems significantly enhances data rates and robustness against interference; however, this advantage comes at the cost of employing additional radio frequency (RF) chains, which leads to high power consumption and increased hardware costs. The proposed approach is based on selecting a subset of the most effective antennas from the available set, which allows preserving the key benefits of MIMO while reducing the number of active RF chains.

The paper presents a mathematical model of the antenna selection technique that exploits channel state information (CSI) at the transmitter side to achieve performance close to that of full diversity systems. The impact of spatial correlation among antennas on the channel capacity is analyzed using spatial channel models (SCM) recommended by 3GPP, considering various propagation environments such as Rayleigh fading, urban macrocell, and microcell scenarios.

Simulation results obtained in Matlab demonstrate the relationship between channel capacity, bit error rate (BER), and the number of selected antennas under different signal-to-noise ratio (SNR) levels. It is shown that the optimal selection of transmit antennas provides a significant increase in spectral efficiency while simultaneously reducing system power consumption. In particular, at SNR = 18 dB, the BER reaches the level of 10^{-3} , which meets the stringent requirements for reliable data transmission in modern wireless networks.

Therefore, the proposed method can be effectively applied for the design of energy-efficient and cost-effective MIMO systems, including large-scale multi-user networks of future generations (5G/6G). The obtained results confirm the practical feasibility of antenna selection techniques to balance high channel capacity, reduced hardware complexity, and minimized energy consumption.

Keywords: MIMO, antenna selection technique, channel state information (CSI), channel capacity.

Надійшла до редакції: 02.01.2026

Прийнята до друку: 21.04.2026

Опубліковано: 27.04.2026

© 2026 Марчук О. М., Герасимчук В. С.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>