

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-28>

УДК 621.396

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

КАРПОВА Лєся

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5015-2107>

e-mail: rtlesya@gmail.com

НАЗАРЧУК Дєніс

Хмельницький національний університет

e-mail: boykojuliy6@gmail.com

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ МІМО-РІШЕННЯ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ WIMAX I 5G

У сучасних бездротових системах зв'язку, таких як WiMAX та 5G, технологія МІМО відіграє ключову роль у підвищенні пропускної здатності, спектральної ефективності та загальної якості зв'язку. У цій роботі аналізуються передові підходи до проектування та оптимізації МІМО-систем, зокрема використання спеціалізованих антенних елементів для покращення ізоляції каналів та зниження взаємних завад. Запропоновані конструктивні рішення дозволяють досягти високої ефективності випромінювання в широкому діапазоні частот. Представлені результати моделювання підтверджують зростання загальної продуктивності системи в порівнянні з традиційними реалізаціями.

Ключові слова: монопольна антена, антенна решітка, широка смуга пропускання, дводіпазонна антена, WIMAX, МІМО, 5G, пікове підсилення, ефективність випромінювання.

BOIKO Juliy, KARPOVA Lesya, NAZARCHUK Denys

Khmelnitskyi National University

HIGH-EFFICIENCY MIMO SOLUTIONS FOR WIMAX AND 5G WIRELESS NETWORKS

This article addresses the critical and timely task of employing strike FPV drones in kamikaze mode to neutralize enemy counter- This study presents a comprehensive analysis of the design and optimization of MIMO antenna systems, which are fundamental to modern wireless communication technologies such as WiMAX and 5G. MIMO technology enables the simultaneous transmission of multiple independent data streams by employing multiple antennas at both the transmitter and receiver. This significantly enhances network capacity, spectral efficiency, and overall communication reliability, making MIMO a key enabler for high-speed and high-capacity wireless networks. The advantages of MIMO systems are particularly evident in urban environments, where multipath propagation and interference present considerable challenges to signal integrity. By leveraging spatial diversity, MIMO mitigates these issues, ensuring robust signal reception even in complex propagation conditions. Moreover, MIMO contributes to increased energy efficiency, leading to more sustainable and cost-effective network operations. This is especially relevant for next-generation wireless networks, where power consumption and spectral optimization are crucial factors in maintaining high system performance. A critical aspect of MIMO system optimization is the refinement of key structural parameters, including element isolation, radiation efficiency, and antenna array geometry. The results obtained in this study demonstrate that the optimized MIMO system achieves an extremely low envelope correlation coefficient ($ECC < 0.0002$), ensuring minimal interference between antenna elements. Additionally, the system exhibits a high diversity gain ($DG > 9.991$ dB), which enhances link reliability and signal robustness. Furthermore, the optimized configuration minimizes capacity loss ($CCL < 0.1$ bit/s/Hz) while maintaining an efficient total active reflection coefficient ($TARC < -10$ dB) and an optimal mean effective gain (MEG ranging from -6.2 dB to -7 dB). These performance indicators confirm the effectiveness of the proposed design in delivering high data throughput, stable connectivity, and improved system reliability, all of which are essential for WiMAX and 5G technologies operating in high-density user environments and under heavy traffic conditions.

In addition to structural optimizations, adaptive beamforming techniques further enhance system efficiency by dynamically adjusting antenna radiation patterns based on real-time channel conditions. This approach not only improves spectral utilization but also maximizes signal strength and reduces interference, leading to better overall network performance. The findings of this study provide valuable insights for the development of next-generation wireless networks, offering improved connectivity, optimized spectral efficiency, and enhanced system resilience in dynamic communication environments.

Keywords: monopole antenna, antenna array, wide bandwidth, dual-band antenna, WIMAX, MIMO, 5G, peak gain, radiation efficiency

Стаття надійшла до редакції / Received 07.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 02.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

З розвитком бездротових технологій постала необхідність забезпечення стабільного та високошвидкісного зв'язку в умовах зростаючого навантаження на мережу, особливо у середовищах із

високою щільністю користувачів [1]. Традиційні методи підвищення ємності мереж, такі як розширення частотного спектра або збільшення щільності базових станцій, мають обмежену ефективність через фізичні та економічні обмеження. У цьому контексті технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) стала ключовим напрямом розвитку сучасних бездротових систем зв'язку, оскільки дозволяє значно підвищити продуктивність системи без необхідності додаткового спектрального ресурсу [2]. MIMO-методика ґрунтується на використанні множинних передавальних і приймальних антен для просторового мультиплексування та збільшення ефективності використання спектра. Це забезпечує кілька ключових переваг, а саме, підвищення пропускної здатності за рахунок незалежної передачі кількох потоків даних через різні просторові канали, покращення надійності зв'язку завдяки використанню просторової диверсифікації, що зменшує вплив багатопроменевого поширення та глибоких завмирань сигналу, а також ефективне використання енергетичних ресурсів, оскільки адаптивні алгоритми MIMO дозволяють динамічно налаштувати потужність випромінювання та схеми модуляції відповідно до умов розповсюдження сигналу.

Особливо актуальним є впровадження таких рішень у системах WiMAX та 5G [3], які функціонують у широких частотних діапазонах нижче та вище 6 ГГц. Саме в цих мережах MIMO-технологія відіграє критичну роль у забезпеченні високої якості обслуговування (QoS), зниженні затримок та підтримці стійкого зв'язку навіть у складних умовах міського середовища.

Попри очевидні переваги, практичне впровадження MIMO-систем супроводжується низкою інженерних викликів. Серед ключових завдань, які потребують вирішення, слід виділити вимоги щодо оптимізації рішень для ізоляції між антенними елементами які дозволять мінімізувати взаємні завади та покращити якість передавання сигналу, необхідність зниження впливу кореляції між каналами, що забезпечує ефективніше використання просторових ресурсів та покращення диверсійного коефіцієнта підсилення, а також оптимізацію конфігурації випромінювачів, що сприятиме зменшенню втрат потужності та адаптивному налаштуванню характеристик випромінювання відповідно до умов розповсюдження сигналу.

Таким чином, дослідження у сфері проектування та оптимізації MIMO-систем є вкрай актуальним для подальшого розвитку бездротових технологій нового покоління. Отримані результати сприятимуть покращенню ефективності бездротових мереж, підвищенню їхньої енергоефективності та забезпеченню стабільного з'єднання для користувачів навіть у складних умовах.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз актуальних літературних джерел у предметній області статті [4, 5] показує, що сучасні дослідження MIMO-систем для WiMAX та 5G зосереджені на розробці ефективних антенних конфігурацій, які здатні забезпечити високу ізоляцію між елементами, широку смугу пропускання та підвищене підсилення. Це є критичними факторами для забезпечення високої продуктивності мереж, оскільки їх вплив безпосередньо визначає ефективність передачі даних у складних умовах навантаження та багатопроменевого поширення сигналів. Одним з найбільш актуальних напрямів є оптимізація структур випромінювачів, таких як монопольні антени, PIFA (Planar Inverted-F Antennas) та слот-антени [6]. Ці антени широко використовуються через свої компактні розміри та здатність ефективно працювати в різних частотних діапазонах, що є важливим для WiMAX і 5G.

Досягнення високої ізоляції між елементами є однією з ключових вимог для ефективної роботи MIMO-систем, оскільки це дозволяє зменшити взаємні завади між антенами і забезпечити більшу стійкість до багатопроменевого поширення сигналу. Сучасні технології, такі як дефектна структура заземлення (DGS) та ємнісна ізоляція, активно використовуються для досягнення необхідної ізоляції між антенами, що дозволяє знизити вплив взаємних завадових впливів і покращити якість сигналу. Зокрема, багато досліджень [7, 8] показують, що використання таких вдосконалених антенних конфігурацій дозволяє досягати рівнів ізоляції більше ніж 15–20 дБ, що є достатнім для забезпечення ефективної роботи у широких частотних діапазонах, таких як 2–3,71 ГГц для WiMAX та 5,9–7,54 ГГц для 5G. Ці частотні діапазони є важливими для реалізації високошвидкісного зв'язку, оскільки вони дозволяють досягати високої пропускної здатності та знижувати рівень завад

Ще одним важливим аспектом є підвищена ефективність випромінювання, яка також є критичним параметром для антенних систем. Завдяки оптимізації геометричних параметрів антенних масивів, вдалося досягти ефективності випромінювання понад 99%, що забезпечує максимальне використання енергетичних ресурсів при мінімальних втратах [9]. Це дозволяє не тільки покращити якість зв'язку, але й значно знизити енергоспоживання мережі, що є важливим для забезпечення стабільності та збереження енергії в умовах високих навантажень. Окрім цього, важливим досягненням є зниження коефіцієнта кореляції огинаючої (ECC), який є показником незалежності каналів у MIMO-системах. Досягнення $ECC < 0,0002$ є значним проривом, оскільки це забезпечує мінімальні взаємні завади між каналами і покращує загальну ефективність системи. У поєднанні з підвищеним піковим підсиленням до 7,5 дБі це забезпечує високий рівень різноманітності каналів, що сприяє стабільності та високій надійності зв'язку

Враховуючи вимоги до компактності та продуктивності антен для сучасних бездротових систем, таких як WiMAX і 5G, розробка ефективних антенних конфігурацій, що поєднують високу ізоляцію,

підсилення та ефективність випромінювання, є одним з основних завдань науковців і інженерів у цій галузі [10]. Актуальні пропонувані конструктивні рішення є перспективними для забезпечення стабільної та високошвидкісної роботи сучасних бездротових мереж, де важливо поєднувати високу продуктивність з компактними розмірами антен.

Таким чином, дослідження, представлені в представленій статті, зосереджені на суттєвому вдосконаленні характеристик МІМО-систем, що є важливим кроком у розвитку технологій WiMAX та 5G. Високий рівень ефективності випромінювання, зниження кореляції каналів та покращена ізоляція між елементами антенних систем сприяють значному підвищенню стабільності та надійності мереж. Це, в свою чергу, є критичними факторами для забезпечення ефективного функціонування майбутніх бездротових комунікаційних технологій, що вимагають високої продуктивності, надійності та стійкості до завад у складних умовах.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є дослідження та вдосконалення МІМО-систем для технологій WiMAX та 5G, зокрема розробка ефективних антенних конфігурацій, які забезпечують високу ізоляцію між елементами, широку смугу пропускання та підвищене підсилення. Особлива увага приділяється досягненню високої ефективності випромінювання, зниженню кореляції каналів та забезпеченню високого рівня різноманітності каналів, що сприяє підвищенню стабільності та надійності зв'язку у складних умовах багатоканальних середовищ.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Технологія МІМО суттєво покращує системи зв'язку, підвищуючи якість сигналу, мінімізуючи багатопроменеве завмирання та збільшуючи спектральну ефективність. Завдяки одночасному використанню кількох каналів, МІМО-системи забезпечують вищу пропускну здатність і надійність зв'язку, що є особливо актуальним у умовах обмеженого спектру частот.

У даній статті розглядається розширення базової конфігурації з 2×1 до двопортової МІМО-системи з габаритами 126×63 мм². Початкове рішення реалізовувалося із застосуванням часткової заземленої структури розміром 109×27 мм² (рис. 1а), яка забезпечувала ізоляцію між каналами на рівні лише 7 дБ, що виявилось недостатнім для оптимальної роботи системи.

Для підвищення ізоляції між каналами було запропоновано вдосконалення заземлювальної структури шляхом введення прямокутного прорізу у заземлювальній площині (рис. 1б). Цей підхід дозволив досягти ізоляції до 20 дБ. Крім того, було досліджено вплив альтернативного варіанту з повністю розділеною заземлювальною структурою (рис. 1в), який, однак, демонстрував нижчі ізоляційні характеристики в окремих частотних діапазонах порівняно з оптимізованим рішенням із щільною заземленою структурою.

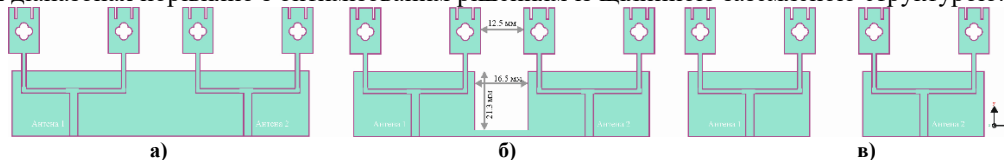


Рис. 1. Модифікації заземлювальної площини двоелементної МІМО-антени

а) – часткова заземлювальна площина; б) – площина з прорізом для покращеної ізоляції; в) – альтернативна структура з відокремленою заземленою площиною

Для подальшого підвищення ефективності ізоляції було застосовано оптимізацію геометрії прорізу. Прямокутна щілина розміром $16,5 \times 21,3$ мм була підібрана таким чином, що забезпечує необхідний рівень ізоляції при збереженні двоканального режиму роботи. Додатково, площа заземлення під лініями передачі 75 Ом була збільшена вдвічі із збереженням відповідних проміжків, що дозволило уникнути негативного впливу загальної заземлювальної площини на ізоляційні характеристики. Результати моделювання підтверджують, що оптимізована МІМО-конфігурація ефективно працює у широких частотних діапазонах (рис. 2), що використовуються для сучасних комунікаційних систем, таких як WiMAX та 5G (діапазони 2,1–3,6 ГГц та 5,9–7,4 ГГц).

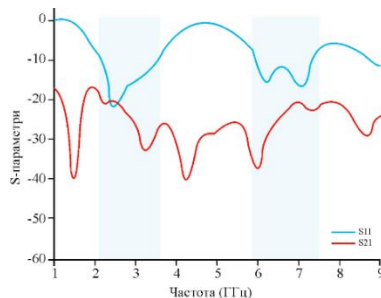


Рис. 2. S-параметри запропонованої антени МІМО

Показники системи демонструють пікове підсилення до 7,5 дБі, ефективність випромінювання на рівні 99% та загальну ефективність 96% (рис. 3).

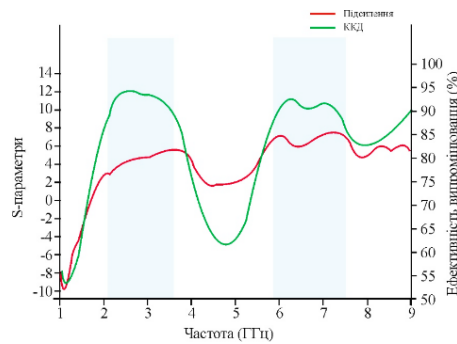


Рис. 3. Зміни підсилення та ефективності антени МІМО залежно від частоти

Змодельовані двовимірні діаграми спрямованості (ДС) антени наведені на рис. 4 та представлені для двох основних площин – XZ (площина H) та YZ (площина E) – на частотах 2,5 ГГц та 6,2 ГГц.

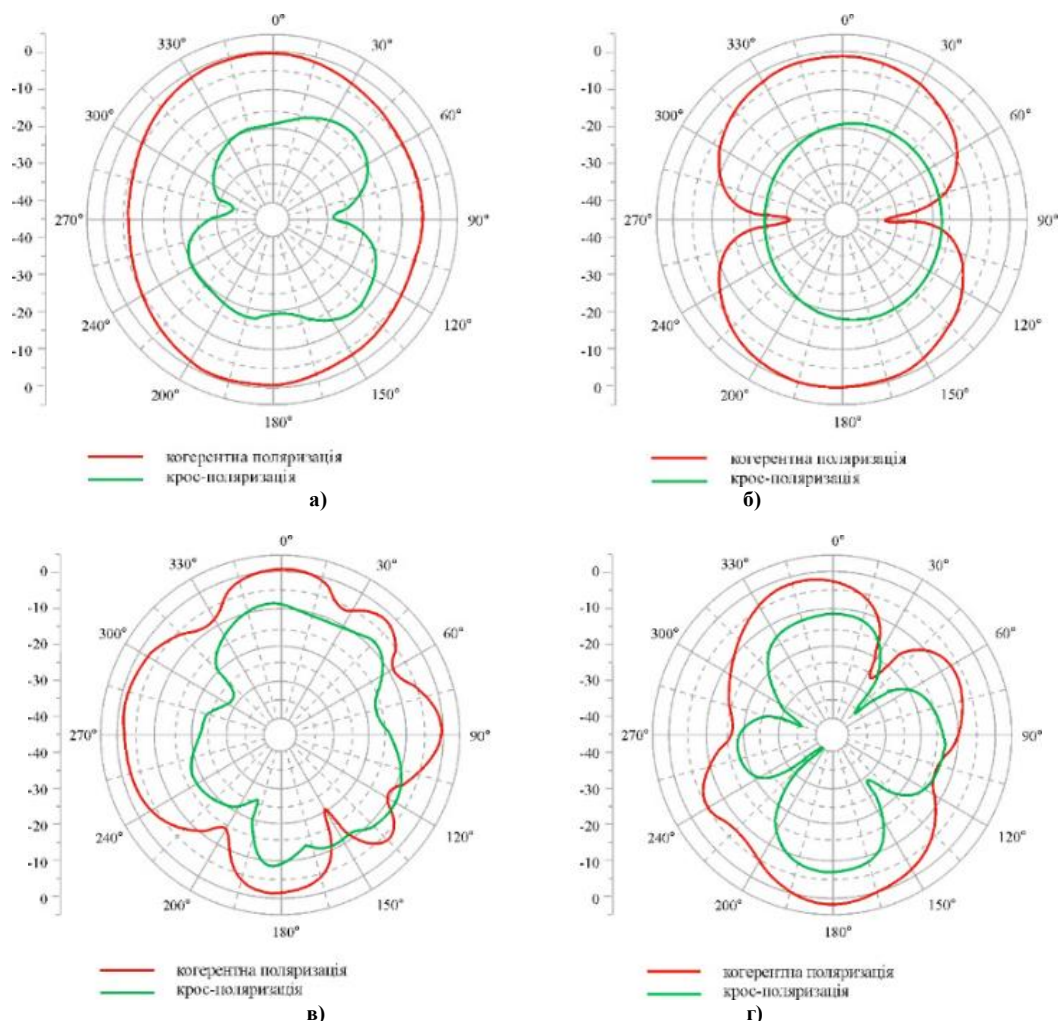


Рис. 4. Змодельовані ДС антени для площин H і E : а) площина H на 2,5 ГГц; б) площина E на 2,5 ГГц; в) площина H на 6,2 ГГц; г) площина E на 6,2 ГГц

Одним із ключових параметрів для оцінки ізоляції елементів у МІМО-системах є коефіцієнт кореляції огинаючої (ECC) [10]. Низькі значення ECC свідчать про мінімальну кореляцію між елементами [11], що забезпечує кращу ізоляцію та знижує взаємні завади. Значення ECC рівні 0,5 або менше вважаються оптимальними для високопродуктивних систем. Розрахунок ECC здійснюється за допомогою рівняння (1):

$$ECC_s = \frac{|S_{ii} \cdot S_{ij} + S_{ji} \cdot S_{jj}|^2}{(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ij}|^2)(1 - |S_{ji}|^2 - |S_{jj}|^2)}, \quad (1)$$

де S_{ii} – коефіцієнт відбиття, S_{ij} – коефіцієнт пропускання.

Як показано на рисунку 5, змодельовані значення ECC для досліджуваної МІМО-системи склали менше 0,0002 в бажаних частотних діапазонах, що свідчить про надзвичайно низьку кореляцію між каналами та сприяє підвищенню швидкості передачі даних і спектральної ефективності.

Ще одним важливим параметром є підсилення рознесення (DG), яке характеризує здатність системи компенсувати втрати сигналу, спричинені завмиранням, завадами та згасанням. Розрахунок DG здійснювали за допомогою рівняння (2):

$$DG = 10\sqrt{1 - |ECC_s|^2}. \quad (2)$$

За результатами моделювання (рис. 6), досягнуте значення DG перевищує 9,991 дБ, що майже дорівнює оптимальному значенню в 10 дБ. Це підтверджує високу ефективність системи у зниженні втрат сигналу та забезпеченні стабільної передачі даних.

Втрата пропускної здатності каналу (CCL) є ще одним критичним показником, що визначає вплив кореляційних ефектів між елементами. Оцінка CCL проводилась за допомогою рівняння (3):

$$CCL = -\log_2(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ij}|^2). \quad (3)$$

Як показано на рис. 7, значення втрати CCL для досліджуваних частотних діапазонів становлять менше 0,1 біт/с/Гц, що значно нижче прийнятної межі в 0,5 біт/с/Гц. Це свідчить про високоефективну мінімізацію кореляційних ефектів, що дозволяє зберегти стабільну і високу пропускну здатність каналу навіть в умовах інтенсивного трафіку та високої щільності користувачів.

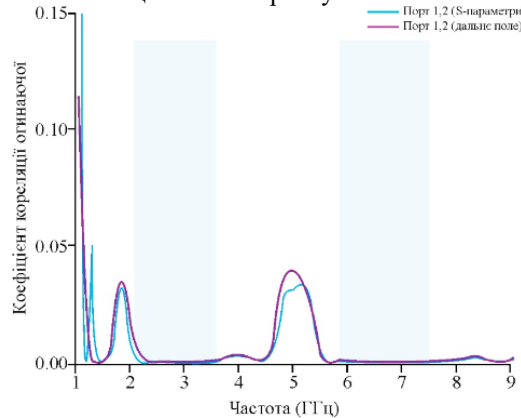


Рис. 5. Змодельовані значення ECC для досліджуваної МІМО-системи

Для оцінки ефективності мінімізації фазових зсувів між вхідними сигналами застосовується повний коефіцієнт активного відбиття ($TARC$). Розраховується він як квадратний корінь відношення відбитої потужності до падаючої потужності за допомогою рівняння (4):

$$TARC = \frac{\sqrt{|S_{ii} + S_{ij}e^{j\theta}|^2 + |S_{ji} + S_{jj}e^{j\theta}|^2}}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Змодельовані значення $TARC$ для різних фаз збудження (від 0° до 180° з кроком 30°) виявилися меншими за -10 дБ (рис. 8), що підтверджує ефективну роботу системи в мінімізації відбиття сигналу та покращенні якості зв'язку.

Ще одним показником є середнє ефективне підсилення (MEG), яке оцінює здатність системи використовувати рознесення сигналів у багатопробному середовищі, порівнюючи отриману потужність з потужністю від ізотропного випромінювача. Розрахунок MEG проводиться за допомогою рівняння (5):

$$MEG_i = 0.5 \left[1 - \sum_{j=1}^M |S_{ji}| \right] \quad (5)$$

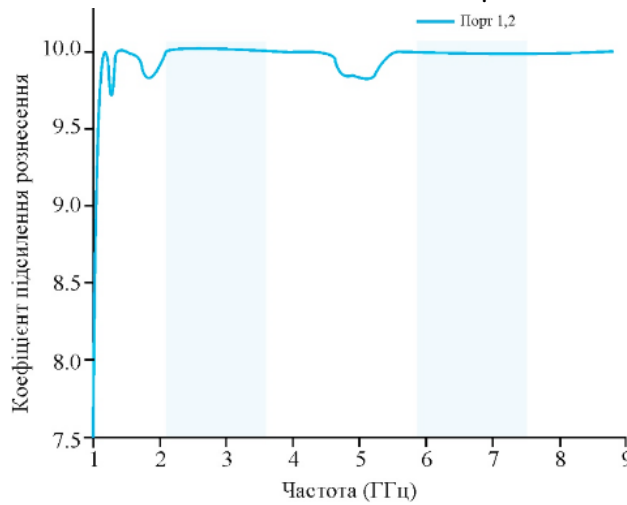


Рис. 6. Змодельовані значення DG для досліджуваної MIMO-системи

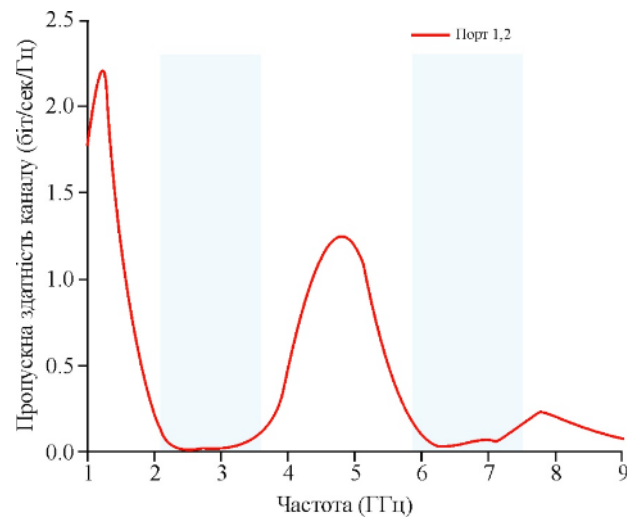


Рис. 7. Змодельовані значення CCL для досліджуваної MIMO-системи

Щоб досягти покращеної продуктивності і забезпечити необхідну рознесеність в системах MIMO, критично важливо, щоб значення середнього ефективного підсилення (MEG) знаходилися в межах, які визначаються як оптимальні відповідно до сучасних досліджень і галузевих рекомендацій:

$$-3 \leq MEG(\text{dB}) < -12 \quad (6)$$

Ці рекомендації базуються на теоретичних моделях і емпіричних дослідженнях, що враховують різні параметри, такі як конфігурація антен [12], ізоляція між елементами, а також специфікації, що стосуються частотних діапазонів. Відповідні нормативи дозволяють визначити оптимальні межі MEG для досягнення високої ефективності і стабільності MIMO-систем у реальних умовах експлуатації.

Згідно з результатами моделювання, представленими на рис. 9, значення середнього ефективного підсилення (MEG) виявилися в межах від $-6,2$ дБ до -7 дБ для бажаних частотних діапазонів. Ці показники відповідають рекомендованим значенням для високоефективних MIMO-систем [13], що демонструють оптимальну продуктивність в умовах високого навантаження на мережу та складних умовах радіоохоплення. Важливо зазначити, що досягнення таких значень MEG забезпечує необхідний рівень якості сигналу та дозволяє знижувати рівень завад, що в свою чергу сприяє підвищенню надійності та ефективності бездротових мереж, таких як WiMAX та 5G.

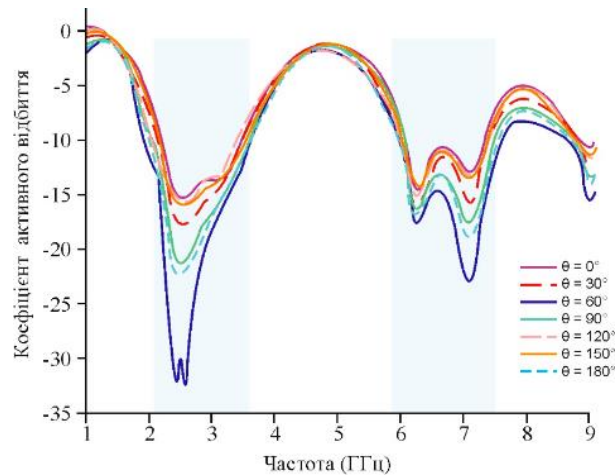


Рис. 8. Показники активного відбиття TARC для досліджуваної MIMO-системи

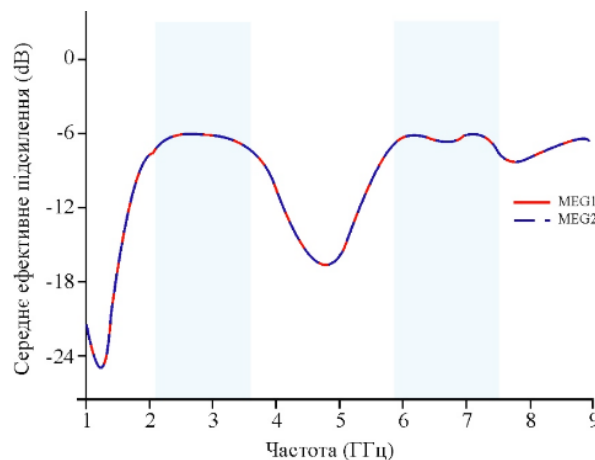


Рис. 9. Показники середнього ефективного підсилення MEG для досліджуваної MIMO-системи

Результати проведених досліджень, зокрема моделювання середнього ефективного підсилення (MEG) у системах MIMO, вказують на значний потенціал для покращення продуктивності бездротових мереж, таких як WiMAX і 5G. Отримані значення MEG, які варіюються від $-6,2$ дБ до -7 дБ, підтверджують відповідність до рекомендованих діапазонів для високоефективних систем, що є важливим фактором для збереження стабільного та високошвидкісного зв'язку в умовах різноманітних завад та великого навантаження. Однак варто зазначити, що досягнення таких результатів залежить не лише від оптимізації антенних конфігурацій, а й від безлічі інших факторів, таких як взаємодія між каналами, кореляція сигналів та умови середовища. Тому, хоча результати є позитивними, досягнення ідеальної продуктивності в реальних умовах потребує подальших досліджень та вдосконалення конструктивних рішень, зокрема для забезпечення кращої ізоляції між елементами антен і зниження завад.

З іншого боку, зниження взаємних завад і підвищення ефективності випромінювання, що підтверджено результатами нашого моделювання (рис. 7-9), надає можливість для більш стабільної роботи MIMO-систем у широких частотних діапазонах. Це дає можливість оптимізувати використання спектру та покращити загальну надійність і пропускну здатність мереж. Однак для подальшого розвитку технології важливо не лише фокусуватися на досягненні високих значень MEG, але й враховувати інші важливі параметри, такі як енергетична ефективність і адаптація до змінних умов середовища. Тому для досягнення максимальної ефективності необхідно продовжувати дослідження в напрямку оптимізації параметрів MIMO-систем, що може забезпечити ще більшу стабільність і швидкість передачі даних у майбутніх бездротових мережах.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

MIMO-системи є невід'ємною частиною сучасних бездротових технологій, що дозволяють значно покращити якість зв'язку та пропускну здатність мереж. Оптимізація їхніх конструктивних параметрів, таких як ізоляція між елементами та ефективність випромінювання, відіграє критичну роль у досягненні найкращих експлуатаційних характеристик. Отримані результати демонструють, що оптимізована MIMO-система

відзначається надзвичайно низьким значенням ECC ($<0,0002$), високим підсиленням рознесення ($DG > 9,991$ дБ), мінімальними втратами пропускної здатності ($CCL < 0,1$ біт/с/Гц), ефективним показником $TARC$ (< -10 дБ) та оптимальним значенням MEG (від $-6,2$ до -7 дБ). Ці показники забезпечують високу пропускну здатність, стабільність та надійність роботи системи, що є критично важливими для технологій WiMAX і 5G в умовах високої щільності користувачів та інтенсивного трафіку.

У майбутньому перспективи досліджень у цьому напрямі полягають у подальшій оптимізації MIMO-систем з урахуванням новітніх технічних досягнень, таких як інтеграція з технологіями Massive MIMO та використання багаточастотних антенних елементів. Додатково, важливо дослідити вплив нових методів обробки сигналів і адаптивного керування каналами на ефективність передачі даних у реальних умовах з високими завадами та перемінними умовами середовища. Розвиток алгоритмів для автоматичної оптимізації параметрів систем, а також інтеграція з новими стандартами комунікаційних мереж (наприклад, 6G), відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності майбутніх бездротових мереж.

Література

1. Jo, Y., Kim, H., Lim, J. & Hong, D. (2020). Self-Optimization of Coverage and System Throughput in 5G Heterogeneous Ultra-Dense Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(3), 285-288.
2. Abdullah, M., Kiani, S. H. & Iqbal, A. (2019). Eight Element Multiple- Input Multiple-Output (MIMO) Antenna for 5G Mobile Applications. *IEEE Access*, 7, 134488-134495.
3. Pyatin, I., Boiko, J., Eromenko, O. & Parkhomey, I. (2023). Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21(3), 496-505.
4. Jilani, S. F. & Alomainy, A. (2018). Millimetre-wave t-shaped MIMO antenna with defected ground structures for 5G cellular networks. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(5), 672-677.
5. Бойко, Ю., Карпова, Л., & Семенюк, В. (2023). Високорівнева одноплощинна антена MIMO для девайсів 5G. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 325(5(1)), 40-46.
6. Halaoui, M. El, et al. (2017). Multiband planar inverted-F antenna with independent operating bands control for mobile handset applications. *Intern. J of Antennas and Propagation*, 2017.
7. Ullah, R., et al. (2020). A 10-Ports MIMO Antenna System for 5G Smart-Phone Applications. *IEEE Access*, 8, 218477-218488.
8. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A, Debbah, M. & Alouini, M.-S. (2018). Design of 5G Full Dimension Massive MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 66(2), 726-740.
9. Wang, Y., et. al. (2023). 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2(1), 100065.
10. Li, Y., Luo, Y. & Yang, G. (2019). High-isolation 3.5 GHz eight-antenna MIMO array using balanced open-slot antenna element for 5G smartphones. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 67, 3820-3830.
11. Boiko, J., & Karpova, L. (2023, March). Increasing efficiency in the correlation processing of information signals for radar. In *Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering: ICCCES 2022* (pp. 549-569). Singapore: Springer Nature Singapore.
12. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., & Tkachuk, V. (2023). Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(1), 26-32.
13. Chen, X, Soh, P. J., & Sharawi, M. S. (2025). Massive-MIMO (m-MIMO) Antenna Systems. MIMO Antenna Systems for 5G and Beyond. Wiley-IEEE Press, (173-190).

References

1. Jo, Y., Kim, H., Lim, J. & Hong, D. (2020). Self-Optimization of Coverage and System Throughput in 5G Heterogeneous Ultra-Dense Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(3), 285-288.
2. Abdullah, M., Kiani, S. H. & Iqbal, A. (2019). Eight Element Multiple- Input Multiple-Output (MIMO) Antenna for 5G Mobile Applications. *IEEE Access*, 7, 134488-134495.
3. Pyatin, I., Boiko, J., Eromenko, O. & Parkhomey, I. (2023). Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21(3), 496-505.
4. Jilani, S. F. & Alomainy, A. (2018). Millimetre-wave t-shaped MIMO antenna with defected ground structures for 5G cellular networks. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(5), 672-677.
5. Boiko, J., Karpova, L., & Semenyuk, V. (2023). Single plane MIMO antenna for 5G devices. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 325(5(1)), 40-46.
6. Halaoui, M. El, et al. (2017). Multiband planar inverted-F antenna with independent operating bands control for mobile handset applications. *Intern. J of Antennas and Propagation*, 2017.
7. Ullah, R., et al. (2020). A 10-Ports MIMO Antenna System for 5G Smart-Phone Applications. *IEEE Access*, 8, 218477-218488.
8. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A, Debbah, M. & Alouini, M.-S. (2018). Design of 5G Full Dimension Massive MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 66(2), 726-740.

9. Wang, Y., et. al. (2023). 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2(1). 100065.
10. Li, Y., Luo, Y. & Yang, G. (2019). High-isolation 3.5 GHz eight-antenna MIMO array using balanced open-slot antenna element for 5G smartphones. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 67, 3820–3830.
11. Boiko, J., & Karpova, L. (2023, March). Increasing efficiency in the correlation processing of information signals for radar. In *Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering: ICCCES 2022* (pp. 549-569). Singapore: Springer Nature Singapore.
12. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., & Tkachuk, V. (2023). Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(1), 26–32.
13. Chen, X, Soh, P. J., & Sharawi, M. S. (2025). Massive-MIMO (m-MIMO) Antenna Systems. *MIMO Antenna Systems for 5G and Beyond*. Wiley-IEEE Press, (173-190).