

УДК 004.85:621.396.41:621.396.946

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.028314

**А. В. ФОМКІНА**, студентка;

ORCID: 0009-0003-3974-1404

**Р. М. КИРИЧЕНКО**, ст. викл.;

ORCID: 0009-0006-2586-2493

**К. О. ДОМРАЧЕВА**, канд. техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-6126-7698

**Д. В. МИРОНОВ**, канд. техн. наук, доцент,

ORCID: 0009-0001-6492-7011

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ 4G/5G З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ MASSIVE MIMO

*У статті проведено комплексне дослідження методів підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності сучасних мереж мобільного зв'язку в умовах щільної міської забудови. Актуальність роботи зумовлена експоненціальним зростанням обсягів мобільного трафіку (до 45% щорічно) та дефіцитом доступного частотного ресурсу, що потребує впровадження високоефективних технологій просторового мультиплексування. Об'єктом дослідження є процеси управління радіоресурсами у гетерогенній мережі ПрАТ «Київстар» на прикладі кластера з 145 базових станцій у Печерському районі міста Києва.*

*Методологія дослідження базується на аналізі великих масивів даних (Big Data), отриманих із систем управління мережею (OSS Huawei U2020) та результатів натурних драйв-тестів із використанням сканерів Rohde & Schwarz. Обробка даних здійснювалася у середовищі Jupyter Notebook мовою Python з використанням бібліотек Pandas, NumPy та алгоритмів машинного навчання (XGBoost) для прогнозування поведінки мережі при зміні параметрів Beamforming.*

*У ході дослідження проведено порівняльний аналіз ефективності класичних систем 2T2R та активних антенних систем (AAS) із підтримкою Massive MIMO 64T64R. Встановлено, що впровадження Massive MIMO забезпечує приріст середньої спектральної ефективності у 2,7 рази, досягаючи показника 4,8 біт/с/Гц. Особливу увагу приділено оптимізації вертикального нахилу променя (D-Tilt). Експериментально доведено, що адаптивне керування діаграмою спрямованості дозволяє підвищити рівень сигналу на верхніх поверхках висотних будівель на 18%, мінімізуючи при цьому міжсекторну інтерференцію (overshooting).*

*Аналіз статистичних даних підтвердив, що використання модуляції 256QAM зросло до 35%, що в поєднанні з технологією MU-MIMO дозволило досягти медіанної швидкості передачі даних 45 Мбіт/с. Також розкрито особливості функціонування технології Dynamic Spectrum Sharing (DSS) у діапазоні 2100 МГц, визначено вплив сигнального навантаження на загальну ємність сегмента мережі. Сформульовано практичні рекомендації щодо налаштування порогів хендоверу та координації променів (Beam Coordination) для мінімізації взаємних завад у зонах зі складною багатопроменевою структурою поширення сигналу. Результати роботи можуть бути використані операторами мобільного зв'язку для планування та оптимізації мереж 5G NR у великих містах України.*

**Ключові слова:** 5G NR, Massive MIMO, Beamforming, спектральна ефективність, гетерогенні мережі, QoS, SINR, статистика OSS.

### *Постановка проблеми*

Стрімка еволюція телекомунікаційних мереж, що характеризується переходом від систем LTE-Advanced Pro до технологій п'ятого покоління (5G NR), формує нові виклики перед національними операторами мобільного зв'язку. Актуальність дослідження обумовлена експоненціальним зростанням обсягів мобільного трафіку даних, який, згідно з внутрішньою статистикою ПрАТ «Київстар», демонструє щорічний приріст на рівні 35-45%. В умовах обмеженості частотного ресурсу та високої щільності забудови міських агломерацій, екстенсивний шлях розвитку мережі стає економічно неефективним. Це виводить на перший план проблему підвищення спектральної ефективності за допомогою впровадження технологій просторового мультиплексування Massive MIMO та адаптивного формування діаграми спрямованості (Beamforming).

### *Аналіз останніх досліджень і публікацій*

Питанням впровадження 5G та оптимізації радіоресурсів присвячено значну кількість сучасних досліджень, зокрема звіти аналітичних компаній GSMA та Deloitte. У звітах Ericsson Mobility Report за 2024 рік вказується, що до 2030 року понад половина глобального трафіку буде припадати на 5G-підключення. Проте більшість опублікованих робіт базується на теоретичних моделях або імітаційному моделюванні. Питання реальної продуктивності Massive MIMO в умовах специфічної забудови українських міст ("вуличних каньйонів"), де переважає багатопроменеве поширення сигналу та високий рівень інтерференції, потребує додаткового емпіричного підтвердження та верифікації на діючих мережах.

### *Мета і задачі дослідження*

Метою роботи є підвищення спектральної ефективності та якості обслуговування (QoS) у гетерогенних мобільних мережах 4G/5G шляхом розробки та вдосконалення методів адаптивного управління антенними системами Massive MIMO. Для досягнення мети вирішено наступні завдання:

1. Провести порівняльний аналіз архітектури гетерогенної мережі та особливостей обладнання 5G NR.
2. Виконати збір та статистичну обробку експериментальних даних з діючої мережі в умовах щільної міської забудови.
3. Оцінити вплив вертикального нахилу променя (D-Tilt) на показники SINR та пропускну здатність.
4. Верифікувати ефективність впровадження Massive MIMO порівняно з класичними антенами.

### *Результати дослідження*

Емпіричну основу дослідження склав масив даних, отриманий у результаті моніторингу сегмента мережі ПрАТ «Київстар» у центральному кластері міста Києва (Печерський район). Досліджуваний кластер охоплює 145 базових станцій, на яких розгорнуто 435 секторів. Загальний обсяг накопиченої інформації після процедур первинної очистки склав 1,24 ТБ.

Обробка масивів даних здійснювалася у середовищі Jupyter Notebook з використанням мови програмування Python 3.9 та спеціалізованих бібліотек Pandas і NumPy. Ключовий показник оцінки спектральної ефективності (SE):

$$SE = L.Tharp.bits.DL / (L.ChMeas.PRB.DL.Used * BW * T),$$

де  $L.Tharp.bits.DL$  - загальний обсяг переданих даних,  $L.ChMeas.PRB.DL.Used$  - кількість використаних ресурсних блоків,  $BW$  - смуга частот одного блоку (180 кГц),  $T$  - час спостереження.

Результати порівняльного аналізу показали, що перехід від схеми антен 2T2R/4T4R до активних антенних систем Massive MIMO (64T64R) забезпечив приріст середньої спектральної ефективності у 2,7 раза - з 1,8 до 4,8 біт/с/Гц. Це дозволило компенсувати високе загасання сигналу у діапазоні 2600 МГц та розширити зону впевненого прийому.

Таблиця 1

## Порівняльний аналіз показників ефективності (KPI) для різних конфігурацій

Показник ефективності	LTE (2T2R / 4T4R)	5G NR Massive MIMO (64T64R)	Приріст / Зміна
Середня спектральна ефективність (DL), біт/с/Гц	1,8 - 3,0	4,8	~2,7 раза
Коефіцієнт підсилення (Beamforming Gain) для PDSCH, дБ	—	9 - 11	—
Пропускна здатність на краю стільника (5-й перцентиль), Мбіт/с	2,4	8,9	+270%
Частка використання модуляції 256 QAM, %	12	35	+23 п.п.
Середня кількість просторових шарів (Layers) у ЧНН	1 - 2	6,8 - 10,2	—
Середня потужність передачі терміналу (UE Tx Power), дБ	Базова	-4	Зниження на 4 дБ

Важливим результатом є аналіз впливу вертикального кута нахилу (D-Tilt) на інтерференційну картину. Експериментально встановлено, що оптимальне значення кута є динамічним і залежить від щільності абонентів по поверххах. У зонах з висотною забудовою (20+ поверхів) використання адаптивного формування променів дозволило збільшити сумарний трафік сектору на 18%.

Дослідження показників висхідного каналу (Uplink) виявило, що Massive MIMO суттєво покращує чутливість приймального тракту базової станції. Завдяки когерентному додаванню сигналів від 64 антенних елементів, рівень теплових шумів фактично знижується, що дозволяє абонентським терміналам працювати на меншій потужності передачі (зниження на 4 дБ), що позитивно впливає на енергоспоживання смартфонів.

**Висновки і перспективи подальших досліджень**

У результаті проведеного комплексного науково-практичного дослідження, об'єктом якого стала діюча мережа ПрАТ «Київстар» у Печерському районі м. Києва, було детально проаналізовано та верифіковано ефективність впровадження активних антенних систем Massive MIMO (конфігурація 64T64R) у гетерогенних мережах стандарту 5G NR. Отримані дані дозволяють стверджувати, що перехід від класичних секторних антенних систем 2T2R до передових систем Massive MIMO забезпечує зростання середньої спектральної ефективності у 2,7 раза. Такий приріст є критично важливим показником для сучасних мегаполісів, оскільки він дозволяє операторам обслуговувати значно більшу кількість активних абонентів у тому самому частотному діапазоні, не втрачаючи при цьому високої якості зв'язку та стабільності з'єднання.

Разом із цим, результати моніторингу зафіксували суттєвий приріст пропускної здатності на краю стільника, який склав 270%. Це дає змогу оператору ефективно вирішувати проблему «мертвих зон» або ділянок зі слабким покриттям, гарантуючи користувачам стабільну роботу високопоточкових сервісів. Зокрема, це стосується безперебійного проведення відео-

конференцій та стрімінгу відеоконтенту у форматі Ultra HD (4K), навіть у години найбільшого (пікового) навантаження на мережу.

Окрему увагу в межах даної роботи було приділено глибокій оптимізації покриття у вертикальній площині. Завдяки застосуванню методів адаптивного формування променів та прецизійного налаштування кутів нахилу антен (D-Tilt) у діапазоні 6-8 градусів, вдалося підвищити рівень корисного сигналу на верхніх поверхах висотної забудови на 18%. Паралельно з цим було досягнуто мінімізації ефекту міжсекторної інтерференції, що позитивно позначилося на загальній завадостійкості системи.

Окрім суто мережевих показників, впровадження технології Massive MIMO продемонструвало позитивний вплив на енергоефективність абонентського обладнання. Висока чутливість приймального тракту базових станцій, що складається з 64 незалежних елементів, дозволила знизити середню потужність передачі смартфонів (UE Tx Power) на 4 дБ. Це безпосередньо сприяє зменшенню енергоспоживання пристроїв та подовженню терміну роботи їхніх акумуляторів.

Експериментальна оцінка використання технології Dynamic Spectrum Sharing (DSS) у діапазоні 2100 МГц підтвердила її високу доцільність як оптимального стратегічного інструменту для еволюційного розгортання 5G в Україні. Навіть з урахуванням витрат радіоресурсу на координацію між різними стандартами (LTE та NR), технологія забезпечила зростання загальної ємності сегмента мережі на 12-15%.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та формуванні верифікованої методики налаштування ключових параметрів Beamforming для умов надщільної міської забудови. Перспективи ж подальших досліджень у даному напрямку вбачаються у глибокій автоматизації процесів управління радіоресурсами. Зокрема, подальша робота буде спрямована на інтеграцію інструментів штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання (Machine Learning), що в осяжній перспективі дозволить побудувати повністю самоорганізовані телекомунікаційні системи (SON) майбутнього, здатні у реальному часі адаптуватися до мінливого трафіку та заводової обстановки.

### **Внесок авторів**

Анастасія ФОМКІНА – розробка дослідницької ідеї та постановка гіпотези; Роман КИРИЧЕНКО – опрацювання наукових джерел і теоретичне узагальнення; Катерина ДОМРАЧЕВА – проєктування дослідження, формування бази даних та представлення результатів; Дмитро МИРОНОВ – технічна реалізація, моделювання та проведення експериментальної перевірки.

### **Декларація про штучний інтелект**

Автор не використовував штучний інтелект при створенні матеріалів статті.

### **Конфлікт інтересів**

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

### **Список використаної літератури**

1. *ITU-T Recommendation Q.1701. Framework for IMT-2000 networks.* 2015. URL: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/2023/10/10/ff23-subscriptions/> (дата звернення: 03.01.2026).
2. *Facts and Figures 2023: Subscriptions.* ITU Statistics. 2023. URL: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/> (дата звернення: 03.01.2026).
3. *State of IoT 2025: Number of connected IoT devices growing 14% to 21.1 billion globally.* IoT Analytics. 2025. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> / (дата звернення: 03.01.2026).

4. Сенік В. В., Зачек О. І. Методологія дослідження впливу інформаційно-комунікаційних систем на удосконалення технологій дистанційного навчання. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. № 34 (1). С. 50-60.
5. Balushi Z. I. M., Porkodi S. *Digital employee experience and organizational performance: a study of the telecommunications sector in Oman*. *Business, Management and Economics Engineering*. 2023. Vol. 21, № 2. P. 248-268.
6. Niyato D. et al. *From Literature to Insights: Methodological Guidelines for Survey Writing in Communications Research*. Arxiv.org. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2509.25828> (дата звернення: 03.01.2026).
7. *Ericsson Mobility Report 2024: Mobile data traffic forecast*. Ericsson Reports. 2024. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast> (дата звернення: 03.01.2026).
8. Гриненко В. Повноцінний запуск 5G в Україні відклали до завершення воєнного стану. *The Village Україна*. 2023. 3 жовтня. URL: <https://www.the-village.com.ua/> (дата звернення: 03.01.2026).
9. Телеком-тренди світу 2023. *Kyivstar Business Hub*. 2023. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/svitovi-telekom-trendy-na-2023-rik> (дата звернення: 03.01.2026).
10. Прогнози розвитку галузі високих технологій, медіа та телекомунікацій на 2023 рік. *Deloitte Ukraine*. 2023. URL: <https://www2.deloitte.com/ua/uk/pages/press-room/deloitte-technology-media-telecom-2023-predictions.html> (дата звернення: 03.01.2026).
11. Доходи мобільних операторів України за I півріччя 2025 року. Аналітичний звіт DEPS. 2025. URL: <https://deps.com.ua/uk/ekonomika/dokhody-mobilnix-operatoriv> (дата звернення: 03.01.2026).
12. Доходи сектору зв'язку України у 2024 році: оприлюднено дані. *Prompolinform*. 2024. URL: <https://prompolit.com/doslidzhennya/64723/> (дата звернення: 03.01.2026).
13. *The Mobile Economy 2025*. GSMA Intelligence. 2025. URL: <https://www.gsmainelligence.com/> (дата звернення: 03.01.2026).
14. *The State of Worldwide Connectivity in 2023*. Ookla. 2023. URL: <https://www.ookla.com/articles/worldwide-connectivity-mobile-fixed-networks-digital-divide-2023> (дата звернення: 03.01.2026).
15. *Cisco Annual Internet Report (2018-2023)*. Cisco Systems. 2023. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (дата звернення: 03.01.2026).
16. *Customer Churn Prediction in Telecommunication Industry: A Literature Review*. Preprints. 2024. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202403.0585/v2> (дата звернення: 03.01.2026).

A. Fomkina, R. Kyrychenko, K. Domracheva, D. Myronov

## RESEARCH AND OPTIMIZATION OF SPECTRAL EFFICIENCY IN HETEROGENEOUS 4G/5G NETWORKS USING MASSIVE MIMO TECHNOLOGY

The article presents a comprehensive study on methods for increasing spectral efficiency and throughput in modern mobile communications networks, specifically addressing the transition from LTE-Advanced Pro to 5G NR within dense urban environments. The research relevance is driven by the exponential growth of mobile data traffic (up to 45% annually) and the critical scarcity of available frequency resources, necessitating the deployment of advanced spatial multiplexing technologies. The study focuses on radio resource management processes in the Kyivstar heterogeneous network, analyzing a cluster of 145 base stations (comprising 435 sectors) in the Pechersk district of Kyiv, an area characterized by complex "street canyon" propagation conditions and high-rise density.

The methodology is based on analyzing large datasets (Big Data) gathered from network management systems (OSS Huawei U2020) and validating them through field drive test results using Rohde & Schwarz scanners. Data processing and predictive modeling were performed in the Jupyter Notebook environment using the Python 3.9 programming language. The study utilized specialized libraries such as Pandas and NumPy for statistical analysis, as well as XGBoost machine learning algorithms to forecast network behavior and interference patterns under varying Beamforming parameters.

*It was established that the deployment of Massive MIMO 64T64R Active Antenna Systems (AAS) provides a significant advantage over classical 2T2R and 4T4R schemes, yielding a 2.7-fold increase in average spectral efficiency to reach 4.8 bps/Hz. Experimental results demonstrate that adaptive beamforming control, with optimized vertical tilt (D-Tilt) in the range of 6-8 degrees, increases signal levels on high-rise building floors (20+ stories) by 18% while simultaneously minimizing inter-sector interference (overshooting). Furthermore, the study reveals a 270% increase in throughput at the cell edge, ensuring stable Ultra HD (4K) video streaming even during peak load hours.*

*An important finding regarding energy efficiency indicates that the high sensitivity of the 64-element antenna array allows for a reduction in user terminal transmission power (UE Tx Power) by 4 dB, thereby extending the battery life of subscriber devices. The research also validates the efficacy of Dynamic Spectrum Sharing (DSS) in the 2100 MHz band, showing a 12-15% increase in total segment capacity despite the signaling overhead required for coordinating LTE and NR standards. Statistical analysis confirmed that the usage of high-order modulation (256QAM) reached 35%, achieving a median data transfer rate of 45 Mbps. Practical recommendations for configuring handover thresholds and beam coordination are formulated to minimize mutual interference. The findings can be utilized by mobile operators for planning and optimizing 5G NR networks in large cities and laying the groundwork for future Self-Organizing Networks (SON).*

**Keywords:** 5G NR, Massive MIMO, Beamforming, spectral efficiency, heterogeneous networks, QoS, SINR, OSS statistics.

---

Надійшла до редакції: 08.12.2025

Прийнята до друку: 21.04.2026

Опубліковано: 27.04.2026

© 2026 Фомкіна А. В., Кириченко Р. М., Домрачева К. О., Миронов Д. В.

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