

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОСТУПУ У ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто підходи до оптимізації архітектури доступу в широкосмугових телекомунікаційних мережах нового покоління. Проаналізовано еволюцію радіомережевого доступу (RAN) у напрямі віртуалізації, відкритості та дезагрегації функцій, що забезпечує гнучкий розподіл навантаження між центральними (CU) та розподіленими (DU) блоками. Проведено порівняльний аналіз варіантів функціонального поділу, визначених стандартами 3GPP (Options 2, 6, 7, 8), з урахуванням вимог до пропускної здатності, затримки та масштабованості мережі. Встановлено, що оптимізація RAN на основі раціонального вибору точки функціонального розподілу сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів, зниженню енергоспоживання та забезпеченню високої якості користувацького досвіду. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні архітектур 5G/6G-мереж, орієнтованих на інтеграцію інтелектуальних технологій, хмарних обчислень та низьколатентного зв'язку.

Ключові слова: широкосмугова мережа, радіомережевий доступ (RAN), функціональний поділ, дезагрегація, затримка, ефективність.

Abstract

The paper examines approaches to optimizing the access architecture in next-generation broadband telecommunication networks. The evolution of the radio access network (RAN) is analyzed in the context of virtualization, openness, and functional disaggregation, enabling flexible load distribution between the Central Unit (CU) and Distributed Unit (DU). A comparative analysis of functional split options defined by 3GPP standards (Options 2, 6, 7, and 8) is presented, taking into account network capacity, latency, and scalability requirements. It is established that RAN optimization based on a rational choice of the functional split point contributes to improved resource utilization efficiency, reduced energy consumption, and enhanced quality of user experience. The obtained results can be applied in the design of 5G/6G network architectures focused on the integration of intelligent technologies, cloud computing, and low-latency communication.

Keywords: broadband network, radio access network (RAN), functional split, disaggregation, latency, efficiency.

Вступ

Стрімкий розвиток цифрової економіки, індустрії 4.0, інтелектуальних транспортних систем, телемедицини та Інтернету речей (IoT) зумовлює необхідність створення нових телекомунікаційних архітектур, здатних забезпечити надвисокі швидкості передавання даних, мінімальні затримки та масове підключення пристроїв. Сучасні широкосмугові бездротові мережі виступають не лише засобом передавання інформації, а й базовою платформою цифрової взаємодії між користувачем, машинами та навколишнім середовищем [1].

Перехід від четвертого до п'ятого покоління зв'язку (4G → 5G) став визначальним етапом еволюції мобільних систем, спрямованим на подолання обмежень попередніх технологій та формування основ для майбутніх мереж шостого покоління (6G). Архітектура 5G відрізняється відкритістю, віртуалізацією функцій, гнучкістю сценаріїв доступу та інтеграцією передових технологій — таких як масивні антенні решітки (massive MIMO), обчислення на периферії мережі (MEC), віртуалізація функцій мережі (NFV) та сегментування мережі (network slicing) [2].

Подальший розвиток телекомунікаційних систем у напрямку 6G, що нині перебуває на етапі активних досліджень і стандартизації, орієнтований на глибоку інтеграцію комунікацій, штучного інтелекту (AI), квантових технологій, хмарних і туманних обчислень (cloud/fog

computing). Її концепція передбачає створення єдиної інтелектуальної екосистеми з конвергенцією наземних, повітряних і космічних мереж, що забезпечують самоорганізацію, адаптивне управління ресурсами та мінімальні затримки передавання даних [3].

У цьому контексті ключовим напрямом є оптимізація архітектури радіомережевого доступу (RAN), яка забезпечує ефективну взаємодію між користувацьким обладнанням та ядром мережі. Еволюція RAN передбачає перехід до гнучких моделей доступу, поєднання централізованих і розподілених обчислювальних ресурсів, а також підвищення рівня масштабованості, енергоефективності та стійкості до навантажень. Особливу увагу приділено аналізу варіантів функціонального поділу, визначених стандартами 3GPP, та оцінці їх ефективності з погляду сучасних вимог до продуктивності й затримки у широкосмугових телекомунікаційних мережах нового покоління [4].

Результати дослідження

У ході дослідження проведено системний аналіз еволюції бездротових технологій нового покоління, що забезпечують основу для розвитку мереж 5G та 6G. Визначено ключові тенденції у формуванні архітектури мережевого доступу, спрямовані на підвищення ефективності, пропускної здатності та гнучкості інфраструктури мобільних систем [5].

Показано, що технологія фіксованого бездротового доступу (FWA) на основі 5G NR є перспективним рішенням для усунення цифрової нерівності, забезпечуючи гігабітні швидкості у поєднанні з низькою затримкою. Використання mmWave-спектра, масивних антенних систем (massive MIMO) та формування променя (beamforming) дозволяє досягати продуктивності, порівнянної з волоконно-оптичними мережами, забезпечуючи високу якість користувацького досвіду та розширення сценаріїв застосування — від потокового мультимедіа до промислових IoT-рішень [6].

Доведено, що архітектура радіомережевого доступу (RAN) зазнала суттєвих змін у напрямі віртуалізації, відкритості та дезагрегації функцій, що забезпечує гнучкий розподіл навантаження між центральними (CU) та дистрибутивними (DU) блоками. Проведено порівняльний аналіз варіантів функціонального поділу, визначених у специфікаціях 3GPP, зокрема Options 2, 6, 7 та 8 [7]. Результати показали, що:

Option 2 (PDCP/RLC Split) забезпечує оптимальний баланс між централізацією обчислень і затримками передачі, підтримує Dual Connectivity та ефективну інтеграцію між 4G і 5G;

Option 6 зменшує вимоги до пропускної здатності фронтхолу, залишаючи централізованим управління плануванням радіоресурсів;

Option 7 (intra-PHY) забезпечує високий рівень спільного використання ресурсів і координації осередків, проте потребує підвищених вимог до затримки й пропускної здатності каналу;

Option 8 є найбільш централізованим, проте вимагає надвисоких характеристик фронтхолу, що обмежує його практичне застосування у великих мережах.

Установлено, що ефективність архітектури RAN визначається оптимальним вибором точки функціонального розподілу між CU і DU з урахуванням типу сервісу, топології мережі та вимог до затримки. Впровадження HLS (High Layer Split)-підходу забезпечує кращу масштабованість, зниження енергоспоживання та підвищення надійності роботи системи, тоді як LLS (Low Layer Split)-архітектури доцільні у сценаріях із високими вимогами до координації масивних антен [1-4].

Отримані результати підтверджують, що розвиток архітектури 5G створює фундамент для побудови інтелектуальних мереж шостого покоління (6G), які орієнтовані на глибоку інтеграцію з технологіями штучного інтелекту, хмарних обчислень, терагерцового спектра та фотонних рішень. Такі мережі матимуть здатність до самоорганізації, адаптивного розподілу ресурсів і забезпечення ультранизької затримки зв'язку у масштабі глобальної цифрової інфраструктури.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що оптимізація доступу у широкосмугових телекомунікаційних мережах є ключовим чинником підвищення ефективності функціонування сучасних систем зв'язку. Технологія 5G NR створює фундамент для реалізації гнучких і масштабованих архітектур, які забезпечують підтримку різномірних сервісів із різними вимо-

гами до швидкості, затримки та надійності передавання даних.

Проаналізовано особливості функціонального розподілу радіомережевого доступу (RAN) між Central Unit (CU) та Distributed Unit (DU), що дозволяє здійснювати дезагрегацію оброблення радіосигналів і оптимізувати використання мережевих ресурсів. Визначено, що високорівневі варіанти поділу (HLS) є придатними для сценаріїв із обмеженими вимогами до затримки, тоді як низькорівневі варіанти (LLS) забезпечують кращу координацію радіоресурсів і підвищену ефективність у щільних мережах, але потребують значно більшої пропускної здатності та стабільності транспортної інфраструктури.

З'ясовано, що вибір оптимального варіанта функціонального поділу має базуватись на комплексному врахуванні технічних (тип мережі, топологія, параметри затримки) та економічних (вартість інфраструктури, обсяг наданих послуг) факторів. Рациональне поєднання централізованого та розподіленого підходів дозволяє забезпечити баланс між продуктивністю, енергоефективністю та витратами на розгортання мережі.

Таким чином, удосконалення архітектури доступу у широкосмугових телекомунікаційних мережах на основі дезагрегації функцій RAN та оптимального вибору варіанту поділу є стратегічним напрямом розвитку мобільних систем зв'язку п'ятого та шостого поколінь, орієнтованих на створення інтелектуальних, гнучких і самоорганізованих мереж майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Saba, J. Salo, K. Ruttik, R. Jäntti, Using existing base station sites for 5G millimeter-wave fixed wireless access: antenna height and coverage analysis, in IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), vol. 2024 (2024), pp. 1–6
2. P. Skokowski, K. Malon, M. Kryk, K. MaÅlanka, J.M. Kelner, P. Rajchowski, J. Magiera, Practical trial for low-energy effective jamming on private networks with 5G-NR and NB-IoT radio interfaces. IEEE Access 12, 51 523–51 535 (2024)
3. M. Klinkowski, Optimized planning of DU/CU placement and flow routing in 5G packet Xhaul networks. IEEE Trans. Netw. Serv. Manag. 21(1), 232–248 (2024)
4. P. Baguer, G.M. Yilma, E. Municio, G. Garcia-Aviles, A. Garcia-Saavedra, M. Liebsch, X. Costa-Pérez, Attacking O-RAN interfaces: threat modeling, analysis and practical experimentation. IEEE Open J. Commun. Soc. 5, 4559–4577 (2024)
5. Васильківський М., Коломієць А., Будах М., Прикмета А., Олійник А. Технологічні аспекти впровадження програмно-керованих мереж 5G та 6G. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2024. Вип. № 56. С. 335-344.
6. Vasylykivskiy M. V., Polishchuk L. K., Amirgaliyeva S., Iskakova A., Kaczmarek C. Optimal design of linear paths for flexible optical networks. Proc. SPIE 12985 «Optical Fibers and Their Applications 2023», 20 December 2023. 2023. 1298502. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3022237>.
7. Васильківський М. В. Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах [Текст] / М. В. Васильківський, Д. В. Нікітович, О. Болдирева // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2022. – № 4. – С. 5-17.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskiy@gmail.com

Олійник Андрій Олегович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Коваль Максим Петрович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maks.koval95@icloud.com

Vasylykivskiy Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskiy@gmail.com

Oliinyk Andrii O. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Koval Maksym P. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maks.koval95@icloud.com