

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕЖНОГО РІВНЯ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ 5/6G

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*Здійснено дослідження мережного рівня мобільних систем на основі технології 6G, що формує передумови покращення продуктивності, надійності та ефективності телекомунікаційної мережі.*

**Ключові слова:** телекомунікаційне обладнання, пропускна здатність мережі, обсяг покриття, технологія програмно-конфігурованого радіо, система терагерцового зв'язку.

### Abstract

*A study of the network level of mobile systems based on 6G technology is carried out, which forms the prerequisites for improving the performance, reliability and efficiency of the telecommunications network.*

**Keywords:** telecommunication equipment, network capacity, coverage, software-defined radio technology, terahertz communication system.

### Вступ

Станом на 2023 рік системи 5G розгортаються в багатьох містах, але їх функції не використовуються у повному обсязі. Першим етапом розгортання технології 5G є впровадження програм розширеного мобільного широкопasmового зв'язку (eMBB). Другим етапом впровадження систем 5G є наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) і автономні системи систем 5G [1]. Подібно попереднім поколінням телекомунікаційного обладнання, системи 6G розширяють можливості мереж 5G і забезпечать ринок інформаційних послуг новими додатками та послугами. Оскільки співпраця між галузями є ключовим аспектом систем 5G, які впливають на телекомунікаційну галузь, а також на інші галузі, такі як автомобільна, охорона здоров'я, харчова, автоматизації виробництва та інших, технології 6G будуть відповідати підходам технологій 5G, включаючи міжгалузеву співпрацю та створення нових програм. Дослідження телекомунікаційного обладнання 6G було розпочато в фокус-групі Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) з технологій для мережі 2030 (FG NET 2030). При цьому, розглянуто майбутню мережеву архітектуру, вимоги, сценарії використання та можливості майбутніх мобільних мереж до 2030 року, а також перші результати досліджень стосувались технології, програми та рушійний сил телекомунікаційного ринку за межами технології 5G. Отже, розгортання мереж 6G може початися з 2030 року і буде перекиватися системами 5G, як це зроблено для попередніх стільникових систем. При розробленні концепції систем 6G були запропоновані нові функції та програми, зокрема компоненти зв'язку та мережі з підтримкою AI. Алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання допоможуть оптимізувати бездротові системи, покращити продуктивність мережі та створити нові сервіси та програми [2].

Міжнародний регулятор ITU визначає розподіл спектру технології 6G для різних послуг і програм. При цьому, робоча ширша смуги пропускання систем 6G дозволяє підтримувати підвищені швидкості передачі даних та збільшений обсяг інформаційного трафіку. Таким чином, розподіл спектру 6G відіграватиме важливу роль в процесі проектування систем та мереж 6G.

У системах та мережах 6G розподіл спектру поширюється в діапазоні терагерцових частот. Регіональні регулюючі органи, такі як Європейська конференція поштових і телекомунікаційних адміністрацій (CEPT) в Європі та Федеральна комісія зв'язку (FCC) в США відіграють досить важливу роль у процесі прийняття рішень в ITU. Рекомендації ITU визначать вимоги до технології побудови систем та мереж 6G, потенційні програми та послуги. Фактичні характеристики технології 6G можна знайти в роботах 3GPP або IEEE. Тому, для розробки технічних специфікацій систем 6G бездротовий канал 6G визначається в 3GPP або IEEE. При цьому, розробляється його математична модель і планується

сценарій тестування для оцінки запропонованих технічних рішень або алгоритмів. В результаті, у стільникових системах в основному використовуються емпіричні моделі каналів, такі як моделі каналів ITU. Їхні тестові сценарії також відрізняються. Тому, кожен блок бездротового зв'язку та мережевих систем вибирається відповідно до вимог систем 6G. Цей крок обговорюється та визначається в стандартах бездротового зв'язку, таких як 3GPP та IEEE. Отже, постачальники або оператори стільникових систем розроблятимуть мережеві компоненти та послуги [3].

Метою роботи є дослідження мережного рівня мобільних систем 6G полягає в розробці та оптимізації нових технологій, протоколів та архітектури, які забезпечують покращення продуктивності, ефективності та надійності мобільних мереж. Основні мети дослідження мережного рівня 6G включають: Висока пропускна здатність: Дослідження спрямовані на розробку технологій, що забезпечують значно більшу пропускну здатність, щоб впоратися з ростом обсягу даних, високоякісним відео, віртуальною реальністю та іншими додатками з великим обсягом даних. Низька затримка: Дослідження спрямовані на зменшення затримки в мережі, щоб підтримувати вимоги реалізації критичних застосунків, таких як автономні автомобілі, інтерактивні додатки та дієздатність в реальному часі. Велика ємність підключення: Дослідження спрямовані на розробку технологій, що дозволяють підтримувати велику кількість одночасних підключень до мережі, щоб задовольнити вимоги розвитку Інтернету речей (IoT) та підключених пристроїв. Енергоефективність: Дослідження спрямовані на зменшення споживання енергії мережами 6G, включаючи оптимізацію роботи базових станцій, енергозберігаючих протоколів та механізмів управління енергією, щоб підвищити тривалість роботи пристроїв та зменшити негативний вплив на довкілля [4].

### Основна частина

Очікується, що в системах 6G вдосконалені методи розподілу спектра покращать використання ресурсів та гнучкість робочого діапазону частот, враховуючи неліцензовані піддіапазони. Таким чином, за допомогою методів спільного використання робочого спектру можливо організувати його спільне використання багатьма операторами, сторонніми операторами або місцевими операторами. Агрегація носійних в технології LAA (Licensed Assisted Access) забезпечує підвищення швидкості передачі даних у мобільних мережах за допомогою комбінування різних частотних діапазонів для передачі даних, забезпечуючи високу швидкість передачі та більш ефективне використання доступного спектру.

Отже, LAA технологія дозволяє використовувати неліцензований смугу частот (наприклад, 5 ГГц) в комбінації з ліцензованими діапазонами (наприклад, LTE на 2,6 ГГц). Таким чином, збільшується загальна пропускна здатність мережі та покращується якість обслуговування користувачів.

Важливою технологічною перевагою мобільних мереж 4G та 5G у порівнянні з попередніми поколіннями мобільних технологій є агрегація носійних сигналів. Дисбаланс між спектрами висхідного і низхідного зв'язку може бути однією з причин дефіциту спектру, він не завжди є таким і не є єдиним фактором, який призводить до дефіциту коли багато компаній і організацій борються за доступ до тих самих діапазонів радіочастот. У такій ситуації може виникнути дисбаланс між спектрами висхідного і низхідного зв'язку, оскільки різні оператори мобільного зв'язку можуть користуватися різними діапазонами радіочастот для передачі і отримання даних. Це може призвести до того, що попит на один діапазон радіочастот перевищує його доступну кількість, тоді як інші діапазони можуть залишатися недостатньо використаними.

Дисбаланс призводить до низького рівня використання стільникових систем. Технології спільного використання спектру та удосконалені дуплексні системи вирішують проблеми дисбалансу. Методи повного дуплексування в системах 5G дозволяють мобільним операторам розподіляти гнучкий спектр та підвищувати коефіцієнт використання спектра носійних частот. Однак вони не були прийняті в системах 5G через недостатню кількість теоретичних і експериментальних результатів. Замість цього в системах 5G було прийнято використання функції гнучкого спектру, наприклад, метод TDD передачі даних в бездротових мережах, де передача та прийом даних відбуваються в різні часові інтервали на одному і тому ж каналі зв'язку.

У TDD системах передача даних поділяється на часові слоти, які можуть бути використані для передачі даних в один час або для прийому даних в інший час. Це означає, що у той час, коли один пристрій передає дані, інший пристрій може приймати дані, і навпаки. Технологія TDD дозволяє ефективно використовувати канал зв'язку, оскільки часові слоти можуть бути присвоєні тільки тим пристро-

ям, які в даний момент використовують канал зв'язку. Це дозволяє зменшити колізії та перенавантаження мережі та підвищити швидкість передачі даних. Технологія TDD часто використовується в мережах зв'язку, таких як мобільні телефонії, Wi-Fi, Bluetooth та інші бездротові мережі. У порівнянні з дуплексом з частковим розділенням (Half Duplex), де пристрій може передавати або приймати дані, але не може робити ці обидві речі одночасно, TDD дозволяє збільшити пропускну здатність каналу зв'язку та покращити ефективність передачі даних. Залежно від варіантів використання або конфігурації використання спектру можна налаштувати робочі спектри висхідного та низхідного каналу передавання. У мережах 6G передбачається більш гнучкий розподіл спектру шляхом спільного використання не лише спектру, але й часу та інших мережевих ресурсів [1].

Системи 5G передбачають віртуалізацію мережі. Це означає, що фізичні компоненти мережі будуть замінені на програмні еквіваленти, що дає змогу збільшити ефективність мережі та знизити вартість її розгортання та підтримки. Віртуалізація мережі дозволяє зменшити час, необхідний для розгортання нових послуг та функцій мережі, забезпечуючи більш гнучкий та швидкий розвиток мережі. Крім того, це дозволяє більш ефективно використовувати ресурси мережі та зменшити витрати на її розгортання та підтримку.

Віртуалізація мережі є важливою складовою 5G, оскільки нова мережа потребує більшої гнучкості та ефективності, щоб забезпечити високу якість послуг та підтримку масштабування мережі в майбутньому. Цей новий підхід до проектування дозволяє нам відокремити програмне забезпечення від апаратного забезпечення та передавати мережевий компонент до периферійних мереж або інших мереж, коли користувачеві потрібна певна функція. Завдяки такій віртуалізації мобільні оператори можуть отримати багато переваг, таких як зменшення капітальних витрат (CAPEX) та операційних витрат (OPEX), скорочення часу на розгортання мережевої послуги та покращення масштабованості мережі. Такий підхід корисний для оптимізації розподілу мережевих ресурсів. На цій віртуалізації мережі базується мережеве розшарування (Network Slicing) в системах 5G, яке дозволяє створювати віртуальні мережеві середовища з різними характеристиками для різного використання мережі, зокрема мобільний Інтернет, медичні послуги, автомобільна транспортна система [2].

Кожен з цих віртуальних сегментів (slice) мережі може мати свої власні характеристики, такі як пропускну здатність, затримка, надійність та безпека, та буде налаштований для відповідних телекомунікаційних засобів мережі. Такі віртуальні сегменти можуть бути створені та настроєні автоматично за допомогою програмного забезпечення мережі. Network Slicing дозволяє мережі 5G забезпечувати розширений спектр послуг та підтримувати збільшену кількість підключених пристроїв з різними потребами в реальному часі. Це може бути корисно для різних промислових та бізнес-застосунків, таких як медицина, автотранспорт, виробництво, дистанційна робота [3]. Зокрема, створення віртуальних наскрізних мереж, пристосованих до різних додатків 5G, таких як eMBB, URLLC і mMTC дозволить системам 5G бути більш масштабованими і швидше адаптуватися до нових послуг. Розподіл мережі на сегменти став однією з ключових функцій системи 5G. З метою підтримки швидкого оновлення мережевого обладнання та пристроїв кінцевих користувачів, в системах 6G продовжено впровадження архітектури, що розділяє програмне та апаратне забезпечення. З точки зору автономної модернізації, сучасні телекомунікаційні пристрої завдяки технологіям автоматичного визначення параметрів апаратного забезпечення (Hardware Profiling) та автоматичного визначення оптимального програмного забезпечення (Software Selection) можуть оцінювати можливості апаратного забезпечення та використовувати ефективно програмне забезпечення для оптимальної працездатності [4].

Автоматичне визначення параметрів апаратного забезпечення дозволяє пристрою отримувати інформацію про функціональні характеристики процесора, пам'яті, диска та інших компонентів пристрою. Така інформація може бути використана для вибору оптимальних налаштувань програмного забезпечення, яке використовується на телекомунікаційній пристрої. Автоматичний вибір оптимального програмного забезпечення дозволяє телекомунікаційному пристрою забезпечувати оптимальну працездатність та більш ефективно використовувати ресурси. Програмне забезпечення може бути підібране на основі параметрів апаратного забезпечення та вимог до виконуваних задач, що дозволяє досягти максимальної продуктивності та ефективності роботи телекомунікаційного пристрою. Отже, автономне адаптування телекомунікаційних пристроїв за допомогою автоматичного визначення параметрів апаратного забезпечення та автоматичного визначення оптимального програмного забезпечення є важливою складовою забезпечення ефективності та продуктивності телекомунікаційних пристроїв в сучасних інфокомунікаційних мережах. Оскільки, традиційно апаратне і програмне забезпечення є спільним для телекомунікаційних пристроїв та систем, тому неможливо окремо модернізува-

ти їхні функції та можливості, такі як кількість антен, роздільну здатність АЦП і схеми кодування з корекцією помилок [1].

Технологія програмно-конфігурованого радіо (SDR) відповідає підходу автономного адаптування телекомунікаційних пристроїв. Основна ідея SDR полягає у тому, що програмне забезпечення може контролювати технічні параметри радіообладнання, такі як частота, ширина смуги та модуляція, що дозволяє адаптувати роботу радіо до змінних умов оточення, таких як інтерференція, забруднення частотного спектра та зміна топології мережі. Це дає можливість пристосовувати телекомунікаційні пристрої до потреб користувачів і покращувати ефективність мережі, знижуючи при цьому витрати на обслуговування та управління мережею. Однак у минулому SDR технологія не була настільки ефективною, як було бажано, оскільки обчислювальна потужність комп'ютерів була обмеженою, що зробило досить важкою реалізацію програмно-керованої радіосистеми, яка вимагала великої кількості обчислювальних ресурсів. Крім того, ранні версії програмного забезпечення для SDR часто мали обмежену функціональність та не забезпечували достатньої ефективності [2].

Однак з плином часу технологія SDR стала все більш ефективною, особливо з появою нових технологій, таких як FPGA та DSP, які забезпечують високу обчислювальну потужність та можливості для програмного забезпечення. Також стандарти радіо- та мережевих протоколів, такі як LTE та 5G, постійно вдосконалюються для підтримки SDR технологій та забезпечення їх сумісності з іншими радіообладнанням. Отже, хоча SDR технологія може не бути настільки поширеною, як було бажано, вона все ж може бути дуже ефективною та має потенціал для дальшого розвитку. Нещодавній розвиток NBIC та технологій антенних систем дозволив покращити апаратні можливості та забезпечити гнучку адаптацію до швидкої модернізації апаратної частини телекомунікаційної системи. Крім того, алгоритми ШІ (штучного інтелекту) та МН (машинного навчання) можуть бути корисними для оптимальної настройки алгоритмів приймача на апаратній платформі та для побудови інтелектуального фізичного рівня. ШІ може бути використаний для вирішення завдань автоматичної настройки та оптимізації параметрів алгоритмів приймача. Наприклад, використання алгоритмів генетичного алгоритму або інших алгоритмів оптимізації може допомогти знайти найбільш оптимальні значення параметрів алгоритмів приймача для певної задачі. МН може бути використаний для навчання приймача розпізнавати різні сигнали та шуми. Наприклад, можна використовувати навчальні набори даних для навчання нейронної мережі розпізнавати різні типи сигналів та шумів та приймати рішення про оптимальні налаштування алгоритмів приймача на основі цієї інформації. У цілому, використання алгоритмів ШІ та МН може допомогти зробити алгоритми приймача більш ефективними та оптимальними на певній апаратній платформі та забезпечити побудову інтелектуального фізичного рівня, який може адаптуватися до різних умов роботи. Традиційний стільниковий зв'язок і мережі зазвичай розробляються і розгортаються із заздалегідь визначеною конфігурацією систем, що вимагає ітеративного методу проб і помилок для кожного сценарію. У традиційних системах стільникового зв'язку перед встановленням зв'язку необхідно виконати процес розгортання мережі, що може займати значний час і коштувати значні кошти. Крім того, підтримка мережі вимагає зміни конфігурації та налаштування обладнання відповідно до потреб користувачів та різних сценаріїв використання. Тому для традиційних систем зазвичай потрібен ітеративний метод проб і помилок для кожного сценарію. Цей процес може включати в себе встановлення різних параметрів мережі та обладнання, перевірку та налаштування різних протоколів зв'язку та рішень щодо управління ресурсами [3].

У таблиці 1 узагальнено вимоги до технології 6G з точки зору мережного рівня.

Таблиця 1. Вимоги до мережевого рівня

	Нарізання	Розгортання сервісу за допомогою нарізки	Пропускна здатність мережі	Аналіз на основі даних	Енергоспоживання	Обсяг покриття
NET 2020	Обмежений сервіс нарізки	Деякі години	100 Гбіт/с та деякі мільярдів пристроїв	Централізовано в хмарі	Помірне	Окремо наземний і супутниковий
NET 2030	Комплексна послуга нарізки	Менше, ніж за кілька годин	1 Тбіт/с та трильйон пристроїв	Розподілені на основі штучного інтелекту	Низьке	Інтегрований наземний та супутниковий

Однією з ключових вимог до систем 6G є значно швидша передача даних, ніж у системах 5G. По суті, розширена смуга пропускання дозволяє підтримувати вищі швидкості передачі даних та збільшений обсяг мережевого трафіку. Робочі смуги частот систем 6G можуть знаходитись в діапазонах довжин хвиль вище 95 ГГц.

## Висновки

Основними перевагами використання телекомунікаційного обладнання 6G є величезна пропускна здатність, мініатюрні антени, проникнення крізь непровідні матеріали, такі як одяг, дерево, пластмаси, кераміка і папір та мінімальний вплив на організм людини. З іншого боку, ключовими проблемами впровадження систем 6G є малий радіус дії через розсіювання і поглинання радіосигналів пилом і дощем, обмежена довжина поширення радіосигналів (не проникають крізь метал і воду), складність виявлення, висока вартість телекомунікаційного обладнання: детекторів, генераторів і модуляторів.

Багато постачальників мобільного зв'язку розглядають терагерцовий діапазон як відправну точку для експериментів з технологіями 6G. Терагерцові діапазони забезпечують величезну пропускну здатність, але з ними пов'язано багато технологічних проблем. Терагерцові діапазони, як і спектр mmWAVE, залежать від умов навколишнього середовища та погоди, а покриття терагерцових діапазонів становитиме 100 м через високий рівень завад та шуму.

Системи терагерцового зв'язку (також відомі як субміліметровий зв'язок) будуть ключовою частиною систем 6G, оскільки для використання технологій 6G, включаючи віртуальну реальність і потокове відео у форматі 8K, потрібна надширока смуга пропускання. Основні характеристики терагерцового діапазону можна підсумувати наступним чином: втрати на поглинання, ослаблення потужності сигналів в радіолінії, надширококутність і надзвичайно спрямований промінь радіопередавача.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ITU-T, FG NET-2030 Technical Report on Network 2030. Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030 (June 2020)
2. W. Tang, X. Li, J.Y. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng, T.J. Cui, Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and experimental results. J. China Commun. 16(5), 46–61 (2019)
3. Васильківський, М., Нікітович, Д., & Болдирева, О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>
4. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)

**Якубівська Наталя Володимирівна** — студентка групи ТКС-21мсз, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [nakubivska@gmail.com](mailto:nakubivska@gmail.com)

**Буїницький Максим Васильович** — студент групи ТКР-22мс, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [Maxxim.byinytciu@gmail.com](mailto:Maxxim.byinytciu@gmail.com)

**Горовенко Дмитро Олександрович** — студент групи ТКР-22мс, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [gorovdima@gmail.com](mailto:gorovdima@gmail.com)

Науковий керівник: **Васильківський Микола Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Yakubivska Natalia V.** - student of the group TKS-21msz, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [nakubivska@gmail.com](mailto:nakubivska@gmail.com)

**Byunitskyi Maksym V.** - student of the TKR-22ms group, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [Maxxim.byinytciu@gmail.com](mailto:Maxxim.byinytciu@gmail.com)

**Horovenko Dmytro O.** - student of the TKR-22ms group, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [gorovdima@gmail.com](mailto:gorovdima@gmail.com)

Supervisor: **Vasykivskiy Mykola V.** — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia