ВСТУП

Сучасні мережі 5G надають широкі можливості для підвищення якості зв’язку, забезпечуючи високу швидкість передачі даних, низькі затримки та стабільність підключення. Водночас ефективне функціонування таких мереж потребує комплексного підходу до оцінки та оптимізації ключових показників якості обслуговування (QoS, Quality of Service) та сприйняття користувачем (QoE, Quality of Experience). Це питання набуває особливої актуальності на фоні стрімкого зростання числа підключених пристроїв і розширення спектра сучасних цифрових сервісів. Сьогодні неможливо уявити суспільство без високошвидкісного мобільного Інтернету, адже він є невіддільним елементом нашого життя під час забезпечення базових потреб. І поки на даний момент у великій частині країн введено для комерційних цілей мобільну мережу п’ятого покоління (Fifth Generation, 5G), вже активно проводяться наукові дослідження та розробки наступного шостого покоління (Sixth Generation, 6G). Як і раніше, елементами модернізації та покращення стануть такі основні показники, як пропускна здатність, затримка, діапазон частот, щільність підключення та мобільність.

Мета роботи – оптимізація мереж мобільного зв'язку на базі 5G/6G з використанням штучного інтелекту.

Об’єкт дослідження – процес використання штучного інтелекту в мережах мобільного зв'язку.

Предмет дослідження – моделі та алгоритм підвищення якості мереж мобільного зв'язку на базі 5G/6G.

Дослідження передбачає теоретичний аналіз архітектури 5G, практичну оцінку показників QoS та QoE, а також розробку рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування сучасних телекомунікаційних систем.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ МЕРЕЖ 5G

1.1 Основні принципи побудови мереж 5G

Мережі п’ятого покоління (5G) представляють собою значний етап розвитку мобільних комунікацій, спрямований на забезпечення високої пропускної здатності, мінімальної затримки та підтримки великої кількості підключених пристроїв. Такі характеристики роблять 5G придатними для сучасних застосувань, зокрема Інтернету речей (IoT), автономних транспортних систем, розумних міст та технологій віртуальної та доповненої реальності.

Основні принципи побудови мереж 5G включають стандартизацію, використання нових частотних діапазонів і впровадження інноваційних технологій, таких як програмно-визначувані мережі (SDN), віртуалізація мережевих функцій (NFV), сегментація мережі (network slicing) і масивні антени MIMO. Ці принципи взаємопов’язані та формують основу для забезпечення високого рівня якості обслуговування (QoS) і позитивного користувацького досвіду (QoE), що є ключовою темою цього дослідження.

У цьому розділі детально розглянуто фундаментальні принципи побудови 5G, їхню роль у забезпеченні ефективного функціонування мережі та вплив на показники якості зв’язку.

Стандартизація є одним із ключових і базових принципів побудови мереж 5G. Вона забезпечує єдиний підхід до розробки, впровадження та експлуатації мереж, гарантує сумісність обладнання та програмного забезпечення між різними операторами та виробниками. Основи стандартів 5G закладаються в рамках ініціативи 3rd Generation Partnership Project (3GPP), зокрема у випуску Release 15 (2018 р.), який започаткував стандарт 5G New Radio (NR), та в наступних оновленнях Release 16 і Release 17. Ці стандарти визначають технічні вимоги до ключових параметрів мережі, таких як максимальна пропускна здатність (до 20 Гбіт/с), затримка (до 1 мс) та щільність підключень (до 1 млн пристроїв на км²).

3GPP виділяє три основні сценарії використання 5G, що формують вимоги до всіх інших принципів побудови мереж:

- eMBB (enhanced Mobile Broadband)**:** призначений для забезпечення високих швидкостей передачі даних у застосунках із великими обсягами інформації, таких як потокове відео у форматах 4K/8K або технології віртуальної та доповненої реальності;
- URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)**:** забезпечує наднизьку затримку та високу надійність для критично важливих сервісів, таких як телемедицина або автономне керування транспортними засобами;
- mMTC (massive Machine-Type Communications)**:** підтримує масове підключення пристроїв IoT, зокрема сенсорів у розумних містах та промислових системах.

Ці три сценарії використання визначають ключові цільові показники продуктивності, що впливають на рівень QoS (наприклад, низька затримка для URLLC) та QoE (наприклад, висока швидкість для eMBB). Стандартизація гарантує, що ці вимоги реалізуються через інші принципи побудови мережі, зокрема вибір частотних діапазонів і впровадження сучасних технологій.

Використання нових частотних діапазонів є другим важливим принципом побудови мереж 5G, що дозволяє досягти високої продуктивності та ефективності передачі даних. На відміну від попередніх поколінь, 5G працює переважно у двох діапазонах:

- Sub-6 GHz**:** частоти нижче 6 ГГц (наприклад, 3,5 ГГц) забезпечують широке покриття та гарне проникнення сигналу через фізичні перешкоди, такі як стіни чи дерева. Цей діапазон є оптимальним для забезпечення стабільного зв’язку у міських і сільських районах, що позитивно впливає на рівень QoS.
- Міліметрові хвилі (mmWave, 24–100 ГГц)**:** забезпечують надвисоку швидкість передачі даних (до 20 Гбіт/с), проте мають обмежене покриття через чутливість до перешкод, включно з будівлями, рослинністю або погодними умовами. mmWave застосовуються переважно в густонаселених зонах, таких як

стадіони, торгові центри чи міські площі, де критично важлива висока пропускна здатність.

Для наочності основних характеристик частотних діапазонів 5G наведено відповідну табл.1.1.

Таблиця 1.1

Основні характеристики частотних діапазонів 5G

Діапазон	Частоти	Основні переваги	Обмеження	Застосування
Sub-6 GHz	<6 ГГц (наприклад, 3,5 ГГц)	Широке покриття, хороше проникнення сигналу через перешкоди	Менша пропускна здатність порівняно з mmWave	Міські та сільські райони, стабільний зв’язок
mmWave	24–100 ГГц	Надвисока швидкість передачі даних (до 20 Гбіт/с)	Обмежене покриття, чутливість до перешкод та погодних умов	Густонаселені зони, стадіони, торгові центри

Частотні діапазони Sub-6 GHz і mmWave взаємодоповнюють один одного, дозволяючи мережі гнучко адаптуватися до різних умов експлуатації. Наприклад, Sub-6 GHz забезпечує стабільність і надійність зв’язку навіть у складних середовищах, що критично для підтримки QoS, тоді як mmWave підвищує QoE у застосунках із високими вимогами до пропускної здатності, таких як потокове відео високої роздільної здатності або віртуальна реальність.

Третім ключовим принципом побудови мереж 5G є впровадження інноваційних технологій, які забезпечують гнучкість, масштабованість і ефективність функціонування мережі. До основних таких технологій належать:

- SDN (Software-Defined Networking): програмно-визначувані мережі дозволяють централізовано керувати ресурсами мережі через програмне забезпечення, що забезпечує швидке переналаштування під різні сценарії використання. Наприклад, SDN дозволяє динамічно виділяти ресурси для URLLC, знижуючи затримку передачі даних;
- NFV (Network Function Virtualization): віртуалізація мережевих функцій замінює фізичне обладнання програмними рішеннями, що працюють на стандартних серверах. Це зменшує витрати на розгортання мережі та підвищує її масштабованість, що особливо важливо для сценаріїв з масовим підключенням пристроїв (mMTC);
- Network Slicing: технологія дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі, кожен з яких оптимізований під конкретний клас трафіку. Наприклад, срез для eMBB забезпечує високу пропускну здатність для потокового відео, тоді як срез для URLLC гарантує мінімальну затримку для критично важливих застосувань;
- Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output): використання великої кількості антен (до 256) на базових станціях дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість користувачів, що підвищує пропускну здатність і ефективність використання радіочастотного спектра.

Ці технології тісно взаємопов’язані та взаємодіють із іншими принципами побудови мереж 5G. Наприклад, SDN і NFV забезпечують гнучкість для реалізації network slicing, яке залежить від вибору частотних діапазонів для досягнення необхідної продуктивності. У свою чергу, Massive MIMO підвищує ефективність використання частот Sub-6 GHz і mmWave, що сприяє збільшенню пропускної здатності та поліпшенню QoE для користувачів. Для оцінки впливу ключових принципів 5G на якість зв’язку наведено таблицю, що відображає їхній внесок у забезпечення QoS і QoE, табл.1.2.

Таблиця 1.2

Вплив ключових принципів 5G на QoS та QoE

Принцип / Технологія	Основний вплив на QoS	Основний вплив на QoE
Стандартизація	Забезпечує сумісність обладнання та програмного забезпечення, визначає цільові показники продуктивності	Гарантує передбачувану якість з'єднання та стабільність роботи сервісів
Частотні діапазони Sub-6 GHz	Надійність сигналу, стабільне покриття	Стабільне підключення та передача даних у міських і сільських районах
Міліметрові хвилі (mmWave)	Висока пропускна здатність	Підтримка потокового відео високої роздільної здатності, VR/AR застосунків
SDN	Динамічне виділення ресурсів для критичних застосувань	Зменшення затримок, підвищення швидкості адаптації мережі
NFV	Масштабованість та ефективне використання ресурсів	Безперервність сервісів, швидке розгортання нових функцій
Network Slicing	Оптимізація ресурсів під різні класи трафіку	Гарантована якість для специфічних сценаріїв (eMBB, URLLC, mMTC)
Massive MIMO	Підвищення спектральної ефективності, одночасне обслуговування багатьох користувачів	Висока пропускна здатність і стабільна швидкість передачі даних

Ця таблиця ілюструє, як ключові принципи 5G сприяють досягненню високих показників якості зв'язку. Зокрема, network slicing дозволяє створювати спеціалізовані сегменти мережі для критично важливих застосувань, забезпечуючи мінімальні затримки (QoS) і, як наслідок, покращуючи користувацький досвід у таких сфер, як телемедицина або автономне керування транспортом (QoE). Технології SDN і NFV дають операторам змогу оперативно

переналаштовувати мережу під змінні умови навантаження, що є ключовим для підтримки стабільного функціонування у пікові періоди.

Всі розглянуті принципи — стандартизація, частотні діапазони та технології — тісно взаємопов'язані. Стандарти 3GPP визначають вимоги до продуктивності, які реалізуються через частотні діапазони Sub-6 GHz і mmWave. SDN, NFV, network slicing і Massive MIMO забезпечують гнучкість та ефективність мережі, дозволяючи адаптувати її під різні сценарії використання. Завдяки цьому 5G здатна забезпечувати високі показники продуктивності та якості зв'язку, що буде детально розглянуто у наступних розділах у контексті архітектури мережі та впливу на QoS і QoE [1].

1.2 Архітектура та ключові компоненти мереж 5G

Архітектура мереж п'ятого покоління (5G) є критичною основою для реалізації сучасних комунікаційних технологій, що забезпечують надвисоку швидкість передачі даних, мінімальні затримки та здатність одночасно обслуговувати величезну кількість підключених пристроїв. Така структура створена для підтримки різноманітних сценаріїв використання: високошвидкісний мобільний широкосмуговий доступ (eMBB), критично надійні комунікації з низькою затримкою (URLLC) та масові підключення пристроїв Інтернету речей (mMTC).

Архітектура 5G відрізняється від попередніх поколінь застосуванням інноваційних рішень, серед яких ключову роль відіграють використання нових частотних діапазонів, програмно-визначувані мережі (SDN), віртуалізація мережевих функцій (NFV) та технологія network slicing. Ці підходи дозволяють досягати високої гнучкості та масштабованості мережі, оптимально розподіляти ресурси та забезпечувати високу якість обслуговування користувачів (QoS) і високий рівень задоволеності користувачів (QoE).

У межах цієї архітектури виділяють основні компоненти, які взаємодіють для забезпечення функціональності мережі та реалізації ключових технологій 5G:

- Радіодоступ (Radio Access Network, RAN) – забезпечує бездротове з’єднання між користувачами та мережею. У 5G використовується гібридна структура з макро- і мікросотами, підтримкою Massive MIMO та mmWave, що дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість користувачів із високою пропускною здатністю;
- Ядро мережі (5G Core, 5GC) – відповідає за маршрутизацію трафіку, управління сесіями, політиками QoS та інтеграцію з іншими мережевими сервісами. Архітектура ядра спирається на принципи SDN/NFV, що забезпечує програмну гнучкість і легке масштабування;
- Мережеві слайси (Network Slicing) – дозволяють створювати віртуальні сегменти мережі, оптимізовані під конкретні класи трафіку, забезпечуючи необхідні характеристики QoS для eMBB, URLLC або mMTC;
- Edge Computing та MEC (Multi-access Edge Computing) – дозволяють обробляти дані ближче до користувача, знижуючи затримку та підвищуючи ефективність використання мережевих ресурсів у реальному часі;
- Контролери та інтелектуальні платформи (RIC, AI/ML модулі) – інтеграція штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання дозволяє динамічно оптимізувати ресурси мережі, прогнозувати навантаження, автоматично виявляти аномалії та здійснювати self-healing функції.

Архітектура 5G формує основу для забезпечення високих показників продуктивності мережі: пікова пропускна здатність до 20 Гбіт/с, затримка на рівні 1 мс, висока надійність та ефективне одночасне підключення до 1 млн пристроїв на км². Взаємодія компонентів та застосування інноваційних технологій дозволяють мережам адаптуватися до змінних умов експлуатації, забезпечуючи високу якість обслуговування користувачів навіть у складних середовищах із великою щільністю підключень.

У наступних підрозділах буде проведено детальний аналіз функціональних блоків 5G, їхніх ролей у забезпеченні QoS/QoE, а також впливу архітектури на ефективність роботи мережі в умовах сучасних сценаріїв використання, включаючи IoT, телемедицину та автономні системи.

Пошарова структура архітектури 5G.

Архітектура мереж п’ятого покоління будується на трьох основних рівнях: мережі радіодоступу (RAN), ядрі мережі (5G Core) та транспортній мережі. Кожен із цих рівнів виконує специфічні функції, що у комплексі забезпечують високу продуктивність, масштабованість і гнучкість мережі. Така багаторівнева структура дозволяє ефективно адаптувати мережу до різних умов експлуатації – від щільно населеної міської інфраструктури до віддалених сільських регіонів, що має критичне значення для впровадження 5G як в Україні, так і за кордоном.

Мережа радіодоступу (RAN) формує перший рівень архітектури та відповідає за бездротове підключення користувацьких пристроїв – смартфонів, планшетів, IoT-сенсорів та інших кінцевих терміналів – до мережі. У 5G RAN реалізується на базі технології New Radio (NR), що визначена стандартами 3GPP і підтримує широкий діапазон частот, включаючи sub-6 GHz та міліметрові хвилі (24–100 ГГц).

Основним елементом RAN є базові станції нового покоління gNodeB, які замінили eNodeB, що використовувалися в мережах 4G. Ці станції обладнані масивними MIMO-антенами (Multiple Input Multiple Output), здатними містити до 256 елементів, що дозволяє обслуговувати одночасно десятки або навіть сотні користувачів. Інтегрована технологія beamforming спрямовує радіосигнали безпосередньо до конкретних пристроїв, підвищуючи ефективність спектра та зменшуючи рівень перешкод.

Наприклад, у щільно населених районах, таких як центр Києва, використання gNodeB із beamforming забезпечує стабільне з’єднання для великої кількості користувачів, які одночасно споживають потокове відео високої роздільної здатності або застосовують додатки доповненої та віртуальної реальності. Такий підхід дозволяє оптимально використовувати спектральні ресурси та підтримувати високі показники QoS і QoE навіть у пікові години навантаження.

Для забезпечення високої щільності покриття у зонах із великим трафіком, таких як торгові центри, вокзали або спортивні арени, застосовуються компактні

базові станції – small cells. Ці невеликі пристрої інтегруються в межах покриття основних gNodeB і розподіляють навантаження, забезпечуючи високу пропускну здатність для численних одночасних з’єднань.

У рамках сценарію eMBB (enhanced Mobile Broadband) small cells гарантують безперервний доступ до високошвидкісного Інтернету, що особливо важливо для потокового відео у форматі 4K/8K та інших ресурсомістких застосунків. Для mMTC (massive Machine-Type Communications) вони забезпечують підключення тисяч IoT-пристроїв, таких як сенсори вуличного освітлення, системи моніторингу громадського транспорту або промислові датчики.

Технічно малі базові станції взаємодіють з gNodeB через бездротові або оптоволоконні канали, що дозволяє координувати їхню роботу, оптимізувати використання спектру та запобігати перевантаженню мережі. Така архітектурна організація підвищує стабільність з’єднання та сприяє ефективному управлінню ресурсами мережі у густонаселених районах.

Ядро мережі 5G (5G Core) є центральним елементом архітектури, відповідальним за управління мережею, маршрутизацію даних, аутентифікацію користувачів та ефективний розподіл ресурсів. На відміну від монолітного ядра 4G (EPC), 5G Core реалізується як повністю віртуалізована система, що функціонує на базі хмарних технологій.

Віртуалізація ядра ґрунтується на принципах SDN (Software-Defined Networking) та NFV (Network Function Virtualization)**,** що дозволяє створювати модульну архітектуру з гнучким і масштабованим розподілом ресурсів відповідно до потреб мережі.

Ядро 5G включає низку ключових функціональних компонентів:

- AMF (Access and Mobility Management Function) – керує підключеннями користувачів та їхньою мобільністю;
- SMF (Session Management Function) – забезпечує управління сеансами передачі даних;

- UPF (User Plane Function) – відповідає за маршрутизацію трафіку до зовнішніх мереж (Data Network, DN).

Додаткові модулі, такі як PCF (Policy Control Function) для реалізації політик якості обслуговування та AUSF (Authentication Server Function) для забезпечення безпеки, розширюють функціональність ядра і дозволяють ефективно підтримувати високі показники QoS та QoE.

Віртуалізація 5G Core надає операторам можливість динамічно адаптувати мережу до змін у навантаженні. Наприклад, під час масового заходу, такого як концерт у Київському Палаці спорту, ядро може оперативно розподілити додаткові ресурси для підтримки тисяч одночасних підключень, забезпечуючи стабільність показників QoS. Особливу роль у цьому відіграє технологія network slicing, що дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі, кожен із яких оптимізовано під конкретні вимоги. Сегмент для URLLC гарантує затримку до 1 мс для критично важливих застосувань, таких як автономні транспортні засоби, тоді як сегмент для eMBB забезпечує високу пропускну здатність для потокового відео та мультимедійних сервісів. Така гнучкість сприяє підтримці різноманітних сценаріїв використання та покращує QoE користувачів.

Транспортна мережа забезпечує зв’язок між рівнями RAN і 5G Core, гарантуючи швидку та надійну передачу даних. Вона реалізується на основі високошвидкісних каналів, таких як оптоволоконні лінії із пропускною здатністю до 100 Гбіт/с, або мікрохвильових з’єднань у районах із обмеженою інфраструктурою. У міських умовах, наприклад, у Одесі чи Харкові, активне розгортання оптоволоконних мереж дозволяє обслуговувати великі обсяги даних для потокового відео та хмарних сервісів.

Крім того, транспортна мережа інтегрує технологію Multi-access Edge Computing (MEC), що розміщує обчислювальні ресурси ближче до користувачів. У розумному місті MEC може обробляти дані від камер відеоспостереження в реальному часі, зменшуючи затримку до кількох мілісекунд. Це є критично важливим для URLLC-застосувань, таких як віддалене керування або системи

безпеки, де швидкість реакції мережі безпосередньо впливає на ефективність та надійність сервісу.

Ключові компоненти архітектури 5G.

Архітектура 5G включає низку ключових компонентів, які забезпечують реалізацію її функціональності та відповідність сучасним вимогам мобільного зв'язку. Кожен компонент виконує специфічні завдання, спрямовані на підвищення загальної продуктивності мережі та якості обслуговування користувачів.

Базові станції gNodeB є центральним елементом рівня RAN. Вони оснащені масивними антенами MIMO, що дозволяють одночасно обслуговувати кілька користувачів за допомогою різних спрямованих променів (beamforming). У частотному діапазоні sub-6 GHz gNodeB забезпечує покриття на відстані 1–2 км, що оптимально для міських та сільських територій. Використання діапазону mmWave скорочує радіус покриття до 100–200 м, але значно підвищує пропускну здатність до 20 Гбіт/с, що робить його придатним для зон із високою щільністю користувачів. Наприклад, у київському метро gNodeB із підтримкою mmWave забезпечує швидкий доступ до Інтернету для пасажирів у години пікового навантаження.

Малі базові станції (small cells) служать для розширення можливостей RAN, забезпечуючи локальне покриття в зонах із високим трафіком. Вони працюють у діапазонах sub-6 GHz і mmWave, координуючи навантаження з основними gNodeB для оптимізації продуктивності мережі. У торгових центрах та громадських місцях такі малі сотні можуть одночасно підтримувати сотні підключень для потокового відео чи онлайн-ігор, що безпосередньо підвищує QoE користувачів. Розміщення малих базових станцій потребує інтеграції з існуючою інфраструктурою, наприклад, із стовпами освітлення або фасадами будівель, для забезпечення оптимального покриття та мінімізації інтерференцій.

Масивні антени MIMO, Network Slicing та Multi-access Edge Computing у 5G.

Масивні антени MIMO є технологічною основою базових станцій gNodeB у мереж 5G. Використання до 256 антен дозволяє одночасно передавати дані кільком користувачам, підвищуючи пропускну здатність та ефективність спектра. У сценарії eMBB massive MIMO забезпечує високошвидкісний доступ для десятків користувачів, тоді як у сценарії mMTC підтримує стабільне підключення тисяч IoT-пристроїв. Технологія beamforming, інтегрована в MIMO, спрямовує радіосигнали безпосередньо до конкретного користувача або пристрою, зменшуючи перешкоди, що особливо важливо при використанні діапазону mmWave.

Network slicing реалізується на рівні 5G Core і дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі з різними характеристиками для підтримки специфічних сервісів. Наприклад, сегмент для URLLC налаштовується на затримку до 1 мс і надійність 99,9999%, що критично для телемедицини та автономного керування транспортом. Сегмент для eMBB забезпечує пропускну здатність до 20 Гбіт/с для потокового відео високої роздільної здатності, тоді як сегмент для mMTC підтримує до 1 млн пристроїв на км², що оптимально для IoT. Ефективність network slicing значною мірою залежить від віртуалізації та хмарних обчислювальних платформ, що забезпечують гнучке керування ресурсами.

Multi-access Edge Computing (MEC) інтегрується в транспортну мережу та дозволяє обробляти дані на краю мережі, скорочуючи затримку та підвищуючи ефективність сервісів. У сценарії URLLC MEC обробляє дані від автономних транспортних засобів безпосередньо на базовій станції, зменшуючи затримку до 1–2 мс. У eMBB MEC кешує популярний контент, наприклад відео, знижуючи навантаження на ядро мережі. У розумних містах MEC аналізує дані від сенсорів у реальному часі, підвищуючи ефективність систем моніторингу та управління інфраструктурою.

Технічна реалізація архітектури 5G

Реалізація архітектури 5G передбачає інтеграцію апаратного та програмного забезпечення з урахуванням місцевих умов експлуатації. На рівні RAN базові станції gNodeB встановлюють на висотних будівлях, телекомунікаційних вежах або спеціальних платформах, оснащуючи їх масивними антенами MIMO для одночасного обслуговування великої кількості користувачів. У містах України, таких як Дніпро, для підвищення щільності покриття в зонах із високим трафіком застосовуються малі сотні (small cells). Вони розташовуються в центрах активності, наприклад поблизу ринків чи транспортних вузлів, використовуючи компактне обладнання для рівномірного розподілу навантаження. У випадку mmWave необхідне щільне покриття, що потребує координації з місцевими органами влади для встановлення антенних майданчиків та забезпечення оптимальної продуктивності.

На рівні 5G Core оператори розгортають віртуалізовані мережеві функції на хмарних серверах, використовуючи технології SDN та NFV. У великих містах, таких як Львів, хмарні платформи розміщують у дата-центрах, що з’єднуються з RAN через високошвидкісні оптоволоконні канали. Це забезпечує надійну маршрутизацію даних та гнучке управління ресурсами. Network slicing реалізується через програмне забезпечення, що дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі, оптимізовані під конкретні сервіси. Наприклад, виділяються сегменти для промислової автоматизації, де пріоритетом є низька затримка та висока надійність, та для потокового відео, де критичною є висока пропускна здатність.

Транспортна мережа та інтеграція MEC

Транспортна мережа 5G реалізується переважно через прокладання високошвидкісних оптоволоконних ліній, розвиток яких в Україні активно підтримується мобільними операторами для забезпечення стабільної та надійної передачі даних. У сільських та віддалених районах, таких як Чернігівщина, застосовуються мікрохвильові з’єднання як тимчасове або додаткове рішення, що дозволяє забезпечити базове покриття без значних капітальних витрат.

Multi-access Edge Computing (MEC**)** інтегрується у транспортну мережу шляхом розміщення обчислювальних ресурсів на базових станціях або у локальних дата-центрах. Це дозволяє обробляти дані ближче до користувачів, зменшуючи затримку та підвищуючи ефективність роботи критично важливих застосунків. Наприклад, у Міжнародному аеропорту "Бориспіль" MEC обробляє дані від систем безпеки в реальному часі, забезпечуючи миттєве реагування на потенційні загрози.

1.3. Вплив компонентів архітектури 5G на якість зв’язку

Кожен ключовий компонент архітектури 5G безпосередньо впливає на показники QoS (Quality of Service) та QoE (Quality of Experience). Так, базові станції gNodeB, оснащені технологією massive MIMO, забезпечують високу пропускну здатність та низьку затримку, що є критично важливим для сценаріїв eMBB, зокрема для потокового відео високої роздільної здатності та додатків віртуальної чи доповненої реальності.

Малі сотні (small cells) підвищують доступність мережі у густонаселених зонах, покращуючи QoE користувачів за рахунок зменшення перевантаження та забезпечення безперервного доступу до високошвидкісного Інтернету. Ядро мережі 5G Core, реалізоване з використанням технології network slicing, гарантує гнучкість і надійність мережі, що особливо важливо для сценаріїв URLLC, де критичними є низька затримка та висока надійність передачі даних.

Транспортна мережа, інтегрована з Multi-access Edge Computing (MEC), забезпечує обробку даних на краю мережі, що зменшує затримку та підтримує застосунки реального часу, такі як автономні транспортні засоби, телемедицина та системи безпеки в розумних містах. Таким чином, взаємодія всіх компонентів архітектури 5G створює умови для досягнення високої продуктивності мережі та покращення користувацького досвіду.

1.4. Візуалізація архітектури 5G для розумних міст

Для кращого розуміння структури мереж 5G доцільно представити схему, що ілюструє взаємодію її основних компонентів. На схемі користувацькі пристрої **(**UE**)** з'єднуються з мережею радіодоступу **(**(R)AN**),** що включає gNodeB та small cells, через інтерфейс N1**.**

Мережа (R)AN взаємодіє з 5G Core через інтерфейси N2 (для функцій керування) та N3 (для передачі даних). 5G Core складається з ключових елементів:

- AUSF – функція автентифікації користувачів;
- AMF – функція доступу та управління мобільністю;
- SMF – функція управління сеансами передачі даних;
- PCF – функція управління політиками QoS;
- UDM – база даних єдиного користувача;
- NRF – реєстр мережевих функцій;
- NEF – експозитор мережевих функцій;
- NSSF – функція вибору мережі;
- AF – додаткові функції для підтримки сервісів.

Ці компоненти взаємодіють внутрішніми інтерфейсами, зокрема через Nsmf**,** що забезпечує координацію між функціями ядра. Контрольна площина (NGC – Control Plane) координується через інтерфейс NA, тоді як площина користувача **(**NGC – User Plane) включає UPF (функція шлюзу користувацької площини), який підключений до зовнішньої мережі (DN – Data Network) через інтерфейс N6.

Транспортна мережа забезпечує інтеграцію між (R)AN та UPF, підтримуючи високу пропускну здатність і мінімальні затримки для сценаріїв eMBB, URLLC та mMTC у контексті розумних міст.

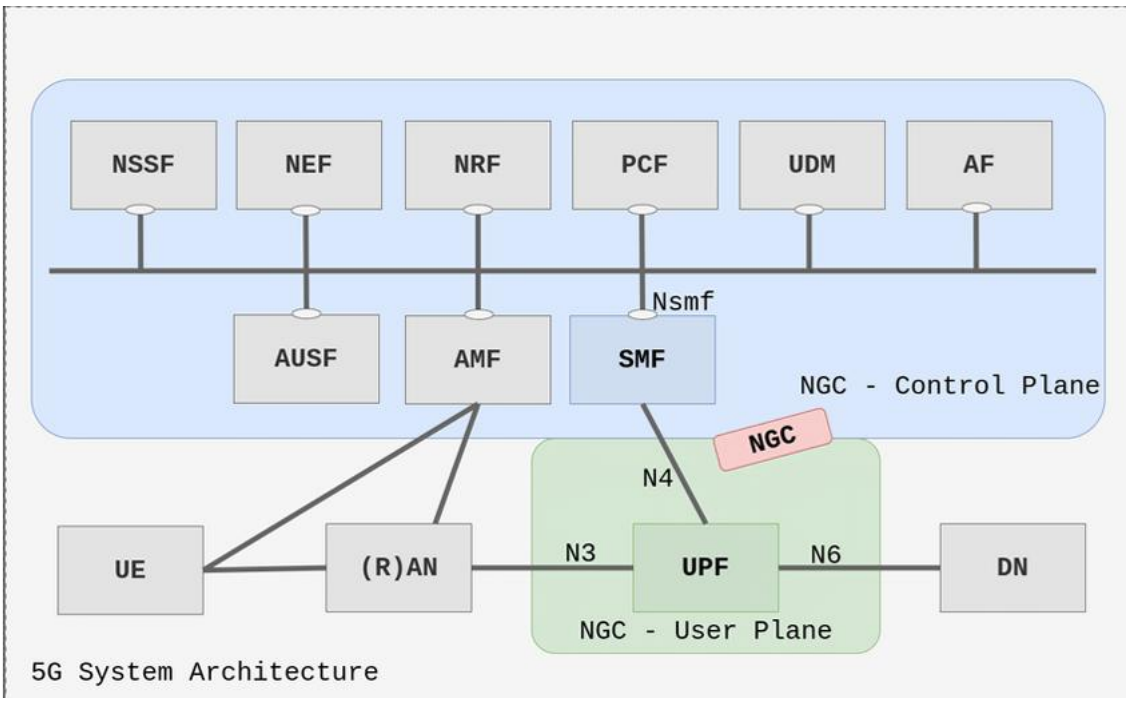


Рис. 1.1. Візуалізація архітектури 5G

Значення архітектури 5G для України

Архітектура 5G має особливе значення для України, де телекомунікаційна інфраструктура перебуває на етапі активного розвитку. У містах із високою щільністю населення, таких як Харків, розгортання gNodeB та small cells дозволить забезпечити високошвидкісний доступ у центрах із великим трафіком. У сільських районах транспортна мережа з використанням мікрохвильових з'єднань надаватиме базові телекомунікаційні послуги, створюючи основу для подальшого масштабування та модернізації мереж.

Multi-access Edge Computing (MEC**)** може застосовуватися для локальної обробки даних у розумних містах, таких як Київ, що дозволяє зменшити навантаження на центральне ядро мережі та скоротити затримку при передачі критично важливої інформації.

Архітектура 5G, побудована на взаємодії рівнів RAN, 5G Core та транспортної мережі, із ключовими компонентами gNodeB, small cells, massive MIMO, network slicing та MEC, забезпечує гнучкість, масштабованість і високу продуктивність мережі. Її впровадження в Україні демонструє поступовий перехід

до сучасних телекомунікаційних технологій, адаптованих до місцевих умов, і створює надійну основу для подальшого аналізу характеристик та оптимізації мереж 5G [2].

1.5. Основи застосування ШІ в телекомунікаціях

Застосування штучного інтелекту (ШІ) у телекомунікаційних мережах базується на поєднанні великих обсягів операційних даних, алгоритмів машинного навчання та архітектур, що забезпечують адаптивність і самоорганізацію. У сучасних 4G/5G-мережах роль ШІ полягає передусім у прогнозуванні навантаження, динамічному розподілі ресурсів, виявленні аномалій, оптимізації енергоспоживання та гарантуванні рівня сервісу (Quality of Service, QoS).[1,2]

Першим кроком у впровадженні методів штучного інтелекту є збір та обробка даних, що включає логи ключових показників якості обслуговування (KPI), статистику використання радіочастот, телеметричні дані базових станцій та пристроїв абонентів. На основі цих даних формуються часові ряди, які слугують вхідними даними для моделей прогнозування, таких як LSTM, а також матриці станів мережі, необхідні для алгоритмів глибинного навчання та навчання з підкріпленням.

Основні напрями застосування ШІ у телекомунікаційних мережах включають прогнозування попиту та динамічне розподілення ресурсів. Використання рекурентних нейронних мереж (LSTM, GRU) дозволяє прогнозувати пікові навантаження й відповідно коригувати потужність передавачів та частотний план (рис. 1.3). Алгоритми навчання з підкріпленням, такі як Q-learning, Deep Q-Network (DQN) та Actor-Critic, перетворюють прогнози на конкретні дії — наприклад, увімкнення або вимкнення RF-модулів та зміну параметрів радіоінтерфейсу в реальному часі без участі оператора.

Самоорганізовані мережі (Self-Organizing Networks, SON). SON-платформи з інтегрованими модулями штучного інтелекту аналізують

просторовий розподіл трафіку та рівень інтерференцій між сотами, автоматично коригуючи параметри хендоверів, ширину каналу та потужність передавачів. Для сегментації зон із високим навантаженням та адаптивного балансування ресурсу застосовуються методи глибинного навчання та алгоритми кластеризації, зокрема K-means і DBSCAN.

Виявлення аномалій і забезпечення безпеки мережі. Автоенкодери та методи некерованого навчання дозволяють ідентифікувати відхилення від нормальної поведінки користувачів або підсистем, наприклад, раптове збільшення кількості запитів на контрольні пакети. У разі виявлення потенційних загроз система миттєво повідомляє оператора про можливі DDoS-атаки, збої в обладнанні або фальсифікацію підключень.

Оптимізація енергоспоживання. Застосування моделей прогнозування, що враховують погодні умови та залежність трафіку, у поєднанні з алгоритмами навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) дозволяє знизити витрати на електроенергію. Це досягається за рахунок динамічного вимкнення невикористовуваних елементів мережі у нічний час або під час низького навантаження.

Сервіс-орієнтована маршрутизація та мережеві слайси (Network Slicing). Застосування алгоритмів політично-градієнтних методів у поєднанні з графовими нейронними мережами (Graph Neural Networks, GNN) дозволяє ефективно створювати мережеві слайси для різних класів трафіку, таких як eMBB, URLLC та mMTC. Це забезпечує гарантований розподіл ресурсів відповідно до угод про рівень обслуговування (SLA) і дозволяє масштабувати рішення на великі топології мереж без втрати продуктивності та ефективності управління ресурсами.

Застосування методів штучного інтелекту в телекомунікаційних системах виходить за межі безпосередньої роботи мережевих функцій. Наприклад, системи підтримки прийняття рішень для операторів використовують кластерний аналіз даних про клієнтську базу для створення персоналізованих тарифів та прогнозування ризику відтоку абонентів. У сфері обслуговування та технічної

підтримки чат-боти з модулями обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) забезпечують автоматизацію взаємодії з користувачами, підвищуючи ефективність комунікації та швидкість реагування.

Нижче наведено кілька прикладів комерційних рішень, що застосовують технології штучного інтелекту для оптимізації управління мобільними мережами та підвищення якості обслуговування.

Autonomous Network Operations від Ericsson, рис. Компанія Ericsson розробила платформу Autonomous Network Operations, яка базується на алгоритмах машинного навчання та аналізі великих обсягів телеметричних даних у реальному часі. Система збирає інформацію з параметрів сот, журналів подій та ключових показників якості (KPI). На основі цих даних глибинні нейронні мережі виявляють аномалії, прогнозують можливі відмови та автоматично запускають коригувальні дії, такі як переналаштування потужності передавачів або перерозподіл ресурсів між сотами. Впровадження цього рішення дозволило операторам скоротити час простою мережі на 30 % та підвищити стабільність обслуговування під час пікових навантажень.

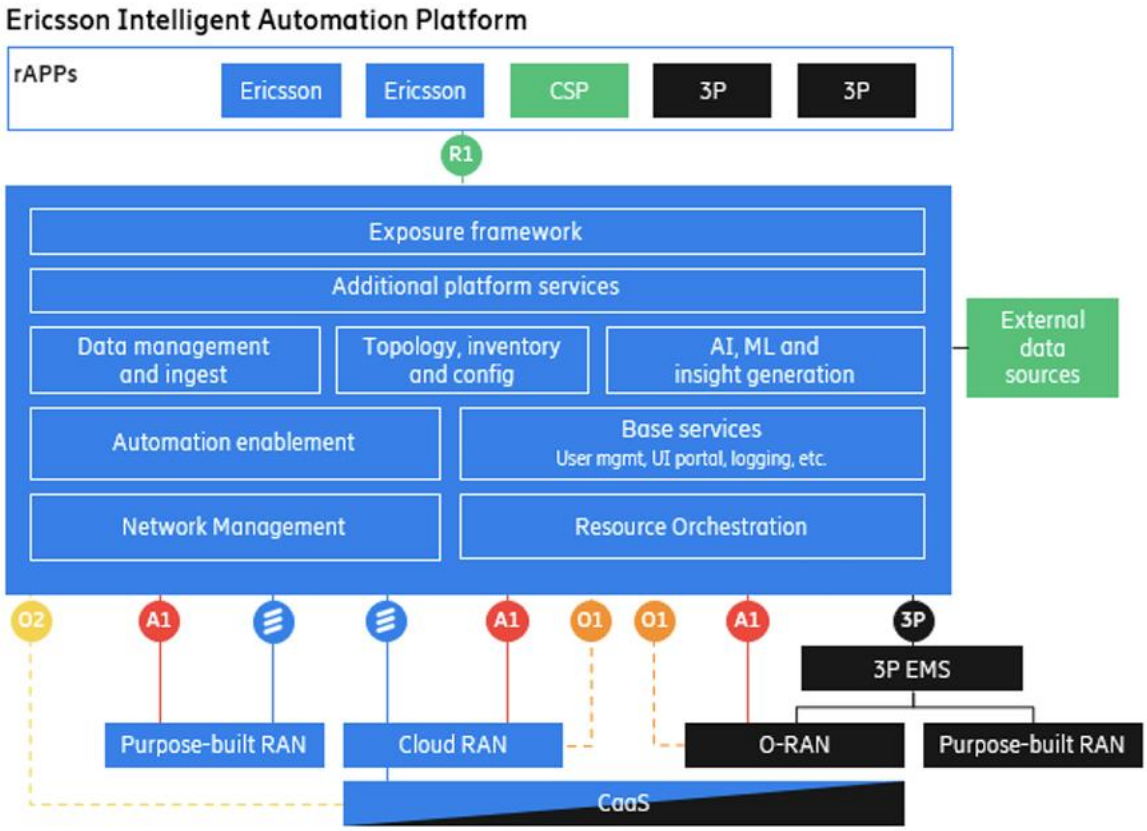


Рис. 1.4 Autonomous Network Operations

RIC для Open RAN в рамках O-RAN Alliance. У межах ініціативи Open RAN було створено RAN Intelligent Controller (RIC) — систему, що включає кластер xApps та rApps для оптимізації роботи окремих сот і кластерів сот. Використовуючи відкриті інтерфейси A1, E2 та O1, RIC збирає показники затримки, навантаження та спектральної ефективності, а також динамічно коригує стратегії розподілу ресурсів, управління радіоефіром та політики хендоверу. Експериментальні випробування продемонстрували підвищення пропускної здатності до 25 % та зниження затримок до 1–5 мс порівняно з традиційними RAN-контролерами.

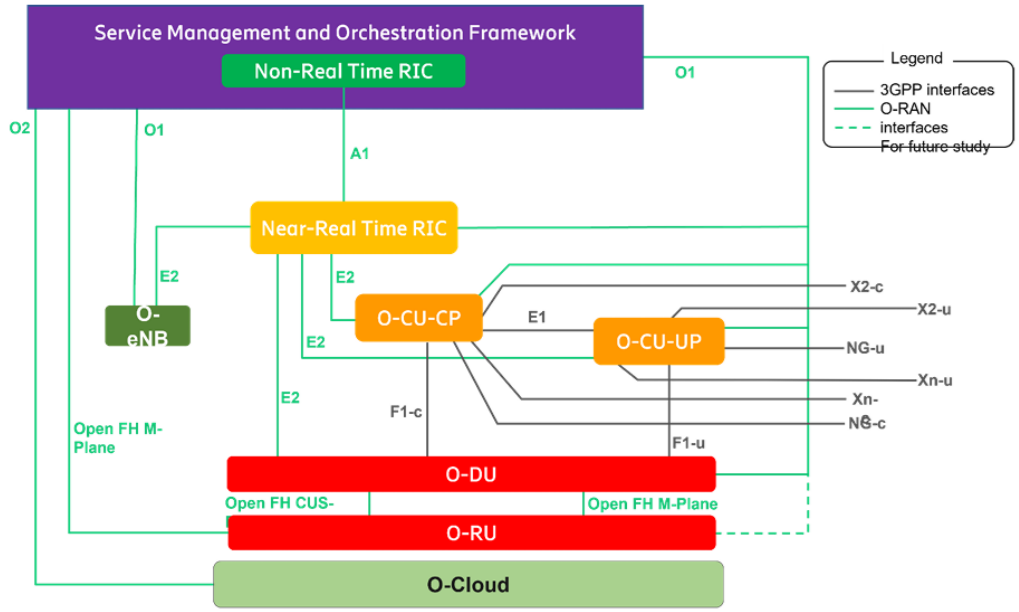


Рис. 1.5 RIC для Open RAN в O-RAN Alliance

AI-платформа China Unicom і Huawei AUTIN. Спільно з Huawei компанія China Unicom розгорнула національну AI-платформу AUTIN, призначену для централізованого збору даних, аналізу та управління мережею 4G/5G. Використовуючи моделі глибокого навчання, система автоматично визначає оптимальні місця для встановлення нових сот, здійснює self-healing у випадках відмов обладнання та проводить ретроспективний аналіз інтерференцій. Завдяки цьому процес планування мережі прискорився втричі, а кількість аварійних ситуацій знизилася на 25 %.

Оптимізація відеотрафіку від Telefonica і Meta. У партнерстві з Meta (Facebook) оператор Telefonica впровадив алгоритми машинного навчання для адаптивної трансляції відеоконтенту. Мережа в режимі реального часу аналізує показники пропускної здатності та затримок у різних регіонах, а за допомогою методів кластеризації динамічно змінює бітрейт CDN-серверів і налаштування QoS. Такий підхід дозволив зменшити кількість пауз під час відтворення на 40 % та підвищити задоволеність користувачів відеосервісів.

AI-інструменти Google Cloud і Telefonica. Оператор Telefonica застосовує хмарні сервіси машинного навчання Google Cloud

для прогнозування навантаження та виявлення аномалій у трафіку IoT-пристроїв. Платформа автоматично тренує моделі LSTM на історичних даних про активність абонентів, що дозволяє з точністю до 95 % передбачати пікові періоди навантаження та заздалегідь масштабувати серверні ресурси.

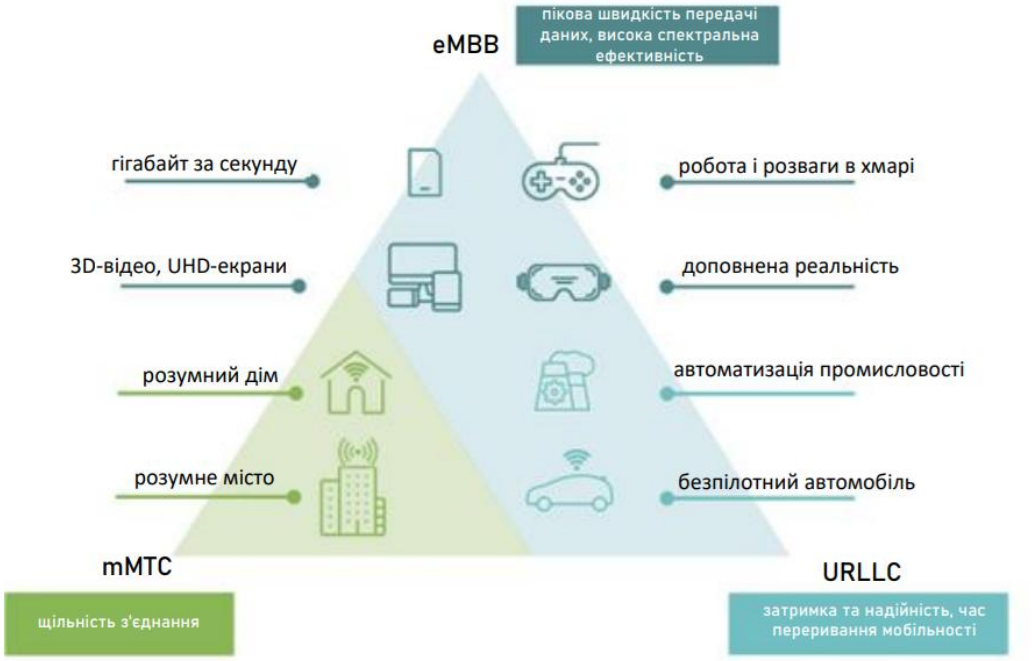


Рис. 1.6 Сценарії використання 5G

У результаті проведеного огляду сучасних мобільних технологій та ролі штучного інтелекту було встановлено, що мережі 4G LTE забезпечили значне зростання швидкості передачі даних і впровадили IP-орієнтовану архітектуру доступу. Водночас вони стикнулися з обмеженою спектральною ефективністю та високими затримками (типово 50–200 мс), що вже не відповідає зростаючим вимогам користувачів до сервісів із критичною чутливістю до латентності (URLLC) та високою щільністю підключень (mMTC).

Перехід на 5G NR відкрив нові можливості для реалізації цільових сервісів: eMBB для мультимедійних застосунків з гігабітними швидкостями, URLLC для критично важливих сценаріїв із затримкою 1–10 мс та mMTC для масового Інтернету речей. Використання технологій network slicing та міліметрових хвиль

дозволяє значно розширити функціональні можливості мережі, проте водночас ускладнює управління ресурсами та проєктування архітектури.

Аналіз основ застосування ШІ у телекомунікаціях показав, що моделі машинного навчання та глибинні нейронні мережі здатні ефективно обробляти великі масиви телеметричних даних у реальному часі, прогнозувати мережеве навантаження та забезпечувати адаптивне балансування радіоресурсів. Комерційні впровадження, такі як Ericsson Autonomous Network Operations, Open RAN RIC, Huawei AUTIN та хмарні сервіси від Telefónica і Google Cloud, підтвердили ефективність AI-підходів у реалізації self-healing, self-organizing та self-optimizing функцій, що сприяє зменшенню простоїв, оптимізації енергоспоживання та підвищенню якості обслуговування користувачів (рис. 1.3).
Таким чином, синергія еволюційних радіотехнологій 5G NR та методів штучного інтелекту формує платформу для створення гнучких, автономних і високоефективних мереж нового покоління, здатних задовольняти вимоги як критичних, так і масових сервісів.

2 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ В МЕРЕЖАХ 5G

2.1 Методи вимірювання та моніторингу показників якості 5G

Для забезпечення високої продуктивності та надійності мереж п'ятого покоління (5G) критично важливим є постійне оцінювання показників якості зв'язку. Моніторинг QoS (Quality of Service) **та** QoE (Quality of Experience) дозволяє операторам своєчасно виявляти проблеми, оптимізувати ресурси та підтримувати належний рівень обслуговування користувачів. У 5G використовуються комплексні підходи до збору та аналізу даних про мережу. Основними методами вимірювання є:

1. Активне тестування – передбачає штучне генерування трафіку та вимірювання параметрів передачі, таких як пропускна здатність, затримка, втрати пакетів та jitter. Цей метод дозволяє оцінити реальні можливості мережі у контрольованих умовах.

2. Пасивне моніторування – базується на зборі статистики з реального трафіку користувачів без втручання в роботу мережі. Дані отримують із базових станцій (gNodeB), транспортної мережі та ядра 5G Core, що дозволяє оцінювати реальний досвід користувачів та ефективність ресурсів.

3. Аналітика KPI та KQI – ключові показники ефективності (KPI) та показники якості обслуговування користувачів (KQI) аналізуються з використанням систем збору телеметрії. До них належать середня швидкість завантаження/відвантаження, час встановлення з'єднання, коефіцієнт відмов, рівень інтерференцій та інші параметри.

4. Інтеграція з AI та ML – сучасні мережі 5G застосовують алгоритми штучного інтелекту для автоматичного виявлення аномалій, прогнозування пікових навантажень та адаптивного балансування ресурсів. Наприклад, нейромережі LSTM можуть передбачати майбутнє завантаження сот, а агенти

навчання з підкріпленням оптимізують управління радіопараметрами у реальному часі.

5. Edge-моніторинг (MEC) – завдяки Multi-access Edge Computing, обчислення та аналіз даних можуть виконуватися безпосередньо на краю мережі. Це зменшує затримку та підвищує точність оцінки QoS для критично важливих застосувань, таких як URLLC.

Системний підхід до моніторингу показників якості 5G дозволяє не лише підтримувати стабільний сервіс, а й оптимізувати мережу під конкретні сценарії використання: від потокового відео та онлайн-ігор до промислового IoT та автономних транспортних систем.

Ефективність мереж п’ятого покоління значною мірою визначається здатністю операторів точно оцінювати та контролювати ключові показники у реальному часі. Це необхідно для підтримки стабільного функціонування мережі та високого рівня користувацького досвіду (QoE). Методи вимірювання та моніторингу QoS у 5G мають вирішальне значення для своєчасного виявлення проблем, оптимального розподілу ресурсів та забезпечення відповідності специфікаціям сценаріїв eMBB (розширений мобільний широкосмуговий доступ), URLLC (наднадійна низькозатримкова передача даних) та mMTC (масові підключення IoT-пристроїв). У цьому розділі розглядаються основні методи та інструменти моніторингу, їх практичне застосування, а також складнощі та виклики, що виникають при контролі роботи 5G-мереж.

Якість зв’язку в мережах 5G оцінюється за показниками QoS, які безпосередньо визначають рівень користувацького досвіду (QoE). У сценаріях URLLC затримка до 1 мс є критичною для застосувань реального часу, таких як автономні транспортні системи чи телемедичні сервіси. Для eMBB висока пропускна здатність у діапазоні mmWave, що досягає 20 Гбіт/с, дозволяє забезпечити швидке завантаження великих обсягів даних, наприклад, потокового відео у форматі 8K. Сервіси mMTC потребують високої доступності та надійності мережі, досягаючи показників 99,999% та 99,9999% відповідно, що гарантує стабільне підключення IoT-пристроїв та критично важливих сервісів.

Для оцінки та моніторингу цих параметрів застосовуються як активні, так і пасивні методи. Активні методи передбачають створення тестового трафіку для вимірювання затримки та пропускної здатності, тоді як пасивні методи ґрунтуються на аналізі реального мережевого трафіку для контролю доступності та надійності. Використання комбінації цих підходів дозволяє отримати повну та точну характеристику QoS, що є необхідною умовою для забезпечення високої якості зв'язку у сучасних мережах 5G.

Одним із найбільш поширених активних методів визначення затримки є тест ping, який дозволяє оцінити час проходження пакета від пристрою до сервера і назад. У контексті 5G цей метод модифіковано для сценаріїв URLLC, де критичною є затримка на рівні до 1 мс. Наприклад, під час перевірки міської мережі в центрі Києва інженери можуть застосовувати ping для оцінки швидкості реакції системи в умовах використання автономного транспорту.

Спеціалізовані платформи, такі як Spirent TestCenter, дають змогу проводити високоточні вимірювання, імітуючи різні сценарії трафіку. Ці інструменти генерують пакети даних із заданими параметрами, такими як розмір та частота надсилання, і фіксують час їхньої доставки, що дозволяє оцінити реальні затримки в мережі. У випадку eMBB Spirent TestCenter дозволяє перевіряти, чи здатна мережа підтримувати затримку на рівні 2–10 мс для додатків віртуальної реальності, що безпосередньо впливає на QoE користувачів.

Пропускна здатність мережі 5G оцінюється за допомогою активних тестів швидкості, що передбачають генерацію великого обсягу трафіку для визначення максимальних можливостей мережі. Для цього застосовуються спеціалізовані інструменти, такі як iPerf або Keysight Nemo. Наприклад, у діапазоні mmWave, де пропускна здатність може досягати 20 Гбіт/с, iPerf дозволяє симулювати передачу великих файлів, наприклад відео формату 8K, щоб перевірити відповідність мережі заявленим характеристикам. У реальних умовах, наприклад в аеропорту «Бориспіль» у Києві, подібні тести допомагають переконатися, що пасажири можуть швидко завантажувати контент без затримок.

Пасивний моніторинг пропускної здатності здійснюється через аналіз фактичного трафіку, що дозволяє виявляти перевантаження мережі, наприклад під час проведення масових заходів у густонаселених районах. Системи управління мережею (Network Management Systems, NMS), такі як Huawei iManager, забезпечують відстеження обсягу переданих даних у реальному часі та дають змогу операторам ефективно розподіляти ресурси і підтримувати стабільність QoS.

Доступність мережі 5G, що для сценаріїв URLLC може сягати 99,999%, переважно оцінюється за допомогою пасивного моніторингу. Це включає аналіз часу простою базових станцій gNodeB та елементів 5G Core. Системи управління мережею (NMS), такі як Nokia NetAct, обробляють журнали подій для виявлення відмов і переривань зв'язку. Наприклад, у розумному місті моніторинг доступності допомагає переконатися, що IoT-сенсори, що контролюють дорожній рух або освітлення, функціонують безперервно.

Активні методи перевірки доступності передбачають періодичну відправку тестових сигналів для підтвердження працездатності мережі. У сценарії eMBB, наприклад у великому торговому центрі, такі тести дозволяють гарантувати стабільний доступ до Інтернету навіть у години пікових навантажень.

Варто зазначити, що віртуалізація 5G Core ускладнює контроль, оскільки ресурси динамічно розподіляються між різними сегментами мережі. Проте сучасні NMS адаптовані для роботи з такими архітектурами і забезпечують ефективний моніторинг доступності, зберігаючи високу надійність роботи мережі.

Надійність мережі 5G, яка у сценаріях URLLC може досягати 99,9999%, оцінюється через контроль втрат пакетів і помилок при передачі даних. Активні перевірки надійності виконуються за допомогою спеціалізованих інструментів, таких як IXIA IxNetwork, що генерує тестовий трафік і підраховує відсоток успішно доставлених пакетів. Наприклад, у промислових автоматизованих системах ця платформа дозволяє перевірити, чи без втрат передаються команди для керування роботами.

Пасивний моніторинг надійності здійснюється шляхом аналізу логів мережі, що дає змогу виявляти джерела втрат, наприклад, вплив перешкод у діапазоні mmWave. У сценаріях mMTC, де одночасно передаються дані тисячі IoT-пристроїв, постійне спостереження за надійністю гарантує стабільну роботу сенсорів, наприклад, для контролю якості повітря у розумних містах.

Практична реалізація методів вимірювання QoS демонструє їхню ефективність у реальних умовах. У випадку eMBB оператори можуть застосовувати iPerf для тестування пропускної здатності у густонаселених районах, наприклад, на Хрещатику в Києві, забезпечуючи швидке завантаження мультимедійного контенту сотнями користувачів одночасно.

2.2 Методи покращення якості зв’язку за допомогою штучного інтелекту

Сучасні мережі 5G характеризуються високою складністю управління через значну кількість користувачів, різноманітні сервіси та динамічне навантаження на радіочастотний спектр. У цьому контексті штучний інтелект (AI) і машинне навчання (ML) стають ключовими інструментами для оптимізації мережевих параметрів та підтримки високого рівня QoS і QoE.

Одним із основних напрямів застосування AI є динамічне розподілення ресурсів радіодоступу**.** Алгоритми ML аналізують трафік у реальному часі, прогнозують пікові навантаження і автоматично налаштовують параметри базових станцій. Наприклад, у сценарії eMBB системи можуть підвищувати пропускну здатність у густонаселених районах, щоб забезпечити безперебійну трансляцію відео високої роздільної здатності.

Другий напрям – самоорганізація та самовідновлення мережі (Self-Organizing Networks, SON / Self-Healing)**.** AI дозволяє виявляти несправності обладнання та аномалії у роботі вузлів мережі, прогнозувати відмови та пропонувати автоматичні дії для відновлення зв’язку. Наприклад, у разі збою gNodeB або перевантаження mmWave-сот, AI-система може оперативно

перенаправити трафік на резервні канали, зменшуючи затримку та зберігаючи QoE користувачів.

Ще один важливий аспект – оптимізація handover і управління мобільністю користувачів**.** Алгоритми машинного навчання прогнозують переміщення пристроїв і забезпечують безшовний handover між сотами, що особливо критично для URLLC-застосувань, таких як автономне керування транспортом або телемедицина.

AI також застосовується для прогнозування та оптимізації мережевої енергоефективності**.** Моделі аналізують трафік у різний час доби та автоматично регулюють потужність базових станцій, що знижує енергоспоживання без погіршення QoS.

У підсумку, використання штучного інтелекту у 5G дозволяє:

- підвищити пропускну здатність і зменшити затримки;
- забезпечити надійність та стабільність роботи мережі;
- підтримувати автономну самоорганізацію та самооптимізацію;
- прогнозувати навантаження та ефективно керувати ресурсами.

Комерційні впровадження, такі як ERICSSON Autonomous Network**,** Open RAN RIC**,** Huawei AUTIN, а також хмарні сервіси від Telefonica та Google Cloud, підтверджують ефективність AI-підходів для управління сучасними мобільними мережами.

Мережі п’ятого покоління (5G) відкривають новий рівень можливостей телекомунікацій завдяки поєднанню принципів побудови, архітектурних рішень та технологічних переваг.

Одним із найперспективніших підходів до підвищення якості зв’язку у 5G є застосування штучного інтелекту (AI), який дозволяє автоматично оптимізувати ключові показники QoS – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність – для сценаріїв eMBB (покращений мобільний широкосмуговий зв’язок), URLLC (наднадійний зв’язок із низькою затримкою) та mMTC (масове підключення пристроїв).

Цей розділ присвячено дослідженню інтеграції AI в архітектуру 5G, його впливу на якість зв’язку, технічним аспектам реалізації, практичним сценаріям застосування, а також викликам і перспективам розвитку, спираючись на представлену схему взаємодії AI з компонентами мережі 5G.

Впровадження штучного інтелекту в мережах 5G відкриває нові можливості для ефективного керування динамічним трафіком, з яким традиційні підходи, такі як статичне розподілення ресурсів у мережах 4G, не завжди справлялися. AI дозволяє автоматизувати процеси управління мережею, здійснювати прогнозування навантажень та адаптувати параметри системи в реальному часі, що є критично важливим для підтримки високих показників QoS у 5G: затримки на рівні 1 мс для URLLC, пропускної здатності до 20 Гбіт/с у eMBB та можливості підключення до 1 млн пристроїв на км² у сценарії mMTC.

Як ілюструє наведена схема, рис. 2.1, AI інтегрується на різних рівнях архітектури 5G, охоплюючи п’ять ключових компонентів: джерела даних (Data Sources), мережі доступу (Access Networks), інфраструктуру (Infrastructure), крайові обчислювальні елементи AI (AI Edge) та центральне ядро AI (AI Core). Така структура забезпечує комплексний аналіз мережевого трафіку й гнучке управління ресурсами, що підвищує ефективність і надійність мережі.

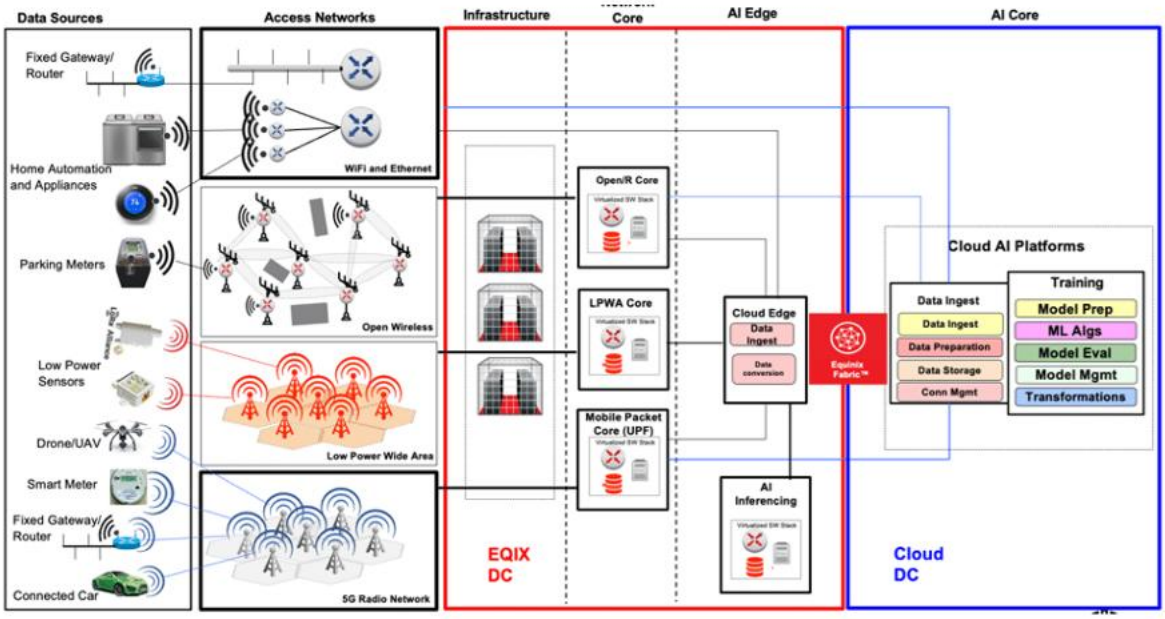


Рис. 2.1 Схема інфраструктури з використанням ШІ для керування мережею

Джерела даних, представлені на схемі рис.2.1, охоплюють різноманітні пристрої, серед яких розумні лічильники (Smart Meters), підключені автомобілі (Connected Cars), безпілотні літальні апарати (Drones/UAV), паркувальні лічильники (Parking Meters), сенсори з низьким енергоспоживанням (Low Power Sensors) та системи домашньої автоматизації (Home Automation). У розумному місті, наприклад у Києві, сенсори якості повітря, пристрої моніторингу дорожнього руху та паркувальні лічильники створюють значні обсяги даних, які потребують оперативної обробки для забезпечення надійної роботи мережі у сценаріях масового підключення пристроїв (mMTC).

Передача цих даних здійснюється через різні мережі доступу, включаючи Wi-Fi, Ethernet, мережі з низьким енергоспоживанням (Low Power Wide Area) та 5G Radio Network з базовими станціями gNodeB. 5G Radio Network забезпечує критично важливі параметри: високу пропускну здатність (до 20 Гбіт/с у mmWave) та низьку затримку (до 1 мс у URLLC), що необхідно для сценаріїв eMBB та URLLC. На практиці, наприклад в аеропорту «Бориспіль», 5G Radio Network одночасно підтримує потокове відео для пасажирів (eMBB) та роботу систем безпеки, що потребують миттєвої реакції (URLLC).

Отримані дані передаються в інфраструктурний рівень, який включає віртуалізоване ядро 5G Core та апаратні ресурси. На схеміщо показано на рис.2.1 показано OpenAirInterface NR Core – ядро 5G у віртуалізованому вигляді, uLPWA Core для підтримки IoT-пристроїв, а також Mobile Packet Core (UPF), який відповідає за маршрутизацію та передачу користувацьких даних. UPF гарантує стабільність роботи мережі у сценаріях eMBB, наприклад у великих торгових центрах Києва, де одночасно сотні користувачів переглядають потокове відео високої роздільної здатності (8K).

Центр обробки даних (EIQIX DC) надає необхідні обчислювальні ресурси для попередньої обробки даних перед їхньою передачею на AI Edge. AI Edge здійснює локальний аналіз даних та інференс моделей штучного інтелекту, що

дозволяє значно зменшити затримку. Наприклад, у телемедичних застосунках розумної клініки в Києві AI Edge на базовій станції gNodeB обробляє сигнали від хірургічного обладнання в режимі реального часу, забезпечуючи затримку до 1 мс у сценарії URLLC. AI Edge включає модулі Cloud Edge для введення даних (Ingest), конвертації (Convert) та підготовки наборів даних (Dataset Conversion), що оптимізує їхню обробку перед передачею в хмару.

Ядро AI (AI Core), розміщене в хмарному середовищі, відповідає за поглиблену аналітику та тренування моделей. Воно складається з Cloud AI Platforms, які включають модулі введення даних (Data Ingest), підготовки (Data Preparation), зберігання (Data Storage), управління підключеннями (Connection Management), трансформації (Transformations) та тренування моделей (Training). Під час навчання використовуються модулі підготовки моделей (Model Prep), алгоритми машинного навчання (ML Algorithms) та оцінка ефективності моделей (Model Eval). Наприклад, AI Core може навчити нейронну мережу для прогнозування трафіку в розумному місті, а отриману модель передати на AI Edge для виконання інференсу, що дозволяє оптимально розподіляти частоти у 5G Radio Network. У сценарії eMBB, наприклад у центрі Києва під час масового заходу на Хрещатику, AI Core прогнозує пікові навантаження, а AI Edge відповідно перенаправляє ресурси частот для забезпечення пропускної здатності до 20 Гбіт/с.

Технічне впровадження штучного інтелекту в мережах 5G базується на поєднанні технологій машинного навчання (ML), глибокого навчання (DL) та обробки природної мови (NLP), які розподілені між рівнями AI Edge та AI Core. На AI Core здійснюється навчання моделей ML, таких як регресійні алгоритми чи нейронні мережі, на історичних даних про мережевий трафік для прогнозування майбутніх навантажень. Наприклад, у київському торговому центрі AI Core може передбачати піки трафіку під час обідньої перерви, коли відвідувачі активно використовують потокові сервіси, а прогнозовані дані передаються на AI Edge, що оптимізує використання частот у 5G Radio Network для стабільного обслуговування користувачів.

На рівні AI Edge застосовуються алгоритми Q-learning для визначення оптимальних маршрутів передачі даних, що дозволяє зменшити затримку до 1 мс у сценаріях URLLC. У рамках розумних транспортних систем Києва це дає змогу оперативно передавати інформацію від автономних автомобілів, забезпечуючи миттєву реакцію на зміни дорожньої обстановки. Для виявлення аномалій у мережі AI Core використовує алгоритми кластеризації, наприклад DBSCAN, що дозволяє своєчасно ідентифікувати DDoS-атаки чи збійні процеси. У промислових середовищах, наприклад на заводах у Дніпрі, AI Edge прогнозує можливі відмови в OpenAirInterface NR Core і автоматично перенаправляє сигнали через sub-6 GHz у разі перешкод у mmWave, підвищуючи надійність мережі до 99,9999%.

Вплив AI на показники QoS у мережах 5G охоплює кілька аспектів. Затримка у сценаріях URLLC зменшується до 1 мс завдяки локальній обробці даних на AI Edge. Наприклад, у телемедичних застосунках розумної клініки Києва AI Edge в режимі реального часу аналізує сигнали хірургічного обладнання, що забезпечує миттєву передачу зображень для віддаленої хірургії. AI Core одночасно тренує моделі для прогнозування перевантажень мережі, що дозволяє уникати затримок у критично важливих сценаріях, таких як автономне керування транспортом.

Пропускна здатність у сценаріях eMBB зростає до 20 Гбіт/с у mmWave завдяки оптимізації розподілу частот на AI Edge. У київському аеропорту «Бориспіль» AI Edge перенаправляє ресурси в зони з підвищеним навантаженням, наприклад під час прильоту кількох рейсів одночасно, що дозволяє пасажирам переглядати потокове відео 8K без затримок. Доступність мережі підвищується до 99,999% завдяки прогнозуванню можливих збоїв на AI Core. У розумному місті це дозволяє заздалегідь визначити перевантаження під час масових заходів і направити трафік через uLPWA Core для IoT-пристроїв, таких як датчики моніторингу дорожнього руху. Надійність досягає 99,9999% завдяки виявленню аномалій та адаптивному перенаправленню сигналів. У промислових автоматичних системах, наприклад на заводах у Запоріжжі, AI Edge

перенаправляє сигнали з mmWave на sub-6 GHz у разі перешкод, забезпечуючи безперервну роботу робототехнічного обладнання.

Практичне застосування штучного інтелекту демонструє його ефективність у підвищенні якості зв'язку у різноманітних сценаріях. Наприклад, у розумному місті Барселона AI Edge аналізує дані від паркувальних лічильників та сенсорів дорожнього руху, що дозволяє оптимізувати маршрути для автомобілів і знизити навантаження на мережу. Подібні підходи можуть бути впроваджені в Києві для управління трафіком на Хрещатику: датчики, підключені через Low Power Wide Area, передають інформацію на AI Edge, який прогнозує утворення заторів та пропонує оптимальні рішення.

У промисловому секторі, наприклад у Німеччині, AI Core прогнозує можливі збої у OpenAirInterface NR Core на електронних заводах, що дозволяє зменшити час простою обладнання на 30%. В Україні подібні технології можуть бути реалізовані на підприємствах Дніпра, де AI Edge забезпечує обробку даних від промислових роботів через 5G Radio Network, а AI Core тренує моделі для прогнозування відмов у роботі базових станцій gNodeB.

У сфері освіти AI Edge допомагає забезпечити стабільну пропускну здатність для онлайн-лекцій у високій якості. Так, у Кембриджському університеті AI Edge гарантує перегляд лекцій у форматі 8K без затримок, а в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка штучний інтелект прогнозує пікові навантаження під час сесій та оптимізує використання частот для студентів, що навчаються дистанційно.

У транспортній інфраструктурі, наприклад в аеропорту «Бориспіль», AI Edge керує розподілом частот для пасажирів, які переглядають потокове відео, а AI Core тренує моделі для управління мережевим трафіком під час одночасних прильотів рейсів, забезпечуючи стабільну швидкість передачі даних та мінімальні затримки.

Порівняно з класичними підходами, як-от статичне виділення ресурсів у мережах 4G, використання штучного інтелекту у 5G відкриває суттєві переваги. У мережах 4G затримка досягала 20–40 мс, а максимальна пропускна здатність становила

близько 1 Гбіт/с, що було недостатньо для сучасних сервісів, таких як потокове відео високої роздільної здатності 8K або автономне керування транспортом.

AI у 5G, завдяки розподіленій обробці на рівнях AI Edge і AI Core, дозволяє скоротити затримку до 1 мс і забезпечити пропускну здатність до 20 Гбіт/с. Традиційні методи вимагали ручного аналізу логів для виявлення збоїв, що займало години, тоді як AI Core автоматизує цей процес, реагуючи майже миттєво. Наприклад, у мережах 4G виявлення DDoS-атаки потребувало значного часу, що призводило до перебоїв у роботі мережі, тоді як у 5G AI Edge здатен ізолювати уражену ділянку в режимі реального часу, суттєво підвищуючи надійність.

У промислових умовах, таких як автоматизоване виробництво на заводах, традиційні методи не забезпечували гнучкого реагування на перешкоди в сигналі. Натомість AI Edge у 5G автоматично перенаправляє трафік через альтернативні частотні діапазони, гарантуючи безперервну роботу систем. Це дозволяє ефективно підтримувати критично важливі сервіси та високі стандарти QoS і QoE навіть у складних умовах експлуатації.

Окрім технічних переваг, інтеграція AI значно покращує користувацький досвід (QoE). У сценаріях eMBB, наприклад, у київських торгових центрах AI Edge забезпечує швидку трансляцію відео високої роздільної здатності 8K, що сприяє більшому задоволенню від користування мережею. У випадку URLLC, наприклад, у розумних клініках Києва, завдяки мінімальній затримці та високій надійності, забезпеченим AI, медичні працівники можуть проводити віддалені хірургічні операції без ризиків, підвищуючи довіру до технології.

У сценаріях mMTC, у рамках розумних міст, AI гарантує стабільну роботу IoT-сенсорів, таких як датчики моніторингу якості повітря чи дорожнього руху, що позитивно впливає на комфорт і безпеку мешканців. У промислових умовах, наприклад, на харківських заводах, AI Edge та AI Core мінімізують простої обладнання, підвищуючи продуктивність виробництва та економічну ефективність підприємства.

Незважаючи на численні переваги, впровадження штучного інтелекту в мережах 5G пов’язане з рядом складнощів. Першою проблемою є високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Навчання моделей на AI Core, особливо з використанням методів глибокого навчання (DL), потребує потужних серверів із GPU, що збільшує витрати операторів. Розгортання AI Edge для локальної обробки даних також вимагає інвестицій у щільне покриття базовими станціями gNodeB, що може стати економічним бар’єром. Наприклад, в Україні, де впровадження 5G ще перебуває на початкових етапах, оператори можуть стикнутися з обмеженими бюджетами для встановлення таких серверів у віддалених регіонах.

Другою проблемою є якість даних. Ефективність AI безпосередньо залежить від точності інформації, що надходить від джерел, таких як IoT-пристрої. Неточні показники, наприклад від сенсорів контролю якості повітря в розумних містах через збій або низький заряд батареї, можуть призвести до помилкових прогнозів AI Core та знизити ефективність оптимізації мережі.

Третій виклик стосується безпеки. AI-системи вразливі до атак, таких як отруєння даних (data poisoning), коли шкідливі зміни у тренувальних наборах впливають на результати роботи моделей. У сценаріях URLLC, наприклад у телемедицині, такі атаки можуть призвести до критичних збоїв, що ставлять під загрозу безпеку пацієнтів.

Четверта складність – дефіцит кваліфікованих фахівців. Для ефективного впровадження AI Edge та AI Core потрібні експерти з машинного навчання та мережевих технологій, яких в Україні недостатньо. Подолати цю проблему можна шляхом підготовки кадрів через спеціалізовані освітні програми та курси, наприклад, у Київському політехнічному інституті, що сприятиме розвитку компетенцій у сфері AI та 5G.

Перспективи розвитку штучного інтелекту у мережах 5G виглядають багатообіцяючими. Як показано на схемі, інтеграція AI Edge із крайовими обчислювальними ресурсами вже дозволяє зменшувати затримку та знижувати навантаження на ядро мережі. У майбутньому ця інтеграція може бути розширена

для створення розумних, інтелектуальних мереж у містах України, таких як Харків або Одеса. AI Edge здатний обробляти дані з камер відеоспостереження в режимі реального часу, підвищуючи рівень безпеки, тоді як AI Core виконуватиме тренування моделей для прогнозування пікових навантажень у міському транспорті.

Технологія федеративного навчання (Federated Learning) на AI Core дозволяє навчати моделі на розподілених даних від IoT-пристроїв без необхідності передавати їх у хмару, що підвищує конфіденційність та зменшує трафік у мережі. Наприклад, у Києві федеративне навчання може оптимізувати підключення дорожніх датчиків, обробляючи дані локально на AI Edge. Досвід використання AI у 5G стане фундаментом для мереж 6G, очікуваних до 2030 року. У 6G ядро AI зможе забезпечувати затримку на рівні мікросекунд та підтримувати голографічні комунікації, відкриваючи нові можливості для високоякісного користувацького досвіду, наприклад, у віртуальній реальності та телеприсутності.

В Україні AI може сприяти масштабуванню 5G у промислових зонах, таких як Кривий Ріг, для автоматизації виробництва, а також у сільських регіонах для підтримки IoT-пристроїв у сільському господарстві, якщо будуть вирішені економічні та організаційні проблеми.

Додаткові практичні приклади підкреслюють універсальність AI у 5G. У Японії AI Edge забезпечує підтримку AR-додатків у розважальних центрах, а Cloud Edge кешує контент для великої кількості користувачів, що дозволяє досягати високої пропускної здатності. В Україні подібне рішення може бути застосоване у торгово-розважальних центрах Києва, таких як "Океан Плаза", прискорюючи завантаження AR-контенту для відвідувачів. У Стокгольмі AI Core прогнозує навантаження під час масових заходів, наприклад, концертів, що дозволяє операторам підтримувати стабільну пропускну здатність для тисяч користувачів. Аналогічно, в Одесі під час фестивалів, таких як "Одеський міжнародний кінофестиваль", AI Core та AI Edge можуть оптимізувати роботу мережі для туристів і відвідувачів, які активно користуються потоковими сервісами.

У сільському господарстві AI Edge у Нідерландах обробляє дані від сенсорів на полях, оптимізуючи процес поливу та внесення добрив, що підвищує врожайність. В Україні, зокрема в Херсонській області, AI може сприяти розвитку розумного землеробства, аналізуючи дані про вологість ґрунту через мережі Low Power Wide Area, що допоможе фермерам підвищити ефективність та продуктивність.

3. ТЕХНОЛОГІЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6G, АРХІТЕКТУРА ТА ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Майбутнє бездротового зв'язку з 6G

Розгортання п'ятого покоління технології бездротового зв'язку, або 5G, все ще триває. Хоча нинішнє покоління ще навіть не повністю доступне, галузь вже дивиться в майбутнє. Технології 6G, до появи яких, ймовірно, ще десять років, вимагатимуть значно більшої потужності, ніж навіть наші нинішні стандарти. До 2030-х років наші пристрої та технології вимагатимуть більшої пропускної здатності, менших затримок і жорсткішої безпеки, ніж будь-коли раніше. Ці інновації, безсумнівно, революціонізують можливості того, що може бути досягнуто в декількох галузях світової промисловості і в нашому повсякденному житті на наших мобільних пристроях і за допомогою Інтернету речей (IoT). У цьому розділі ми обговоримо вплив 6G на такі галузі, як охорона здоров'я та аерокосмічна промисловість, проблеми безпеки, пов'язані з впровадженням 6G, штучний інтелект (ШІ) в мережах 6G і багато іншого, в тому числі роль 6G в майбутньому.

Незважаючи на те, що мережі 5G все ще перебувають на стадії розгортання, все обговорюються мережі 6G. Потреба в мережах 6G формується завдяки зростанню інновацій у сферах, що потребують великих обсягів даних, таких як взаємодія між мозком і комп'ютером (BCI), літаючі транспортні засоби, електронна охорона здоров'я та розширена реальність. Численні дослідження стверджують, що мережі 6G революціонізують еволюцію стільникових мереж від "підключених речей" до "підключеного інтелекту" (дослідницька програма, проведена Університетом Оулу, зосереджена на впровадженні екосистеми 5G та інновацій 6G). Отриманий "підключений інтелект" буде адаптувати і контролювати ключові показники ефективності (KPI). Таким чином, підсумок бачення 6G може бути в першу чергу зосереджений на досягненні "повсюдного бездротового" [4] інтелекту за рахунок володіння численними і новими

аспектами мережевих вимог, таких як послуги і технології, дослідницькі проблеми і операційне вдосконалення. На рис. 3.1 показано ієрархічний підхід до обговорення цих аспектів 6G" [3].

Термін *ubiquitous s*використовується для визначення повсюдного покриття і безперешкодного доступу до послуг. У ретроспективі, 6G має на меті використовувати концепцію ШІ, ML і методів великих даних, які підтримують автономне прийняття рішень в інтелектуальних пристроях і додатках. Наприклад, під час використання цих додатків мережі можуть модифікуватися на основі досвіду користувачів. Крім того, методи ML і Big Data допомагають підтримувати використання даних у режимі реального часу, що завжди є важливим стимулом для розвитку інтернет-технологій.

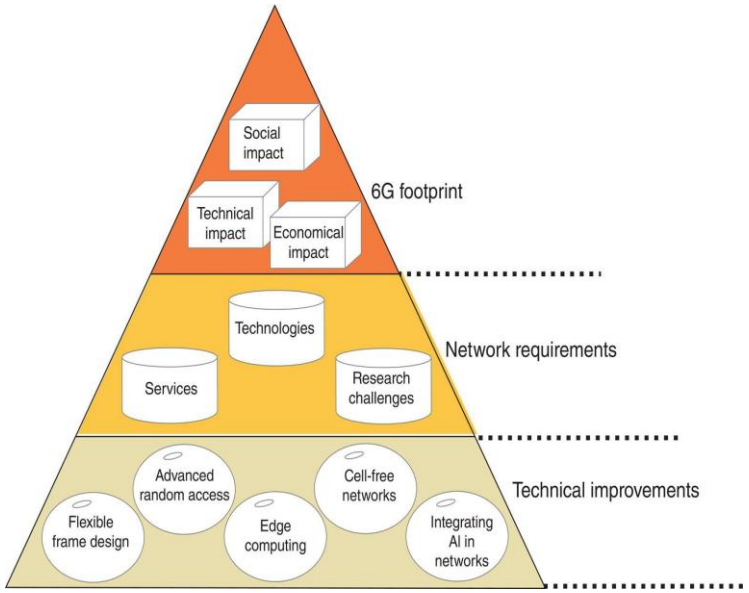


Рис. 3.1 Ієрархічний підхід до обговорення аспектів 6G

Надзвичайно важливо, щоб ці мережі забезпечували величезні швидкості передачі даних, що характеризуються високою надійністю і надзвичайно низькою затримкою, для покращення одночасного надання послуг - як висхідної, так і низхідної лінії зв'язку. Оператори наголошують на значній надійності швидкості і затримок, оскільки це відкриває шлях до використання частот за межами

діапазону ГГц, що в кінцевому підсумку вдосконалює бездротову мережу. За словами операторів та афілійованих [5] компаній поява 6G має покращити швидкість передачі даних, користувацький досвід, затримки та тривимірне покриття. Наприклад, деякі підходи до створення мережі включають, серед іншого, зондування, зв'язок, позиціонування, навігацію та обчислення. Крім того, квантові комп'ютерні системи, ймовірно, підвищать безпеку і конфіденційність персональних даних.

Дивлячись на ці обговорювані додатки і випадки використання 6G, мережі повинні прийняти нові набори вимог. Формалізація 6G має важливе значення існуючих світових тенденціях. Тому дослідники та науковці невтомно працюють над тим, щоб змінити обличчя бездротових технологій. Наприклад, серед відомих установ, які беруть участь у цьому курсі, є Університет Оулу у Фінляндії та Terabit Bidirectional Multi-User.

Оптична бездротова система (TOWS) для 6G LiFt від уряду Великобританії (дослідницька група, що займається збільшенням пропускної здатності бездротового зв'язку). Крім того, світові телекомунікаційні компанії, такі як Samsung, AT&T, Ericsson, Nokia і SK Telecom, а також експерти в галузі зв'язку почали зміщувати фокус уваги за межі мереж 5G. Цей перехід до мереж 6G охоплює такі ключові засоби, як великі інтелектуальні послуги (LIS), надмасивні системи з багатьма входами і виходами (SM-MIMO), терагерцовий зв'язок (THz), лазерний зв'язок, зв'язок у видимому діапазоні (VLC), квантові обчислення і мультиплексування з орбітальним кутовим) [2] імпульсом (OAM).

3.2 6G та основні характеристики

5G продемонстрував потребу в більшій гнучкості завдяки своїй потребі та успіху в задоволенні різноманітних вимог і адаптації різних технологій. Для досягнення гнучкості мережі потрібні три речі: обізнаність, наявність варіантів і адаптація/оптимізація. Незважаючи на успіх 5G у задоволенні потреб у гнучкості, йому все ще не вистачає справді оптимальної гнучкості, а 6G буде ще складніше

пристосувати через нові додатки та вимоги. Щоб підготуватися до 6G, необхідно краще вивчити різні аспекти комунікаційних середовищ, використовуючи штучний інтелект, розширюючи технологічні можливості та забезпечуючи належне використання існуючих варіантів. Більшість опублікованої літератури про 6G не торкається перспективи гнучкості.

Основною метою більшості досліджень у сфері 6G є визначення майбутніх додатків, послуг і вимог. Існує три основні категорії, до яких відносяться ці елементи для 6G. eMBB, наднадійний зв'язок з низькою затримкою (uRLLC), і масове машинне навчання (mMTC). Існує також перелік потенційних застосувань для 6G, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА), транспортний засіб для всього (V2X), VR, AR, голографічні конференції, розумні об'єкти, охорона здоров'я та багато іншого.

Гнучке використання декількох діапазонів є першою ключовою умовою для 6G. Оскільки 5G використовує новий спектр міліметрових хвиль, з усіма перевагами, які він надає, його використання наразі обмежене правилами IMT. ТГц-діапазон також сприяє гнучкості спектрів, пропонуючи більше каналів. Для кращого узагальнення решту джерел цього розділу можна поділити на три категорії: багатодіапазонна гнучкість, гнучкість джерел інформації і гнучкість співіснування спектрів.

Надгнучкі фізичні (PHY) і середні рівні управління доступом (MAC) можливі для систем з декількома нумераціями, вперше застосованих в 5G. Для цілей 6G в одному кадрі можна використовувати кілька форм сигналу, що може слугувати радіолокаційним зондуванням для декількох мереж. Методи NOMA для домену сигналів покращують можливості розподілу ресурсів для 6G. Для рівня MAC гнучкості вимагають два питання: призначення параметрів форми сигналу і планування нумерології.

Надгнучкі гетерогенні мережі є наступним ключовим інструментом. Ця функція охоплює літаючі точки доступу, які дозволяють гнучко позиціонувати і оптимізувати траєкторії для різних функцій. Удосконалення супутникових мереж також. Розподіл мережі на сегменти і безстільникові мережі дозволяють системи,

орієнтовані на користувача, з гнучкістю декількох мереж під однією парасолькою. Технологія блокчейн і квантові технології зв'язку також можуть зробити свій внесок у майбутнє.

Інтегроване зондування і зв'язок акцентують увагу на зондуванні або спостережуваних даних, які можуть бути використані для вдосконалення систем зв'язку. До цієї категорії відносяться такі технології, як зондування спектра, визначення місцезнаходження і розуміння контексту. Для отримання інформації про навколишнє середовище використовуються карти радіоекології (REM), але з розвитком технологій, можливо, з часом вдасться зібрати повну інформацію і сформувати базу даних. Недоліком такої повної обізнаності є величезний обсяг даних, що генеруються, а також потреба у величезних обчислювальних потужностях.

Інтелектуальні комунікації в 6G включають використання штучного інтелекту і машинного навчання. ШІ вже дуже поширений у 5G і використовується для кращої периферійної обробки та сортування величезних потоків даних у 5G. Як ключова 6G, він має різноманітне застосування в сенсориці та комунікації, а також в радіоелектроніці. Розподілений інтелект і штучний інтелект допоможуть задовольнити величезний попит на дані і їх обробку з боку РЕМ. ШІ також можна використовувати для кращого управління бездротовими мережами, створюючи інтелектуальну мережу.

Наступними двома ключовими факторами є "зелені" та безпечні комунікації. Екологічний зв'язок включає в себе такі технології, як збір радіочастотної енергії, зворотне розсіювання, симбіотичне радіо, бездротову передачу енергії та системи Інтернету речей з нульовим споживанням енергії. Мета "зеленого" зв'язку полягає в тому, щоб зробити 6G більш енергоефективним за рахунок утилізації енергії та зменшення споживання енергії, необхідної для роботи систем. Безпечний зв'язок для 6G вирішує такі завдання з безпекою на основі криптографії, яка використовує властивості фізичного рівня для захисту речей. Однією з проблем безпеки є захист величезних приватних даних, що генеруються концепціями REM і ISAC. На рис. 3.2 зображено загальну схему

ключових характеристик 6G.

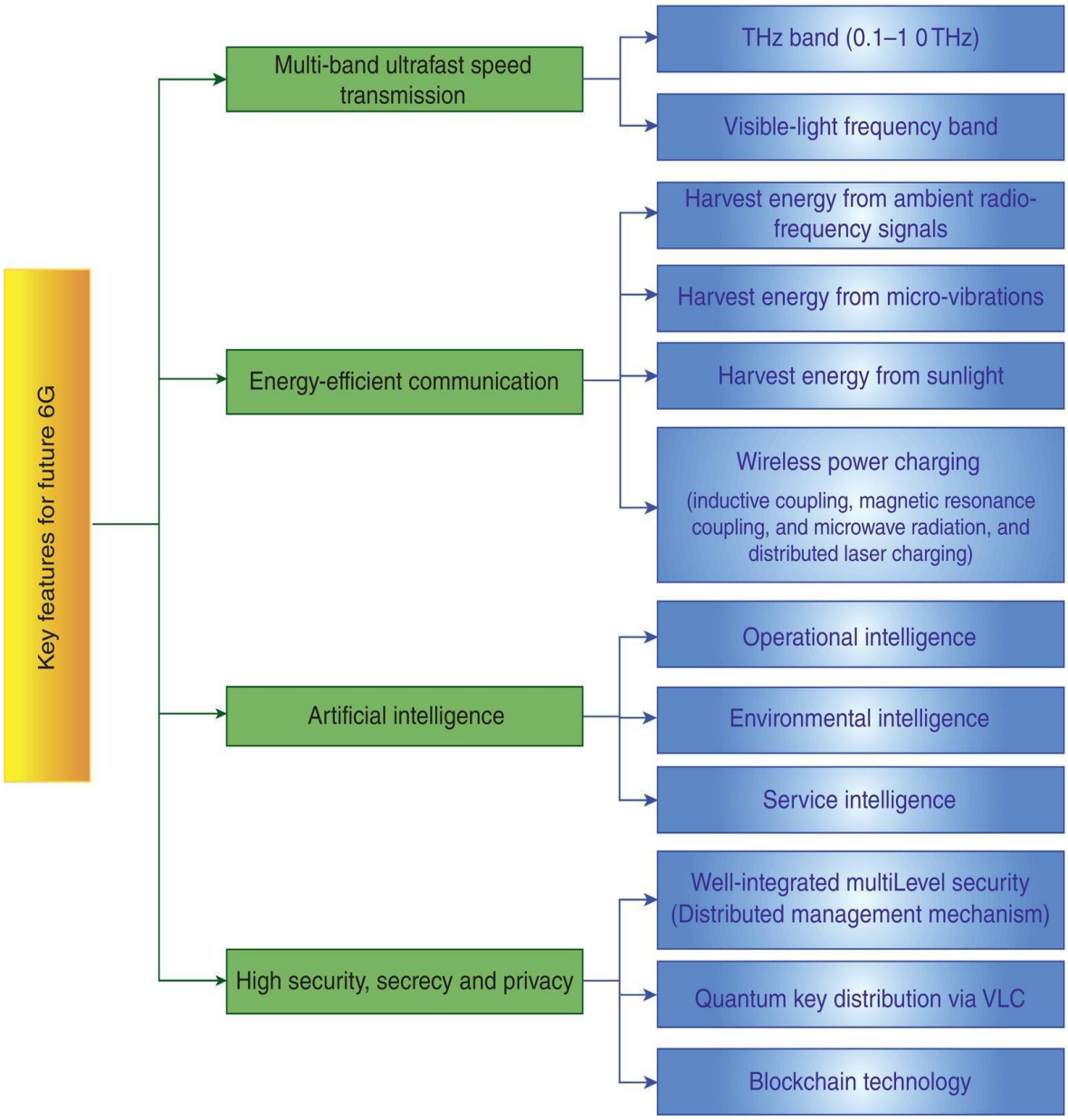


Рис. 3.2 Ключові характеристики майбутнього 6G

Отже, XR з роздільною здатністю 4K або 8K підтримує зображення високої чіткості, що підходить для таких додатків, як відеоігри та 3D-камери. Крім того, цей додаток є життєво важливим для офісного середовища, оскільки він підтримує віртуальні фізичні зустрічі [7], соціальний досвід, а також освіту і навчання. Оскільки ці нові додатки використовують понад 1 Тбіт/с, вони можуть

наситити існуючі мережі 5G, тим самим забезпечуючи плавний перехід. Отже, віртуальна, доповнена і змішана реальність підтримуватимуть мінімальну затримку і надвисоку надійність.

Вплив 6G на космічні технології та супутниковий зв'язок.

До 2030 року ми очікуємо побачити нове покоління мобільного зв'язку, 6G. Ми можемо очікувати побачити антени, решітки та носимі пристрої, які взаємодіяти між собою. Очікується, що все це забезпечуватиме високу швидкість завантаження і блискавичну швидкість вивантаження порівняно з тим, що ми маємо сьогодні. Необхідно буде також спільно розробляти нові, сумісні додатки. Люди користуються інтернетом більше, ніж будь-коли, а системи зв'язку стали вищими. Щоб відповісти на цей виклик, ми повинні розробити більш потужну архітектурну інфраструктуру для систем мобільного зв'язку в усьому світі. Якщо ми цього не зробимо, старі технології застаріють і стануть непридатними для використання. Супутники GEO (геостаціонарні), MEO (середня навколоземна орбіта) і LEO (низька навколоземна орбіта) є елементами комунікацій для розширення та інтеграції з наземними мережами. Супутники є основою всіх послуг зв'язку в усьому світі і ефективним засобом комунікації. Супутниковий зв'язок застосовується для зв'язку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у діапазонах мм-хвиль/ТГц, а також для морського широкосмугового зв'язку, автоматизації дистанційного визначення місцезнаходження, супутників на будівлях, професійних мобільних мереж, авіаційного широкосмугового зв'язку і масового MIM з використанням діапазонів до 6 ГГц і мм-хвиль.

У багатьох людей є побоювання щодо безпеки та конфіденційності системи зв'язку 5G, наприклад, щодо здоров'я та шпигунських технологій.

Однак технології зв'язку 5G вже існують, наприклад, у діапазоні mmWave. Вони використовуються в системах безпеки, поліцейських радарах, супутниках і дистанційних датчиках. Всі ці технології були досліджені, і немає жодних доказів того, що ці хвилі створюють несприятливі умови для здоров'я. З 6G ми можемо очікувати, що зв'язок з'явиться по всьому світу в більшій кількості сільських районів. Необхідно буде також докладати більше зусиль для забезпечення

безпеки.

З моменту запуску першого супутника в космос у 1957 році людство зробило значний крок у розвитку космічних технологій. Від комп'ютера наведення "Аполлона" з 4 КБ оперативної пам'яті до суперкомп'ютерів, які сьогодні використовує НАСА, ми, безумовно, пройшли довгий технологічний шлях. 6G може стати наступним кроком до подальшого підкорення космосу. На рис. 3.3 і 3.4 показано макет космічної інтегрованої обчислювальної мережі, яка може стати можливою. 6G стане першим поколінням, яке об'єднає космічний, наземний зв'язок та Інтернет речей у величезну мережу зв'язку. Ключовими характеристиками 6G є зв'язок, мобільність, безпека, мовлення, повсюдність і швидкість передачі даних.

Інтегрована мережа "космос-повітря-земля" може стати можливою за допомогою 6G завдяки використанню комбінації супутників, що обертаються навколо Землі на різних рівнях. Зі зростанням потреб людства мережі наземні мережі, ймовірно, стануть ще менш ефективними в міру того, як ми будемо рухатися в майбутнє [13]. Саме тут у гру вступає Інтегрована мережа "Космос-Повітря-Земля" (SAGIN). Завдяки очікуваній швидкості і надійності 6G, мережа SAGIN потенційно може запропонувати інтернет-зв'язок величезним територіям і людям, які в іншому випадку мали б труднощі з підключенням взагалі, і заповнити цифрову прогалину в районах з недостатнім рівнем обслуговування - кажучи вже про збільшення мережевого трафіку в міських районах завдяки здатності витримувати набагато більше навантаження, ніж наземні мережі.

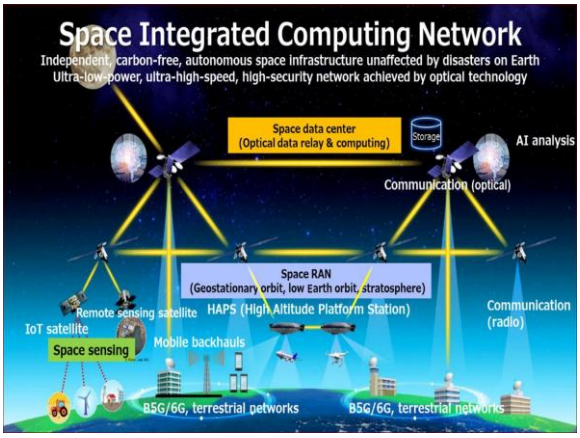


Рис. 3.3 6G та космічна обчислювальна мережа

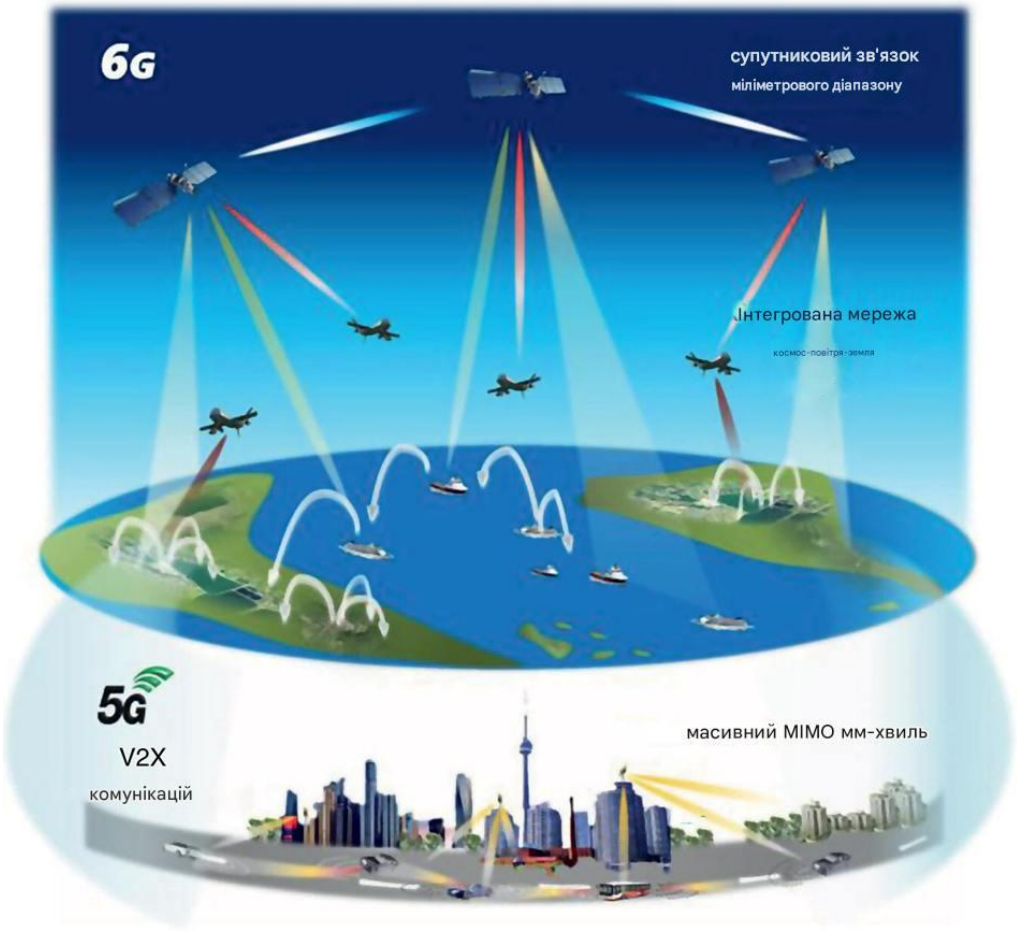


Рис. 3.4 3D-покриття 6G

6G також буде корисним для пілотованих космічних місій. Астронавти, які проводять дослідження на Міжнародній космічній станції, легше зв'язуватися зі своїми країнами і використовувати більше пристроїв Інтернету речей і Інтернету речей на самій станції.

Існує також можливість майбутніх польотів на Місяць, пілотованих місій на Марс або навіть більш далеких польотів у космос. Технології 6G допоможуть усім цим проектам і зроблять їх більш вірогідними.

Вплив 6G на інші галузі.

Охорона здоров'я та космічна галузь будуть не єдиними сферами нашого життя, на які вплине 6G, коли він буде впроваджений. Від обробної промисловості до і навіть сільського господарства - 6G торкнеться багатьох

аспектів нашого життя. Ймовірно, ми навіть не можемо уявити, скільки всього зміниться з появою 6G, оскільки до його комерційного впровадження ще щонайменше десять років. На рис. 3.5 показані потенційні варіанти використання систем 6G, хоча цей список не є вичерпним.

Сільське господарство, як правило, повільно сприймає технологічні зміни. Суспільство часто дивиться на неї як на "нижчу" галузь, але наш світ не міг би існувати без неї. Зі стрімким зростанням населення планети сільськогосподарська [5] галузь, ймовірно, повинна буде збільшити обсяги виробництва до 70% у найближчі десятиліття. 6G і технології, які він дозволяє, відіграватимуть важливу роль у досягненні цього зростання. Бездротові сенсорні мережі дозволять здійснювати віддалений моніторинг ферм, а штучний інтелект зможе приймати рішення на основі даних, отриманих від датчиків. Сільськогосподарською технікою, такою як трактори і комбайни, можна буде керувати дистанційно або автономно, доповнену реальність можна буде використовувати для навчання нових фермерів і працівників ферм, а худобу можна буде відстежувати і контролювати за допомогою дистанційних датчиків.

Під час пандемії COVID-19 багато учнів від дитячого садка до університету були змушені навчатися дистанційно, часто з поганими результатами. 6G надасть кращі можливості для дистанційного навчання через роботу в класі онлайн. Онлайн-навчання можна вдосконалити, використовуючи пристрої доповненої реальності та голограми, щоб значно покращити досвід і навіть імітувати фізичну аудиторію [5]. У недистанційній освіті 6G також може принести користь, забезпечуючи швидкий зв'язок і час реагування в надзвичайних ситуаціях, таких землетруси або активна стрілянина.

У виробничій та транспортно-логістичній галузях 6G матиме величезний вплив. 6G дозволить автоматизувати виробництво з надзвичайно низькою затримкою, а датчики зможуть надавати точну інформацію про деталі в режимі реального часу, коли вони проходять через виробничий процес. Після завершення і відвантаження 6G допоможе логістичному процесу, покращуючи управління запасами, надаючи можливості для аналізу логістичної доцільності, оптимізуючи

комунікації на складах, автоматизуючи навантажувачі і потенційно навіть дозволяючи майже автономне водіння вантажівок [5]. Інші функції, такі як відстеження відправлень і оновлення інформації про доставку в режимі реального часу, ймовірно, будуть покращені за допомогою 6G.

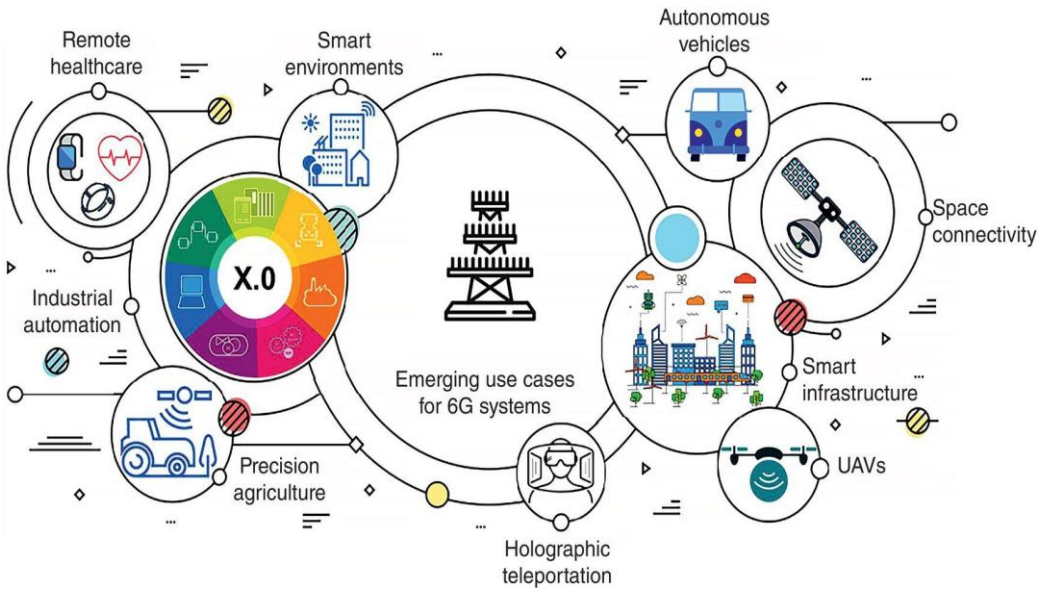


Рис. 3.5 Різні потенційні варіанти використання 6G

3.3 6G-покриття завдяки позаземним мережам

Управління стихійними лихами є важливим інструментом, який допомагає впоратися зі лихами, такими як пожежі, торнадо і повені. Тому мережі повинні підтримувати неземний зв'язок (НЗК), щоб обмежити кількість людських жертв і матеріальних збитків. NTN слід будувати, щоб розвантажити трафік і охопити віддалені райони. Деякі з технологій, що підтримують НТК, включають БПЛА[2], висотні , дрони і супутники, які вимагають повсюдного підключення і систем з низькою затримкою . Як наслідок, ці системи зв'язку розвантажать канали зв'язку, підтримають високошвидкісну мобільність і збільшать пропускну здатність послуг. В ідеалі, NTC корисні для підтримки спостереження, метеорології, навігації та дистанційного зондування. Крім того, 6G може підтримувати лазерний зв'язок, який є життєво важливим для зв'язку на великі відстані.

Вартість виробництва та запуску супутників у космос значно знизилася за останні 10 років [1]. Це призвело до запланованого розгортання кількох супутникових сузір'їв для зв'язку, таких як Starlink, OneWeb та система Kuiper від Amazon [2]. Ці системи спочатку були націлені на ринок фіксованого бездротового зв'язку, але наразі фокус зміщується на ринок смартфонів та IoT-пристроїв [3], забезпечуючи підключення до супутників для портативних пристроїв. Це вирішує проблему відсутності покриття в місцях без наземного зв'язку, забезпечуючи справжнє глобальне покриття.

Проєкт партнерства третього покоління (3GPP) у Release-17 визначив підтримку позаземних мереж (NTN) як для фіксованого, так і для портативного бездротового зв'язку з підтримкою технологій New Radio (NR) та IoT (зокрема, NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT) та enhanced Machine-Type Communication (eMTC)) [4].

NTN прагне забезпечити дійсно глобальну доступність послуг 5G (а згодом і 6G), а також стійкість у випадку природних катастроф, таких як цунамі чи землетруси. Сфера NTN охоплює супутники на різних орбітах — від геостаціонарної (GEO) до низької (LEO), а також високоплатформові системи (HAPS). У порівнянні з наземними мережами (TN), NTN має кілька нових викликів. По-перше, значно більша відстань (до 37 000 км) до мережевого вузла має серйозний вплив на енергетичний бюджет каналу та час затримки (RTT). По-друге, супутники LEO рухаються відносно Землі — до 7,5 км/с — що спричиняє зсуви частоти та часу. По-третє, цей рух супутників впливає на низку радіопроцедур, таких як мобільність. 3GPP Release-17 і 18 враховують ці виклики та пропонують нові архітектури. Як показано на рис. 3.6, у NTN розглядаються прозорі та регенеративні архітектури — у першій базова станція (BS) залишається на Землі, тоді як у другій — повністю або частково розміщується на супутнику.

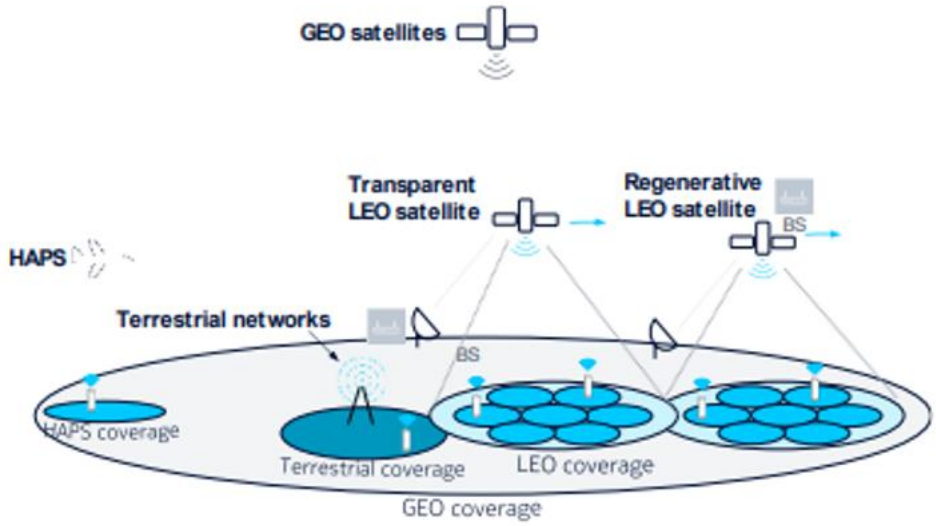


Рис 3.6 Огляд архітектур позаземних мереж

Багато з удосконалень, реалізованих у 5G для вирішення викликів NTN, буде розвинено далі в 6G, а також додано нові. Оскільки NTN щойно були запроваджені в Release-17 і 18, природно очікувати еволюційний, а не революційний підхід у 6G. Різні дослідження описують ключові складові майбутнього 6G, як-от [5]: штучний інтелект та машинне навчання (AI/ML), нові спектральні технології, сенсорика, надзвичайна щільність підключень і нові архітектури, а також питання безпеки та довіри.

чікується, що NTN стануть частиною 6G із самого початку та, перш за все, сприятимуть глобальному підключенню. Проте NTN матимуть і інші ключові функції, які покращать систему та її продуктивність у 6G.

Позаземні мережі в 6G

Становлять відправну точку для розвитку NTN у 6G, було визначено у 3GPP Release-17 та 18A. Release-17 визначив базову підтримку стільникового зв’язку через супутники. Це завдання було непростим, оскільки під час дослідницького етапу було виявлено безліч проблем, які слід вирішити, таких як покращення синхронізації та співвідношення часу, модифікації HARQ (гібридний автоматичний повторний запит) та випадкового доступу (RA), вибір у

режимі очікування (idle mode) та мобільність у підключеному режимі (connected mode).

Існує три різних типи розгортання комірок (cell) для позаземних мереж (NTN):

- Earth Moving Cells (EMC) — супутниковий промінь, який формує комірку, зафіксований відносно супутника, тому комірка рухається над поверхнею Землі з тією ж швидкістю та напрямком, що і сам супутник.
- Quasi Earth Fixed Cells (EFC) — напрямок променя, що формує комірку, спрямовується на певну точку на Землі. Комірка залишається "закріпленою" на поверхні Землі протягом певного часу, після чого перемикається на наступну фіксовану позицію.
- Earth Fixed Cells — комірки супутника постійно зафіксовані над конкретним місцем на Землі, без необхідності перемикання їхнього положення. Це можливо лише для супутників на геостаціонарній орбіті (GEO).

Ці варіанти розгортання відрізняються як з точки зору складності реалізації на супутнику, так і з точки зору мобільності абонентських пристроїв (UE). Перевага EFC перед EMC полягає в нижчій частоті передачі між комірками (handover), адже EFC утримується над однією ділянкою довше. Мінімальні кути підняття (elevation angles) залежать від кількості супутників та конфігурації мережі. Однак малі кути підняття призводять до більшого загасання сигналу (coupling loss), оскільки відстань між супутником і пристроєм зростає. Компроміс між загасанням сигналу та частотою передачі комірки для супутника LEO на висоті 600 км зображено на рис. 3.7 для статичного користувача в мережі з комірками радіусом 25 км. При мінімальному куті підняття 10° додаткове загасання порівняно з положенням супутника прямо над користувачем (надир) становить до 10 дБ. У середньому втрати становлять 3 дБ за час видимості супутника, а зміна комірки відбувається кожні 500 секунд. Для порівняння: для EMC зміна комірки з таким же розміром відбувається кожні 4–5 секунд, але додаткові втрати майже відсутні. Цікавий компроміс досягається при куті

підняття 75° — частота зміни комірки знижується до разу на 40–50 секунд, а додаткові втрати залишаються мінімальними.

Щоб забезпечити повне покриття при низькому мінімальному куті підняття (наприклад, 10°), необхідно мати велике "відбиття" супутника (footprint), як показано на рис. 1.7. При 10° радіус охоплення становить 1761 км, що відповідає приблизно 5000 комірок по 25 км. Це надто багато для супутника LEO на висоті 600 км. При 75° радіус зменшується до 147 км, що відповідає приблизно 35 коміркам на супутник — значно більш реалістичний варіант. Максимальна кількість комірок на супутник залежить не лише від кількості можливих променів, а й від пропускної здатності каналу підключення (feeder link, FL).

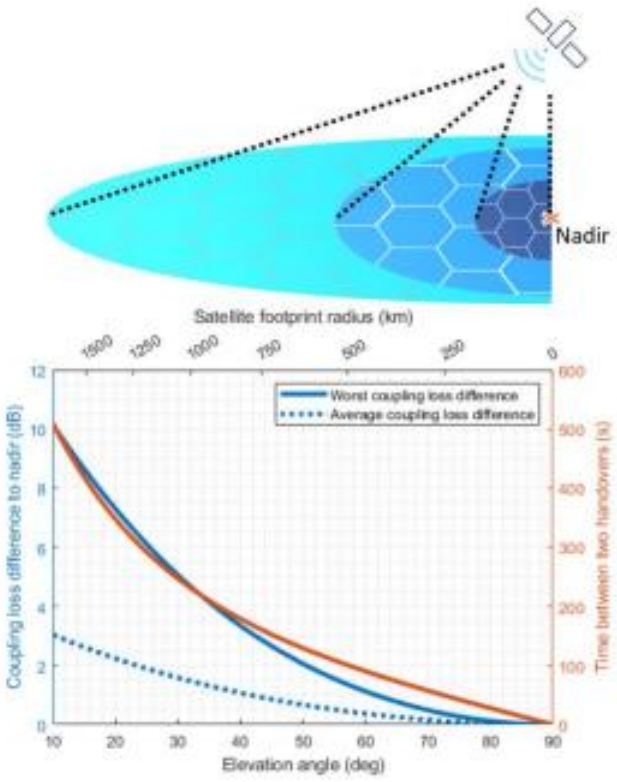


Рис. 3.7 Висота та радіус супутника для покриття

Компроміс між загасанням сигналу (синя лінія) та частотою зміникомірок (червона лінія) при різних кутах підняття для статичного користувача, LEO 600

км, комірки 25 км. Необхідний радіус покриття супутника показано у верхній шкалі.

Додаткові відмінності у мобільності полягають у наступному: у EMC користувачі передаються між комірками поступово, коли комірка "з'їжджає", тоді як у EFC — всі користувачі повинні бути передані майже одночасно, коли активна комірка вимикається, а наступний супутник її замінює. Для мобільності в підключеному режимі (connected mode mobility) у NTN, 3GPP ввів удосконалення до механізму умовної передачі (Conditional Handover, CHO). Оскільки зміни в RSRP/RSRQ (рівень сигналу/якість сигналу) часто не є достатньо показовими для ініціації передачі у NTN (через слабкий контраст між центром і краєм комірки), до CHO додали умовність за часом або місцем розташування. Зміна комірки ініціюється лише тоді, коли виконуються одночасно і умови часу/місця, і умови радіовимірювань.

Щоб оптимізувати споживання енергії пристроями UE та адаптуватися до великих комірок (які можуть сягати сотень кілометрів), у Release-17 було введено можливість вимикати вимірювання сусідніх комірок, якщо виконуються відповідні умови за місцем чи часом. EFC може транслювати інформацію про час, що залишився до завершення обслуговування поточної комірки. UE має забезпечити виконання вимірювань для вибору наступної комірки до того, як покриття зникне. Аналогічно, UE може використовувати своє місцезнаходження: воно порівнюється з координатами, які транслюються коміркою. Якщо відстань менша за встановлений поріг — UE починає пошук сусідніх комірок і заощаджує заряд батареї.

Оскільки час затримки "туди-назад" (RTT) у позаземних мережах (NTN) значно більший, ніж у наземних мережах (TN) — мінімум 8 мс для супутників LEO на висоті 600 км і понад 500 мс для супутників GEO, — і RTT додатково швидко змінюється у випадку з LEO, були розроблені нові способи забезпечення синхронізації UE та збереження точності часу передавання сигналу. У TN контроль за коригуванням часу здійснює мережа, а в NTN UE відіграє ключову роль та самостійно компенсує випередження передавання (Timing Advance, TA)

без необхідності отримання команд від мережі. Цей параметр обчислюється на основі позиції UE (отриманої через обов'язкову підтримку GNSS), ефемерид супутників та затримки каналу підключення (feeder link), яку мережа передає в системній інформації (SI).

HARQ — важлива функція бездротових мереж для обробки повторних передавань. Великий RTT у NTN викликає проблему зависання HARQ-процесів, коли всі можливі канали зайняті через затримку, і деякі з них не вивільняються вчасно. У Release-17 цю проблему пом'якшено подвоєнням кількості HARQ-процесів. Крім того, HARQ-підтвердження може бути вимкнено для сервісів, які не потребують високої надійності передавання.

Окрім NR у NTN, Release-17 також додав підтримку NB-IoT/eMTC через NTN. Окрім впровадження подібних рішень як у NR, тут виникли додаткові виклики через: використання напівдуплексних пристроїв, повторення сигналів для поліпшення покриття, розривне покриття через обмежену кількість супутників, неможливість одночасного використання GNSS та модему, а також необхідність забезпечення довгого терміну служби батареї та низької вартості пристроїв [6]. Запропоновані рішення включають: трансляцію інформації до 4 сусідніх супутників у випадку розривного покриття (щоб пристрій міг прогнозувати наявність покриття на години або дні наперед), звітність про актуальність даних GNSS, сегментовані періоди повторення підйомного каналу, щоб забезпечити корекцію частоти та часу, передачу інформації про TA, щоб базова станція знала, коли напівдуплексний пристрій може заблокувати прийом зворотного каналу.

Release-18 розширює рішення Release-17 і вдосконалює як NR, так і NB-IoT/eMTC.У NR запроваджено оптимізації хендоверу, такі як передавання без RACH (RACH-less HO), що зменшує обсяг сигналізації, завдяки трансляції інформації про цільову комірку через широкомовні канали. У сфері IoT додано механізми мобільності, що дозволяють: – застосовувати часо- та геозалежні умови Release-17 NR NTN до eMTC, здійснювати вимірювання сусідніх комірок до

виникнення втрат зв’язку (для NB-IoT), транслювати ефемериди сусідніх комірок у системній інформації.

Введено механізм перевірки місцезнаходження UE мережею для ситуацій, коли супутникова комірка покриває кілька країн. У таких випадках UE повинен вибирати PLMN тієї країни, де він фізично знаходиться. Щоб боротися з шкідливими UE, які підробляють своє місцезнаходження, специфікація містить метод виявлення таких пристроїв за допомогою багатоточкового RTT-позиціювання (multi-RTT). Представлено покращення покриття низхідної лінії (downlink) для підтримки швидкостей до 3 кбіт/с для портативних пристроїв. Зокрема, розширено модель групування Demodulation Reference Signal (DMRS) для адаптації до умов NTN і введено повторення сигналу для HARQ-підтвердження повідомлення 4 у процесі первинного доступу. Ці удосконалення є основними цілями Release-18 для NTN. Зміст Release-19, який передує 6G, наразі ще невідомий.

Удосконалення в технології 6G.

Технологія шостого покоління (6G) мобільних мереж встановить нові стандарти для задоволення недосяжних вимог до продуктивності мереж п'ятого покоління (5G). Це пов'язано з високими вимогами до більш інтелектуальної мережі, ультранизькою затримкою, надзвичайною швидкістю мережевого зв'язку та підтримкою великої кількості різних підключених додатків. У довгостроковій перспективі поєднання різних бізнес-розробок із комунікаційними платформами, ініційоване 5G, перебільшить і підкреслить сфери, де можливості 5G не відповідатимуть вимогам продуктивності. Мотивовані розробкою застосунків у масових з'єднаннях, розробляються майбутні мережі, розробки та технологічні досягнення мобільного зв'язку, які виходять за межі мереж п'ятого покоління (B5G). У цьому контексті потрібні дуже занурюючі застосунки, такі як тривимірні (3D) комунікації, цифрові двійники або застосування великої розширеної реальності (XR)/віртуальної реальності (VR), для реалізації яких у великому масштабі для комерційної доцільності потрібні можливості 6G. Головним чином, ми очікуємо, що лише майбутні 6G-мережі зможуть підтримувати надзвичайно

високопродуктивне підключення з величезною кількістю підключених пристроїв, навіть у складних ситуаціях, таких як надзвичайна щільність, різноманітність мобільності та енергійне середовище.

5G досягне свого ліміту до 2030 року, що спонукає до розробки нових парадигм для подолання викликів попередніх поколінь мобільних мереж. Очікується, що мобільна мережа 6G досягне високих практичних стандартів, які відповідатимуть вимогам продуктивності IoE, VR, 3D-додатків, штучного інтелекту, M2M-комунікації, eMBB та їх додаткових технологічних напрямків [7].

Мережа 6G забезпечить у 100 разів збільшення енергетичної та об'ємної спектральної ефективності порівняно з мережею 5G. Інфраструктура 6G буде надзвичайно складною через потужне підключення до мережі. Очікується, що глобальний мобільний трафік зростає на 55 % щороку між 2020 і 2030 роками [10]. Очікуване зростання трафіку забезпечить 5 016 ексабайт (EB) щомісячних даних до 2030 року. Ця величезна кількість даних із потужними можливостями обробки та навчання може бути використана для керування мережею на різних етапах.

Мобільні технології — це місце, де користувач має «мобільність». Хоча бездротовий зв'язок забезпечує низку зручностей, він також включає численні ризики та проблеми. З початку 1970-х ці проблеми вирішувалися протягом різних поколінь. 6G — це нинішня технологія бездротового зв'язку, що перебуває в розробці, поступова еволюція порівняно з початковою 1G. 6G — це технологія, яка дозволить 6G бездротовій комунікації стати реальністю. Покоління бездротового зв'язку випускаються приблизно з інтервалом у 10 років. Якщо ця тенденція збережеться, очікується, що 6G з'явиться в нашому житті приблизно у 2030 році. Обговорюються загальні характеристики всіх поколінь, щоб чітко побачити прогрес між поколіннями з часів 1G.

Мультиплексування з частотним поділом (FDMA) зі швидкістю 2 Кбіт/с спочатку використовувалося для 1G . Це була мобільна телефонна служба з дуже низькою пропускною здатністю та слабким з'єднанням. Пізніше ми помітили

збільшення швидкості 2G (14-64 Кбіт/с) [8]. Перехід від 1G до 2G ще більше змістив аналогову мережу на цифрову. Покоління 2G включало технології коротких повідомлень (SMS) та мультимедійних месенджерів (MMS) з пропускною здатністю 30–200 кГц [7].

У 3G швидкість додатково збільшувалася до 2 Мбіт/с разом із пропускною здатністю, яка коливалася від 15 до 20 МГц. Це призвело до масштабних інновацій у мобільних технологіях [4]. Такі інновації включають технології, які дозволяють «розумному» телефону з'являтися в нашому повсякденному житті. Згодом було розроблено четверте покоління (4G) зі швидкістю завантаження 100–300 Мбіт/с, тоді як 5G має вищу швидкість завантаження. Запланована швидкість пропускної здатності досягне до 1 Гбіт/с [47]. Ця інформація про поступову еволюцію від 1G до 5G надається для порівняння цих поколінь мобільних технологій і оцінки розвитку 6G.

5G стане широко доступним, закладаючи основу для 6G. Порівнюючи всі покоління, очевидно, що швидкість і покриття інтернету поступово зростають. Мета 6G — забезпечити глобальне покриття. Застосування на основі ШІ відрізнять 6G від попередніх поколінь. Хоча автономна 6G-мережа ще перебуває на ранній стадії, очікується, що вона стане основою 6G-технологій. Порівняно з поточною пропускною здатністю 5G, швидкість передачі даних і якість безпеки зростуть, а затримка зменшиться. Оцінюється, що 6G має швидкість від 1 до 10 Тбіт/с [9]. Його частота буде вищою, ніж у всіх інших поколіннях. Частота зазвичай зростає з наступними поколіннями. Високі швидкості передачі визначаються частотою ТГц. Завдяки 6G затримка буде в межах 10–100 мкс, щільність зв'язку — у межах 10 пристроїв/км^2, а пропускна здатність трафіку буде в межах 1 Гбіт/с/м^2 [9]. Крім того, для нових ключових показників визначення 6G покращить відсоток покриття до 99 %, надійність до 99,9999 %, похибку позиціонування від поточного рівня лічильника до сантиметра, а чутливість приймача — краще за –130 дБм. Ефективність спектра та енергоефективність експоненційно зростатимуть порівняно з 5G. 6G обіцяє необмежене бездротове з'єднання. Це буде мережа зв'язку, яка прийматиме

численні системи, такі як зв'язок, обличення, зберігання, обчислення, керування, глобальна система позиціонування (GPS), радар, зображення та навігація [5], [9]. Основні особливості 6G узагальнені на 3.8.

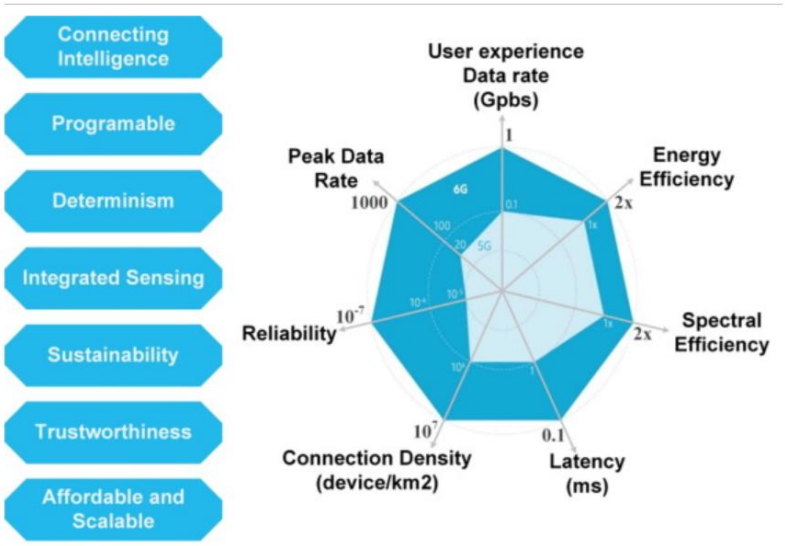


Рис. 3.8 Ключові покращення технології 6G

3.4. Важливість розвитку технології 6G

Щоб зрозуміти важливість технології 6G, важливо розглянути, де буде використовуватися 6G. Наприклад, окрім телефонів, очікується, що щільність мобільних пристроїв зв'язку зросте. Це можуть бути носими пристрої, інтегровані гарнітури та імплантовані сенсори [13]. Кожен новий пристрій потребує певної системи для зв'язку, а також різних умов навколишнього середовища залежно від місця використання. Пристрої вищої якості потребують більш складних умов навколишнього середовища, і ці умови доступні лише в 6G. Незважаючи на вдосконалення технологій 4G і 5G, може бути неможливо забезпечити безперебійну, високоякісну комунікацію всюди з існуючими поколіннями. Ці покоління все ще можуть страждати від таких проблем, як висока мобільність, доплерівський зсув, часті передачі та відсутність покриття в деяких регіонах [13]. Архітектура 6G вирішить ці проблеми та забезпечить глобальне покриття [5]. Поточні покоління комунікації можуть бути недостатніми для внутрішньої комунікації. Кількість нерозвинених і сільських регіонів є густонаселеною. Технологія 6G буде ефективною як у нерозвинених сільських

районах, так і в жвавих і розвинених містах. Ця масштабна мережа зв'язку буде забезпечена наземним, повітряним та супутниковим зв'язком [5].

Підводні човни також включені до концепції глобального покриття. Це критично важливо, оскільки більша частина світу покрита водою. Технологія 6G повинна брати участь у Індустрії 4.0. Автоматизація будівель і фабрик, виробництво, електронне здоров'я, транспорт, сільське господарство, спостереження та розумні мережі потребують 6G для підвищення надійності, затримки та широкої пропускної здатності. З запуском 6G очікується, що багато пристроїв, які використовують інтернет-інфраструктуру, будуть включені до повсякденного життя [3]. Концепція IoE забезпечує інтеграцію та автономну координацію між усіма пристроями. 6G забезпечить значну підтримку IoE. Автономізація пристроїв полегшує життя розумним суспільствам, забезпечуючи розумні будинки, розумні автомобілі та розумні фабрики. Він дозволить пристроям виконувати кілька завдань, які сьогодні виконують люди. 6G додатково полегшить розумні медичні послуги, оскільки стане можливою надійна система дистанційного моніторингу. Надійність, низька затримка та висока швидкість передачі даних дозволять навіть проводити дистанційну операцію, оскільки медичні дані можна швидко та зручно передавати [4]. Оборонна промисловість також отримає вигоду від технології 6G, оскільки для БПЛА потрібні високі швидкості передачі даних у бездротових з'єднаннях. Надійність цього з'єднання буде вирішальною для оборонної промисловості. Отже, 6G буде значно безпечнішим за поточні покоління.

Ще одним внеском покоління 6G стане передача п'яти відчуттів (смак, нюх, дотик, зір і слух) користувачам. Ця передача включатиме неврологічний процес, який стане можливим завдяки бездротовим взаємодіям мозку та комп'ютера [2]. Система, відома як інтерференція мозку-комп'ютера (BCI), буде використана для встановлення зв'язку між мозком та іншими пристроями, підключеними до цієї системи [5]. Тактильна комунікація — це галузь невербальної та тактильної комунікації. Тактильний зв'язок, як і інші сенсорні комунікації,

підтримуватиметься кращими функціями 6G. ШІ, віртуальна реальність, 3D-медіа та системи на основі IoE базуються на 6G [6].

3.5. Архітектура мобільної технології 6G

Як уже згадувалося, поточні можливості наземних мереж далеко не здатні задовольнити вимоги 6G для глобального покриття. Потрібна масштабна мережа, яка також може інтегрувати позаземні мережі для підтримки різноманітних застосувань, таких як польоти та вітрильний спорт. Архітектура 6G буде безклітинною, розмірно великою та чотирирівневою. Рівні мережі включають космос, повітря, земний та морський, як показано на рис. 3.9 [5]. Наприклад, на рівні космічної мережі космічні інтернет-послуги (які можуть бути критично важливими для космічних подорожей) будуть у зоні покриття через супутники [9]. Для наземного рівня буде забезпечена передача даних зі швидкістю Тб/с для розширення зони покриття 6G за допомогою частотних діапазонів ТГц. Тому частота підвищується, що призводить до збільшення втрат на шляху. Діапазон 6G буде меншим, ніж у поточних поколінь. У такому випадку доведеться використовувати більше базових станцій, що зробить мережу 6G значно більш переповненою та щільною.

За допомогою 5G концепція мережі IoT означає мільярди інтелектуальних пристроїв, які з'єднують системи, людей та інші додатки для збору та обміну даними. З 6G ця концепція розшириться і розвиватиметься у режим керування та реагування в реальному часі, не обмежуючись виявленням зв'язків і комунікаційних відносин. «Тактильний Інтернет» описує виявлення, контроль, доступ і роботу віртуальних об'єктів у реальному часі, як визначено стандартом IEEE 1918.1 [6]. Через поточні обмеження ресурсів і детекторів спектральний діапазон ТГц не використовується у повній мірі. Фотонні рішення є передовою технологією, яка, як очікується, забезпечить цей частотний діапазон для різних застосувань.

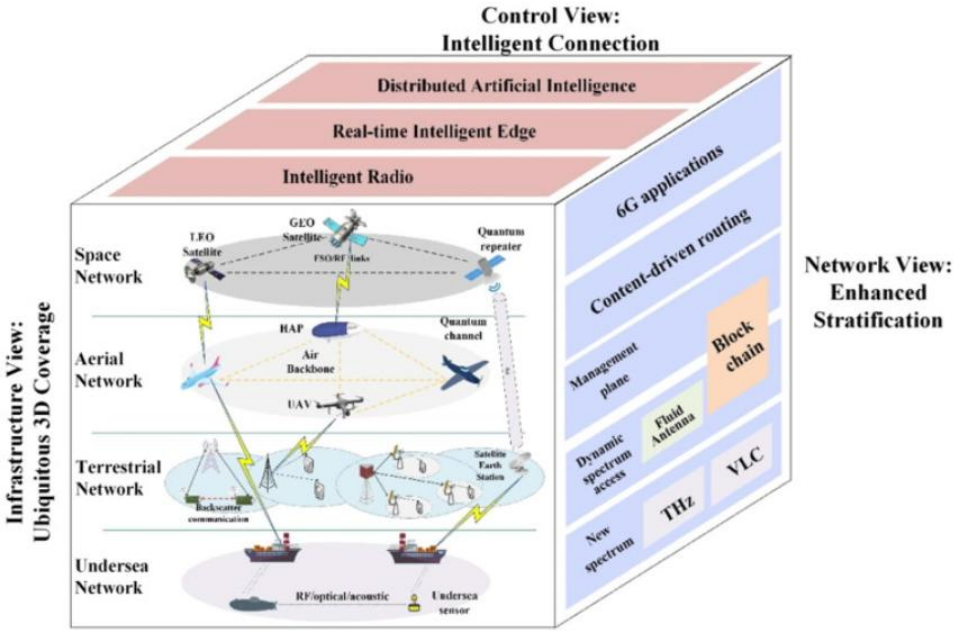


Рис. 3.9 Архітектура 6G

Фотонні методи є бажаними рішеннями для отримання mmWaves і THz з точки зору енергоефективності, пропускної здатності та діапазону регулювання. Методи генерації ТГц частот на основі фотонних гетеродинних методів змішування можуть подолати обмеження пропускної здатності електричних компонентів, а також ефективно сприяти безшовній інтеграції волоконного та бездротового мережевого зв'язку. Це зробить систему потокового зв'язку з волоконним ТГц-волокном перспективним вибором [5], [6]. Системи зв'язку з видимим світлом (VLC) мають велике значення для 6G. VLC працює в діапазоні частот від 400 ТГц до 800 ТГц. На відміну від радіочастотних технологій, які використовують антени в низькому діапазоні ТГц, зв'язок із видимим світлом базується на джерелах світла (зокрема, світлодіодних діодів (LED) та датчиках зображення або фотодіодних масивів) для зв'язку з трансиверами [6]. У кількох неземних сценаріях, таких як авіаційні або морські застосування, зв'язок видимого світла перевершує радіочастотні технології за ефективністю поширення.

Можливості мобільної технології 6G

Мобільна технологія 6G пропонує низку ключових факторів, таких як висока пропускна здатність, надзвичайно надійні канали зв'язку, підвищена швидкість передачі даних, низька затримка та відповідне середовище для AI-застосувань. Ці фактори створюють багато нових сфер застосування, де 6G може використовуватися замість колишніх мобільних технологій 5G. Останні заявки охоплюють широкий спектр — від військових застосувань до особистих потреб. З початком пандемії особисті потреби тепер мають задовольнятися дистанційно. Необхідність надійних комунікаційних послуг без компромісів із високими швидкостями передачі даних стала дедалі більшою проблемою. У цьому розділі розглядаються можливості та переваги мобільних технологій 6G, включаючи ключові фактори та приклади.

4. ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ 5G/6G З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

4.1. Штучний інтелект з використанням мобільних технологій 5G/6G

Концепція розумних міст бере початок з 1994 року. Це стало більш необхідним із появою пандемії COVID-19, оскільки багато людських практик (таких як освіта чи культурні заходи) змушені перейти на цифрові платформи. Спроба зробити міста розумнішими — це використання автономних транспортних засобів, сенсорів і камер для регулювання руху, систем розпізнавання та безготівкових систем у фінансовому секторі. Ці спроби вимагають швидшого підключення, особливо в рішеннях на основі ШІ, таких як інтернет речей. Мобільна технологія 6G обіцяє швидше з'єднання, вищу швидкість широкосмугового зв'язку та швидшу пропускну здатність, необхідну для згаданих вище сервісів.

Можливості підключення 6G мобільних технологій у тисячу разів швидші, ніж у 5G, який наразі дозволяє користувачам отримувати швидкість від 1 до 10 Гбіт/с. Хоча мобільна технологія 5G корисна для комунікаційних технологій, таких як IoT, 6G дозволяє повністю використовувати технології ШІ. Завдяки внеску 6G у штучний інтелект, обслуговування клієнтів, яке пропонує IoT, зросте експоненційно, забезпечуючи легкий доступ до персональних даних або екологічних даних, таких як погодні умови, якість їжі чи забруднення повітря в міських районах. Крім того, різноманітність взаємодій між цими пристроями та людьми розшириться, що призведе до відносно дешевшого та швидшого доступу до особистих або екологічних даних. Необхідність зробити наші міста розумнішими для легкого доступу як до екологічних, так і до особистих даних тепер є більш важливою для нашого життя, ніж у минулому, через пандемію [9]. На рис. 4.1, огляд концепції розумного міста.

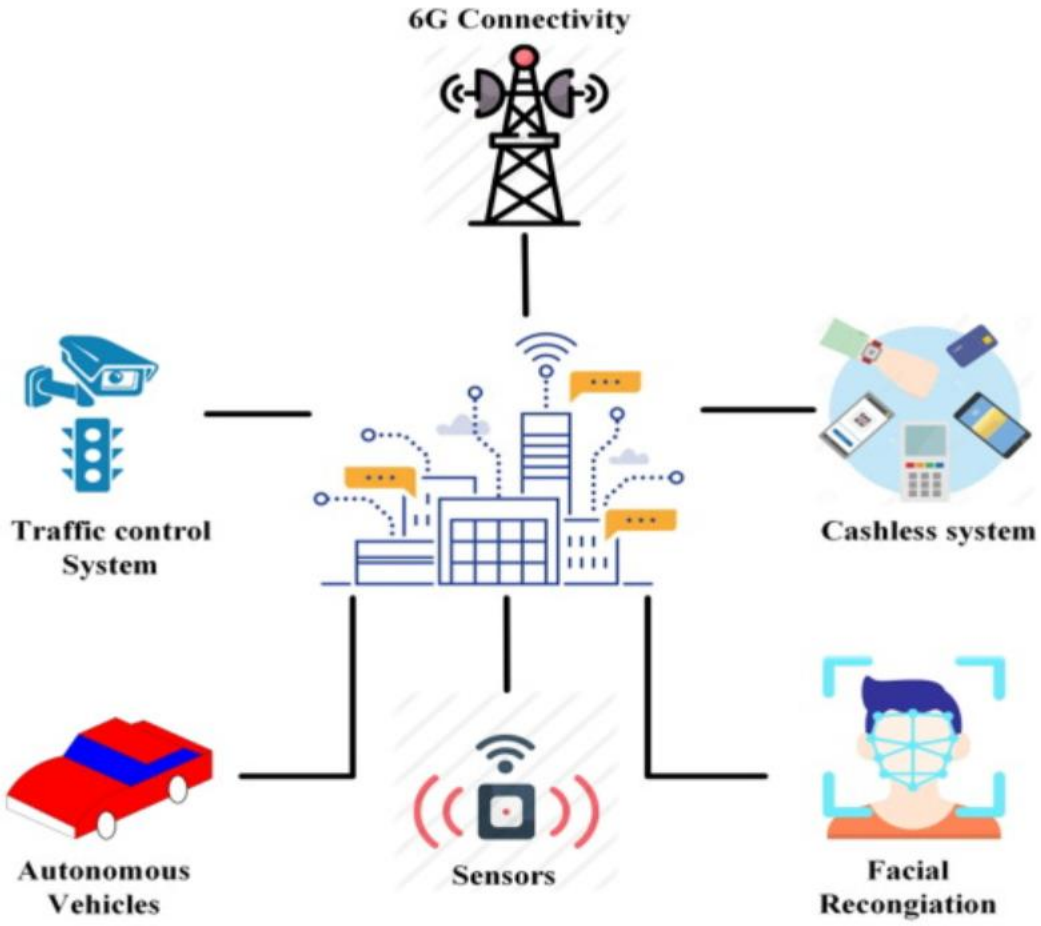


Рис. 4.1. Розумні міста з використанням мобільних технологій 6G

Розвиток технологій для 6G.

На основі технологій, впроваджених у попередніх мобільних системах, 6G-мережа буде здебільшого побудована за архітектурою 5G, використовуючи переваги, досягнуті у 5G [7], [2]. Система 6G включатиме різні технології: деякі будуть покращеними версіями архітектури 5G, інші — цілком інноваційними. У цьому розділі розглядаються перспективні нові технології в технології 6G. Зв'язок THz [3] та видиме світло [7] є важливими методами для покращення пропускної здатності системи 6G, вільного дуплексингу та спільного використання спектра. Безпеку та ефективність стандартного спільного використання спектра можна підвищити за допомогою блокчейну [4]. Ефективність спектра також може бути покращена за допомогою

MIMO [5] та OAM [6], коли численні паралельні потоки даних мультиплексуються на подібному частотному каналі. Обчислювальна ефективність, що забезпечує потужний захист 6G, може підтримуватися за допомогою квантового зв'язку (QC) та квантового машинного навчання (QML) [5], [7].

Штучний інтелект.

Декілька дослідників і галузей вже почали роботу над наступним поколінням мереж, обговорюючи технології, які зроблять 6G можливим після впровадження 5G. ШІ, технологічний тренд сьогодення, надає кілька корисних функцій для розвитку 6G. ШІ відіграватиме ключову роль у розвитку структури мережі 6G завдяки інтелектуальному використанню застосунків і функцій 6G для багатьох галузей, таких як архітектура, обчислення, зберігання тощо. У мережі 6G можна реалізувати розумні методи аналізу за допомогою штучного інтелекту. Одним із методів є описовий аналіз, який можна використовувати для кращого доступу до історії даних та мережевих операцій. Прогнозна аналітика надає прогнози на майбутнє, використовуючи зібрані дані та діагностичну аналітику, які є життєво важливими для підвищення безпеки мережі та забезпечення автономного виявлення. Прескриптивна аналітика застосовує ці прогнози для надання кількох атрибуцій. ШІ також забезпечує оптимізацію замкненого циклу для бездротових 6G-мереж. У цій техніці користувач діє відповідно до зворотного зв'язку пристрою. Підтримуючи наскрізну колективну оптимізацію на системному рівні, ШІ можна додатково впроваджувати для оптимізації бездротових систем зв'язку. Цей інтелектуальний шар пропонує численні можливості, такі як самооптимізація, самонавчання та збір даних. Приклади, коротко описані тут, є лише невеликою частиною широкого застосування технологій ШІ та інновацій, які вони принесуть у структуру мережі 6G.

Машинне навчання.

Машинне навчання (ML) — одна з найважливіших технологій для самостійного навчання та прийняття рішень. Ця технологія на базі ШІ є обчислювальною системою, яка розробляє математичні моделі, розпізнаючи

поведінку та властивості системи, дозволяючи машинам навчатися без програмування. Алгоритми машинного навчання потребують даних, зібраних з багатьох різних джерел. Вони використовують зібрані дані для оптимізації алгоритмів шарів, таких як фізичний і вищий шари. Бездротові канали зв'язку іноді можуть призводити до проблем із безпекою. ML дозволить пристрою навчитися підвищувати конфіденційність і безпеку даних, навчаючись на його можливостях прийняття рішень і прогнозування. Заснований на методі штучних нейронних мереж, глибоке навчання — це застосунок, який може швидко розв'язувати обчислювальні задачі, досягаючи ресурсів із великими обсягами інформації. Це потужна техніка для фізичного рівня 6G завдяки швидким ітеративним операціям. Він може розв'язувати задачі максимізації, зменшувати затримку обчислень, підвищувати енергоефективність та виконувати низку інших функцій. Технологія машинного навчання у поєднанні з ШІ стане ключовою на шляху до технології 6G. Ймовірнісні методи машинного навчання та баєсівського висновку забезпечать теоретичну основу з багатими даними 6G-застосунками для моделювання високовимірних і складних реальних прогнозів. Використання машинного навчання для проєктування самосвідомих і самоадаптивних комунікаційних мереж є суттєвим для структури мережі 6G, служачи як гнучкий і динамічний рівень безпеки. ML також дозволить автоматизувати управління динамічних мобільних мереж, що підвищить енергоспоживання, експлуатацію, конфігурацію мережі та продуктивність мережі.

Терагерцова комунікація.

Необхідно використовувати високі частоти та широку смугу пропускання у бездротових системах зв'язку для розвитку мереж зв'язку. Терагерцовий зв'язок дозволяє забезпечити високі швидкості передачі даних і широку пропускну здатність для систем зв'язку, що робить цю технологію перспективною для 6G. Спектр ТГц — це область між mmWave та далекою інфрачервоною (ІЧ). Він пропонує вищу пропускну здатність порівняно з mmWaves і має більш сприятливе налаштування поширення, ніж ІЧ. Зв'язок THz може використовуватися в різних технологічних сферах, таких як внутрішні бездротові мобільні

мережі, наномасштабний зв'язок та космічні застосунки. Інтелектуальні відбивні поверхні, надмасивний MIMO та інтегрований доступ можуть додатково посилити THz-комунікацію. Хоча компоненти системи зв'язку ТГц складно спроектувати з антенами ТГц, вони мають численні переваги, такі як високий коефіцієнт підсилення та швидке сканування променя. Головна мета субтерагерцової комунікації — підвищити спектральну ефективність за допомогою технологій вищих MIMO, досягнувши швидкості передачі даних на рівні Тб/с, що значно перевищує 5G. Субтерагерцові комунікації першого покоління забезпечують прості схеми модуляції, архітектури антен з широкою смугою пропускання, низьку спектральну ефективність для короткого зв'язку, енергоефективність, просту обробку сигналів і методи кодування. 6G буде надзвичайно щільною мережею з точки зору збільшення кількості підключених машин і пристроїв. Зв'язок THz може задовольнити цю величезну вимогу в пропускній здатності. Він має значно багатші ресурси спектра, ніж низькочастотні діапазони, що робить його вигідним з кількох причин. Перша перевага полягає в тому, що він задовольняє величезний попит 6G на пропускну здатність, забезпечуючи до сотень гігагерц, досягаючи кількох терабіт за секунду. Друга перевага — інтеграція більшої кількості елементів антени в одну базову станцію, оскільки довжина хвилі обернено пропорційна частоті та розміру антени. Очікується, що на базових станціях буде розміщено понад 10 000 малих антен. Вони здатні справлятися з втратою шляху, генеруючи надвузькі пучки, які досягають більшої пропускної здатності, одночасно спілкуючись з більшою кількістю користувачів. Нарешті, антенні з високою спрямованістю допомагають зменшити перешкоди на співканалі та запобігати прослуховуванню під час зв'язку, забезпечуючи таким чином кращу безпеку . З огляду на особливості швидкості обробки даних, терагерцовий зв'язок є стратегічним стимулом для 6G, якщо складність системи та недоліки енергоспоживання будуть вирішені в найближчі роки.

Візуальна світлова комунікація.

Система візуального світлового зв'язку (VLC) — ще одна ключова технологія, яку слід виділити, оскільки вона може забезпечувати передачу, схожу на волоконно-оптичну систему. Оптичне волокно — це дуже гнучке та тонке середовище на основі кремнезему, яке використовує світло для передачі даних. Оскільки волоконно-оптична система передає світло, швидкість передачі та смуга пропускання вищі, ніж у багатьох інших методах. Хоча існують різні типи та розміри оптичних волокон, швидкість передачі для кожного типу волокон перевищує рівень 1 Гбіт/с [10]. Технологія VLC використовує видиме світло та забезпечує терагерцову смугу пропускання, повторне використання високої частоти, комплементарний неліцензований спектр і відсутність електромагнітних перешкод [11], [7]. Розробка VLC може задовольнити вимоги продуктивності 5G і зробити передачу даних з терабітною швидкістю для 6G. Високошвидкісні канали передачі даних для особистого використання та VLC для створення зв'язку між транспортними засобами можна отримати за допомогою світлочутливих пристроїв, таких як світлодіоди, що випромінюють світло, досягаючи швидкості передачі на рівні гігабіту. Комерційні світлодіоди з VLC-системами мають вузьку пропускну здатність. Система потребує покращення пропускної здатності та більш ефективного проєктування MIMO-систем у VLC через обмежене підвищення різноманітності та складні процеси проєктування [17]. Незважаючи на ці труднощі, VLC може створювати високошвидкісні канали передачі даних для особистого використання та зв'язку між транспортними засобами. Дослідники заявили, що розвиток візуальної світлової комунікації може адекватно задовольнити потреби 5G у продуктивності та зробити можливими швидкості передачі даних Terabit для 6G до 2027 року. Тисячі активних джерел світлодіодів покажуть пропускну здатність швидкості короткодіапазонної передачі [11].

Багатодоступні крайні обчислення.

У міру того, як світ стає більш пов'язаним, змінюються й компоненти та системи в мережі. Багатодоступні крайні обчислення (MEC) дозволять інтегрувати застосункові можливості у структуру мережі 6G [10]. MEC розгортає та керує процесами розподілених обчислень, кешування, мережевої комунікації та аналізу даних на периферії стільникової мережі. Додатки, які використовують технологію MEC, отриману від IoT, з туманних обчислень, мають на меті використовувати хмарні обчислення. MEC дозволяє швидко приймати рішення та обробляти сигнали на основі зібраних даних. Зменшення наскрізної затримки для комунікаційного каналу є однією з головних цілей різних нових технологій. Інтелектуальні функції видалення та обробки даних MEC суттєво знижують наскрізну затримку [7]. Ефективне управління комунікаційною мережею та ресурсами є основним аспектом процесу оптимізації. Інтегруючи MEC у мережеву систему, можна знизити складність шарів. Централізоване розподілення ресурсів також може слугувати механізмом управління ресурсами. Завдяки впровадженню можливостей MEC та вертикально-орієнтованих сервісів у поєднанні з машинним навчанням можна створити динамічно змінну та самооптимізовану мережу зв'язку машинного типу (MTC). Мережевий слайсінг у MEC був центральною темою численних досліджень. Він слугує однією зі структур слайсингу в мережі 5G і може застосовуватися до 6G. Мережевий слайсінг пропонує гнучку та динамічну структуру [4]. Отже, MEC є критично важливою технологією для 6G. Він пропонує швидку та локалізовану обробку даних у сферах безпеки, зв'язку з транспортними засобами, енергоефективності та гнучкості мережевої структури.

Комунікація машинного типу.

6G стане першим бездротовим стандартом, який з'єднає численних користувачів на різних галузевих рівнях, адекватно відповідаючи зростаючим потребам у комунікації. Різні сектори підтримуватимуть цифровізацію на основі 6G за допомогою вертикалей через машинний зв'язок, як уже згадувалося. Безперебійна робота багатооператорної системи у вертикальному секторі не обмежується забезпеченням з'єднання під час передачі. Він також може

забезпечити сумісність різних інформаційно-технологічних систем різних одиниць, що містяться в будь-яких даних [7]. Прямий зв'язок між пристроями через дротові або бездротові канали зв'язку називається «машинним типом комунікації» (MTC). Виклики впровадження MTC — низька затримка та високі вимоги до надійності. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) та програмно-визначені мережі (SDN) — це деякі з технологій, які відповідають вимогам вертикалей, що використовуються в MTC. NFV — це концепція архітектури мережі, яка створює комунікаційну мережу шляхом з'єднання будівельних блоків мережі за допомогою технік віртуалізації. SDN — це технологія управління мережею, яка створює структури, схожі на хмарні обчислення, для підвищення продуктивності та безпеки мережі. NFV та SDN є основними пособниками для задоволення попиту на широкосмугове з'єднання за допомогою недорогих і регульованих реалізацій [18], [10], [6]. Проєктування основної мережі з гнучкою, динамічною, простою та уніфікованою системою для задоволення широких потреб різних вертикальних секторів буде необхідним для структури 6G [9]. Впровадження комп'ютерних рішень MTC стане важливою віхою для розвитку 6G у концепціях масштабованості мережі, надійності, затримки та ефективності.

Супутниковий зв'язок на низькій навколоземній орбіті.

Дослідження космосу, які інтегрують супутникову ємність у незалежні супутникові та наземні мережі, створить інноваційні можливості. Такі дослідження покращать певні питання, такі як ефективна передача даних, оптимізація ресурсів, аварійне відновлення після катастроф та безперебійний високоякісний зв'язок у віддалених районах. Система низької навколоземної орбіти (LEO), яка привернула увагу для супутникового зв'язку, може забезпечити повторне використання частоти та ефективність, підтримуючи покриття всієї поверхні Землі. Тривимірне покриття з впровадженням наземної інфраструктури та авіаційних платформ є ще однією дослідницькою сферою для технології 6G [10]. Підтримка mmWaves у супутниковому зв'язку вперше була помічена 3GPP і її використанням у сценаріях розгортання супутників. Через

велику відстань між супутником і поверхнею Землі затримка та втрата шляху mmWave неминуче будуть великими. Незважаючи на ці недоліки, mmWaves забезпечують високу смугу пропускання та підвищену спрямованість завдяки супутниковим зв'язкам точка-точка. Архітектури супутникового зв'язку пропонують низку досягнень у мінімізації витрат і гетерогенних структур супутникових мереж для кращого покриття. У наземних терміналах мережевий слайсинг, NFV і SDN комбінуються для полегшення інтеграції різних технологій в одну платформу, що забезпечує гнучкість, автоматизацію та гнучкість [7]. Інтеграція наземних і неназемних технологій у стільниковий зв'язок забезпечує низку переваг, таких як стійкість зв'язку, оптимізація ресурсів на паралельних зворотних каналах, ефективне трансляцію та ретрансляція даних, покращення якості якості за допомогою периферійних обчислень та мобільність комунікацій. Різні організації нині визнають, що високоспрямований супутниковий зв'язок на mmWaves є необхідною технологією для 6G-комунікації завдяки її перевагам, особливо великій пропускній здатності для широкого покриття.

Інтеграційні системи

З розвитком технологій з'явилося багато автоматизованих системних вимог, які керуються машинним навчанням та штучним інтелектом. Однак наразі потрібно багато роботи для створення бездоганних систем. Збій, який може виникнути на критичних роботах у реальному часі, може бути дорогим. Як ML, так і AI технології мають бути належним чином розроблені з використанням інфраструктур 5G та 6G як відповідних платформ для оптимального функціонування.

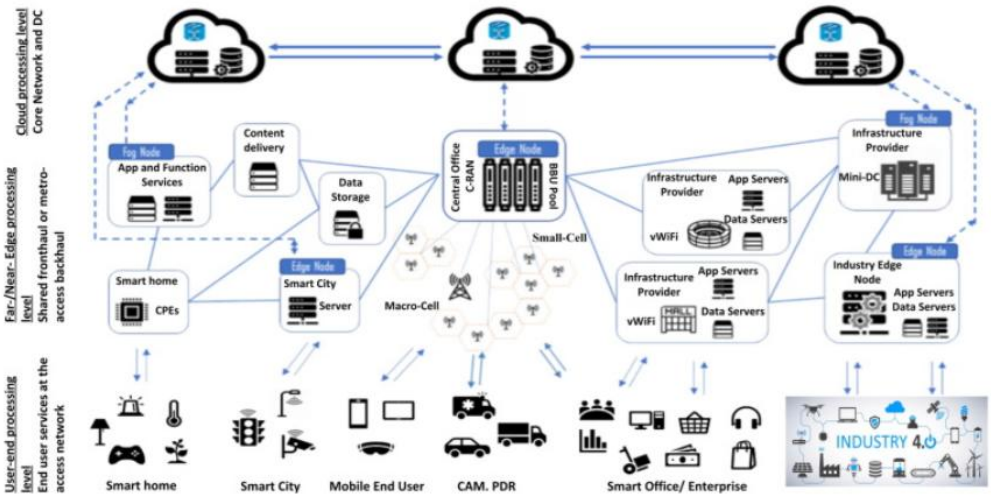


Рис. 4.2 Вся структура мережі

Наразі всі власні пристрої отримали статус «розумних пристроїв» завдяки цим досягненням [4]. Значним викликом буде визначення найефективнішої інтеграції цих пристроїв і інфраструктури, як показано на рис.4.2.

4.2 Дослідження та систематизація підходів штучного інтелекту для розв’язання оптимізаційних задач у телекомунікаційних мережах 5G/6G

У сучасних умовах функціонування суспільства високошвидкісний мобільний доступ до мережі Інтернет став невід’ємною складовою повсякденної діяльності людини та важливим чинником задоволення базових потреб. Незважаючи на те, що в більшості країн світу вже впроваджено комерційну експлуатацію мобільних мереж п’ятого покоління (Fifth Generation, 5G), наукова спільнота активно зосереджує увагу на розробці концепцій і технологій наступного — шостого покоління мобільного зв’язку (Sixth Generation, 6G).

Подальший розвиток мереж передбачає удосконалення таких ключових технічних характеристик, як швидкість передавання даних, рівень затримки, ефективне використання частотного спектра, щільність абонентських підключень та підтримка високої мобільності користувачів. Водночас досягнення максимальних значень основних показників ефективності (Key Performance Indicators, KPI) можливе лише за умови стабільного забезпечення належної якості

обслуговування (Quality of Service, QoS) і рівня захищеності інформації (Quality of Protection, QoP), що безпосередньо визначає загальну якість сприйняття сервісів кінцевими користувачами (Quality of Experience, QoE).

У зв’язку з еволюцією мобільних телекомунікацій оптимізація параметрів якості обслуговування та забезпечення належного рівня інформаційної безпеки й надалі залишається важливим прикладним і науковим напрямом досліджень. Це зумовлено тим, що концепція мереж шостого покоління орієнтована на значно ускладнену інфраструктуру, яка характеризується масовим підключенням пристроїв, надвисокими швидкостями передавання даних і суттєво посиленими вимогами до захищеності мережевих сервісів.

З урахуванням зазначених викликів у проєктуванні телекомунікаційних систем нового покоління передбачається широке застосування методів штучного інтелекту. Перші практичні кроки у цьому напрямі вже закладено в специфікаціях Release 18, що відповідає стандарту 5G-Advanced [1], де передбачено інтеграцію алгоритмів ШІ у бездротові мережі. Таким чином, використання інтелектуальних підходів у мобільному зв’язку стане реальністю ще до офіційного впровадження повноцінних мереж 6G.

З точки зору теорії та практики, оптимізацію можна розглядати як процедуру визначення найбільш ефективного варіанта серед множини допустимих рішень відповідно до заданих цілей, обмежень і критеріїв оцінювання. Такий підхід широко застосовується для керування параметрами якості обслуговування та рівнем захищеності в різноманітних напрямах розвитку бездротових систем, зокрема в транспортних комунікаційних мережах, системах когнітивного радіо (Cognitive Radio, CR), мережах Інтернету речей (Internet of Things, IoT) та інших телекомунікаційних середовищах.

Незважаючи на наявність значної кількості моделей і методів оптимізації, що можуть бути використані в мережах шостого покоління, спільною тенденцією для них є інтеграція інструментів штучного інтелекту. Застосування інтелектуальних алгоритмів дає змогу істотно підвищити ефективність процесів

оптимізації завдяки адаптивності, здатності до навчання та обробки складних багатовимірних даних.

Оптимізаційні підходи, засновані на використанні штучного інтелекту, здатні залучати значні обсяги неоднорідних даних для формування високорівневих моделей, що пристосовуються до змінних характеристик телекомунікаційного середовища. Такі моделі мають можливість виявляти закономірності функціонування мережі та здійснювати прогнозування оптимальних значень параметрів якості обслуговування й рівня захисту для різних режимів роботи та категорій користувачів.

Перевага інтелектуальних методів полягає в їх здатності ідентифікувати складні нелінійні залежності, які часто залишаються поза межами можливостей класичних алгоритмів оптимізації. Ключовим елементом подібних підходів є механізм самонавчання, що дає змогу алгоритмам постійно вдосконалювати свою поведінку без явного програмування. У контексті мереж шостого покоління такі процеси навчання можуть бути реалізовані через два основні підходи до побудови моделей штучного інтелекту, які забезпечують обробку необхідних даних та формування оптимізаційних рішень на їх основі.

Методи машинного навчання (Machine Learning, ML) базуються на застосуванні статистичних підходів і математичного апарату для опрацювання вибірок даних та формування моделей, здатних виконувати завдання прогнозування, автоматичної класифікації, групування, регресійного аналізу й інші типи аналітичної обробки [2]. У задачах керування параметрами якості обслуговування в мережах шостого покоління алгоритми ML можуть бути використані в різних конфігураціях, зокрема у вигляді градієнтних підходів оптимізації, еволюційних стратегій та метаевристичних алгоритмів [2].

Однією з переваг машинного навчання є відносно невисокі вимоги до обсягів навчальних даних і обчислювальних ресурсів у порівнянні з методами глибокого навчання (Deep Learning, DL). Водночас такі підходи мають низку обмежень, пов’язаних із залежністю від попередніх припущень щодо структури даних і вибраної моделі, що може знижувати ефективність роботи зі складними

або неструктурованими типами інформації, зокрема зображеннями, текстовими чи аудіоданими. Крім того, процес розробки й налаштування ML-моделей зазвичай потребує більш активної участі спеціаліста, ніж у випадку використання нейромережевих архітектур, які лежать в основі методів глибокого навчання.

Глибоке навчання (Deep Learning, DL) належить до класу інтелектуальних методів і ґрунтується на застосуванні багаторівневих нейромережевих архітектур для розв'язання задач підвищеної складності, зокрема автоматичного аналізу візуальної інформації, обробки природної мови та синтезу текстових даних. У контексті телекомунікаційних систем шостого покоління методи DL можуть ефективно використовуватися для керування основними показниками продуктивності, якості обслуговування та рівня захисту шляхом інтеграції сучасних нейромережевих підходів.

До найбільш перспективних технологій глибокого навчання, які застосовуються для оптимізації KPI, QoS і QoP у мережах 6G, належать:

- підходи федеративного навчання для децентралізованого опрацювання даних;
- генеративні змагальні моделі (Generative Adversarial Networks, GAN), зокрема з використанням механізмів уваги;
- згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN);
- рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN) та інші різновиди глибоких архітектур.

До ключових переваг методів глибокого навчання належить їх здатність ефективно опрацьовувати складні, різнорідні та неструктуровані набори даних, а також автоматично здійснювати виділення інформативних ознак без необхідності ручного втручання. Застосування DL дає змогу досягати високих показників точності й продуктивності у завданнях, що складно реалізуються за допомогою класичних алгоритмів оптимізації без використання нейромережевих підходів, що робить даний напрям особливо перспективним для оптимізації процесів у мережах шостого покоління.

Крім того, моделі глибокого навчання демонструють високу адаптивність до змін параметрів мережевого середовища та здатність до навчання за умов обмеженої кількості розмічених даних порівняно з методами машинного навчання. Така властивість забезпечує динамічне реагування на зміни стану інфраструктури, що є критично важливим для масштабних за архітектурою телекомунікаційних систем із масовим підключенням пристроїв, характерних для мереж наступних поколінь.

Порівняно з методами машинного навчання, підходи глибокого навчання, як правило, потребують значно більших обсягів навчальних даних і відповідно вищих обчислювальних витрат під час формування моделей, що може призводити до зростання вартості та тривалості процесу навчання. Крім того, нейромережеві моделі є чутливими до проблеми недостатнього або надмірного навчання, коли рівень узагальнення не відповідає оптимальним умовам експлуатації, що потенційно негативно впливає на точність показників та стабільність функціонування як окремих компонентів, так і всієї мережевої архітектури.

Водночас методи штучного інтелекту, розглянуті у межах мереж шостого покоління, можуть бути систематизовані за парадигмами навчання, які реалізуються в телекомунікаційному середовищі. Зокрема, виділяють підходи із навчанням на розмічених даних (Supervised Learning, SL), методи без попередньої розмітки (Unsupervised Learning, USL), а також навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL), яке широко застосовується для прийняття оптимізаційних рішень у динамічних умовах мережі [3].

Алгоритми та методи штучного інтелекту, що застосовуються для оптимізації мереж, можуть базуватися на різних принципах навчання, розглянутих раніше, і відрізнятися сценаріями та сферами використання. Наприклад, поєднання методів глибокого навчання з навчанням з підкріпленням (Deep Learning з Reinforcement Learning, DL-RL) дозволяє створювати моделі, які оцінюють стан мережі, формують політику дій і використовують акторно-критичний підхід для прийняття рішень. Такі алгоритми доцільно інтегрувати у системи оптимізації маршрутизації, управління перевантаженням та ресурсами,

забезпечуючи комплексне інжиніринг-рішення для трафіку в мережах шостого покоління.

Крім того, для оптимізації комунікаційних систем із гетерогенною структурою та різними технологіями радіодоступу (Radio Access Network, RAN) застосовуються наступні методи:

- векторні машини (Vector Machine, VM);
- класифікація об’єктів за принципом k-найближчих сусідів (k-Nearest Neighbors, KNN);
- згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN);

– рекурентні нейронні мережі зі спеціальною структурою для збереження довгострокових залежностей у послідовних даних (Long Short-Term Memory, LSTM);

- баєсівські підходи до навчання (Sparse Bayesian Learning, SBL).
- застосування гіперповерхонь для ймовірнісного розділення класів даних із врахуванням невизначеності (Probabilistic Hypersurface Classifiers, PHC);
- навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL);
- некероване навчання (Unsupervised Learning, USL).

Слід також підкреслити, що інтеграція методів машинного та глибокого навчання значно спрощує та підвищує ефективність наскрізної оптимізації (End-to-End, E2E), що забезпечує безперервну передачу даних між кінцевими користувачами без проміжних переривань [4]. Така E2E-оптимізація є ключовим аспектом при наданні телекомунікаційних послуг, а застосування алгоритмів штучного інтелекту дозволяє мінімізувати втрати та вирішувати потенційні проблеми під час обробки трафіку [5–7].

На рис. 4.3 представлені можливості використання сучасних методів глибокого навчання для реалізації політик QoS у визначених сферах застосування.

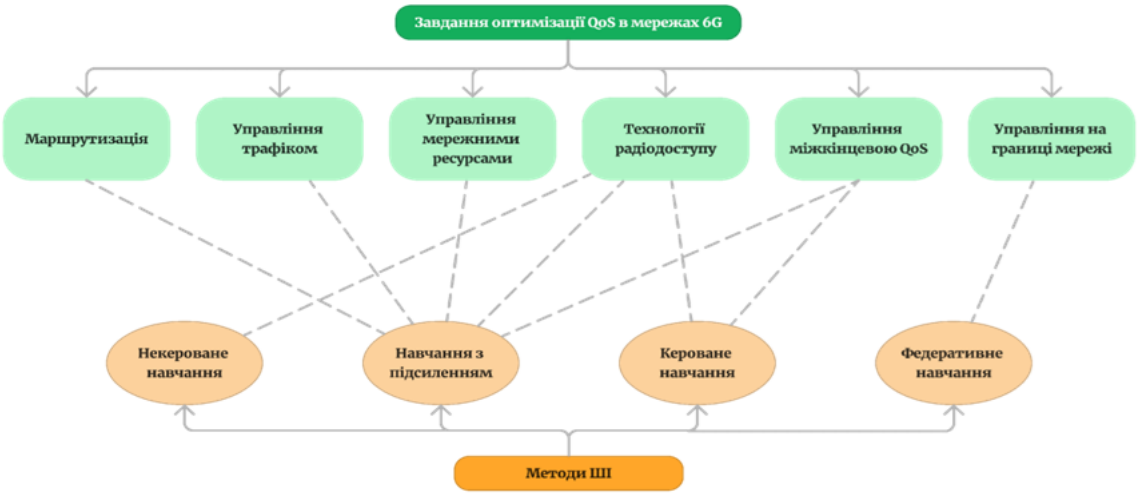


Рис. 4.3 Використання методів штучного інтелекту для оптимізації показників QoS у мережах шостого покоління (6G)

Аналізуючи релевантність різних парадигм навчання штучного інтелекту на основі даних, представлених на рис.1.2, можна зробити висновок, що найбільш ефективними техніками є підходи з керованим навчанням (Supervised Learning, SL) та навчанням з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL). При порівнянні цих методів слід відзначити, що RL демонструє особливий потенціал для оптимізації параметрів QoS у мережах шостого покоління, що робить його перспективним вибором серед інших парадигм навчання.

Дослідження методів оптимізації на основі ШІ показують їх переваги над традиційними підходами, які не використовують інтелектуальні алгоритми. Серед основних переваг можна виділити:

- здатність адаптуватися до динамічних умов мережі та змін у вимогах користувачів;
- використання даних та контексту для навчання і вдосконалення моделей, що забезпечує більш швидке та ефективне вирішення нових задач;
- можливість обробки складних і нелінійних проблем оптимізації, що залишаються поза досяжністю класичних методів;

- підтримка розподілених і федеративних підходів, які зменшують навантаження на мережу, підвищують конфіденційність та загальний рівень захисту (QoP), а також дозволяють здійснювати оптимізацію на периферії мережі;
- інтеграція з іншими технологіями та алгоритмами оптимізації для підвищення якості обслуговування та безпеки надання послуг [8–10].

Оптимізація за допомогою методів штучного інтелекту є ключовим інструментом у мережах шостого покоління, проте її впровадження неминуче супроводжуватиметься новими викликами та обмеженнями, що потребують подальших досліджень і розвитку. Зокрема, забезпечення достатнього обсягу обчислювальних ресурсів для роботи алгоритмів машинного навчання та нейромереж є однією з головних задач для розробників і операторів мереж 6G. Додатково слід враховувати високі вимоги до енергоспоживання, зумовлені масштабуванням інфраструктури та значною кількістю підключених користувацьких пристроїв, що істотно навантажує базові станції. Незважаючи на високий рівень автоматизації, впроваджений у мережах наступного покоління, остаточний контроль і адміністрування залишатимуться необхідними для забезпечення стабільного та безпечного функціонування системи.

Звісно, актуальним представляється питання, як саме буде відбуватися процес інтеграції та впро вадження ШІ до 6G. Таким чином, результати проведеного аналізу методів ШІ показали та підтвердили їх перспек тивність і потенційну ефективність з погляду забезпечення якісної оптимізації KPI та разом з цим QoS і QoP. Водночас ШІ дозволяє проводити оптимізацію міжкінцевої якості обслуговування в ме режі, більш ретельно планувати розподіл інформаційних та енергетичних ресурсів. Увесь спектр можливостей за відсутності релізу дослідити неможливо, але при продовженні розвитку ML та DL у даному напрямку методи оптимізації зміняться кардинально та з’явиться ще більше сценаріїв з їх ви користанням [11-13].

ВИСНОВКИ

Мережі п’ятого покоління (5G) відкривають нові можливості для покращення якості зв’язку завдяки впровадженню передових технологій, таких як massive MIMO, mmWave та network slicing. Ці інновації дозволяють підвищувати пропускну здатність, зменшувати затримку та ефективно розподіляти ресурси, що сприяє досягненню високих показників якості обслуговування (QoS) і користувацького досвіду (QoE), критично важливих для сучасних телекомунікаційних систем.

Дослідження методів оцінки та моніторингу QoS і QoE, у тому числі за допомогою інструментів iPerf і Spirent TestCenter, показує їхню ефективність для забезпечення стабільного та надійного зв’язку в різних сценаріях використання. Використання штучного інтелекту та адаптивного управління з edge computing дозволяє оптимізувати параметри мережі в реальному часі, зменшувати навантаження на ядро та підвищувати ефективність роботи мережі. Це забезпечує масштабованість, гнучкість та швидку адаптацію систем до змінних умов. Водночас впровадження таких рішень пов’язане з певними викликами:

- високі витрати на інфраструктуру;
- складність інтеграції з наявними мережами;
- технічні обмеження mmWave;
- недостатня кількість кваліфікованих фахівців;
- питання безпеки даних;
- необхідність регулярного оновлення програмного забезпечення.

Для успішного впровадження оптимізаційних рішень необхідно розробити чіткий план дій, який включає оцінку технічних ризиків, підготовку персоналу, інтеграцію AI-систем та організацію належної технічної підтримки. Також важливо забезпечити ефективну координацію між операторами, розробниками технологій і регуляторними органами для уніфікації стандартів і стратегічного планування.

Подальший розвиток 5G передбачає вдосконалення методів моніторингу QoS і QoE, розширення застосування штучного інтелекту та крайових обчислень (edge computing), а також адаптацію мереж до нових вимог, таких як масове підключення IoT-пристроїв і підтримка автономних систем. Це сприятиме підвищенню ефективності, екологічної стійкості та безпеки телекомунікаційних мереж.

Отже, аналіз та оптимізація показників якості у мережах 5G є ключовим фактором їхнього успішного функціонування. Незважаючи на наявні складнощі, системний підхід до впровадження сучасних технологій дозволяє створювати надійні, ефективні та гнучкі мережі, здатні задовольняти потреби суспільства і промисловості. Виходячи з результатів цього комплексного дослідження, ми дійшли висновку, що впровадження MBRLLC та управління мобільністю у високочастотних mmWave діапазонах та за ними є першим кроком до 6G.

Для 6G потрібен зсув парадигми від радіоцентричного проєктування систем (тобто 3GPP) до наскрізної конвергенції комунікацій, обчислень, керування, локалізації та сенсорування (3CLS), координованого інтелектуальною підкладкою, керованою штучним інтелектом. 6G-бачення не буде таким простим, як дослідження додаткових діапазонів високочастотного спектра для збільшення пропускної здатності. Навпаки, вона буде мотивована різноманітними застосуваннями, технологіями та методами. 6G відкриє нову еру розумних поверхонь, що спілкуються з імплантами, вбудованими в людину, відходячи від парадигми смартфон-базова станція.

Для аналізу та оптимізації продуктивності 6G рекомендується працювати у 3D-просторі та відходити від простого усереднення до дрібнозернистого аналізу, що стосується хвостів, розподілів і якості фізичного досвіду (QoPE). Для досягнення цих високих цілей техніки ШІ/ML стануть критично важливими компонентами 6G, такими як автоматизація процесів прийняття рішень і досягнення підходу без дотику.

Мобільна мережа 6G просуває технології на основі ШІ, які стають дедалі важливішими, оскільки все більше галузей впроваджують ШІ у свою діяльність.

Більшість секторів із різних регіонів планують працювати над проєктами, пов'язаними з мобільними технологіями 6G, через її потенціал. З огляду на цю інформацію, очевидно, що наше життя стане комфортнішим. У порівнянні з сучасними технологіями мобільного зв'язку наші проблеми матимуть більш сучасні рішення з використанням 6G-мобільної технології та її ключових функцій.