ВСТУП

Актуальність теми. Еволюція мобільних мереж до п'ятого покоління (5G) відкриває нові горизонти для телекомунікацій, пропонуючи значно вищі швидкості передачі даних, масивне підключення пристроїв та наднизьку затримку. Однак, розгортання виключно наземної інфраструктури 5G стикається з економічними та географічними обмеженнями, залишаючи значні території, включаючи сільську місцевість, океани та повітряний простір, без якісного покриття.

Вирішенням цієї проблеми є інтеграція наземних мереж 5G із супутниковими системами, що дозволяє створити глобальну багаторівневу мережеву архітектуру. Цей напрямок активно стандартизується консорціумом 3GPP, починаючи з Release 17, який визначає підтримку неземних мереж (Non-Terrestrial Networks, NTN) в екосистемі 5G NR. Використання сучасних супутникових угруповань, особливо на низькій навколоземній орбіті (LEO), у поєднанні з передовими технологіями обробки сигналів та управління ресурсами, стає ключовим фактором для забезпечення повсюдного доступу до послуг eMBB, mMTC та навіть критично важливих сервісів URLLC.

Таким чином, дослідження методів та архітектурних підходів до ефективної інтеграції 5G та супутникових систем для забезпечення глобального покриття є актуальним науково-прикладним завданням, що відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку телекомунікацій.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в галузі інформаційно-комунікаційних технологій, спрямованих на розбудову інфраструктури широкосмугового доступу та впровадження мереж нового покоління.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка та обґрунтування архітектурних рішень і методів інтеграції наземних мереж 5G із супутниковими

системами для забезпечення глобального покриття та гарантованс обслуговування різнорідного трафіку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз еволюції стандартів 5G, ролі неземних мереж (NTN) та викликів, пов'язаних з їх інтеграцією, зокрема проблем затримки та ефекту Доплера.

2. Дослідити технологічні аспекти побудови інтегрованих мереж, включаючи порівняльний аналіз супутникових орбіт (GEO, MEO, LEO), використання перспективних частотних діапазонів (Ka, Q/V) та застосування антенних решіток з електронним скануванням.

3. Проаналізувати роль сучасних мережевих технологій, таких як програмно-конфігуровані мережі (SDN) та віртуалізація мережевих функцій (NFV), в управлінні супутниковим сегментом.

4. Обґрунтувати архітектурні підходи до побудови інтегрованих мереж 5G-NTN, зокрема визначити оптимальний тип корисного навантаження супутника (регенеративний чи прозорий) відповідно до вимог 5G NR.

5. Розробити методики маршрутизації, динамічного управління трафіком та забезпечення якості обслуговування (QoS) у гібридних мережах з використанням функцій ядра 5G.

6. Виконати моделювання ефективності інтегрованих систем, оцінити бюджети затримок для різних орбіт та проаналізувати сценарії глобального покриття.

Об’єкт дослідження – процеси передачі даних та управління ресурсами в інтегрованих телекомунікаційних мережах, що поєднують наземний сегмент 5G та супутниковий сегмент.

Предмет дослідження – архітектурні моделі, методи маршрутизації, управління трафіком, забезпечення якості обслуговування та технології, що забезпечують ефективну взаємодію наземних та супутникових компонентів мережі 5G.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для дослідження архітектури інтегрованих мереж; методи порівняльного аналізу для оцінки ефективності різних супутникових технологій та орбіт; методи теорії телетрафіку для розробки стратегій маршрутизації та QoS; методи математичного та імітаційного моделювання для оцінки продуктивності системи та параметрів затримки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Набуло подальшого розвитку обґрунтування архітектури інтегрованої мережі 5G-NTN на базі стандартів 3GPP Release 17, яке, на відміну від існуючих підходів, базується на детальному порівняльному аналізі та доведенні переваг використання регенеративного корисного навантаження з обробкою на борту для підтримки складних функцій 5G NR.

2. Удосконалено методики маршрутизації та управління трафіком у гібридних системах шляхом впровадження механізмів динамічного перенаправлення на основі моніторингу показників якості каналу в реальному часі та використання паралельних шляхів через наземну та супутникову інфраструктуру.

3. Дістала подальшого розвитку модель забезпечення QoS у інтегрованій мережі через застосування функції контролю політик (PCF) ядра 5G для диференційованої пріоритезації трафіку різних класів (URLLC, eMBB, mMTC) в умовах нестабільності супутникового каналу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені архітектурні підходи, схеми взаємодії інтерфейсів (N2, N3, N9) та стратегії управління трафіком можуть бути використані операторами зв'язку та системними інтеграторами при проектуванні та розгортанні гібридних мереж 5G із супутниковим розширенням. Запропоновані політики QoS дозволяють оптимізувати використання ресурсів та забезпечити виконання вимог до критично важливих сервісів у віддалених регіонах. Результати моделювання затримок та сценаріїв покриття надають рекомендації щодо вибору оптимальних конфігурацій супутникових угруповань (гібридних LEO/GEO) для різних географічних зон.

1. ТЕХНОЛОГІЯ П’ЯТОГО ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ (5G)

1.1. Основні принципи побудови та архітектура мереж 5G

Поява бездротової технології п'ятого покоління (5G) знаменує собою значну віху в еволюції мобільного зв'язку, обіцяючи безпрецедентний рівень швидкості, ємності та зв'язку. На відміну від попередніх поколінь, 5G побудовано на передових принципах, які дозволяють йому підтримувати широкий спектр застосувань, від потокового передавання високої чіткості до автономних транспортних засобів та розумних міст. Розуміння основних принципів побудови та архітектури 5G включає вивчення його теоретичних основ, архітектури його мережі доступу (мережі радіодоступу, RAN) та його базової мережі (ядро 5G, 5GC) (рис. 1.1). Цей вичерпний огляд підкреслює, як ці елементи синергізують для досягнення амбітних цілей, поставлених перед 5G, включаючи наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), покращений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB) та масовий машинний зв'язок (mMTC). Досліджуючи ці основні аспекти, ми можемо оцінити інноваційну інженерію, яка лежить в основі трансформаційного потенціалу 5G [1].

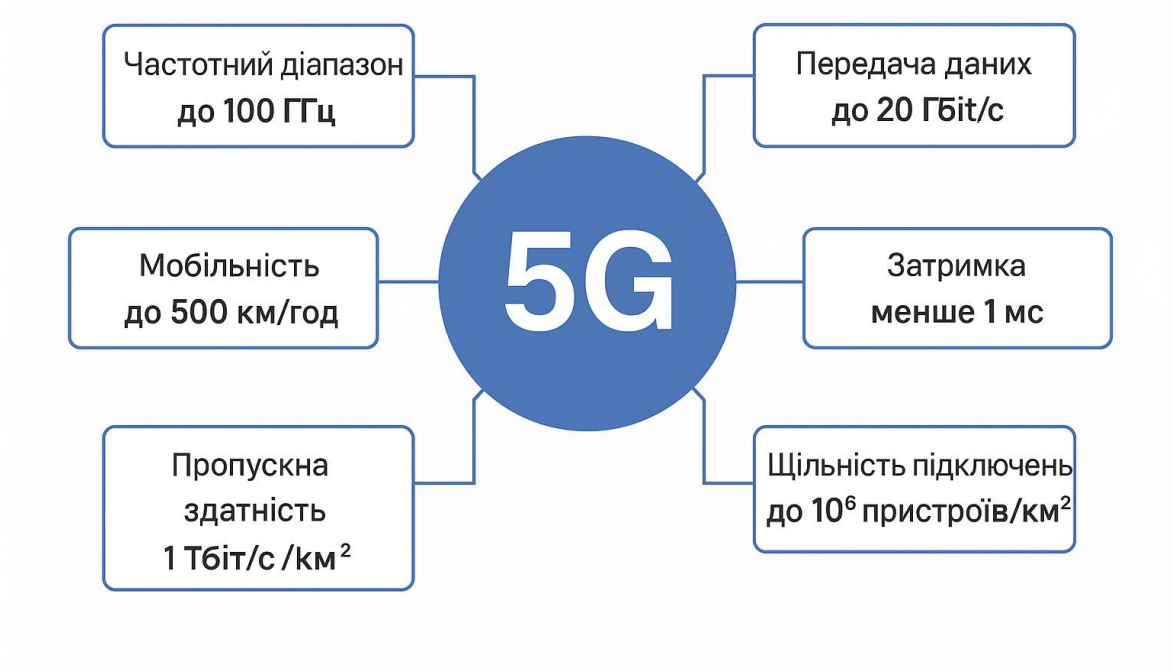


Рис. 1.1. Технічні характеристики мереж 5G

Теоретичні основи технології 5G ґрунтуються на еволюції стандартів мобільного зв'язку протягом десятиліть. Починаючи з 1G, який в основному зосереджувався на аналоговій передачі голосу, кожне наступне покоління впроваджувало значні технологічні досягнення — 2G забезпечував цифровий голос, 3G приносив послуги передачі даних, а 4G запроваджував високошвидкісний мобільний широкосмуговий доступ. 5G являє собою крок вперед, прагнучи забезпечити не лише вищі швидкості передачі даних, але й підвищену надійність, меншу затримку та збільшення ємності. Цілі та вимоги до 5G були визначені завдяки масштабним глобальним дослідженням та зусиллям зі стандартизації такими організаціями, як 3GPP. До них належать підтримка швидкості передачі даних, що перевищує 1 Гбіт/с для мобільних користувачів, затримка менше 1 мілісекунди, енергоефективність та масове підключення для підтримки мільярдів пристроїв. Принципи, що керують проектуванням мереж 5G, підкреслюють гнучкість, масштабованість та інтеграцію нових радіотехнологій. Ключовим серед них є використання сегментації мережі, яке дозволяє операторам створювати віртуальні мережі, адаптовані для певних послуг, тим самим оптимізуючи продуктивність для різноманітних застосувань. Впровадження передових схем модуляції, щільне розгортання малих комірок та використання вищих частотних діапазонів є основоположними для досягнення цілей 5G, гарантуючи, що він може задовольнити динамічні та вимогливі потреби сучасного суспільства.

Архітектура мережі доступу 5G, відома як мережа радіодоступу (RAN), є критично важливим компонентом, який безпосередньо взаємодіє з пристроями кінцевих користувачів (рис. 1.2). Центральним елементом цієї архітектури є базові станції gNodeB, які служать основними точками контакту між користувачами та основною мережею. Ці базові станції оснащені розширеними можливостями обробки для одночасної обробки кількох користувачів, використовуючи такі технології, як Massive Multiple Input Multiple Output (Масивний множинний вхід/множинний вихід) (Massive MIMO) – це розгортання великих масивів антен, які можуть передавати та приймати кілька потоків даних одночасно, що значно збільшує спектральну ефективність та пропускну здатність мережі.

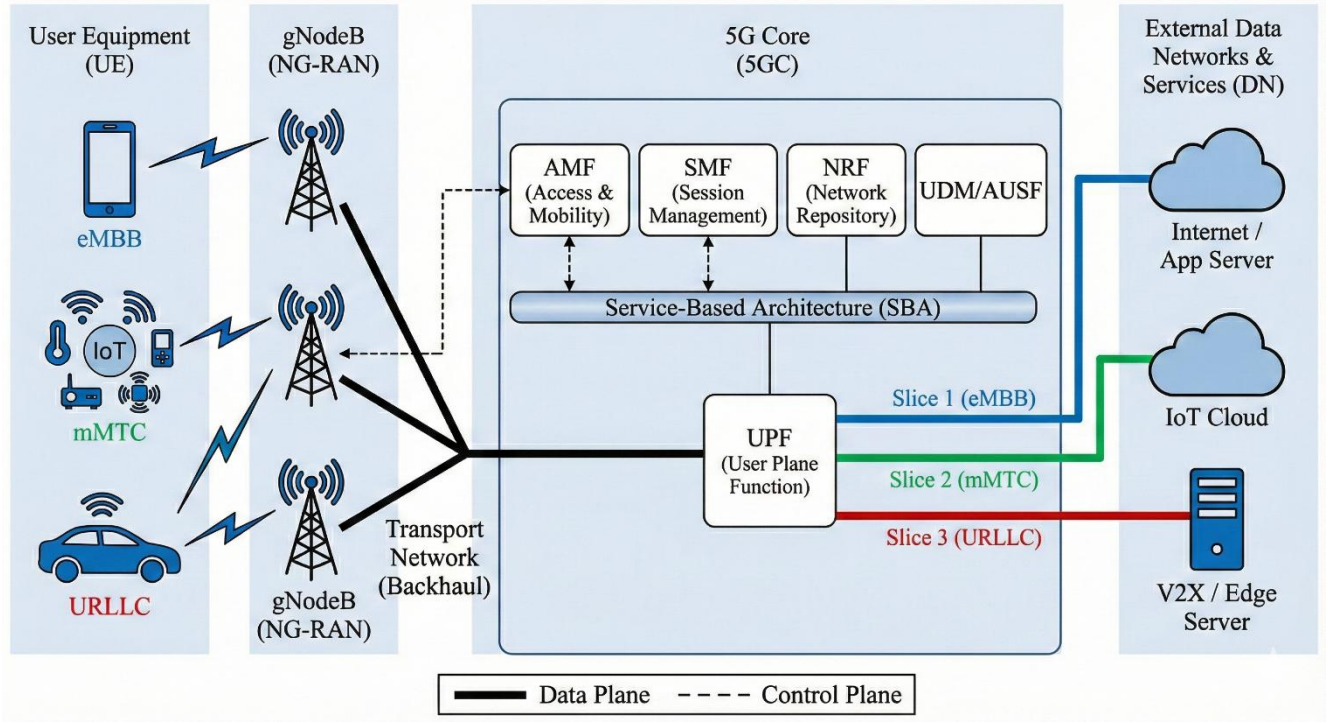


Рис. 1.2. Загальна архітектура мережі 5G з відображенням взаємодії користувацьких пристроїв, базових станцій gNodeB, транспортної мережі, ядра 5GC та зовнішніх сервісів

Це особливо важливо в щільних міських середовищах, де висока щільність користувачів вимагає надійного та високопродуктивного покриття. Крім того, 5G широко використовує діапазон частот міліметрових хвиль (mmWave), зазвичай від 24 ГГц до 100 ГГц, для досягнення високих швидкостей передачі даних та низької затримки. Хоча сигнали mmWave мають обмежену відстань поширення та чутливі до перешкод, їх розгортання через щільні мережі з малими стільниками дозволяє обробляти величезні обсяги даних та підтримує надшвидкісні програми. Інтеграція методів формування променя ще більше підвищує силу та якість сигналу, спрямовуючи енергію точно до користувачів для максимізації ефективності. Ці функції разом ілюструють, як архітектура мережі доступу 5G розроблена для задоволення зростаючого попиту на високошвидкісне та надійне з'єднання в різних середовищах.

В основі інфраструктури 5G лежить основна мережа 5G (5GC), яка являє собою фундаментальний зсув від традиційних мереж. архітектури. 5GC використовує сервісно-орієнтовану архітектуру, що складається з кількох

функціональних блоків, включаючи функцію керування доступом та мобільністю (AMF), функцію керування сеансами (SMF), функцію площини користувача (UPF) та функцію мережевого репозиторію (NRF). Ці блоки взаємодіють через стандартизовані протоколи для забезпечення безперебійної мобільності, керування сеансами та якості обслуговування (QoS) у гетерогенних мережах (табл. 1.1). Логічна структура 5GC розроблена як дуже гнучка, масштабована та здатна одночасно підтримувати різноманітні вимоги до послуг. Наприклад, 5GC гарантує, що чутливі до затримки програми, такі як URLLC, мають пріоритет та ефективне управління, водночас підтримуючи високу пропускну здатність для послуг eMBB та підтримуючи масові підключення пристроїв для mMTC. Такі протоколи, як протокол додатків наступного покоління (NGAP) та сервісно-орієнтована архітектура (SBA), сприяють зв'язку між елементами мережі, забезпечуючи динамічний розподіл ресурсів та управління в режимі реального часу. Ця архітектура дозволяє операторам надавати широкий спектр послуг з індивідуальними параметрами якості, сприяючи таким інноваціям, як сегментація мережі, периферійні обчислення та інтеграція з новими технологіями, такими як Інтернет речей та штучний інтелект. По суті, дизайн 5GC є ключовим для реалізації. Обіцянка 5G щодо інтелектуальної, адаптивної мережі, здатної підтримувати цифрові вимоги майбутнього.

Важливим аспектом архітектури 5G є її залежність від віртуалізації та хмарної інфраструктури, які фундаментально змінюють способи розгортання, управління та масштабування мережевих функцій (табл. 1.1) [2]. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) – це основний принцип, який дозволяє відокремити мережеві служби від власного обладнання, дозволяючи цим функціям запускатися як екземпляри програмного забезпечення на стандартних серверах. Такий підхід пропонує значні переваги, включаючи підвищену гнучкість, швидке розгортання та економічну ефективність. NFV спрощує використання контейнерів — легких, портативних одиниць програмного забезпечення, що інкапсулюють певні мережеві функції, — та інструментів оркестрації, які автоматизують розгортання, масштабування та управління цими контейнерами в хмарних середовищах.

Таблиця 1.1.

Порівняння технологій 4G LTE та 5G NR

Параметр	4G LTE	5G NR	Покращення / Інновація
Покоління стандарту	Четверте покоління (Release 8–14)	П’яте покоління (Release 15–18)	Орієнтація на IoT, URLLC та eMBB
Архітектура мережі	Монолітна, централізований EPC	Сервісно-орієнтована (SBA), 5GC	Хмарна гнучкість і масштабованість
Технологія доступу	OFDMA (DL) / SC-FDMA (UL)	OFDMA (DL/UL), NOMA (опціонально)	Гнучкий розподіл ресурсів
Частотний діапазон	< 6 ГГц	FR1: до 7,125 ГГц; FR2: до 71 ГГц	Використання міліметрових хвиль
Ширина каналу	До 20 МГц	До 400 МГц (FR2)	Збільшення смуги пропускання
Модуляція	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	Вища швидкість при сталому SNR
Пропускна здатність	До 1 Гбіт/с (DL)	До 10 Гбіт/с (DL)	Підвищення у 10–20 разів
Затримка сигналу	30–50 мс	< 1 мс	Критично низька затримка для URLLC
Підтримка IoT	Обмежена (NB-IoT, LTE-M)	Масштабована (mMTC)	До 1 млн пристроїв/км²
Мобільність	До 350 км/год	До 500 км/год	Підтримка високошвидкісного транспорту
Антенні технології	MIMO до 8×8	Massive MIMO до 256×256, Beamforming	Підвищення спектральної ефективності
Архітектура RAN	eNodeB	gNodeB, CU/DU Split	Гнучке розділення функцій
Топологія мережі	Макрокомірки	Макро-, мікро-, піко-, фемтокомірки	Підвищення щільності покриття
QoS / Network Slicing	Фіксована класифікація трафіку	Динамічне розділення ресурсів	Гарантована якість сервісів

Програмно-визначені мережі (SDN) доповнюють NFV, забезпечуючи централізований контроль над мережевим трафіком, що дозволяє динамічне та програмоване управління мережею. Контролери SDN контролюють маршрутизацію та комутацію потоків даних, оптимізуючи використання ресурсів та забезпечуючи безпеку мережі. Хмарно-орієнтована архітектура 5G Core (5GC) є прикладом цього зрушення, оскільки вона використовує хмарну інфраструктуру для підтримки віртуалізованих мережевих функцій (VNF), розподілених по центрах обробки даних або периферійних розташуваннях. Ця архітектура підвищує масштабованість, стійкість та гнучкість, дозволяючи мережевим операторам швидко адаптуватися до змінних вимог, безперешкодно впроваджувати нові послуги та реалізовувати сегментацію мережі в режимі реального часу. Конвергенція NFV, контейнерів, SDN та хмарних обчислень створює гнучку та ефективну платформу, яка лежить в основі різноманітних пропозицій послуг 5G та підтримує швидку еволюцію телекомунікаційної інфраструктури. Визначальною рисою мереж 5G є реалізація мережевого сегментування, яка впроваджує парадигму сегментації мережі, адаптовану до конкретних вимог до послуг. Мережеве сегментування дозволяє створювати кілька віртуальних мереж – сегментів – на спільній фізичній інфраструктурі, кожен з яких оптимізований для різних застосувань, таких як покращений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB), наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) або масивний машинний зв'язок (mMTC). Основний принцип роботи полягає у виділенні виділених ресурсів, таких як пропускна здатність, обчислювальна потужність та гарантії затримки, кожному сегменту, що гарантує, що кожен тип послуг отримує відповідну якість обслуговування (QoS). Механізми ізоляції ресурсів реалізуються за допомогою методів віртуалізації та розподілу ресурсів, які запобігають перешкодам між сегментами та забезпечують передбачувану продуктивність. Крім того, складні системи управління контролюють та динамічно коригують розподіл ресурсів, підтримуючи рівні QoS та адаптуючись до коливань потреб. Наприклад, у сценарії розумного міста сегмент може бути виділений для зв'язку автономних транспортних засобів, що вимагає наднизької затримки, тоді як інший сегмент

обслуговує датчики Інтернету речей з високою щільністю пристроїв, але менш жорсткими вимогами до затримки. Цей гнучкий та настроюваний підхід дозволяє операторам надавати індивідуальні мережеві можливості, оптимізувати використання ресурсів та підтримувати широкий спектр програм одночасно в рамках однієї фізичної інфраструктури.

Підтримка безперебійної мобільності залишається критичним компонентом архітектури мережі 5G, забезпечуючи безперебійне з'єднання, коли користувачі переміщуються між різними зонами покриття та мережами. Механізми підтримки мобільності включають розширені процедури передачі, які дозволяють пристроям плавно переходити між базовими станціями, мінімізуючи перебої в обслуговуванні. У 5G процеси передачі вдосконалюються завдяки швидшій сигналізації, прогнозуючим алгоритмам та контекстно-залежному прийняттю рішень для врахування сценаріїв високошвидкісної мобільності, таких як високошвидкісні поїзди або автономні транспортні засоби. Підтримка роумінгу в гетерогенних середовищах, що включають різні технології радіодоступу та мережевих операторів, також є невід'ємною частиною, дозволяючи пристроям підтримувати з'єднання в різних мережах та географічних регіонах. Це досягається за допомогою стандартизованих протоколів та угод між операторами, які сприяють автентифікації, забезпеченню безперервності сеансу та передачі даних між різними доменами. Керування мобільністю користувачів в межах ядра 5G включає складні механізми, які відстежують місцезнаходження пристроїв, керують станами сеансу та ефективно розподіляють ресурси. Ядро 5G використовує мережеві функції, такі як функція керування доступом та мобільністю (AMF) та функція керування сеансами (SMF), для координації цих процесів, забезпечуючи користувачам стабільну якість обслуговування незалежно від їхнього переміщення. Ці елементи мобільності разом підтримують фундаментальну мету 5G: забезпечення надійного високошвидкісного з'єднання у все більш мобільному та взаємопов'язаному світі, як у міських, так і в сільських районах.

Безпека архітектури 5G є критичним аспектом, що лежить в основі її широкого впровадження та надійної роботи. Оскільки мережі стають все більш

складними та взаємопов'язаними, захист цілісності даних, конфіденційності та стійкості системи вимагає постійних планів масштабування та технологічних удосконалень. 5G запроваджує передові протоколи безпеки, включаючи вдосконалені методи шифрування, взаємну автентифікацію та розширений захист цілісності даних користувачів. Ці заходи розроблені для протидії новим загрозам, таким як кібератаки, порушення безпеки даних та несанкціонований доступ, які стають все більш складними в сучасних мережах. Крім того, розширені можливості 5G готові революціонізувати різні сектори, включаючи транспорт, медицину та промисловість, шляхом забезпечення обміну даними та автоматизації в режимі реального часу. Наприклад, автономні транспортні засоби залежать від безпечних каналів зв'язку з низькою затримкою для безпечної навігації, тоді як для дистанційних операцій потрібні захищені та надійні канали передачі даних. Інтеграція 5G з майбутніми поколіннями, такими як 6G та 7G, також є можливою, що обіцяє ще надійніші системи безпеки, засновані на штучному інтелекті та методах квантового шифрування. Ці досягнення спрямовані на захист ландшафту взаємопов'язаних пристроїв та критичної інфраструктури, що постійно зростає, гарантуючи, що зі зростанням можливостей мереж їхні заходи безпеки пропорційно розширюються для зменшення ризиків та сприяння довірі між користувачами та зацікавленими сторонами [3].

Підсумовуючи, побудова та архітектура мереж 5G базуються на інноваційних принципах, що покращують зв'язок, пропускну здатність та універсальність. Теоретичні основи простежують еволюцію від попередніх поколінь, підкреслюючи такі цілі, як наднизька затримка, висока швидкість передачі даних та масове підключення, все це завдяки передовим радіотехнологіям та принципам проектування мереж. Архітектура мережі доступу, прикладом якої є базові станції gNodeB та технологія міліметрових хвиль, забезпечує високошвидкісний та надійний зв'язок, адаптований до густонаселених та різноманітних середовищ. Одночасно, основна мережа 5G впроваджує гнучку, масштабовану та сервісно-орієнтовану структуру, що підтримується віртуалізацією, хмарною інфраструктурою та складними протоколами для надання широкого спектру послуг.

Розподіл мережі ще більше підвищує цю адаптивність, дозволяючи створювати індивідуально налаштовані віртуальні мережі, оптимізовані для конкретних застосувань, а механізми підтримки мобільності забезпечують безперебійний користувацький досвід у гетерогенних середовищах. В основі всіх цих функцій лежить сильний акцент на безпеці, що є життєво важливим, оскільки 5G стає невід'ємною частиною критично важливих секторів, таких як транспорт, охорона здоров'я та промисловість, і оскільки це прокладає шлях для майбутніх поколінь мереж. Разом ці принципи та архітектури позиціонують 5G не просто як еволюцію бездротових технологій, а як трансформаційну інфраструктуру, здатну формувати майбутній цифровий ландшафт, сприяти інноваціям та підтримувати взаємопов'язаний світ завтрашнього дня.

1.2. Технологічні особливості та стандарти радіоінтерфейсу 5G NR

Еволюція технологій бездротового зв'язку призвела до розвитку мережі п'ятого покоління (5G), яка обіцяє значне підвищення швидкості передачі даних, зменшення затримки та покращення зв'язку. Центральним елементом цього прогресу є радіоінтерфейс 5G New Radio (NR) – набір технологічних стандартів та функцій, що визначають, як дані передаються через мережі 5G. На відміну від попередніх поколінь, таких як LTE, 5G NR впроваджує інноваційні концепції та режими роботи, розроблені для задоволення різноманітних вимог сучасних застосувань, від високошвидкісного мобільного широкосмугового доступу до Інтернету речей (IoT). У цьому розділі досліджуються основні технологічні особливості та стандарти радіоінтерфейсу 5G NR, зосереджуючись на його принципах роботи, використанні частоти, а також методах модуляції та кодування, ілюструючи, як ці елементи разом забезпечують надійну роботу мереж 5G.

Радіоінтерфейс 5G NR фундаментально базується на концепції «Нового радіо», що суттєво відрізняється від стандартів Long-Term Evolution (LTE), що йому передували. На відміну від LTE, який переважно працює в межах фіксованого

частотного спектру та використовує жорстку структуру на основі OFDMA, 5G NR пропонує більш гнучку та масштабовану архітектуру, здатну підтримувати ширший діапазон діапазонів спектру та сценаріїв розгортання. Одним з ключових принципів є використання гнучкої нумерації, що дозволяє використовувати різні інтервали між піднесучими та тривалості слотів для оптимізації продуктивності в різних середовищах. Основними цілями стандартизації інтерфейсу 5G NR є забезпечення сумісності, підвищення спектральної ефективності та підтримка різноманітних варіантів використання, починаючи від покращеного мобільного широкосмугового доступу до критично важливих комунікацій. Для досягнення цих цілей 5G NR підтримує два основні режими роботи: автономний (SA), який спирається виключно на інфраструктуру 5G, та неавтономний (NSA), який інтегрується з існуючими мережами LTE для забезпечення плавнішого переходу та ширшого покриття. Режим NSA дозволяє операторам швидко розгортати функції 5G, використовуючи існуючу інфраструктуру LTE, тоді як режим SA являє собою повністю незалежну мережу 5G, оптимізовану для нових послуг, що є прикладом гнучких принципів проектування, що лежать в основі 5G NR (табл. 1.2) [4].

Використання діапазону частот є основою можливостей 5G NR, причому стандарт визначає два основні діапазони: діапазон частот 1 (FR1) та діапазон частот 2 (FR2). FR1 охоплює частоти нижче 6 ГГц, подібні до тих, що використовувалися в попередніх бездротових стандартах, і характеризується широким покриттям та хорошими можливостями проникнення, що робить його придатним для широкого розгортання в містах та сільській місцевості. І навпаки, FR2 охоплює діапазони міліметрових хвиль (mmWave), зазвичай вище 24 ГГц, які забезпечують надзвичайно високу швидкість передачі даних та ємність завдяки своєму широкому доступному спектру. Розгортання мм-хвильових частот у системах 5G використовує їхню здатність підтримувати надвисокопродуктивні програми, такі як потокове передавання 4K, доповнена реальність та щільне міське з'єднання, хоча вони вимагають передових методів формування променя для подолання вищих втрат поширення.

Таблиця 1.2.

Технічні характеристики та стандарти радіоінтерфейсу 5G NR

Параметр	Характеристика	Типові значення / Стандарти	Призначення у системі 5G
Частотні діапазони	Поділ спектра на FR1 (Sub-6 GHz) і FR2 (mmWave)	FR1: 410 МГц – 7,125 ГГц FR2: 24,25 – 71 ГГц	Забезпечення гнучкого розгортання для макро- і піко-комірок
Ширина каналу	Гнучке масштабування частотного ресурсу	FR1: до 100 МГц FR2: до 400 МГц	Оптимізація пропускної здатності та затримки
Модуляція	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	Підтримується адаптивна AMC	Збільшення швидкості передачі при сталому рівні SNR
Кодування	LDPC (дані користувачів), Polar Codes (управління)	3GPP TS 38.212	Підвищення стійкості до завад та зменшення BER
Множинний доступ	OFDMA (DL), SC-FDMA (UL), NOMA (опціонально)	3GPP TS 38.211	Оптимізація використання спектра та одночасного доступу
Розділення ресурсів	Гнучка сітка піднесучих (15–240 кГц)	15/30 кГц – FR1 60/120/240 кГц – FR2	Масштабування для різних середовищ і затримок
Антенні технології	Massive MIMO, Beamforming, MU-MIMO	До 256 антенних елементів	Підвищення SNR, формування вузьких пучків сигналу
Топологія розгортання	SA (Standalone) / NSA (Non-Standalone)	SA – повністю автономна NSA – спільна з LTE	Гнучкий перехід між поколіннями
Затримка передачі	Кінцева затримка < 1 мс (URLLC)	TTI = 0,125 мс	Критично важливі застосування (роботизація, транспорт)
QoS та Slice ID	Підтримка Network Slicing на PHY-рівні	ID Slice у RRC/RLC/MAC	Диференціація сервісів (eMBB, URLLC, mMTC)
Пропускна здатність	Теоретично до 10 Гбіт/с (DL) / 5 Гбіт/с (UL)	Залежить від спектра і MIMO	Реалізація високошвидкісного мобільного доступу
Стандарти 3GPP	Основні релізи 15–18	TS 38.201 – 38.331	Регламентують усі рівні фізичного й MAC-рівня

Щоб максимізувати спектральну ефективність у цих діапазонах, 5G використовує складні методи, такі як формування променя, масивний MIMO (множинні входи-виходи) та динамічний розподіл спектру, які покращують якість сигналу та зменшують перешкоди. Ці методи разом дозволяють 5G забезпечити обіцяні покращення продуктивності, адаптуючись до унікальних викликів та можливостей, що надаються різними діапазонами частот.

Схеми модуляції та кодування є ключовими для визначення ефективності передачі даних та надійності радіоінтерфейсу 5G NR. Стандарт включає різноманітні методи модуляції, включаючи квадратурну фазову маніпуляцію (QPSK), 16QAM, 64QAM та 256QAM, кожен з яких пропонує різні компроміси між швидкістю передачі даних та стійкістю. Наприклад, QPSK забезпечує високу надійність в умовах поганого сигналу, тоді як 256QAM дозволяє набагато вищу пропускну здатність даних за сприятливих умов, що ілюструє адаптивний характер схем модуляції 5G. Для забезпечення цілісності даних 5G NR використовує вдосконалені схеми корекції помилок, зокрема коди перевірки парності з низькою щільністю (LDPC) для передачі даних та полярні коди для керуючої інформації, що значно підвищує ефективність корекції помилок. Крім того, адаптивне кодування та модуляція (AMC) динамічно регулюють порядок модуляції та швидкість кодування на основі умов каналу в режимі реального часу, оптимізуючи пропускну здатність та мінімізуючи повторні передачі. Цей адаптивний підхід гарантує, що мережі 5G можуть підтримувати високу швидкість передачі даних та низьку затримку в різних середовищах, що робить 5G NR стійким та ефективним стандартом зв'язку, здатним задовольнити вимогливі потреби сучасних бездротових застосувань.

Критичним аспектом технологічного прогресу 5G NR є використання складних антенних технологій та методів просторового мультиплексування, які значно підвищують пропускну здатність мережі та покриття. Однією з найвизначніших інновацій є масивний множинний вхід/вихід (Massive MIMO), який використовує велику кількість антенних елементів — часто десятки або навіть сотні — для одночасного обслуговування кількох користувачів в одному діапазоні

частот. Ця технологія дозволяє просторове мультиплексування, де кілька потоків даних передаються одночасно, ефективно множачи пропускну здатність мережі без потреби в додатковому спектрі. Формування променя додатково доповнює масивний MIMO, спрямовуючи сигнали точно на окремих користувачів або пристрої, тим самим покращуючи якість сигналу та зменшуючи перешкоди. Цей цілеспрямований підхід не тільки підвищує спектральну ефективність, але й розширює покриття, особливо в складних умовах, таких як щільні міські райони або приміщення. Для оптимізації продуктивності в різних сценаріях антенні решітки ретельно проектуються та налаштовуються на основі конкретні середовища розгортання, будь то міські, сільські чи приміщені. Ці масиви можна налаштувати для максимального покриття, пропускної здатності або збалансованого поєднання обох, забезпечуючи адаптацію мереж 5G до широкого спектру випадків використання та географічних умов. Використовуючи ці передові антенні технології, 5G NR досягає чудової швидкості передачі даних, підвищеної надійності та ефективнішого використання доступних спектральних ресурсів.

Управління ресурсами та механізми доступу є основоположними для гнучкої та ефективної роботи 5G NR, при цьому ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) формує основу фізичного рівня. OFDM розділяє доступний спектр на численні вузькосмугові піднесучі, які можна динамічно розподіляти користувачам на основі їхніх вимог до даних та стану каналу. Цей поділ забезпечує високу спектральну ефективність та стійкість до багатопроменевих згасань, що робить його добре пристосованим для різноманітних середовищ, в яких працює 5G. Гнучкий розподіл частотних та часових ресурсів дозволяє мережі швидко адаптуватися до змінних навантажень трафіку, підтримуючи широкий спектр послуг з різними вимогами до затримки, пропускної здатності та надійності. Методи множинного доступу, побудовані на цій основі, включають OFDMA (ортогональний частотний поділ каналів) для низхідних та висхідних каналів, що забезпечує одночасний доступ користувачів без перешкод, та SC-FDMA (множинний доступ з однорядним частотним поділом), який забезпечує енергоефективність для висхідних передач. Крім того, неортогональний

множинний доступ (NOMA) впроваджується як інноваційний підхід до подальшого підвищення пропускної здатності, дозволяючи кільком користувачам спільно використовувати одні й ті ж часово-частотні ресурси за допомогою мультиплексування в енергетичній області, що покращує спектральну ефективність, особливо в умовах перевантаженості. Ці стратегії розподілу ресурсів разом дозволяють мережам 5G забезпечувати високу пропускну здатність, низьку затримку та рівний доступ до величезної кількості користувачів та пристроїв.

Однією з визначальних особливостей універсальності 5G NR є його здатність підтримувати широкий спектр послуг, адаптованих до конкретних потреб, починаючи від високошвидкісної передачі даних до наднадійного зв'язку з низькою затримкою та масового підключення Інтернету речей. Розширений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB) розроблений для забезпечення користувачів надшвидким доступом до Інтернету, підтримуючи такі послуги, як потокове відео 4K/8K, додатки віртуальної реальності та доповненої реальності. Щоб задовольнити ці вимоги, 5G використовує широку пропускну здатність, вдосконалену модуляцію та ефективні методи використання спектра для забезпечення швидкості передачі даних у кілька гігабіт на секунду. Наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) орієнтований на програми, що вимагають майже миттєвого часу відгуку, такі як автономні транспортні засоби, дистанційна хірургія та промислова автоматизація. Досягнення суворих вимог до затримки передбачає пріоритетність каналів керування, оптимізацію планування ресурсів та використання периферійних обчислень. Тим часом, масовий машинний зв'язок (mMTC) спрямований на поширення підключених пристроїв в екосистемі Інтернету речей. Цей тип послуг робить акцент на масовому з'єднанні, енергоефективності та підтримці пристроїв з низькою швидкістю передачі даних та тривалим терміном служби акумуляторів. Гнучка структура кадру 5G NR, адаптивний розподіл ресурсів та масштабовані протоколи сигналізації дозволяють йому ефективно обслуговувати ці різноманітні профілі послуг, гарантуючи, що конкретні вимоги до якості обслуговування (QoS) кожної програми виконуються в рамках однієї загальної архітектури мережі.

Стандартизація та постійний розвиток специфікацій 5G NR зумовлені, головним чином, Проектом партнерства третього покоління (3GPP), міжнародною спільною організацією, відповідальною за розробку та підтримку стандартів стільникового зв'язку. З моменту появи 5G, 3GPP відігравав ключову роль у визначенні технічної бази через послідовні релізи, кожен з яких впроваджував нові функції та вдосконалення для задоволення потреб, що виникають, та технологічних досягнень. Реліз 15 ознаменував початковий етап стандартизації 5G, встановивши основні характеристики радіоінтерфейсу, включаючи гнучку нумерацію, спільне використання спектру та початкову підтримку режимів NSA та SA. Наступні релізи, такі як Реліз 16, розширили можливості, покращивши підтримку промислового Інтернету речей, покращивши сегментацію мережі та вдосконаливши методи формування променя та MIMO для кращого покриття та пропускної здатності. Реліз 17 продовжив цю траєкторію, зосередившись на наднадійному зв'язку з низькою затримкою, інтегрованому супутниковому зв'язку та покращеннях енергоефективності, тоді як Реліз 18 має на меті включити ще більш просунуті функції, включаючи інтеграцію з неземними мережами та покращене управління мережею на основі штучного інтелекту. Забігаючи вперед, еволюція 5G NR створює умови для розвитку 6G, який, як очікується, буде базуватися на фундаменті 5G з ще вищими швидкостями передачі даних, повсюдною інтеграцією штучного інтелекту та повсюдним підключенням. Прогрес від релізів 3GPP підкреслює динамічні, спільні зусилля щодо постійного вдосконалення та розширення можливостей бездротового зв'язку, гарантуючи, що майбутні мережі відповідатимуть постійно зростаючим потребам суспільства та промисловості [5].

На завершення, радіоінтерфейс 5G NR являє собою вражаючий крок вперед у технології бездротового зв'язку, що характеризується інноваційними принципами, універсальним використанням частот, передовими схемами модуляції та кодування, а також складними стратегіями управління антеною та ресурсами. Його гнучка архітектура, що підтримується подвійними режимами SA та NSA, забезпечує безперебійне розгортання в різних середовищах, тоді як використання міліметрових хвиль та методів спектральної ефективності забезпечує

безпрецедентні швидкості передачі даних та ємність. Інтеграція передових технологій антен, таких як Massive MIMO та формування променя, ще більше підвищує продуктивність мережі, а різноманітна підтримка послуг, включаючи eMBB, URLLC та mMTC, демонструє адаптивність 5G до широкого спектру застосувань. Поточні зусилля зі стандартизації, очолювані 3GPP, забезпечують безперервну еволюцію, прокладаючи шлях до ще більш досконалих бездротових систем та остаточної реалізації 6G. Загалом, технологічні особливості та стандарти 5G NR є прикладом надійної, гнучкої та перспективної платформи, яка покликана змінити те, як суспільство з'єднується, спілкується та впроваджує інновації в найближчі десятиліття.

1.3. Можливості та перспективи застосування мереж 5G у інформаційних ресурсах

Роль підсистеми IP Multimedia Subsystem (IMS) у контексті інтеграції 5G з супутниковими системами для глобального покриття. Швидкий розвиток телекомунікацій послідовно спрямований на розширення зв'язку, підвищення якості послуг та підтримку різноманітних застосувань. Серед критично важливих технологічних структур, що сприяють цьому прогресу, є IP-мультимедійна підсистема (IMS) – стандартизована архітектурна структура, призначена для надання мультимедійних послуг через IP-мережі. Оскільки світ переходить в еру 5G, інтеграція цієї бездротової технології наступного покоління з існуючими та новими системами зв'язку, зокрема супутниковими мережами, стає важливою для досягнення справді повсюдного покриття. У цьому есе досліджується ключова роль IMS у контексті інтеграції 5G із супутниковими системами для реалізації безперебійного глобального зв'язку. У ньому розглядаються фундаментальні аспекти IMS, її вдосконалення за допомогою 5G та значення супутникових систем у розширенні покриття на віддалені регіони, тим самим підкреслюючи комплексну структуру, необхідну для майбутніх комунікаційних мереж.

Підсистема IP-мультимедіа (IMS) – це стандартизована архітектурна структура, розроблена в рамках проекту партнерства третього покоління (3GPP) для забезпечення надання мультимедійних послуг на основі IP у різних мережевих інфраструктурах. По суті, IMS працює як багаторівнева архітектура, що складається з кількох ключових компонентів, що забезпечують безперебійне надання послуг, керування сеансами та їхню сумісність. Її основні компоненти включають функцію керування сеансами викликів (CSCF), яка керує сигналізацією та керуванням сеансами; домашній сервер абонента (HSS), який діє як централізована база даних для інформації про абонентів; та сервери додатків (AS), які розміщують та виконують додаткові послуги. Основна архітектура IMS ефективно відокремлює логіку обслуговування від базових транспортних мереж, дозволяючи операторам впроваджувати нові послуги з мінімальними перебоями. Традиційно IMS відігравала життєво важливу роль у підтримці послуг голосового зв'язку через IP (VoIP), мультимедійних повідомлень та конференц-зв'язку у фіксованих та мобільних мережах, дозволяючи операторам переходити від систем з комутацією каналів до систем з комутацією пакетів, зберігаючи при цьому безперервність обслуговування. Завдяки модульній конструкції та стандартизації IMS стала основою сучасних телекомунікаційних послуг, пропонуючи масштабованість, гнучкість та сумісність між різними мережевими доменами та пристроями.

Інтеграція технології 5G значно розширює можливості IMS, перетворюючи її на більш динамічну та універсальну структуру, здатну підтримувати широкий спектр передових застосувань. 5G покращує IMS, забезпечуючи наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), масивний машинний зв'язок (mMTC) та покращений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB), які разом вимагають складних механізмів управління сеансами та якості обслуговування (QoS). IMS слугує критично важливим елементом в архітектурі 5G, функціонуючи як компонент площини керування, який керує наданням мультимедійних послуг, включаючи доповнену реальність, віртуальну реальність та критично важливі зв'язки (табл. 1.3) [6].

Таблиця 1.3.

Функціональна роль IMS у гібридних мережах 5G–LEO/MEO/GEO

Параметр	Роль IMS у мережах 5G	Роль IMS у супутникових мережах	Значення для інтеграції 5G–Satellite
Управління сеансами (SIP/SDP)	Контроль викликів, VoNR, відеосесій	Стабілізація сеансів при великій затримці	Безшовна передача між наземними та супутниковими сегментами
QoS / PCRF / PCF	Призначення політик для eMBB/URLLC/mMTC	Адаптація до змінної пропускної здатності супутника	Гарантована якість сервісу у гетерогенному середовищі
HSS / UDR / UDM	Централізована автентифікація 5G	Автентифікація користувачів у супутникових доменах	Єдиний глобальний профіль абонента
S-CSCF / I-CSCF / P-CSCF	Маршрутизація SIP-трафіку	Маршрутизація через супутникові шлюзи	Інтелектуальний вибір маршруту наземний/орбітальний
Network Slicing через IMS	eMBB, URLLC, mMTC сегменти	Супутникові slice-и для морської, авіаційної, військової галузі	Єдині slice-и у наземних і супутникових доменах
Security (AKA, IPsec)	Захист RRC/UP трафіку	Захист супутникових каналів від перехоплення	Безпека в мультиорбітальних каналах
Edge/Cloud IMS	MEC-оптимізована IMS	Розподілена хмара у супутниковому шлюзі	Зменшення затримки і підвищення стабільності в LEO-середовищі

Синергія між 5G та IMS сприяє безперебійній роботі сервісів, динамічному розподілу ресурсів та персоналізованому користувацькому досвіду. Наприклад, основні мережі на базі IMS дозволяють розділяти мережу, дозволяючи операторам адаптувати послуги для певних галузевих вертикалей або груп користувачів, тим

самим підвищуючи операційну ефективність та задоволеність клієнтів. Інтеграція також спрощує розгортання нових послуг, прискорює інновації та сприяє взаємодії між різнорідними мережами, що робить її незамінною для досягнення повного потенціалу екосистем, що підтримують 5G.

Схема демонструє архітектуру інтеграції наземної мережі 5G та супутникових систем за допомогою IP Multimedia Subsystem (IMS), яка виконує функцію єдиної платформи управління мультимедійними сеансами та політиками обслуговування.

У верхній частині розміщено зовнішні IP-сервіси, які отримують доступ до мережі через IMS-платформу. IMS координує встановлення, підтримку та завершення мультимедійних сеансів (голос, відео, повідомлення, дані), незалежно від того, чи UE (User Equipment) підключений через наземну RAN чи супутниковий канал.

Взаємодія IMS із ядром 5G здійснюється через протоколи SIP, Diameter та HTTP/2, які забезпечують сигналізацію, керування сеансами й політиками QoS. IMS обмінюється службовою інформацією з наземним UPF (User Plane Function), який відповідає за маршрутизацію і передачу даних у площині користувача.

З наземної сторони gNodeB (RAN) з'єднується з UPF через інтерфейси N3/N9, а користувацькі термінали UE використовують інтерфейс доступу NR (New Radio). Це забезпечує стандартне підключення 5G у діапазонах FR1/FR2.

З супутникової сторони IMS так само взаємодіє із супутниковим шлюзом (Gateway + UPF-SAT), який забезпечує комутацію трафіку між супутником та наземним сегментом 5GC. Шлюз з'єднаний із супутниками через високошвидкісні канали: eCPRI, Ka-діапазон або лазерні міжсупутникові лінки.

LEO/GEO супутники забезпечують транспорт трафіку до користувацьких супутникових терміналів (морські, авіаційні, віддалені райони). IMS виступає центральним елементом, що забезпечує єдину логіку встановлення сеансів і QoS, дозволяючи надати однакові IMS-сервіси (VoNR, відеодзвінки, IoT-моніторинг) як через наземний, так і супутниковий канал.

У результаті IMS виконує роль уніфікатора, що забезпечує безшовну роботу сервісів у гібридній архітектурі 5G–Satellite з єдиною сигналізацією та управлінням політиками (рис. 1.3).

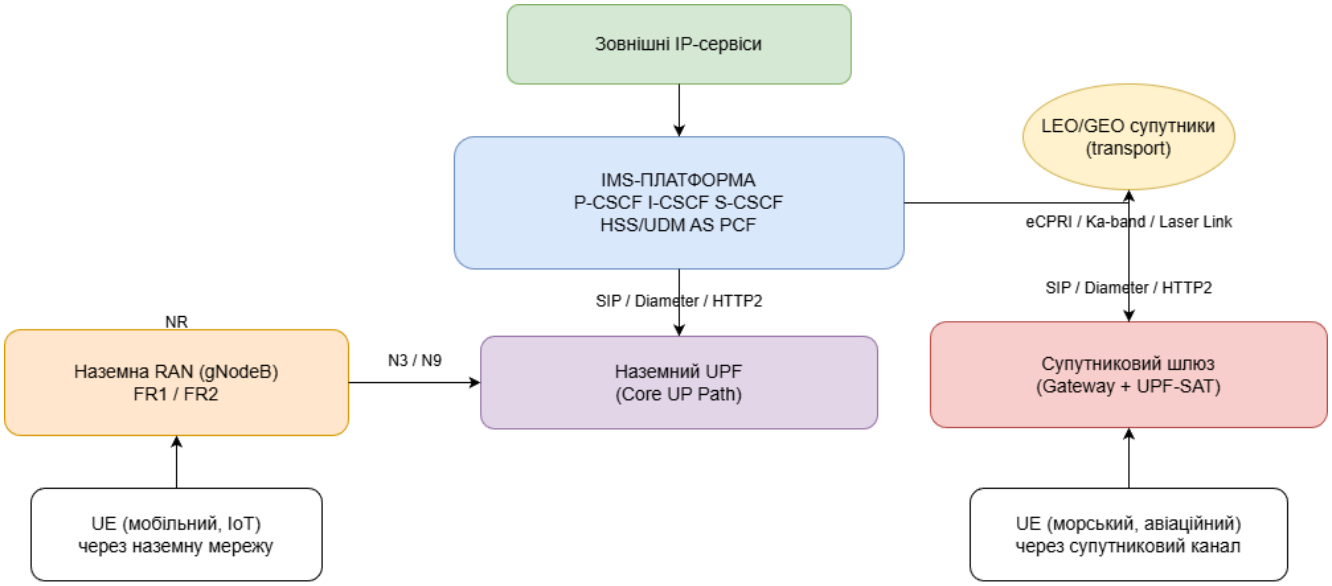


Рис. 1.3. Єдина IMS-координація сеансів через SIP/SDP

Системи супутникового зв'язку відіграють незамінну роль у розширенні глобальної зв'язності, особливо у віддалених та недостатньо обслуговуваних регіонах, де наземні мережі є непрактичними або економічно недоцільними. Супутникові технології, що охоплюють геостаціонарні, середні та низькі навколоземні орбіти (LEO) супутники, забезпечують широкі зони покриття, гарантуючи, що навіть найбільш ізольовані громади можуть отримати доступ до життєво важливих комунікаційних послуг. Ці системи пропонують чіткі переваги, включаючи широкий географічний охоплення, швидке розгортання в умовах стихійних лих та можливість забезпечення зв'язку в морському, авіаційному та сільському середовищі. Однак інтеграція супутникових систем з наземними мережами стикається зі значними труднощами, пов'язаними, головним чином, з обмеженнями затримки та пропускної здатності. Висока затримка, властива геостаціонарним супутникам через висоту їхньої орбіти, може перешкоджати роботі програм реального часу, тоді як обмеження пропускної здатності можуть обмежувати пропускну здатність даних. Незважаючи на ці труднощі, такі

досягнення, як сузір'я супутників LEO (наприклад, Starlink), зменшують проблеми затримки та збільшують ємність, роблячи супутникові мережі більш сумісними з рамками 5G та IMS. Конвергенція супутникових систем з інфраструктурою IMS та 5G обіцяє комплексне рішення для глобального покриття, що гарантує, що передові мультимедійні послуги можуть досягти кожного куточка земної кулі, таким чином реалізуючи бачення універсального підключення.

Синергія між 5G, IMS та супутниковими системами залежить від здатності IMS сприяти безперешкодній інтеграції в гетерогенних мережевих середовищах, ефективно поєднуючи наземні та супутникові домени. IMS функціонує як об'єднуюча платформа керування та сигналізації, яка керує встановленням сеансів, автентифікацією та наданням послуг, незалежно від базової інфраструктури. Ця можливість дозволяє супутниковим каналам стати невід'ємною частиною загальної комунікаційної екосистеми, дозволяючи пристроям плавно перемикатися між наземними та супутниковими мережами без переривання обслуговування. Приклади використання ілюструють цю синергію, такі як сценарії реагування на надзвичайні ситуації, коли наземні мережі порушені; у таких випадках супутникове з'єднання може автоматично активуватися та керуватися через IMS, забезпечуючи безперервний зв'язок для служб швидкого реагування. Крім того, у глобальних розгортаннях Інтернету речей (IoT) IMS координує підключення пристроїв у різних мережах, підтримуючи такі програми, як дистанційний моніторинг та автономні системи. Досягнення сумісності вимагає ретельних технічних міркувань, включаючи розробку та впровадження стандартизованих протоколів, інтерфейсів та моделей даних, які враховують унікальні характеристики супутникових каналів, такі як змінна затримка та динамічна пропускна здатність. Стандарти 3GPP, разом з ініціативами таких організацій, як Міжнародний союз електрозв'язку (ITU), відіграють важливу роль у встановленні цих стандартів, дозволяючи пристроям та мережевим компонентам від різних постачальників гармонійно працювати. Зусилля зі стандартизації спрямовані на вирішення критично важливих проблем, таких як забезпечення стабільної якості обслуговування (QoS), безпеки та безперебійної передачі зв'язку між супутниковим та наземним сегментами, що є

важливим для надійного, комплексного надання послуг в інтегрованих супутникових мережах 5G (табл. 1.4) [7].

Таблиця 1.4.

Основні напрями застосування технології 5G

Сфера застосування	Характеристика	Очікуваний ефект
Мобільні широкосмугові сервіси (eMBB)	Забезпечення високих швидкостей передачі даних до 10 Гбіт/с	Покращення якості мультимедіа та доступу до хмарних сервісів
Масовий Інтернет речей (mMTC)	Підключення до 1 млн пристроїв на км²	Ефективний збір даних для Smart City та Smart Industry
Надійний зв’язок з низькою затримкою (URLLC)	Затримка менше 1 мс, висока надійність передачі	Критичні застосування: автономний транспорт, роботизація

Поява технології 5G знаменує собою трансформаційну віху в еволюції глобальних телекомунікаційних систем. Обіцяючи безпрецедентну швидкість, наднадійну низьку затримку та розширений зв'язок, 5G готовий революціонізувати різні сектори світу. Ця бездротова мережа наступного покоління не лише покращує традиційні комунікаційні можливості, але й відкриває нові можливості для інновацій у таких галузях, як міське будівництво, виробництво та транспорт. Оскільки країни та корпорації роблять значні інвестиції в розгортання інфраструктури 5G, розуміння її різноманітних застосувань та майбутніх перспектив стає надзвичайно важливим. У цьому розділі досліджуються основні сфери застосування технології 5G, зосереджуючись на її ролі в розширенні послуг мобільного широкосмугового зв'язку, розвитку промислового Інтернету речей (IoT) та перетворенні міського середовища на розумні міста. Крім того, в ньому розглядається, як 5G підтримує промислову автоматизацію та виробничі системи, а також як він революціонізує транспорт та мобільність, прокладаючи шлях до безпечніших, ефективніших та взаємопов'язаних систем у всьому світі.

Одним з основних застосувань технології 5G є розробка вдосконалених послуг мобільного широкосмугового зв'язку, відомих як eMBB, які значно

покращують швидкість, ємність та надійність інтернету як для споживачів, так і для бізнесу. Розгортання 5G дозволяє використовувати потокове передавання високої чіткості, віртуальну реальність (VR) та доповнену реальність (AR), що потребують значної швидкості передачі даних, тим самим змінюючи досвід користувачів (рис. 1.4).

.



Рис. 1.4. Перспективи застосування мереж 5G [8]

Наприклад, користувачі можуть насолоджуватися безперебійним потоковим відео 4K або 8K та захопливими ігровими середовищами без затримок. Крім того, 5G сприяє розширенню промислового Інтернету речей (Industrial Internet of Things, Industrial IoT), де взаємопов'язані пристрої взаємодіють у режимі реального часу для оптимізації виробничих процесів. Заводські цехи, оснащені датчиками та обладнанням з підтримкою 5G, можуть забезпечити збір даних у режимі реального часу, прогнозне обслуговування та ефективне управління ресурсами. Розумні міста є прикладом інтеграції технології 5G, де міська інфраструктура, така як світлофори, камери безпеки та комунальні служби, взаємодіє для покращення міського життя. Розумні дорожні системи можуть динамічно адаптуватися до заторів, зменшуючи

забруднення та скорочуючи час поїздок на роботу та з роботи. У сфері транспорту та інфраструктури 5G підтримує розвиток інтелектуальних систем, які забезпечують ефективніший розподіл ресурсів, управління енергією та громадську безпеку, зрештою сприяючи сталому розвитку міського середовища.

У промисловому та виробничому секторах 5G відіграє ключову роль у революції автоматизації виробництва та роботизованих операцій. Високошвидкісне з'єднання 5G з низькою затримкою забезпечує безперебійну роботу роботизованих комплексів на заводських цехах, забезпечуючи точну координацію та коригування в режимі реального часу, що підвищує продуктивність. Наприклад, роботизовані маніпулятори, що використовуються на складальних лініях, можуть миттєво реагувати на датчики та команди, зменшуючи помилки та збільшуючи пропускну здатність. Крім того, 5G тісно інтегрується з технологіями Індустрії 4.0, такими як штучний інтелект (ШІ), аналітика великих даних та цифрові двійники, створюючи тісно взаємопов'язану виробничу екосистему. Ця інтеграція забезпечує дистанційний моніторинг обладнання, прогнозне обслуговування та адаптивні виробничі процеси, що мінімізують час простою та експлуатаційні витрати. Промисловість також може впроваджувати дистанційне керування складними системами, зменшуючи потребу в персоналі на місці та підвищуючи безпеку в небезпечних середовищах. Поєднання технологій 5G та Індустрії 4.0 сповіщає про нову еру розумних заводів, де автоматизація та прийняття рішень на основі даних є центральними для конкурентної переваги та сталого виробництва.

Транспортні системи та мобільність отримають величезну користь від 5G, особливо враховуючи, що світ рухається до автономних транспортних засобів та інтелектуальних транспортних мереж. Наднадійна комунікаційна інфраструктура 5G з низькою затримкою дозволяє транспортним засобам миттєво взаємодіяти один з одним та із системами управління дорожнім рухом, формуючи основу технології автономного водіння. Наприклад, інтелектуальні дороги, оснащені датчиками та підключенням 5G, можуть надавати оновлення в режимі реального часу про дорожні умови, аварії та погоду, дозволяючи автономним транспортним засобам приймати безпечніші та швидші рішення. Окрім наземного транспорту, 5G

покращує авіаційний та морський зв'язок завдяки вдосконаленим системам відстеження, навігації та безпеки, сприяючи ефективнішій роботі та протоколам безпеки на морі та в повітрі. Крім того, системи громадського транспорту, такі як поїзди та автобуси, можуть бути інтегровані з мережами 5G для забезпечення планування руху, продажу квитків та інформації про пасажирів у режимі реального часу, тим самим покращуючи загальний досвід поїздок. Інтеграція 5G у ці системи обіцяє майбутнє розумніших, безпечніших та більш сталих транспортних мереж, що зменшить затори, викиди та час подорожей у всьому світі.

Ще однією важливою сферою, де очікується значний вплив 5G, є медицина та охорона здоров'я, трансформуючи традиційні практики завдяки передовим рішенням для зв'язку (табл. 1.5). Телемедицина, яка дозволяє пацієнтам дистанційно консультуватися з медичними працівниками, значно покращується завдяки високошвидкісній передачі даних та наднадійному з'єднанню 5G. Це сприяє відеоконсультаціям у режимі реального часу, дистанційній діагностиці та постійному моніторингу пацієнтів із хронічними захворюваннями, особливо у сільській місцевості або недостатньо обслуговуваних районах, де доступ до медичних закладів може бути обмежений. Крім того, 5G дозволяє інтегрувати технології доповненої реальності (AR) та віртуальної реальності (VR) у медичну підготовку та хірургічні процедури. Студенти-медики та практикуючі лікарі можуть практикувати складні операції в змодельованих умовах або отримувати керівництво в режимі реального часу під час операцій, покращуючи точність та результати. У сценаріях реагування на надзвичайні ситуації 5G підтримує швидке розгортання медичних служб, забезпечуючи миттєву передачу даних з місць аварій, дозволяючи фельдшерам та лікарням належним чином підготуватися до прибуття пацієнта. Крім того, системи моніторингу пацієнтів, оснащені датчиками 5G, можуть безперервно відстежувати життєво важливі показники та безпечно передавати дані медичним працівникам, забезпечуючи оперативне втручання та персоналізований догляд. Загалом, роль 5G в охороні здоров'я має на меті підвищити ефективність, точність та доступність, що зрештою покращить результати лікування пацієнтів та зменшить витрати на охорону здоров'я.

Таблиця 1.5.

Застосування технології 5G у транспорті, медицині та мультимедіа

Сфера застосування	Приклад використання	Характеристика	Переваги 5G
Транспортна система	Автономні авто, V2X-зв’язок	Комунікація між транспортними засобами	Зниження аварійності, затримка <1 мс
Залізничний транспорт	Інтелектуальні станції, моніторинг колій	Передача даних у реальному часі	Оптимізація руху і техобслуговування
Авіаційний та морський зв’язок	Передача даних між суднами/літаками	Підтримка зв’язку у складних умовах	Підвищена надійність і глобальне покриття
Медицина	Телемедицина, дистанційна діагностика	Відеозв’язок і передача даних у реальному часі	Мінімальна затримка, стабільність з’єднання
Моніторинг пацієнтів	IoT-сенсори для контролю стану здоров’я	Постійний збір даних від пристроїв	Масштабованість для великої кількості пристроїв
Роботизована хірургія	Дистанційне керування хірургічними роботами	Передача відео і команд без затримок	Висока точність і надійність операцій
Мультимедіа	Потокове 4K/8K-відео	Висока пропускна здатність каналів	Стабільна передача даних без буферизації
Віртуальна/доповнена реальність	AR/VR-платформи для навчання та розваг	Інтерактивна взаємодія користувачів	Зменшення затримки і підвищення якості досвіду
Хмарні ігри	Онлайн-геймінг без потужного клієнтського обладнання	Передача графіки з віддалених серверів	Плавність роботи і низька затримка

У сфері мультимедіа та розваг технологія 5G обіцяє революціонізувати спосіб споживання та сприйняття контенту. Безпрецедентна пропускна здатність та низька затримка 5G сприяють безперебійній потоковій передачі контенту високої чіткості, такого як відео 4K та 8K, на широкий спектр пристроїв, забезпечуючи захопливий досвід перегляду без буферизації чи затримок. Ця здатність підтримує розвиток інтерактивних платформ, які поєднують пряму трансляцію із залученням користувачів у режимі реального часу, сприяючи новим формам розваг та соціальної взаємодії. Більше того, додатки віртуальної реальності (VR) та доповненої реальності (AR) стають більш практичними та поширеними з 5G, дозволяючи користувачам брати участь в захопливих іграх, віртуальних концертах та соціальних заходах, не виходячи з дому. Хмарні ігрові сервіси, які транслюють ігри безпосередньо з віддалених серверів, також отримують вигоду від можливостей 5G, зменшуючи затримку та дозволяючи грати у складні, графічно ресурсоємні ігри на менш потужних пристроях. Інтерактивний контент, такий як 360-градусні відео та віртуальні тури, стає більш доступним та захопливим, трансформуючи ландшафт цифрових розваг. Як результат, 5G має переосмислити споживання мультимедіа, зробивши розваги більш інтерактивними, захопливими та персоналізованими, ніж будь-коли раніше [9].

2. СУЧАСНІ СУПУТНИКОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ

2.1. Класифікація супутникових систем зв’язку та їх архітектурні особливості

Системи супутникового зв'язку революціонізували глобальну зв'язок, надаючи широкий спектр послуг у різних сферах. Ці системи класифікуються на основі різних критеріїв, включаючи їхнє орбітальне розміщення, функціональне призначення та архітектурний дизайн. Розуміння класифікації систем супутникового зв'язку є важливим для розуміння їхніх операційних можливостей, пропонованих послуг та технологічних складнощів. У розділі ми дослідимо основні класифікації супутникових систем, а саме орбітальні, функціональні та архітектурні, та розглянемо відмінні риси та ролі, які вони відіграють у сучасній комунікаційній інфраструктурі.

Супутникові системи класифікуються переважно за їхнім орбітальним положенням, яке суттєво впливає на їхнє покриття, затримку та конкретні застосування. Супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO) обертаються приблизно на висоті 35 786 кілометрів над екватором, зберігаючи фіксоване положення відносно поверхні Землі (табл. 2.1) [10]. Таке стабільне позиціонування дозволяє супутникам GEO забезпечувати безперервне покриття певних регіонів, що робить їх ідеальними для таких застосувань, як телевізійне мовлення та моніторинг погоди. Однак їхня велика висота призводить до помітної затримки сигналу, часто близько 240 мілісекунд, що може вплинути на послуги в режимі реального часу, такі як голосовий зв'язок. Супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) обертаються на висотах від 2000 до 20 000 кілометрів, виконуючи переважно навігаційні та комунікаційні функції. Супутники GPS є яскравим прикладом систем MEO, що пропонують точні дані позиціонування з відносно низькою затримкою порівняно з системами GEO. Супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO) працюють на висотах від 500 до 2000 кілометрів і

характеризуються щільними сузір'ями, що забезпечують зв'язок з низькою затримкою та високою частотою.

Таблиця 2.1.

Класифікація супутникових систем зв’язку

Класифікаційна група	Тип системи	Характеристика (технічні параметри)
За орбітою руху супутників	GEO (Geostationary Earth Orbit)	Висота ~35 786 км; затримка 240–280 мс; покриття 1/3 Землі; стабільна точка над екватором; застосування: мовлення, FSS
	MEO (Medium Earth Orbit)	2000–20 000 км; затримка ~80–150 мс; менше покриття, ніж GEO; використання в навігації та комунікаціях
	LEO (Low Earth Orbit)	500–2000 км; затримка <50 мс; велика кількість супутників у сузір’ї; оптимальні для broadband та мобільних сервісів
За типом інформаційного сервісу	FSS (Fixed Satellite Service)	Фіксований зв’язок “точка–точка”; стабільні широкосмугові канали; великі стаціонарні антени
	MSS (Mobile Satellite Service)	Зв’язок із рухомими об’єктами (морські, авіаційні, наземні системи); глобальне покриття
	BSS (Broadcasting Satellite Service)	Супутникове мовлення; широкомовна дистрибуція контенту; орієнтація на GEO
За архітектурою супутника	Bent-pipe	“Прозорий ретранслятор”: мінімальна обробка сигналу; нижчі затрати; більша залежність від наземної інфраструктури
	OBP (On-Board Processing)	Обробка, комутація та маршрутизація сигналів на борту; зменшення затримки; підтримка багатопроменевої структури
	ISL (Inter-Satellite Links)	RF або оптичні канали між супутниками; дозволяють будувати глобальну мережу без наземних ретрансляцій

Системи LEO, такі як Starlink або OneWeb від SpaceX, розроблені для забезпечення широкосмугового інтернет-покриття, особливо у віддалених та недостатньо обслуговуваних регіонах. Їхня близькість до Землі забезпечує швидку передачу сигналу, що є критично важливим для мобільних послуг та передачі даних у режимі реального часу, що робить системи LEO особливо придатними для сучасних застосувань з високим попитом.

Окрім своїх орбітальних характеристик, системи супутникового зв'язку також класифікуються на основі їх функціональної ролі в мережевій інфраструктурі. Фіксовані супутникові системи (FSS) розроблені для забезпечення стабільних ліній зв'язку "точка-точка", які переважно використовуються для телефонного зв'язку, передачі даних та телевізійного мовлення. Ці системи зазвичай використовують великі наземні станції та оптимізовані для високопродуктивних, надійних передач по фіксованих географічних зонах. Мобільні супутникові системи (MSS), з іншого боку, адаптовані для підтримки зв'язку з мобільними користувачами та пристроями, включаючи кораблі, літаки та операторів віддалених польових служб. MSS використовують супутникові сузір'я для забезпечення безперебійного зв'язку в районах, де відсутня наземна інфраструктура, прикладами яких є такі системи, як Iridium та Inmarsat. Вони дозволяють здійснювати голосові дзвінки, передачу даних та послуги екстреного зв'язку, підкреслюючи гнучкість та мобільність. Системи мовлення та розповсюдження мовлення (BSS) спеціалізуються на поширенні мультимедійного контенту, такого як телевізійні та радіосигнали, серед широкої аудиторії. Ці системи використовують геостаціонарні супутники для передачі сигналів над великими регіонами, забезпечуючи широку доступність. Сучасні BSS також включають технології цифрової передачі, що дозволяє надавати послуги мовлення високої чіткості та інтерактивні медіа. Кожна функціональна класифікація відповідає конкретним потребам у зв'язку, а їх інтеграція в екосистему супутників покращує глобальну зв'язність та різноманітність послуг.

Архітектура мереж супутникового зв'язку охоплює просторову структуру всієї системи, включаючи корисне навантаження супутників, наземні сегменти та міжсупутникові зв'язки. Як правило, супутникова мережа включає супутник, який

діє як ретрансляційний вузол, наземну шлюзову станцію для передачі та прийому сигналів та користувацькі термінали. Наземний сегмент включає наземні станції, які забезпечують зв'язок із супутниками, керують мережевим керуванням та обробляють дані.

Архітектуру можна загалом класифікувати на конструкції з вигнутими трубами та бортовими системами обробки (OBP). Архітектура з вигнутими трубами передбачає, що супутники діють лише як ретранслятори, ретранслюючи сигнали, не змінюючи та не обробляючи дані на борту. Така конструкція спрощує конструкцію супутника, але може призвести до затримки та обмеження функціональності. І навпаки, архітектури OBP оснащують супутники можливостями обробки, що дозволяє їм виконувати такі завдання, як маршрутизація даних, комутація сигналів та управління ресурсами на борту. Такий підхід підвищує гнучкість мережі, зменшує затримку та підтримує складні послуги, такі як багатопроменеве покриття та динамічна маршрутизація. Міжсупутникові канали (ISL), незалежно від того, чи це радіочастотні, чи лазерні канали зв'язку, додатково розширюють можливості мережі, забезпечуючи прямий зв'язок між супутниками, не покладаючись виключно на наземні станції. Радіочастотні ISL широко використовуються завдяки зрілим технологіям, тоді як лазерні ISL пропонують вищу пропускну здатність, нижчу затримку та є вирішальними для щільних сузір'їв низькозоряних навколоземних орбіт (LEO), які прагнуть глобального покриття. Загалом, архітектурний вибір у супутникових мережах безпосередньо впливає на їхню продуктивність, масштабованість та здатність підтримувати нові потреби в зв'язку [11].

Системи супутникового зв'язку працюють у різних діапазонах частот, кожен з яких пропонує різні переваги та обмеження для передачі сигналу. Найбільш часто використовувані діапазони частот включають L, S, C, Ku та Ka. L-діапазон, що охоплює діапазон від 1 до 2 ГГц, цінується за свої чудові характеристики поширення, особливо за несприятливих погодних умов, що робить його придатним для мобільних пристроїв та навігації. S-діапазон (2-4 ГГц) та C-діапазон (4-8 ГГц) традиційно використовуються для метеорологічних радіолокаційних та

стаціонарних супутникових служб, маючи відносно менший атмосферний атенюатор. Ku-діапазон (12-18 ГГц) став стандартом для мовлення та широкосмугових послуг завдяки своїй більшій ємності та відносно компактним розмірам антен. Ka-діапазон (26,5-40 ГГц), з іншого боку, пропонує ще більшу пропускну здатність та швидкість передачі даних, що ідеально підходить для високопродуктивного супутникового інтернету та магістрального зв'язку. Окрім вибору частоти, методи модуляції та кодування відіграють ключову роль в оптимізації продуктивності каналу (рис. 2.1).

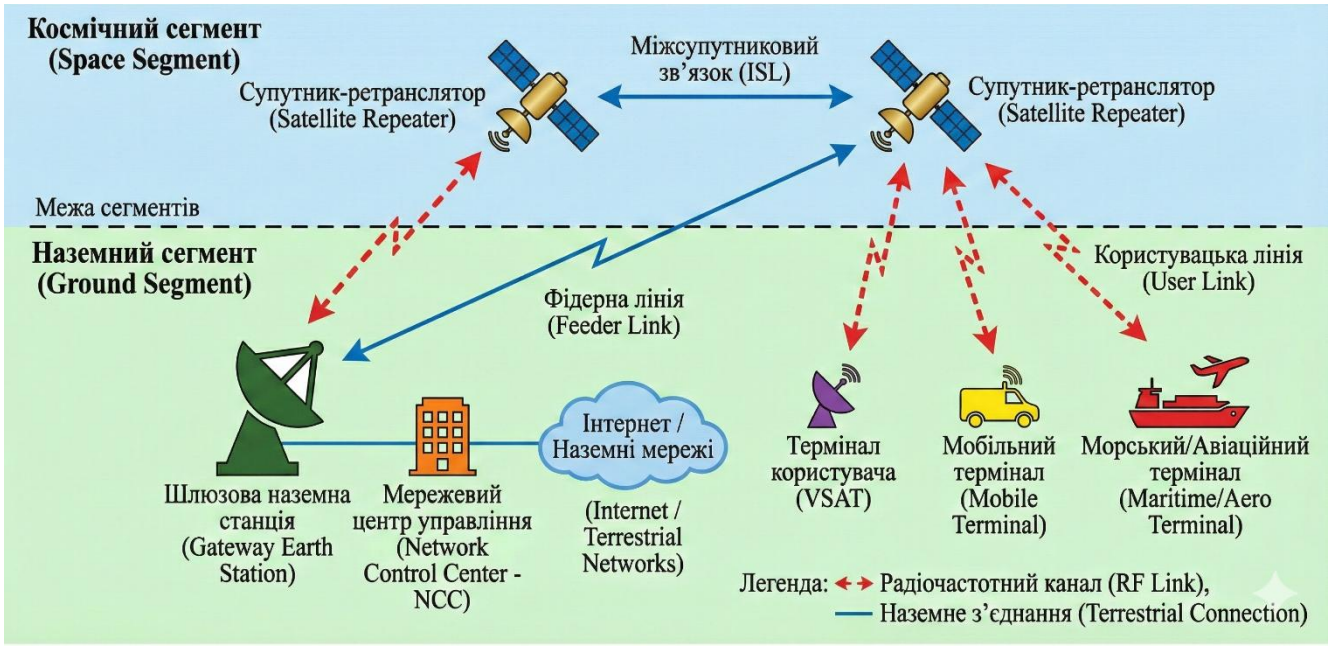


Рис. 2.1. Узагальнена архітектура мережі супутникового зв'язку: взаємодія космічного та наземного сегментів

Поширені схеми модуляції включають квадратурну фазову маніпуляцію (QPSK) та 8-фазову маніпуляцію (8PSK), які забезпечують баланс між спектральною ефективністю та стійкістю до шуму. Для покращення можливостей виправлення помилок, що забезпечує надійну передачу даних навіть у складних умовах, використовуються передові методи кодування, такі як коди з низькою щільністю перевірки парності (LDPC). Атмосферні фактори, включаючи згасання дощу, туман та іоносферні збурення, суттєво впливають на якість каналу, особливо у вищих частотних діапазонах, таких як Ka та Ku. Географічні фактори, такі як

перешкоди на місцевості та хмарність, можуть спричиняти ослаблення або згасання сигналу, що вимагає адаптивного керування потужністю, надійних схем кодування та методів рознесення для підтримки якості зв'язку та стійкості системи в різних середовищах.

Наземний сегмент супутників є критичним компонентом загальної комунікаційної інфраструктури, що охоплює різні наземні об'єкти, відповідальні за управління супутниковими операціями та з'єднання супутникових мереж із наземними системами. Супутникові шлюзи та телепорти служать основними інтерфейсами, діючи як центральні вузли для передачі, прийому та обробки сигналів. Ці об'єкти містять великі антени, обладнання для обробки сигналів та системи керування, які координують діяльність супутників, включаючи управління спектром, керування корисним навантаженням та маршрутизацію даних. Наземні станції користувачів, включаючи термінали з дуже малою апертурою (VSAT), морські та авіаційні термінали, дозволяють кінцевим користувачам отримувати прямий доступ до супутникових послуг. Термінали VSAT широко використовуються для корпоративних даних, доступу до Інтернету та дистанційного зондування, характеризуючись компактними розмірами та простотою розгортання. Наземні станції морських та авіаційних систем сприяють зв'язку для суден та літаків, забезпечуючи підключення в мобільних та віддалених середовищах. Інфраструктура взаємодіє з наземними мережами за допомогою різних протоколів та стандартів, таких як Інтернет-протокол (IP), переадресація польотів через Інтернет (IFF) та вдосконалений Загальний громадський радіоінтерфейс (eCPRI). Ці інтерфейси забезпечують безперешкодну інтеграцію супутникових мереж з наземними інтернет-, стільниковими та волоконно-оптичними системами, забезпечуючи сумісність та підтримуючи різноманітні вимоги до послуг. Конструкція наземного сегмента робить акцент на надійності, масштабованості та безпеці, що життєво важливо для підтримки безперервного обслуговування та адаптації до змінних потреб у зв'язку в різних секторах та географічних регіонах.

Топології супутникових мереж визначають структурні механізми, що регулюють те, як супутники, наземні станції та термінали користувача з'єднуються між собою для формування операційних систем зв'язку. Однопроменеві та багатопроменеві супутники є прикладом різних підходів до управління покриттям та потужністю. Однопроменеві супутники використовують широку, рівномірну зону покриття, що підходить для широкомасштабного мовлення або базових потреб у зв'язку. На відміну від цього, багатопроменеві супутники використовують методи формування променя для створення кількох сфокусованих зон покриття, що значно підвищує спектральну ефективність та пропускну здатність. Методи формування променя дозволяють супутникам динамічно спрямовувати промені до гарячих точок попиту, оптимізувати використання спектру та зменшувати перешкоди, тим самим покращуючи загальну продуктивність мережі. Серед поширених топологій, сітчаста, зіркова та гібридна конфігурації пропонують різний ступінь гнучкості, масштабованості та стійкості. Зіркова топологія має центральний вузол — часто наземну станцію — який підключається безпосередньо до кількох користувацьких терміналів, що підходить для централізованого керування, але вразливе до точок відмови. Сітчаста топологія дозволяє прямі взаємозв'язки між супутниками та наземними станціями, забезпечуючи резервування та стійкість, необхідні для стійкого зв'язку в складних умовах. Гібридні топології поєднують аспекти обох, розгортаючи центральні вузли разом із міжсупутниковими зв'язками для балансування продуктивності та складності. Крім того, сучасні супутникові сузір'я використовують стратегії динамічного розподілу ресурсів, такі як адаптивне формування променя, для розподілу пропускної здатності та потужності на основі попиту в режимі реального часу. Такі методи, як динамічні промені та механізми передачі, забезпечують безперешкодну передачу користувацьких з'єднань під час їхнього переміщення між зонами покриття, забезпечення безперебійного обслуговування та оптимального використання ресурсів. Ці архітектурні інновації є ключовими для підтримки зростаючого попиту на високопродуктивні послуги супутникового зв'язку з низькою затримкою в глобальних мережах.

Поява сучасних супутникових сузір'їв значно змінила ландшафт систем супутникового зв'язку, зокрема, завдяки розгортанню архітектур низької навколоземної орбіти (LEO) такими компаніями-піонерами, як Starlink від SpaceX, OneWeb та Kuiper від Amazon. Ці сузір'я використовують щільні, великомасштабні мережі малих супутників, що працюють на LEO, що забезпечує низькозатримку та високу ємність широкосмугового зв'язку, адаптованих до глобального покриття, включаючи віддалені та недостатньо обслуговувані регіони. Архітектурний підхід цих мега-сузір'їв робить акцент на швидкій передачі сигналу, масштабованому розгортанні та динамічному управлінні ресурсами, часто використовуючи передові методи формування променя та міжсупутникові зв'язки для координації супутникових операцій та оптимізації покриття. Паралельно, розвиток високопродуктивних супутників (HTS) та дуже високопродуктивних супутників (VHTS) має ще більш розширені можливості супутників, використовуючи кілька точкових променів, повторне використання частоти та складні методи модуляції для значного збільшення швидкості передачі даних та спектральної ефективності. Ці супутники в основному використовуються для підтримки широкосмугового Інтернету, корпоративного підключення та послуг магістральних мереж, особливо в районах, де відсутня наземна інфраструктура. Більше того, перехід до неземних мереж (NTN) у контексті систем 5G та майбутніх 6G знаменує собою ключову технологічну еволюцію, спрямовану на безперешкодну інтеграцію супутникових мереж у наземні стільникові екосистеми. NTN використовують супутникові платформи для розширення покриття 5G до віддалених місць, сприяння масовому машинному зв'язку та забезпечення стійкого зв'язку під час стихійних лих або у складних умовах. Ця конвергенція супутникових технологій із наземними мережами підкреслює майбутнє, де супутникові системи є невід'ємною частиною глобальних високошвидкісних комунікаційних інфраструктур з низькою затримкою, підтримуючи постійно зростаючі потреби цифрового суспільства.

2.2. Технічні параметри супутникових каналів і методи забезпечення якості обслуговування

Супутниковий зв'язок став невід'ємним компонентом сучасної телекомунікаційної інфраструктури, підтримуючи широкий спектр застосувань, від мовлення до доступу до Інтернету у віддалених регіонах. Ефективність та результативність супутникових каналів значною мірою залежать від їхніх власних технічних параметрів та методів, що використовуються для забезпечення якості обслуговування (QoS). Розуміння фундаментальних параметрів, що визначають супутникові канали, природи затримки сигналу та стратегій, що використовуються для підвищення надійності та стабільності, має вирішальне значення для проектування надійних систем супутникового зв'язку. У розділі досліджуються ці основні аспекти, надаючи всебічний огляд технічних параметрів супутникових каналів та методів підтримки високої якості обслуговування.

Основні параметри супутникового каналу слугують основою для його експлуатаційних характеристик та пропускної здатності. Одним з основних параметрів є пропускна здатність каналу, яка визначає обсяг даних, що може передаватись за одиницю часу. Ширша пропускна здатність дозволяє забезпечити вищу швидкість передачі даних, що є важливим для застосувань, що потребують інтенсивного використання пропускної здатності, таких як потокове відео високої чіткості або передача великих обсягів даних. Не менш важливим є ефективна ізотропна випромінювана потужність (EIRP), яка вимірює потужність, що випромінюється передавачем супутника, безпосередньо впливаючи на силу сигналу, що приймається на землі. Вища EIRP покращує покриття та якість зв'язку, особливо в районах зі складними умовами поширення. З іншого боку, чутливість приймача визначає мінімальний рівень сигналу, необхідний для точного декодування даних приймачем, відіграючи вирішальну роль у підтримці надійного зв'язку на великих відстанях. Співвідношення несучої до шуму (C/N) та співвідношення щільності несучої до шуму (C/N0) є життєво важливими

показниками якості сигналу; вони порівнюють бажаний сигнал з фоновим шумом і використовуються для оцінки запасів продуктивності з'єднання (табл. 2.2) [12].

Таблиця 2.2.

Основні технічні параметри супутникових каналів та їх вплив на QoS

Параметр	Характеристика	Значення для QoS
C/N та C/N0 (співвідношення сигнал/шум)	Відображає якість прийому сигналу та рівень завад	Визначає BER, стабільність каналу та можливість використання високих модуляцій
BER (Bit Error Rate)	Кількість помилкових бітів при передачі	Критичний для відеозв'язку, IoT, передачі керуючих сигналів
Орбітальна затримка (GEO/MEO/LEO)	LEO: <50 мс, GEO: ≈250 мс	Визначає придатність для URLLC, VoIP, відеоконференцій
Частотний діапазон (L/S/Ku/Ka)	Ka – висока ємність; L/S – стійкі до погодних умов	Впливає на пропускну здатність та надійність
Атмосферні втрати (дощ, волога)	Особливо критичні у Ka-діапазоні	Погіршують QoS, потребують ACM або FEC
ACM (Adaptive Coding and Modulation)	Динамічна зміна модуляції/кодування	Дозволяє утримувати QoS при погіршенні каналу
FEC (Forward Error Correction)	Корекція помилок у каналі	Знижує BER, підвищує надійність зв'язку

Наприклад, високе співвідношення C/N гарантує, що сигнал може бути правильно демодульований, зменшуючи помилки та підвищуючи загальну надійність з'єднання. Разом ці параметри визначають пропускну здатність, покриття та надійність супутникових каналів, що робить їх оптимізацію важливою для ефективних систем супутникового зв'язку.

Затримка, яку часто сприймають як латентність, суттєво впливає на продуктивність супутникових каналів і змінюється залежно від орбіти супутника та бортової обробки. Орбітальна затримка в першу чергу визначається положенням супутника відносно Землі. Супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті

(GEO), розташовані приблизно на 35 786 км над екватором, створюють затримку близько 250 мілісекунд через довгий шлях поширення, що може впливати на програми реального часу, такі як голосові дзвінки та відеоконференції. Супутники на середній навколоземній орбіті (MEO), розташовані на менших висотах (~10 000-20 000 км), пропонують зменшені затримки, що робить їх придатними для навігаційних систем та деяких широкосмугових послуг, тоді як системи на низькій навколоземній орбіті (LEO), з висотами близько 500-2000 км, мають найкоротші затримки — часто менше 50 мілісекунд — ідеально підходять для програм, чутливих до затримки. Затримка обробки на борту виникає через час, який витрачається супутниками на обробку сигналів, включаючи завдання комутації, маршрутизації та кодування, що збільшує загальну затримку. Крім того, мінливість затримки, або тремтіння, стосується коливань рівнів затримки, які можуть погіршити якість послуг у реальному часі. Тремтіння може бути спричинене перевантаженням мережі або змінним часом обробки, і його управління має вирішальне значення для підтримки плавних мультимедійних потоків. Такі методи, як буферизація та алгоритми компенсації тремтіння, використовуються для зменшення ефектів тремтіння, забезпечуючи стабільну якість обслуговування.

Надійність та стабільність супутникових каналів зазнають порушень через атмосферні впливи та властивий шум у системах зв'язку. Погодні явища, зокрема ослаблення дощем, становлять значну загрозу для цілісності сигналу, особливо на вищих частотах, таких як Ka-діапазон, де краплі дощу можуть поглинати та розсіювати радіохвилі, спричиняючи згасання сигналу або повну втрату. Тропосферні ефекти, такі як коливання вологості та температури, також впливають на якість сигналу, що вимагає адаптивних стратегій для протидії цим перешкодам. Коефіцієнт помилок у бітах (BER) – це критичний показник, який кількісно визначає кількість отриманих помилкових бітів відносно загальної кількості переданих бітів, слугуючи показником надійності з'єднання. Підтримка низького BER є важливою для забезпечення цілісності даних, особливо в додатках, що потребують високої точності, таких як фінансові транзакції або безпечний зв'язок. Для боротьби з цими проблемами використовуються різні інструменти компенсації.

Методи прямої корекції помилок (FEC) додають надлишкові дані, щоб забезпечити виявлення та виправлення помилок на приймачі, значно зменшуючи BER. Перемежування розподіляє помилки по кількох пакетах даних, що полегшує їх виправлення, тоді як адаптивні схеми модуляції та кодування динамічно регулюють параметри передачі на основі стану каналу в режимі реального часу. Ці методи разом підвищують надійність супутникових ліній зв'язку, забезпечуючи стабільну продуктивність навіть за несприятливих атмосферних умов.

Різні діапазони частот, що використовуються в супутниковому зв'язку, мають різні характеристики, які впливають на якість обслуговування (QoS) та загальну продуктивність системи. Найпоширеніші діапазони частот включають діапазони L, S та C, а також діапазони Ku та Ka, кожен з яких має певні переваги та проблеми. Діапазони L та S, що працюють на відносно нижчих частотах (1-4 ГГц), зазнають мінімального затухання та менш схильні до атмосферних впливів, що робить їх придатними для мобільних та морських застосувань, де надійність є першорядною. Однак їхня обмежена пропускна здатність обмежує пропускну здатність даних. Діапазон C (4-8 ГГц) забезпечує баланс між покриттям та ємністю, зі зменшеним затуханням від дощу порівняно з вищими частотами, але все ще стикається з деякими атмосферними проблемами. На противагу цьому, діапазони Ku (12-18 ГГц) та Ka (26,5-40 ГГц) пропонують значно вищу пропускну здатність, що дозволяє надавати широкосмугові послуги та мовлення високої чіткості. Тим не менш, вони більш вразливі до затухання, спричиненого дощем та атмосферною вологою, особливо в Ka-діапазоні, де затухання від дощу може серйозно погіршити якість сигналу. Для пом'якшення цих наслідків використовуються такі методи, як керування потужністю, адаптивна модуляція та різноманітність сайтів. Методи компенсації згасання від дощу включають використання вищої потужності передачі, адаптивні схеми кодування та розгортання більших або чутливіших антен. Крім того, вибір між вузькосмуговими та широкосмуговими каналами впливає на якість обслуговування (QoS); вузькосмугові канали є більш стійкими до несприятливих умов завдяки нижчій швидкості передачі даних та кращій завадостійкості, тоді як широкосмугові канали забезпечують вищу пропускну

здатність даних, але вимагають більш надійних методів компенсації для підтримки стабільності з'єднання [13].

Методи адаптації супутникових каналів є важливими для підтримки оптимальної продуктивності за різних умов навколишнього середовища та вимог до трафіку. Однією з найефективніших методик є адаптивна модуляція та кодування (ACM), яка динамічно налаштовує схему модуляції та швидкість кодування на основі оцінки якості каналу в режимі реального часу. Коли умови сигналу відмінні, використовуються схеми модуляції вищого порядку для максимізації швидкості передачі даних; навпаки, за несприятливих умов система перемикається на більш надійні схеми нижчого порядку для забезпечення цілісності даних. Ця адаптивність підвищує загальну ефективність та надійність супутникових каналів. Інший метод включає динамічне розподілення смуг частот, де доступні смуги частот розподіляються між користувачами або службами у відповідь на поточні вимоги мережі, оптимізуючи використання спектру та зменшуючи перевантаження. Перемикання променя або просторового рознесення є ще однією важливою стратегією адаптації, яка включає перемикання між кількома променями або антенними живильниками для протидії локалізованому погіршенню сигналу або перешкодам. Цей метод просторового рознесення покращує покриття та зменшує ймовірність переривання обслуговування, особливо в регіонах, де спостерігаються суворі атмосферні умови або перешкоди. У сукупності ці методи адаптації дозволяють супутниковим системам гнучко реагувати на зміну умов, тим самим забезпечуючи стабільну якість обслуговування та максимізуючи використання ресурсів.

Забезпечення високої якості обслуговування (QoS) у супутникових системах також вимагає складних стратегій управління трафіком та визначення пріоритетів, адаптованих до різноманітних вимог до обслуговування. Класифікація трафіку включає категоризацію пакетів даних на основі їхнього типу, чутливості та необхідної затримки, таких як VoIP, потокове відео або передача критичних даних. Пріоритизація пакетів потім призначає різні рівні пріоритету цим категоріям, гарантуючи, що чутливі до затримки послуги, такі як голосові дзвінки та відео в

реальному часі, передаються з мінімальною затримкою та коливанням. Механізми управління чергами є ключовими у впровадженні QoS; зважена справедлива черга (WFQ) справедливо розподіляє пропускну здатність між кількома класами трафіку, запобігаючи монополізуванню з'єднання будь-якою окремою службою. Пріоритетна черга (PQ) надає пріоритет важливому трафіку над менш критичними даними, гарантуючи, що термінові пакети обробляються в першу чергу. Зважена справедлива черга на основі класів (CBWFQ) поєднує переваги WFQ та PQ, призначаючи класи з певними гарантіями пропускної здатності та рівнями пріоритету, тим самим підтримуючи різноманітний набір послуг одночасно. У супутникових каналах, де пропускна здатність є цінним ресурсом, такі механізми є життєво важливими для забезпечення якості обслуговування (QoE), особливо для програм реального часу, таких як VoIP та відеоконференції. Ці послуги вимагають не лише низької затримки та джиттера, але й стабільної пропускної здатності, чого можна досягти завдяки ретельному управлінню трафіком та плануванню пакетів, що гарантує користувачам безперебійний високоякісний зв'язок незалежно від умов навколишнього середовища чи мережі [14].

Інтеграція супутникової системи якості обслуговування (QoS) у нові архітектури 5G та IMS (IP Multimedia Subsystem) є критично важливим кроком до забезпечення безперебійного підключення та надійності обслуговування в гетерогенних мережах (рис. 2.2). У мережах 5G функція контролю політик (PCF) в ядрі 5G (5GC) відіграє ключову роль в управлінні QoS для супутникових каналів. PCF динамічно застосовує політики, пов'язані з розподілом пропускної здатності, пріоритетом та обробкою трафіку, забезпечуючи відповідність супутникових каналів загальним цілям QoS мережі. Ця інтеграція включає складні механізми сигналізації, зокрема протокол ініціювання сеансу (SIP) та протокол опису сеансу (SDP), які сприяють узгодженню QoS між вузлами мережі та пристроями кінцевих користувачів.

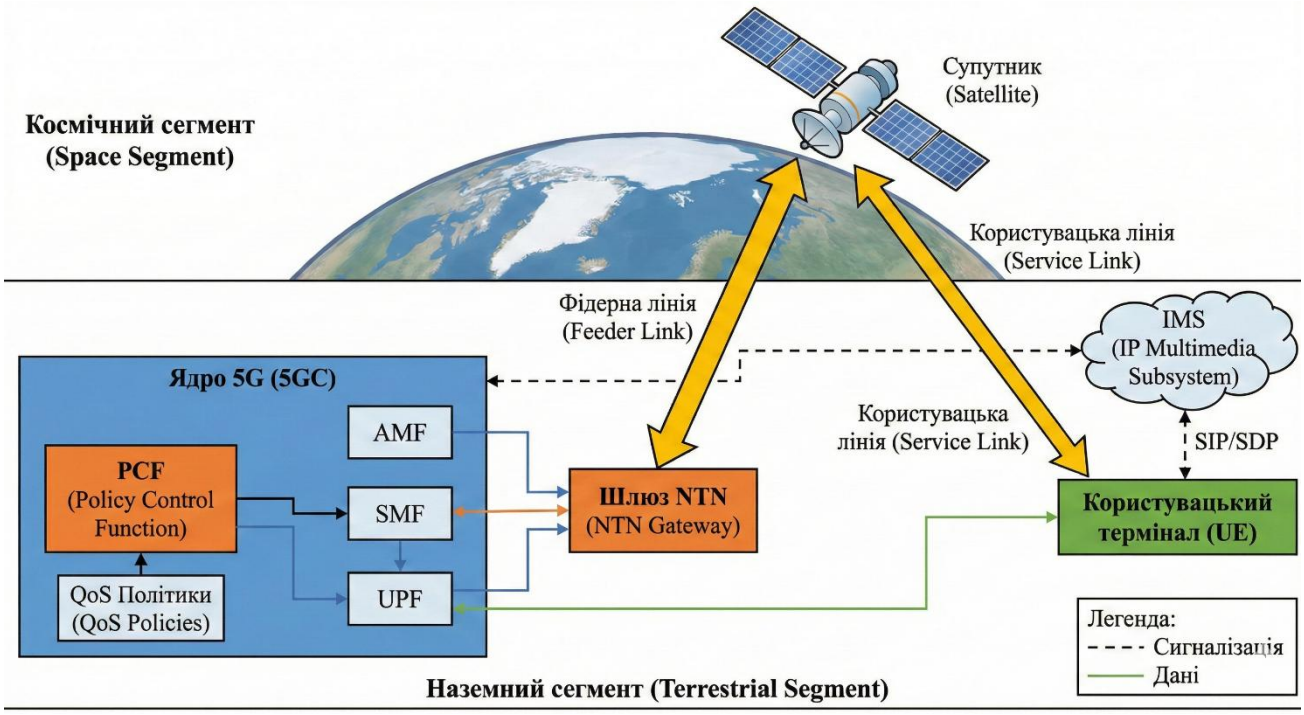


Рис. 2.2. Інтеграція супутникового сегмента в архітектуру 5G (NTN)

Завдяки сигналізації SIP/SDP пристрої та мережеві елементи узгоджують такі параметри, як пропускна здатність вимоги, обмеження затримки та рівні пріоритетів, що дозволяє адаптивне та пріоритетне надання послуг навіть через супутникові канали з суттєво вищими затримками. Крім того, нещодавні розробки в 3GPP Release 17 розширили сферу застосування неземних мереж (NTN), які включають супутникові системи як невід'ємні компоненти архітектур 5G. Цей реліз запроваджує стандартизовані процедури управління якістю обслуговування (QoS) NTN, охоплюючи специфічні для супутників міркування, такі як мінливість каналу, затримки поширення та атмосферні ефекти. Ці стандарти гарантують, що супутникові канали можуть забезпечувати стабільні гарантії QoS, бездоганно інтегруючи їх у гнучку, сервісно-орієнтовану структуру 5G та підтримуючи різноманітні програми, починаючи від Інтернету речей до потокової передачі медіа високої чіткості.

Технічні параметри супутникових каналів, такі як пропускна здатність, EIRP та співвідношення сигнал/шум, формують основу для розуміння їхніх експлуатаційних можливостей та обмежень. Затримки, включаючи орбітальні та бортові затримки обробки, разом із джиттером, суттєво впливають на якість

обслуговування в режимі реального часу, що вимагає вдосконалених стратегій компенсації та пом'якшення наслідків. Надійність та стабільність супутникових ліній зв'язку зазнають труднощів через атмосферні впливи та шум, але використання таких інструментів, як FEC, перемежування та адаптивні схеми, може суттєво підвищити продуктивність за несприятливих умов. Різні діапазони частот пропонують унікальні переваги та проблеми; вищі частоти, такі як Ku та Ka, забезпечують більшу пропускну здатність, але вимагають спеціальних методів компенсації ослаблення. Методи адаптації, такі як ACM, динамічний розподіл смуг та комутація променя, дозволяють системам динамічно реагувати на зміну умов, підтримуючи оптимальний рівень обслуговування. Ефективне управління QoS за допомогою класифікації трафіку, механізмів черг та пріоритезації гарантує, що різноманітні програми, особливо ті, що чутливі до затримки та джиттера, отримуватимуть належну якість обслуговування. Зрештою, інтеграція супутникового QoS в рамках 5G та IMS за допомогою таких механізмів, як PCF та стандартизовані протоколи сигналізації, є прикладом постійної еволюції до більш надійних, гнучких та повсюдних мереж зв'язку. Ці досягнення обіцяють подолати розрив між наземними та супутниковими системами, забезпечуючи надійне, високоякісне з'єднання по всьому світу та підтримуючи майбутнє глобальних телекомунікацій.

2.3. Перспективи розвитку низькоорбітальних супутникових систем зв’язку (LEO)

Швидкий розвиток технологій супутникового зв'язку позиціонував супутникові системи на низькій навколоземній орбіті (LEO) як трансформаційну силу в глобальному зв'язку. Завдяки своїй близькості до Землі, супутники LEO обіцяють значно зменшену затримку та розширені можливості пропускної здатності, що робить їх ідеальними для різноманітних застосувань, починаючи від широкосмугового Інтернету до розгортання Інтернету речей (IoT). Оскільки попит на повсюдний високошвидкісний зв'язок продовжує зростати, розробка надійних та

масштабованих сузір'їв супутників LEO стає все більш важливою. У розділі досліджуються перспективи розвитку супутникових комунікаційних систем LEO, розглядаючи сучасні технологічні тенденції, стратегії збільшення пропускної здатності та спектральної ефективності, а також ініціативи, спрямовані на зменшення затримки та одночасно покращення загальної якості обслуговування (QoS).

Однією з найвизначніших технологічних тенденцій у розвитку супутникових систем на низькій навколоземній орбіті (LEO) є постійне збільшення кількості супутників та щільності сузір'їв. Такі компанії, як Starlink від SpaceX, OneWeb та Kuiper від Amazon, розгортають тисячі невеликих, відносно недорогих супутників для формування щільних мереж, які можуть забезпечити широке покриття та резервування. Обґрунтуванням цього підходу є пом'якшення обмежень зон покриття окремих супутників та забезпечення безперебійної передачі зв'язку, тим самим підвищуючи надійність. Крім того, еволюція до багатоорбітальних архітектур – інтеграція супутників на низькій навколоземній орбіті (LEO), середній навколоземній орбіті (MEO) та геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO) – дозволяє системам використовувати переваги кожної орбіти. Наприклад, супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO) забезпечують стабільне покриття для фіксованих регіонів, тоді як супутники на LEO та MEO забезпечують низьку затримку та вищу пропускну здатність (рис. 2.3) [15]. Цей гібридний підхід забезпечує більш гнучкі, стійкі та ефективні глобальні мережі. Крім того, вирішальну роль відіграють досягнення в галузі міжсупутникових лазерних зв'язків або оптичних міжсупутникових зв'язків (ISL).

Ці лазерні канали сприяють високошвидкісному зв'язку з низькою затримкою безпосередньо між супутниками, зменшуючи залежність від наземних станцій та забезпечуючи більш динамічну маршрутизацію. Такі компанії, як Mynaric та Inmarsat, є піонерами в цих технологіях оптичного зв'язку, які обіцяють значно покращити масштабованість мережі та скоротити час передачі даних по сузір'ю, зрештою покращуючи якість обслуговування.

Таблиця 2.3.

Порівняння сучасних та перспективних LEO-систем зв’язку

Параметр	Стан сучасних LEO-систем	Перспективи розвитку (5 років)
Орбітальна конфігурація	500–1600 км, десятки–сотні супутників	Десятки тисяч супутників, кластеризація орбіт
Міжсупутникові лінки	Переважно RF-канали	Масове впровадження оптичних ISL (лазерних лінків)
Затримка каналу	20–40 мс	< 15 мс завдяки оптичним ISL та оптимізованій маршрутизації
Пропускна здатність	До 20–40 Гбіт/с на супутник	100+ Гбіт/с (VHTS)
Антенні системи	Аналоговий BF, прості решітки	Повністю цифровий beamforming, багатопроменеві структури
Наземний сегмент	Централізовані шлюзи	Розподілені edge-шлюзи з UPF-SAT для 5G
Підтримка 5G	Часткова (IP-транспорт)	Повноцінний NTN NR згідно 3GPP R17–R19

Щоб задовольнити зростаючий попит на вищі швидкості передачі даних, супутники на низькій орбіті (LEO) впроваджують інноваційні методи для підвищення пропускної здатності та спектральної ефективності. Модернізація антенних систем є на передньому краї цих зусиль, а такі технології, як формування променя, зокрема цифрове формування променя, дозволяють супутникам динамічно спрямовувати та формувати свої сигнали на конкретних наземних користувачів. Цей цілеспрямований підхід збільшує силу сигналу та мінімізує перешкоди, що призводить до кращого використання спектру. Супутники з дуже високою пропускною здатністю (VHTS), які традиційно асоціюються з геосистемами, зараз адаптуються для платформ LEO, використовуючи розширене управління пропускною здатністю та транспондери високої ємності для значного підвищення швидкості передачі даних. Наприклад, розгортання VHTS на LEO може підтримувати програми з інтенсивним використанням даних, такі як потокове відео

8K та хмарні ігри, з мінімальною затримкою. Доповнюючи ці досягнення, методи адаптивної модуляції та кодування (ACM) динамічно регулюють параметри передачі на основі якості з'єднання в режимі реального часу, максимізуючи ефективність навіть у складних умовах. Цей адаптивний підхід підвищує спектральну ефективність та забезпечує більш стабільне, високоякісне з'єднання в різноманітних середовищах. Ці комбіновані технологічні інновації мають вирішальне значення для того, щоб системи LEO могли реалізувати обіцянку високопродуктивного, надійного з'єднання для зростаючого кола глобальних користувачів та послуг.

Зменшення затримки та забезпечення високої якості обслуговування (QoS) є життєво важливими цілями для майбутнього супутникових комунікаційних систем LEO. Одна з ефективних стратегій включає оптимізацію алгоритмів маршрутизації за допомогою міжсупутникових лазерних каналів, які забезпечують пряму, високошвидкісну передачу даних між супутниками. Це зменшує потребу в передачі даних назад до наземних станцій, тим самим мінімізуючи затримки транзиту — важлива функція для чутливих до затримки застосувань, таких як віртуальна реальність, автономні транспортні засоби та телемедицина. Крім того, інтеграція сузір'їв LEO з можливостями багатоканальних периферійних обчислень (MEC) та периферійної обробки дозволяє обробляти локальний трафік, що ще більше зменшує затримку шляхом обробки даних ближче до користувача. Наприклад, розгортання периферійних серверів на наземних станціях супутникового зв'язку або навіть на борту супутників може сприяти аналітиці та прийняттю рішень у режимі реального часу, що є критично важливим для програм, що потребують наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC). Розгортання функцій URLLC у мережах LEO гарантує, що критично важливі послуги, такі як дистанційна хірургія або промислова автоматизація, підтримуються з гарантованими порогами затримки та високою надійністю. У міру розвитку цих технологічних стратегій вони підвищать продуктивність супутникових систем LEO, позиціонуючи їх як важливу інфраструктуру для наступного покоління цифрових послуг, які вимагають як швидкості, так і надійності [16].

Важливим аспектом розвитку супутникових комунікаційних систем LEO є розробка складної наземної інфраструктури та супутникових шлюзів. Традиційні наземні станції все частіше доповнюються або замінюються розподіленими наземними сегментами, які служать для децентралізації мережевого навантаження, підвищення резервування та підвищення стійкості покриття. Розподіливши наземні станції по кількох географічних місцях, оператори можуть зменшити ризик перебоїв у наданні послуг, спричинених локальними проблемами, такими як погодні явища або технічні збої. Крім того, інтеграція інтелектуальних шлюзів, оснащених функцією User Plane Function-Satellite (UPF-SAT) Можливості, особливо в рамках мереж 5G, знаменують собою значний технологічний стрибок. Ці шлюзи забезпечують безперебійну обробку даних користувачів та функцій площини керування, сприяючи ефективній маршрутизації, управлінню трафіком та забезпеченню якості безпосередньо на рівні супутника. Крім того, впровадження програмно-визначених мереж (SDN) та віртуалізації мережевих функцій (NFV) дозволяє автоматизувати управління ресурсами та динамічну конфігурацію мережі. Такі технології підтримують оптимізацію розподілу пропускної здатності в режимі реального часу, визначення пріоритетів критично важливих послуг та швидку адаптацію до змінних потреб користувачів. Ця парадигма інтелектуальної інфраструктури не тільки підвищує масштабованість та гнучкість мережі, але й гарантує, що системи LEO можуть ефективно підтримувати зростаючий спектр програм та послуг, від широкосмугового доступу до критично важливих комунікацій [17].

Конвергенція супутникових систем LEO з новими стандартами мобільних мереж, зокрема 5G та майбутнім 6G, готова до революції у глобальному зв'язку. Проект партнерства третього покоління (3GPP) включив неземні мережі (NTN) у випуск 17 та наступні версії, формалізувавши підтримку інтеграції супутників у наземні мобільні архітектури. Ця структура дозволяє сузір'ям LEO служити додатковими мережевими вузлами, забезпечуючи повсюдне покриття, особливо у

віддалених або недостатньо обслуговуваних регіонах. Стандарт 5G New Radio (NR) тепер включає підтримку NTN, що дозволяє супутникам функціонувати як невід'ємні компоненти мереж 5G, забезпечуючи низьку затримку, високу пропускну здатність та надійне з'єднання у великих масштабах (рис. 2.4) [18].

Таблиця 2.4.

Ключові технології, що визначають майбутнє LEO-систем у контексті 5G

Технологія	Технічна характеристика	Очікуваний вплив на інтеграцію з 5G
Оптичні міжсупутникові лінки (Optical ISL)	Лазерні канали, швидкість >100 Гбіт/с	Зменшення затримок, побудова глобальної супутникової “мережі в мережі”
Digital Beamforming	Цифрове формування променя, динамічні множинні промені	Підвищення QoS, адаптація під щільність UE, підтримка 5G URLLC
VHTS (Very High Throughput Satellites)	Супутники із надвеликою пропускною здатністю	Масштабний broadband, підтримка eMBB у віддалених регіонах
UPF-SAT у наземному сегменті	Локальна обробка трафіку 5G	Зменшення затримки, ефективний роумінг між наземними й LEO-мережами
SDN/NFV у супутникових мережах	Віртуалізація супутникових функцій	Динамічна оркестрація ресурсів, інтеграція з 5G Core
MEC/Edge у супутникових шлюзах	Розміщення сервісів поряд з користувачем	Підтримка IoT, автономних систем, URLLC у LEO
NTN NR (Non-Terrestrial Networks New Radio)	Розширення специфікацій 5G NR для супутників	Єдиний стандарт 5G для наземних і орбітальних мереж

Ця інтеграція додатково полегшується уніфікованими системами управління абонентами, такими як User Data Management (UDM) та User Data Repository (UDR), які забезпечують безперебійну автентифікацію користувачів, управління сеансами та персоналізацію послуг у наземних та супутникових доменах. Таке уніфіковане управління гарантує, що абоненти отримують стабільні послуги

незалежно від їхнього фізичного місцезнаходження чи базової мережевої інфраструктури.

З розвитком 6G очікується, що роль супутників LEO ще більше розшириться, підтримуючи більш просунуті функції, такі як інтегроване зондування, оптимізація мережі на основі штучного інтелекту та імерсивні комунікаційні послуги, що зрештою створить комплексну, багаторівневу та стійку глобальну структуру зв'язку.

Заглядаючи в майбутнє, супутникові системи LEO все частіше розглядаються як життєво важливі засоби для поширення масового розгортання Інтернету речей (IoT) та автономних систем по всьому світу. Унікальні можливості сузір'їв LEO, такі як низька затримка, висока пропускна здатність та широке покриття, роблять їх ідеальними транспортними платформами для глобальних мереж Інтернету речей, особливо у віддалених, морських або інших важкодоступних середовищах. Вони можуть сприяти створенню великомасштабних сенсорних мереж для моніторингу навколишнього середовища, точного землеробства та управління інфраструктурою, забезпечуючи потоки даних у режимі реального часу, критично важливі для прийняття рішень та автоматизації. Крім того, системи LEO мають вирішальне значення для підтримки автономних морських, повітряних та безпілотних наземних транспортних засобів, які потребують надійних каналів зв'язку з низькою затримкою для навігації, управління та безпеки. Наприклад, автономні кораблі та дрони, що працюють в ізольованих регіонах, залежать від підключення LEO для обміну командами та даними в режимі реального часу. Крім того, супутники LEO відіграють важливу роль у наданні критично важливих послуг моніторингу, таких як виявлення стихійних лих, відстеження клімату та спостереження за безпекою, де швидка передача даних та широке покриття є важливими. Оскільки ці застосування продовжують розширюватися, очікується, що супутникові системи LEO розвиватимуться як фундаментальна інфраструктура для високо взаємопов'язаної та автономної глобальної екосистеми, що лежить в основі як повсякденних послуг, так і критично важливих операцій у різних секторах.

Незважаючи на багатообіцяючі перспективи систем супутникового зв'язку LEO, для забезпечення сталого та ефективного майбутнього розвитку необхідно

вирішити кілька суттєвих проблем. Основною проблемою є управління орбітальним рухом та запобігання зіткненням, враховуючи зростання щільності супутників на низькій навколоземній орбіті. Оскільки все більше організацій розгортають великі сузір'я, ризик космічного сміття та зіткнень супутників зростає, загрожуючи як безпеці експлуатації, так і довгостроковій стійкості космічної діяльності. Розробка складних систем відстеження, алгоритмів запобігання зіткненням у режимі реального часу та міжнародних нормативно-правових баз є важливими кроками для зменшення цих ризиків. Ще одним критичним завданням є енергоефективність та час безвідмовної роботи супутників. Супутники на низькій навколоземній орбіті значною мірою залежать від сонячної енергії, і оптимізація споживання енергії є життєво важливою для продовження терміну служби місій та зниження витрат на технічне обслуговування. Інновації в технологіях збору енергії, зберігання та системах управління живленням необхідні для максимізації часу безвідмовної роботи супутників, особливо в суворих космічних умовах. Крім того, зниження витрат на запуск залишається ключовим фактором у масштабуванні розгортання сузір'їв. Досягнення в багаторазових ракетах-носіях та інноваційні методи запуску можуть значно знизити витрати, роблячи великомасштабні сузір'я супутників більш економічно доцільними. Крім того, розробка модульних конструкцій супутників, які сприяють легшій модернізації, ремонту та заміні, може підвищити гнучкість системи та термін служби, зменшуючи потребу в повному капітальному ремонті сузір'їв та мінімізуючи утворення космічного сміття. Вирішення цих проблем за допомогою технологічних інновацій та міжнародної співпраці матиме вирішальне значення для реалізації повного потенціалу систем супутникового зв'язку на низькій навколоземній орбіті (LEO) у найближчі десятиліття.

Розвиток систем супутникового зв'язку на низькій навколоземній орбіті знаходиться на захопливому роздоріжжі, зумовленому швидким технологічним прогресом та зростаючим глобальним попитом на повсюдне підключення. у, який може задовольнити потреби все більш пов'язаного світу.

3. МЕТОДИ ІНТЕГРАЦІЇ МЕРЕЖ 5G ТА СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ

3.1. Архітектурні підходи до побудови інтегрованих 5G-супутникових мереж

Швидкий розвиток технології 5G суттєво трансформував сучасні телекомунікації, забезпечивши покращений мобільний широкосмуговий доступ, масовий машинний зв'язок та наднадійний зв'язок з низькою затримкою. Оскільки попит на повсюдне підключення виходить за межі наземних кордонів, інтеграція супутникових мереж в екосистему 5G стала центральним пунктом досліджень та розробок. Побудова ефективної архітектурної основи для супутникових мереж 5G вимагає повного розуміння взаємодії між наземним та супутниковим сегментами, відповідності галузевим стандартам, таким як 3GPP Release 17 [19], та надійних схем для безперебійного зв'язку між компонентами мережі. Досліджуються архітектурні підходи до побудови інтегрованих супутникових мереж 5G, з акцентом на логічному моделюванні сегментів мережі, обґрунтуванні архітектур неземних мереж (NTN) та механізмах взаємодії між gNodeB та супутниковими каналами для забезпечення надійних гібридних систем зв'язку.

Фундаментальним кроком у проектуванні інтегрованих супутникових мереж 5G є створення чіткої та комплексної архітектурної моделі, яка окреслює взаємодію між наземним та супутниковим сегментами. Ця модель починається з логічного представлення обох компонентів, де наземний сегмент включає мережу радіодоступу (RAN), базову мережу та користувацьке обладнання, тоді як супутниковий сегмент охоплює неземні мережі (NTN), такі як супутники та пов'язані з ними наземні станції. Зв'язок між RAN, NTN та ядром 5G (5GC) має бути чітко визначений для забезпечення ефективного потоку даних та сигналізації керування. Наприклад, RAN підключається як до наземних gNodeB, так і до супутникових gNodeB (або gNodeB NTN), причому останні служать інтерфейсом між наземною мережею та супутниковими каналами. Ключові точки обміну даними

включають інтерфейси між gNodeB та 5GC, зокрема інтерфейс N2, а також інтерфейси, що з'єднують супутниковий сегмент з основними функціями через шлюзи. Визначення цих точок має вирішальне значення для забезпечення сумісності, оскільки вони дозволяють безперешкодно інтегрувати функції сигналізації, передачі даних користувачів та управління мережею між двома сегментами. Більше того, логічна модель повинна враховувати різноманітні сценарії розгортання, включаючи прямий супутниковий доступ для віддалених районів та архітектури на основі ретрансляції для міського середовища, тим самим підтримуючи гнучкість та масштабованість розгортання мережі.

Вибір архітектури NTN, особливо як зазначено у 3GPP Release 17, є ключовим для забезпечення відповідності супутникових мереж специфікаціям 5G та підтримки розширених послуг (рис. 3.1) [20]. Серед доступних варіантів, прозорі та регенеративні моделі корисного навантаження служать різним операційним цілям.

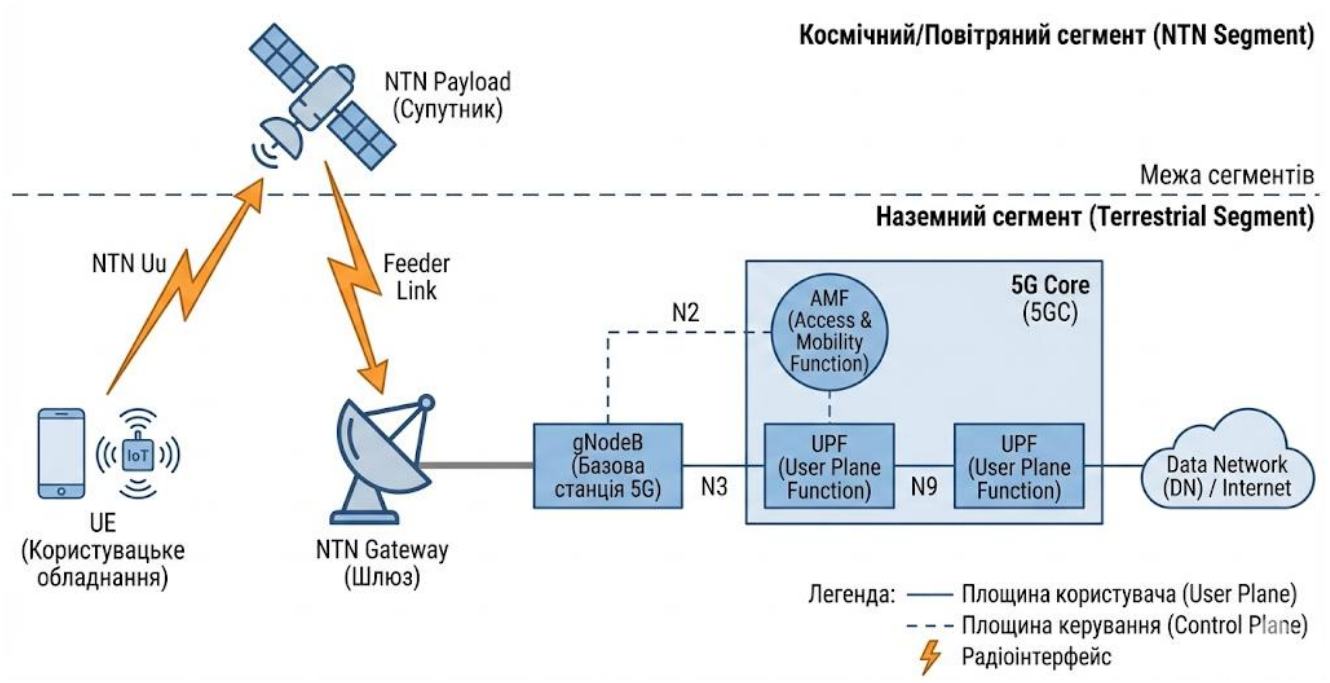


Рис. 3.1. Обрана архітектура інтегрованої мережі 5G-NTN

Модель прозорого корисного навантаження, яка функціонує як чисте ретрансляційне з мінімальною обробкою на борту, пропонує простоту та підходить

для сценаріїв покриття великої зони, де затримка менш критична. І навпаки, модель регенеративного корисного навантаження включає вбудовані можливості обробки, що дозволяє виконувати такі функції, як регенерація сигналу, обробка та навіть певний рівень обробки базової смуги, тим самим зменшуючи затримку та підвищуючи надійність. Аналіз цих моделей показує, що регенеративний підхід більше відповідає вимогам 5G NR NTN, оскільки він може підтримувати такі функції, як формування променя, динамічний розподіл ресурсів та точна синхронізація, необхідні для послуг 5G. Відповідність стандартам Release 17 вимагає, щоб архітектури супутників включали такі функції, як синхронізація, кодування та управління площиною користувача в самому сегменті супутника, що вимагає розширених можливостей обробки на борту. Цей підхід гарантує, що сегмент супутника може підтримувати такі функції 5G NR, як гнучка нумерологія, управління променем та висока пропускна здатність, що сприяє більш інтегрованій та ефективній мережі. Крім того, архітектура повинна підтримувати подвійне з'єднання та безперебійні механізми передачі, що забезпечується регенеративними корисними навантаженнями, які можуть динамічно адаптуватися до вимог мережі та мобільності користувачів.

Вибір архітектури неземних мереж (NTN), особливо в контексті специфікацій 3GPP Release 17, є критичним етапом проектування для забезпечення сумісності супутникового сегмента з вимогами 5G та підтримки розширених послуг. Серед доступних архітектурних варіантів основними є моделі з прозорим (transparent) та регенеративним (regenerative) корисним навантаженням, які служать різним операційним цілям.

Для визначення оптимальної архітектурної основи практичної розробки інтегрованої мережі необхідно провести детальний порівняльний аналіз цих моделей з огляду на вимоги 5G NR. Результати цього аналізу, що базуються на ключових технічних та експлуатаційних критеріях, зведено в табл. 3.1 [21].

Як видно з аналізу в табли. 3.1, модель прозорого корисного навантаження пропонує простоту і підходить для сценаріїв покриття великої зони, де затримка є менш критичною, функціонуючи з мінімальною обробкою на борту.

Таблиця 3.1

Порівняльний аналіз архітектурних моделей корисного навантаження супутників (NTN Payload) в контексті вимог 5G NR

Критерій порівняння	Прозора модель (Transparent Payload)	Регенеративна модель (Regenerative Payload)
Принцип роботи	Функціонує як "чистий ретранслятор" (bent pipe). Сигнал просто підсилюється і передається далі.	Здійснює регенерацію сигналу, демодуляцію/модуляцію та обробку базової смуги частот безпосередньо на борту супутника.
Обробка на борту (On-board Processing)	Мінімальна.	Розширені вбудовані можливості обробки, включаючи функції синхронізації, кодування та управління площиною користувача.
Вплив на затримку	Вища затримка, оскільки сигнал повинен пройти повний шлях до наземного шлюзу для обробки. Підходить для сценаріїв, де затримка менш критична.	Зменшує затримку завдяки локальній обробці даних на борту супутника, що підвищує надійність зв'язку.
Підтримка функцій 5G NR	Обмежена підтримка складних функцій радіодоступу.	Повна підтримка розширених функцій: формування променя (beamforming), динамічний розподіл ресурсів, точна синхронізація та гнучка нумерологія.
Управління мобільністю та ресурсами	Покладається на наземну інфраструктуру для управління.	Здатна динамічно адаптуватися до вимог мережі та мобільності користувачів, підтримуючи подвійне з'єднання та безперебійні механізми передачі обслуговування (handover).
Відповідність вимогам 3GPP Release 17	Базова відповідність для простих сценаріїв покриття.	Висока відповідність. Архітектура спеціально адаптована для задоволення вимог 5G NR NTN, забезпечуючи високу пропускну здатність та ефективність мережі.
Основний сценарій застосування	Забезпечення покриття великих територій з мінімальною складністю системи.	Розгортання інтегрованих мереж 5G, що вимагають високої продуктивності, надійності та підтримки передових сервісів.

Натомість, модель регенеративного корисного навантаження включає вбудовані можливості обробки, що дозволяє виконувати регенерацію сигналу та обробку базової смуги, тим самим зменшуючи затримку та підвищуючи надійність.

Аналіз демонструє, що регенеративний підхід значно більше відповідає вимогам 5G NR NTN, оскільки він здатний підтримувати необхідні для послуг 5G функції, такі як формування променя, динамічний розподіл ресурсів та точна синхронізація[16]. Відповідність стандартам Release 17 вимагає, щоб архітектури супутників включали функції синхронізації, кодування та управління площиною користувача безпосередньо в сегменті супутника, що диктує необхідність використання розширених можливостей обробки на борту. Цей підхід гарантує підтримку таких функцій 5G NR, як гнучка нумерологія та висока пропускна здатність, сприяючи створенню більш інтегрованої та ефективної мережі. Крім того, така архітектура, завдяки регенеративним корисним навантаженням, здатна підтримувати подвійне з'єднання та безперебійні механізми передачі, динамічно адаптуючись до мобільності користувачів.

Виходячи з проведеного аналізу, для подальшої практичної розробки в цій роботі прийнято архітектуру з регенеративним корисним навантаженням як таку, що забезпечує необхідну функціональність для повноцінної інтеграції в екосистему 5G згідно зі стандартами 3GPP Release 17 [22].

Інтеграція gNodeB із супутниковими каналами вимагає ретельно розробленої схеми взаємодії для забезпечення безперебійного наскрізного з'єднання в гібридних мережах (див. рис. 3.1). Один з ефективних підходів включає підключення gNodeB до сегмента супутника через NTN-gNodeB або NTNgNB на основі ретрансляції, який діє як проміжний вузол для управління специфічними для супутника проблемами, такими як затримка, ефекти Доплера та затухання сигналу. Ця інтеграція часто досягається за допомогою наземного шлюзу, який служить мостом між наземною мережевою інфраструктурою та супутниковим каналом, транслюючи протоколи та керуючи потоком даних між різними сегментами. Шлюз обробляє такі функції, як перетворення протоколів, буферизація даних та синхронізація сигналів, сприяючи зв'язку між gNodeB та супутниковим каналом.

Модель з'єднання значною мірою залежить від інтерфейсів, таких як N2, N3 та N9, які є критично важливими в гібридних схемах. Інтерфейс N2 керує сигналізацією керування між gNodeB та 5GC, тоді як інтерфейс N3 контролює передачу даних на площині користувача. Інтерфейс N9, який використовується між різними gNodeB, стає важливим у багатовузлових супутникових архітектурах для координації передачі передач та управління ресурсами. Для гібридних мереж ці інтерфейси повинні бути оптимізовані для обробки унікальних характеристик супутникових каналів, таких як висока затримка та змінна якість сигналу, зберігаючи при цьому надійність та низьку затримку, необхідні для послуг 5G. Ця схема взаємодії гарантує, що користувачі матимуть стабільне підключення незалежно від їхнього місцезнаходження чи базового сегмента мережі, що зрештою дозволяє створити стійку та масштабовану інтегровану екосистему супутникової мережі 5G. Критичним компонентом інтегрованої супутникової мережі 5G є створення ефективної архітектури маршрутизації трафіку, яка безперешкодно спрямовує дані між наземними та супутниковими зв'язками. інфраструктури. Центральним елементом цієї архітектури є функція користувацького плану для супутника (UPF-SAT), яка діє як стратегічний вузол, відповідальний за управління потоком даних між сегментами (рис. 3.2).

Логіка маршрутизації повинна інтелектуально визначати шляхи на основі мережевих умов, місцезнаходження користувача та вимог до послуг, надаючи пріоритет низькій або високій пропускній здатності за необхідності. Впровадження схеми вибору маршруту з урахуванням затримки є важливим, завдяки чому мережа оцінює параметри в режимі реального часу, такі як затримка супутникового зв'язку, рівні перевантаження та якість сигналу, щоб вибрати оптимальні шляхи. Ця динамічна маршрутизація забезпечує мінімальну затримку для чутливих до затримки програм, таких як URLLC, одночасно максимізуючи використання ресурсів для менш критичних до часу даних. Доповнюючи це, встановлюється політика переадресації для ефективного спрямування трафіку між наземним та супутниковим сегментами, яка визначає, як пакети пересилаються через шлюзи, супутникові ретрансляції або безпосередньо через супутникові канали.

Ці політики враховують такі фактори, як стабільність з'єднання, пропускна здатність та тип послуги, що дозволяє мережі адаптуватися до коливань умов та підтримувати безперервність обслуговування.

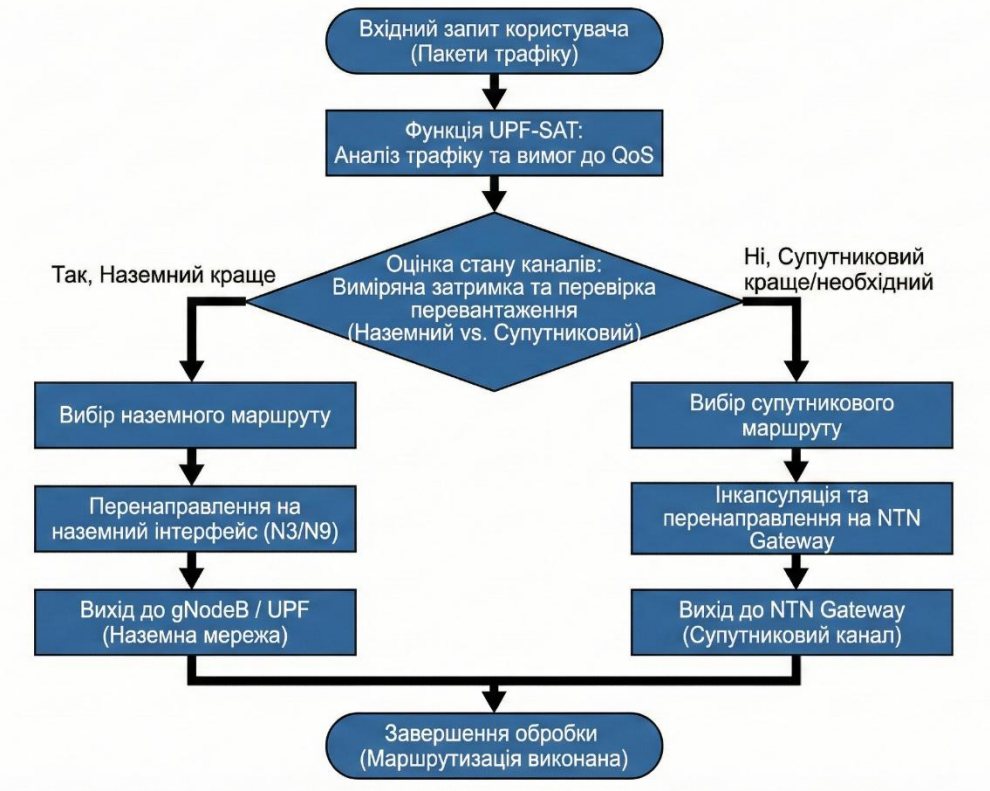


Рис. 3.2. Запропонований алгоритм маршрутизації трафіку через функцію UPF-SAT

Інтегруючи інтелектуальну логіку маршрутизації з переадресацією на основі політик, мережа може оптимізувати продуктивність, зменшити втрату пакетів та покращити взаємодію з користувачами в різних сценаріях розгортання. Забезпечення якості обслуговування (QoS) в інтегрованій мережі 5G–супутник вимагає комплексної моделі, яка пріоритезує трафік та керує ресурсами для задоволення різноманітних потреб у послугах. Фундаментальним елементом є реалізація механізму пріоритезації для супутникових каналів, який враховує критичність різних потоків даних. Наприклад, трафік URLLC, що вимагає наднизької затримки та високої надійності, має найвищий пріоритет, тоді як сервісам eMBB та mMTC відповідно розподіляються ресурси пропускної здатності та затримки. Функція контролю політик (PCF) відіграє життєво важливу роль у

визначенні конкретних політик, адаптованих до кожного типу послуг. Ці політики визначають такі параметри, як максимальна затримка, тремтіння, коефіцієнти втрати пакетів та рівні резервування ресурсів, гарантуючи, що кожна категорія послуг отримує відповідну обробку QoS. Крім того, модель повинна враховувати параметри QoS під час міжорбітальних переходів, коли дані переміщуються по різних супутникових орбітах або від супутника до наземних мереж. У цих сценаріях такі параметри, як час передачі обслуговування, стратегії буферизації та механізми синхронізації, визначаються для запобігання погіршенню якості обслуговування. Встановлення чітких політик та параметрів QoS гарантує, що всі послуги, незалежно від того, чи є вони чутливими до часу, чи такими, що вимагають багато пропускної здатності, збережуть свої гарантії продуктивності, тим самим підтримуючи різноманітні програми, передбачені в середовищі 5G [23].

Забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS) в інтегрованій мережі "5G–супутник" є критичним архітектурним завданням, яке вимагає комплексної моделі пріоритизації трафіку та управління ресурсами для задоволення різноманітних потреб у послугах[1]. Оскільки супутникові канали мають унікальні характеристики, такі як вища затримка та змінна якість сигналу, інтерфейси та механізми обробки трафіку повинні бути оптимізовані для збереження надійності, необхідної для послуг 5G.

Фундаментальним елементом архітектури QoS є реалізація механізму пріоритезації, який враховує критичність різних потоків даних. Центральну роль у визначенні конкретних політик, адаптованих до кожного типу послуг, відіграє функція контролю політик (PCF) ядра 5G. PCF налаштовується для забезпечення диференційованих політик пріоритезації трафіку на основі стандартних класів послуг 5G: наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC), покращеного мобільного широкосмугового доступу (eMBB) та масового машинного зв'язку (mMTC).

У табл. 3.2 наведено зведені політики забезпечення QoS та параметри пріоритизації для основних класів сервісів в інтегрованій мережі, розроблені на основі аналізу вимог до цих сервісів та особливостей супутникового каналу [24].

Таблиця 3.2.

Політики забезпечення QoS та пріоритизація трафіку для різних класів сервісів в інтегрованій мережі 5G-NTN

Клас сервісу 5G	Приклади застосування	Рівень пріоритету	Ключові вимоги до QoS	Політика при деградації супутникового каналу або хендовері
URLLC (Наднадійний зв'язок з низькою затримкою)	Автономне керування транспортом, телемедицина, критично важливі додатки.	Найвищий.	Наднизька затримка, мінімальний джиттер, висока надійність.	Має абсолютний пріоритет у чергах для мінімізації затримки. Вимагає превентивної передачі контексту та резервування ресурсів під час хендовера.
eMBB (Покращений мобільний широкосмуговий доступ)	Потокове відео високої чіткості, мобільний інтернет-доступ.	Середній/Високий (Пріоритет у розподілі смуги пропускання).	Висока пропускна здатність, помірна толерантність до затримок.	Може бути тимчасово обмежений (throttled) або перенаправлений для підтримки продуктивності URLLC під час нестабільності супутника.
mMTC (Масовий машинний зв'язок)	Пристрої Інтернету речей (IoT), мережі датчиків.	Низький (Толерантний до затримок)	Висока щільність підключень, енергоефективність, толерантність до затримок, невелика смуга пропускання на пристрій.	Ресурси виділяються після задоволення потреб URLLC та eMBB. Дані можуть буферизуватися під час перевантажень.

Як показано в табл. 3.2, розроблена модель QoS надає найвищий пріоритет трафіку URLLC, який є критично важливим і вимагає наднизької затримки та високої надійності, особливо над супутниковими каналами, що можуть вносити додаткові затримки. Для забезпечення цих пріоритетів на практиці, архітектура повинна включати алгоритми управління чергами на супутниковому інтерфейсі, такі як зважена справедлива черга на основі класів (CBWFQ), які дозволяють мережі динамічно розподіляти пропускну здатність і гарантувати, що трафік з високим пріоритетом отримує необхідні ресурси.

Крім того, модель враховує необхідність динамічної адаптації параметрів QoS під час міжорбітальних переходів або перемикання променів, що є характерним для супутникових систем LEO. У цих сценаріях критично важливою є швидка переналаштування профілів QoS та застосування стратегій буферизації і механізмів синхронізації для запобігання погіршенню якості обслуговування та пікам затримки. Встановлення цих чітких політик гарантує, що всі категорії послуг, від чутливих до часу до тих, що вимагають широкої смуги пропускання, збережуть свої гарантії продуктивності в гібридному середовищі.

Підтримка безперебійної мобільності та передачі обслуговування між наземним та супутниковим сегментами є основоположною для забезпечення безперебійного з'єднання 5G (рис. 3.3.) [25]. Для ефективного управління переходами між середовищами RAN та NTN необхідно розробити механізм передачі обслуговування між сегментами (міжсегментового хендовера). Це включає виявлення, коли користувацьке обладнання (UE) переміщується з наземного покриття в супутникове покриття або навпаки, та організацію процесу передачі обслуговування для мінімізації переривання обслуговування. Процедура включає превентивну передачу контексту, резервування ресурсів та синхронізацію параметрів сеансу, особливо для послуг реального часу, таких як голосові або відеодзвінки. Щоб зберегти поточні сеанси IMS під час переходу, мережа використовує методи продовження сеансу, такі як передача або дублювання сеансу, гарантуючи, що поточний зв'язок не буде втрачено або перервано. Крім того, необхідна логічна структура для повторного вибору супутника або променя, щоб

адаптуватися до змінних умов мережі, мобільності користувачів або доступності супутників. Це включає вимірювання якості сигналу променя, відстеження руху супутника та динамічний вибір найбільш підходящого променя або супутника для постійного обслуговування. Процес повторного вибору має бути тісно інтегрований з процедурою передачі обслуговування для підтримки якості обслуговування (QoS) та цілісності сеансу, забезпечуючи користувачам безперебійне та надійне з'єднання незалежно від їхнього переміщення в інтегрованому мережевому середовищі.

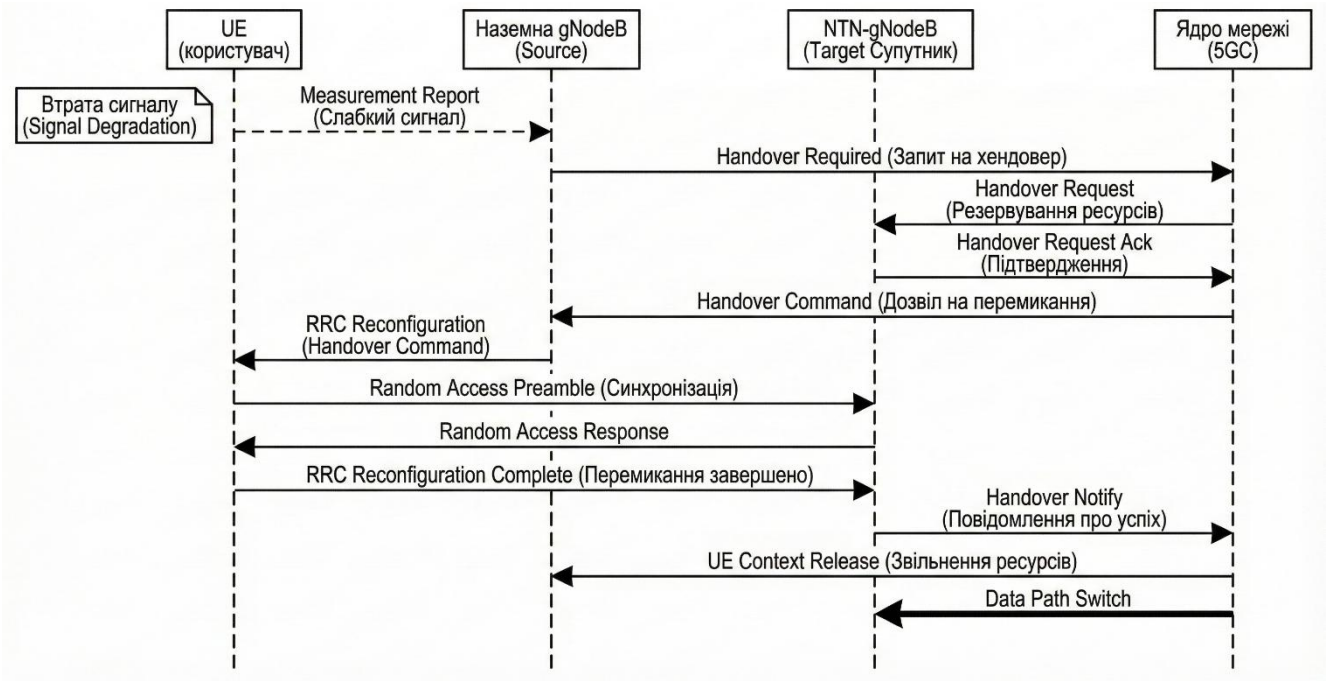


Рис. 3.3. Діаграма послідовності (Sequence Diagram) міжсегментного хендовера

Життєво важливим аспектом інтеграції супутникових систем в екосистему 5G є створення надійної архітектури синхронізації та синхронізації, яка забезпечує узгоджену роботу між наземними та неземними компонентами. Ефективна синхронізація є фундаментальною для підтримки цілісності сигналу, підтримки точного формування променя та забезпечення безперебійної передачі обслуговування. Для досягнення цієї мети можна використовувати такі механізми, як посилання на синхронізацію на основі Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), протокол точного часу (PTP) або синхронний Ethernet, для

синхронізації мережі 5G з доменом синхронізації супутникової системи. Ці механізми сприяють узгодженню позначок часу та структур кадрів в обох сегментах, що є критично важливим для належного функціонування функцій 5G NR, таких як гнучка нумерологія та динамічний ресурс. розподіл. Крім того, оскільки супутникові канали за своєю суттю призводять до значних затримок через поширення сигналу на великі відстані, архітектура повинна включати стратегії для компенсації цих затримок. Такі підходи, як адаптивна корекція зміщення синхронізації, стратегії буферизації та прогнозні алгоритми, можуть бути використані для компенсації затримки та підтримки точності синхронізації. Архітектурний підхід може включати розгортання головних годинників на наземних станціях або шлюзах, які служать опорними точками, а потім розподіляються між корисними навантаженнями супутників та наземними терміналами для збереження узгодженості синхронізації. Забезпечення відповідності цих методів синхронізації вимогам 5G NR NTN є важливим, оскільки вони повинні підтримувати суворі стандарти точності синхронізації, низького джиттера та надійності, визначені 3GPP Release 17. Завдяки впровадженню цих механізмів інтегрована мережа може працювати гармонійно, забезпечуючи високопродуктивний, синхронізований зв'язок як наземного, так і супутникового сегментів, що має вирішальне значення для підтримки передових послуг 5G.

Успішна інтеграція супутникових мереж у парадигму 5G залежить від комплексної та ретельно розробленої архітектурної структури. Починаючи з логічної моделі, яка чітко окреслює взаємодію між наземним та супутниковим сегментами, мережі можуть сприяти безперебійному обміну даними та керуючій сигналізації, підтримуючи різноманітні сценарії розгортання. Вибір архітектури NTN, зокрема моделі регенеративного корисного навантаження, описаної в 3GPP Release 17, забезпечує необхідні вбудовані можливості обробки для задоволення вимог 5G NR, забезпечуючи високу пропускну здатність, управління променем та ефективне використання ресурсів. Розробка схем взаємодії між gNodeB та супутниковими каналами через проміжні шлюзи та оптимізовані інтерфейси, такі як N2, N3 та N9, забезпечує надійний гібридний зв'язок, враховуючи специфічні для

супутників проблеми, такі як затримка та ефект Доплера. Архітектури маршрутизації трафіку, що включають інтелектуальні політики маршрутизації з урахуванням затримки та гнучкі механізми переадресації, ще більше підвищують продуктивність мережі та безперервність обслуговування. Для гарантування якості послуг вирішальне значення мають механізми пріоритезації, політики QoS та параметри, адаптовані до різних типів послуг, особливо під час міжорбітальних переходів. Підтримка безперебійної мобільності та процесів передачі обслуговування забезпечує безперебійне з'єднання для користувачів, які переміщуються між сегментами мережі. Зрештою, створення надійної архітектури синхронізації та часу є важливим для підтримки когерентності мережі, компенсації затримок супутникових каналів та узгодження зі стандартами 5G NR NTN. Разом ці архітектурні підходи утворюють основу стійкої, масштабованої та ефективної інтегрованої супутникової мережі 5G, здатної задовольнити потреби майбутніх комунікаційних ландшафтів та забезпечити повсюдне підключення по всьому світу.

3.2. Методики маршрутизації та управління трафіком у гібридних 5G–супутникових системах

Поява технології 5G у поєднанні із системами супутникового зв'язку проклала шлях для гібридних мереж, здатних забезпечувати повсюдне високошвидкісне з'єднання в різних середовищах. Ці гібридні системи 5G-супутниковий зв'язок інтегрують наземні мережі із супутниковими сегментами для розширення покриття та підвищення надійності, особливо у віддалених або недостатньо обслуговуваних районах. Однак ця інтеграція створює значні проблеми в маршрутизації та управлінні трафіком через притаманні відмінності в затримці, пропускній здатності та стабільності між наземними та супутниковими каналами. Для забезпечення безперебійного потоку даних необхідно розробити надійні моделі маршрутизації та стратегії управління трафіком. Досліджуються передові методи маршрутизації та управління трафіком, адаптовані для гібридних систем 5G-супутниковий зв'язок, зосереджуючись на гібридних моделях маршрутизації, механізмах динамічного

перенаправлення та реалізації політик трафіку через функцію контролю політик (PCF) в ядрі 5G.

Фундаментальний крок в оптимізації гібридних мереж 5G–супутників передбачає розробку складної гібридної моделі маршрутизації, яка ефективно керує потоком даних між наземним та супутниковим сегментами. Ця модель базується на визначенні чіткої логіки маршрутизації трафіку через ядро 5G (5GC), зокрема, використовуючи функцію площини користувача (UPF) та компонент UPF-SAT, призначений для супутникових сегментів. Логіка маршрутизації повинна бути здатною спрямовувати трафік паралельними маршрутами — один через наземну інфраструктуру, а інший через супутникові канали — забезпечуючи резервування та балансування навантаження. [26].

Це динамічне перенаправлення підвищує стійкість гібридних мереж, забезпечуючи надійне надання послуг, незважаючи на змінний характер супутникових каналів. Ефективні політики управління трафіком мають вирішальне значення для визначення пріоритетів та контролю потоків даних у гібридних системах 5G–супутників, і функція контролю політик (PCF) ядра 5G відіграє ключову роль у цьому процесі. PCF може бути налаштована для забезпечення диференційованих політик пріоритезації трафіку на основі типу послуги, таких як наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), покращений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB) або масовий машинний зв'язок (mMTC). Наприклад, трафік URLLC, який використовується для критично важливих застосувань, таких як автономне керування транспортними засобами, повинен мати пріоритет над іншими типами, особливо над супутниковими каналами, які можуть призвести до більшої затримки.

Правила класифікації трафіку встановлюються для розрізнення різних типів даних та призначення відповідних параметрів QoS, таких як рівні пріоритету, розподіл пропускної здатності та межі затримки. У контексті супутникових сегментів політики також повинні враховувати нестабільність каналу, встановлюючи адаптивні правила, які, наприклад, тимчасово підвищують пріоритет для критично важливих даних під час подій деградації супутника.

Ілюстративна політика може вказувати, що під час нестабільності супутника певний трафік eMBB може бути тимчасово перенаправлений або обмежений для підтримки продуктивності URLLC. Інтегруючи ці політики в PCF, мережеві оператори можуть забезпечити проактивне та динамічне управління трафіком, тим самим оптимізуючи використання ресурсів, підтримуючи якість обслуговування та забезпечуючи ефективне вирішення унікальних проблем супутникових каналів у рамках загальної системи управління трафіком.

Ефективне функціонування гібридних мереж "5G–супутник" критично залежить від реалізації надійних стратегій управління трафіком, які здатні адаптуватися до притаманних відмінностей у затримці, пропускній здатності та стабільності між наземними та супутниковими каналами. Ключову роль у цьому процесі відіграє Функція контролю політик (PCF) ядра 5G, яка дозволяє визначати пріоритети та контролювати потоки даних на основі типу послуги.

Для забезпечення необхідної якості обслуговування (QoS) у такому гетерогенному середовищі, PCF налаштовується для застосування диференційованих політик до основних класів трафіку 5G: наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC), покращеного мобільного широкосмугового доступу (eMBB) та масового машинного зв'язку (mMTC). Правила класифікації трафіку дозволяють розрізняти ці типи даних та призначати їм відповідні параметри QoS, такі як рівні пріоритету, розподіл пропускної здатності та межі затримки. Особливо важливим є врахування нестабільності супутникового каналу шляхом встановлення адаптивних правил, які динамічно змінюють обробку трафіку під час подій деградації сигналу.

Узагальнені політики управління трафіком та пріоритезації, розроблені для інтегрованої мережі з урахуванням вимог різних сервісів та особливостей супутникового сегмента, наведено в табл. 3.3 [27].

Як показано в таблиці 3.3, стратегія управління полягає в тому, щоб гарантувати продуктивність критично важливих сервісів URLLC навіть за рахунок тимчасового зниження якості обслуговування для менш чутливого трафіку eMBB та mMTC під час періодів нестабільності супутникового зв'язку. Інтеграція цих

політик у PCF дозволяє забезпечити проактивне та динамічне управління трафіком, оптимізуючи використання ресурсів гібридної мережі.

Таблиця 3.3

Політики управління трафіком та пріоритезації QoS для різних класів сервісів у гібридній мережі

Клас сервісу (Тип трафіку)	Приклади застосування та вимоги	Відносний пріоритет	Політика обробки при деградації супутникового каналу або перевантаженні
URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication)	Критично важливі додатки (напр., автономне керування). Вимагає наднизької затримки та високої надійності.	Найвищий. Має абсолютний пріоритет над іншими типами трафіку.	Трафік повинен мати пріоритет, особливо над супутниковими каналами, що можуть вносити затримку. Використовуються стабільні маршрути та миттєва активація резервних шляхів для забезпечення безперервності.
eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	Додатки, що вимагають високої пропускної здатності (напр., потокове відео). Чутливий до пропускної здатності.	Високий/Середній (Пріоритет у розподілі смуги пропускання).	Під час нестабільності супутника трафік eMBB може бути тимчасово перенаправлений або обмежений (throttled) для підтримки продуктивності URLLC.

Важливим аспектом управління гібридними мережами 5G-супутників є розробка комплексної моделі балансування навантаження, яка ефективно розподіляє трафік між кількома супутниковими променями та наземними каналами.

Цей підхід спрямований на запобігання перевантаженню будь-якого окремого каналу та максимізацію загальної ефективності мережі шляхом забезпечення справедливого та адаптивного розподілу потоків даних. Один практичний метод включає впровадження механізму розподілу трафіку, який розділяє вхідні потоки даних на менші сегменти, які потім можна одночасно маршрутизувати через різні супутникові промені або наземні шляхи. Це не лише покращує використання ресурсів, але й забезпечує резервування, оскільки трафік можна перенаправляти, якщо певний промінь або супутник стає недоступним. Для досягнення збалансованого навантаження система повинна постійно контролювати ключові параметри, такі як потужність прийнятого опорного сигналу (RSRP), якість прийнятого опорного сигналу (RSRQ) та співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR). На основі цих показників адаптивний алгоритм балансування динамічно регулює розподіл трафіку, надаючи перевагу з'єднанням з кращою якістю сигналу та стабільністю. Наприклад, якщо супутниковий промінь демонструє зниження значень RSRP та RSRQ, система може зменшити трафік на цьому промені та перенаправити його на більш надійні наземні маршрути або інші супутникові промені з вищими рівнями SINR. Таке динамічне балансування не тільки оптимізує використання ресурсів, але й підвищує стійкість та якість обслуговування, особливо в середовищах, де умови супутникового зв'язку часто коливаються через атмосферні фактори або фактори перешкод.

Оптимізація обробки трафіку на рівнях функції площини користувача (UPF) та UPF-SAT є життєво важливою для забезпечення ефективного потоку даних у гібридних мережах, особливо враховуючи унікальні характеристики супутникових з'єднань. Розробка логіки обробки локального трафіку, яку часто називають «локальною обробкою», дозволяє обробляти певні потоки даних, особливо ті, що чутливі до затримки або вимагають високої надійності, локально на межі мережі, минаючи основну мережу, коли це можливо. Це зменшує затримку та зменшує перевантаження супутникових каналів, забезпечуючи більш чуйний користувацький досвід. Крім того, оптимізація маршрутизації для супутникових сузір'їв на низькій навколоземній орбіті (LEO) передбачає використання

міжсупутникових каналів (ISL). Ці канали дозволяють передавати дані безпосередньо між супутниками, створюючи гнучкий та ефективний шлях, який мінімізує необхідність маршрутизації трафіку через наземні станції, тим самим зменшуючи затримку та потенційні вузькі місця. Правила агрегації пакетів додатково сприяють ефективності, об'єднуючи кілька менших пакетів у більші кадри перед передачею по супутникових каналах, значно зменшуючи накладні витрати та покращуючи пропускну здатність. Наприклад, налаштування UPF для агрегації пакетів на основі порогових значень розміру або часових інтервалів забезпечує ефективне використання пропускної здатності супутника, що особливо важливо, враховуючи вищу затримку та обмежену пропускну здатність, типові для супутникових каналів. Разом ці стратегії на рівнях UPF та UPF-SAT дозволяють мережі ефективніше обробляти великі обсяги трафіку, покращувати швидкість реагування та краще адаптуватися до операційних реалій супутникового зв'язку [28].

Впровадження механізмів якості обслуговування (QoS) у супутниковому сегменті має вирішальне значення для підтримки стандартів продуктивності, очікуваних від послуг 5G. Алгоритми управління чергами, такі як зважена справедлива черга (WFQ), циклічна черга з дефіцитом (DRR) та зважена справедлива черга на основі класів (CBWFQ), можуть бути налаштовані на супутниковому інтерфейсі для ефективного визначення пріоритетів різних класів трафіку. Наприклад, трафік URLLC, який використовується в критично важливих додатках, повинен отримувати черги з вищим пріоритетом, щоб забезпечити мінімальну затримку та коливання, навіть у періоди високого навантаження мережі або нестабільності супутника. Ці алгоритми дозволяють мережі динамічно розподіляти пропускну здатність, гарантуючи, що трафік з високим пріоритетом отримує необхідні ресурси, тоді як дані з нижчим пріоритетом плануються відповідно. Встановлення відповідних профілів QoS, узгоджених з вимогами до послуг 5G, передбачає визначення таких параметрів, як максимальна затримка, пороги втрати пакетів та гарантії пропускної здатності для кожної категорії послуг. Крім того, підтримка якості обслуговування (QoS) під час перемикання супутників

або променя, що є поширеним явищем у системах сузір'їв на низькій навколоземній орбіті (LEO), вимагає швидкої переналаштування параметрів керування чергами та профілів QoS для адаптації до змінних умов з'єднання. Наприклад, коли промінь супутника погіршується або відбувається перемикання, система повинна безперешкодно налаштовувати параметри QoS, щоб підтримувати рівні обслуговування, запобігаючи втраті даних або пікам затримки. Ці механізми разом гарантують, що сегмент супутника може відповідати суворим стандартам QoS для послуг 5G, навіть у динамічному та часто непередбачуваному середовищі супутникового зв'язку.

Поряд із розглянутими стандартними механізмами реактивного перенаправлення трафіку, які базуються на моніторингу метрик продуктивності в режимі реального часу (таких як збільшення затримки або втрата пакетів), в умовах використання низькоорбітальних (LEO) супутникових систем виникає потреба у більш проактивних підходах. Часті перемикання між супутниками або променями (хендовери), характерні для LEO-сузір'їв, створюють виклики для підтримки QoS, вимагаючи швидкої переналаштування параметрів мережі для адаптації до змінних умов з'єднання. Для вирішення цієї проблеми та забезпечення наднадійного зв'язку для критичних сервісів пропонується вдосконалена Стратегія предиктивної адаптивної маршрутизації на основі ефемерид LEO-супутників.

Запропонована стратегія використовує детерміновану природу орбітального руху супутників (рис. 3.4). Замість того, щоб чекати порушення порогових значень QoS (наприклад, перевищення ліміту затримки у 100 мс) для запуску процедури перенаправлення, система використовує дані ефемерид для розрахунку точного часу до наступного прогнозованого хендовера (Time-to-Handover, TTHO). Цей показник стає новим критичним критерієм для алгоритмів маршрутизації та управління політиками.

Для трафіку категорії URLLC, який вимагає найвищого пріоритету та мінімальної затримки, стратегія передбачає проактивне перемикання маршруту. Якщо розрахований TTHO стає меншим за визначений безпечний поріг (наприклад, 2–3 секунди до фізичного розриву з'єднання), система примусово перенаправляє

потоки URLLC на альтернативний стабільний маршрут — наземний канал або інший супутниковий промінь — ще до початку процесу хендовера. Такий підхід дозволяє досягти фактично безшовної передачі обслуговування, мінімізуючи ризики переривання сервісу та піків затримки, які є критичними для додатків реального часу.

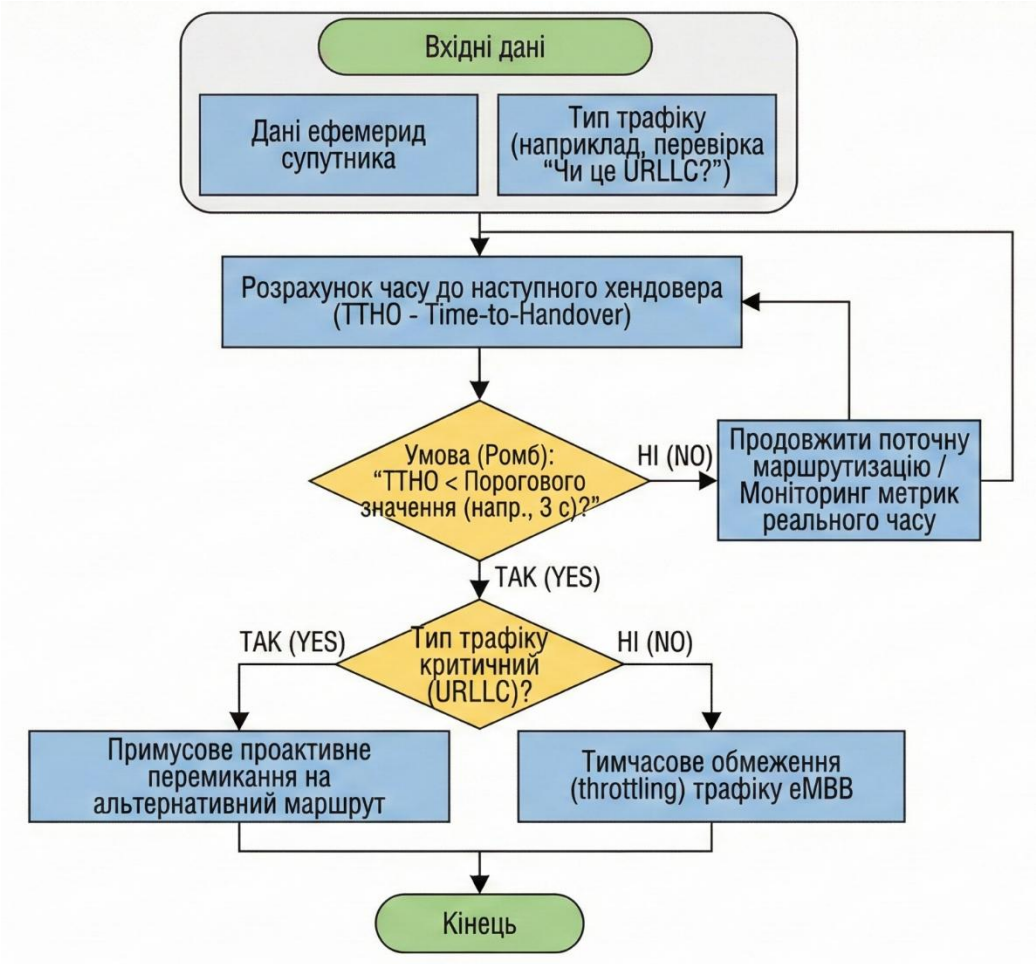


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму предиктивної адаптивної маршрутизації на основі ефемерид

Крім того, цей предиктивний підхід інтегрується з функцією контролю політик (PCF) для оптимізації управління ресурсами під час перехідних процесів. Наближення моменту хендовера (за тригером TTHO) слугує сигналом для тимчасової адаптації політик QoS для менш пріоритетного трафіку. Наприклад, трафік eMBB може бути тимчасово обмежений (throttled) або перенаправлений безпосередньо перед хендовером. Це дозволяє вивільнити буферні ресурси на

шлюзах та борту супутника, гарантуючи безперешкодне проходження критично важливих сигнальних повідомлень та пакетів URLLC під час фази перемикання, тим самим підтримуючи високі стандарти QoS навіть у динамічному середовищі LEO.

3.3. Моделювання ефективності запропонованої стратегії предиктивної адаптивної маршрутизації на основі ефемерид LEO-супутників

Швидке поширення технології 5G здійснило революцію в глобальному зв'язку, обіцяючи високошвидкісну передачу даних, низьку затримку та широке покриття. Однак традиційні наземні мережі 5G стикаються з труднощами в охопленні віддалених та недостатньо обслуговуваних регіонів через суттєві інфраструктурні обмеження. Щоб подолати цей розрив і досягти справді універсального покриття, інтеграція супутникових систем з мережами 5G постає як переконливе та необхідне рішення.

Для точної оцінки продуктивності такої гібридної системи 5G–супутників першочерговим завданням є створення надійної математичної моделі, яка здатна врахувати складні взаємодії між наземними та супутниковими компонентами. У цьому підрозділі досліджується моделювання інтегрованих супутникових систем 5G із фокусом на розробці комплексної математичної основи, аналізі тонкощів поширення супутникового сигналу та дослідженні динамічних ефектів затримок у гібридному середовищі. Систематичний аналіз цих аспектів дозволяє не лише зрозуміти ефективність та обмеження таких систем, але й визначити стратегії оптимізації їх розгортання для забезпечення глобального масштабу [29].

Фундаментальним кроком у розробці такої моделі є визначення ключових параметрів, що впливають на якість сигналу та швидкість реагування системи. До них належать затримка поширення сигналу, доступна пропускна здатність та співвідношення несуча/шум (C/N), які безпосередньо визначають надійність прийому серед шуму та перешкод. Критично важливим є встановлення формалізованих взаємозв'язків між наземними базовими станціями 5G та

супутниковими каналами, що дозволяє описати процеси потоку сигналів, розподілу ресурсів та балансування навантаження між сегментами.

На основі цих визначених параметрів та архітектурних взаємозв'язків було розроблено узагальнену структурну схему імітаційної моделі (рис. 3.5) [30]. Вона візуалізує основні функціональні блоки гібридної мережі та інформаційні потоки між ними, дозволяючи симулювати роботу системи в різних сценаріях розгортання.

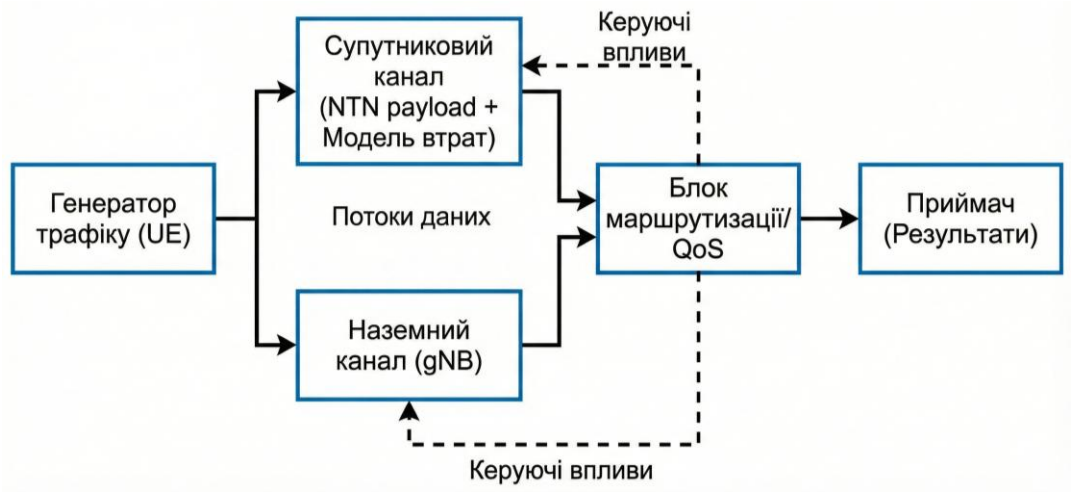


Рис. 3.5. Структурна схема імітаційної моделі гібридної мережі 5G-NTN

Як показано на рисунку 3.5, розроблена модель включає блок генерації трафіку, який імітує поведінку користувацького обладнання (UE) із різними вимогами до сервісів. Потоки даних можуть спрямовуватися через наземний сегмент (Terrestrial gNB) або супутниковий сегмент (NTN Segment). Супутникова частина моделі містить блоки, що відтворюють роботу корисного навантаження супутника, а також моделі фізичного каналу зв'язку, які враховують специфічне для різних орбіт затухання сигналу та вплив атмосферних умов. Центральним елементом схеми є блок маршрутизації та управління якістю обслуговування (Routing & QoS Decision), який визначає оптимальний шлях передачі даних на основі поточного стану каналів та політик мережі. Завершальним етапом є блок збору та аналізу статистики, який дозволяє оцінити ключові показники ефективності системи, такі як наскрізна затримка, джиттер та коефіцієнт втрати пакетів.

Визначивши за допомогою розробленої структурної схеми (рис. 3.5) загальну архітектуру, основні інформаційні потоки та ключові функціональні блоки імітаційної моделі гібридної мережі, наступним критичним етапом дослідження є детальна формалізація алгоритмічної логіки роботи її центрального елемента — блоку прийняття рішень щодо маршрутизації та забезпечення якості обслуговування (QoS). Це завдання набуває особливої актуальності та складності в умовах інтеграції з низькоорбітальними (LEO) супутниковими системами. Висока динаміка їх орбітального руху, що призводить до швидкої зміни топології мережі та частих міжсупутникових або міжпроменевих хендоверів, створює значні виклики для підтримання стабільності з'єднання та забезпечення безперервності критично важливих сервісів.

Для проведення комплексного порівняльного дослідження ефективності та стійкості мережі в модель закладаються та реалізуються два принципово різні концептуальні підходи до управління трафіком під час цих критичних перехідних процесів. Перший підхід — це стандартний реактивний механізм, широко описаний у сучасній науково-технічній літературі. Він базується на безперервному моніторингу метрик продуктивності мережі в режимі реального часу (таких як затримка, джиттер, рівень втрати пакетів) і приймає рішення про перенаправлення потоків даних лише апостеріорі — після фактичного виявлення погіршення якості каналу нижче заданих порогових значень. Другий підхід — це розроблена та запропонована в підрозділі 3.2 Стратегія предиктивної адаптивної маршрутизації на основі ефемерид LEO-супутників (алгоритм якої представлено на рис. 3.4). Ця стратегія використовує апріорні детерміновані дані ефемерид про рух супутників для точного передбачення моментів майбутніх хендоверів та здійснює випереджувальне (проактивне) перемикання маршрутів до моменту виникнення деградації сервісу.

Фундаментальні ключові відмінності в логіці дії та тригерах між цими двома механізмами, які безпосередньо визначають сценарії проведення імітаційного моделювання та формують очікувані результати щодо показників якості обслуговування, систематизовано та зведено в порівняльній таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Порівняльний аналіз стандартного реактивного та запропонованого предиктивного механізмів маршрутизації в LEO-мережах для сценаріїв моделювання

Критерій порівняння	Стандартний реактивний механізм	Запропонований предиктивний механізм
Принцип дії (Тригер)	Рішення про перемикання приймається на основі моніторингу метрик продуктивності в режимі реального часу (наприклад, збільшення затримки або втрата пакетів).	Рішення про перемикання приймається на основі розрахункового часу до прогнозованого хендовера (Time-to-Handover, TTHO).
Час реакції	Реактивний. Дія виконується після того, як виявлено погіршення якості каналу або перетин порогового значення QoS.	Проактивний (випереджувальний). Дія виконується до початку фізичного погіршення каналу або розриву з'єднання.
Використовувані дані	Миттєві вимірювання якості сигналу (RSRP, RSRQ, SINR), поточна затримка та рівень перевантаження мережі.	Детерміновані дані про орбітальний рух супутників (ефемериди) та геолокація користувача.
Вплив на QoS під час хендовера	Можливі короткочасні сплески затримки або втрати пакетів у період між виникненням деградації та завершенням перемикання маршруту.	Забезпечує фактично безшовне перемикання (seamless handover) з мінімальною варіацією затримки для критичного трафіку.
Придатність для критичних сервісів (URLLC)	Обмежена. Вимагає надзвичайно швидких процедур перенаправлення (в межах мілісекунд) для відповідності суворим вимогам надійності.	Висока. Спеціально розроблений для гарантування безперервності сервісів із наднизькою затримкою шляхом випередження проблем.
Управління ресурсами	Реагує на перевантаження по факту їх виникнення.	Дозволяє заздалегідь адаптувати політики для некритичного трафіку (наприклад, throttling eMBB) для вивільнення ресурсів перед хендовером.

Виявлені в табл. 3.4 фундаментальні відмінності у принципах дії двох механізмів маршрутизації визначають необхідність проведення порівняльного моделювання для кількісної оцінки їх ефективності в динамічних умовах LEO-мережі. Особливу увагу в процесі симуляції було приділено аналізу поведінки мережі під час критичних подій — міжсупутникових або міжпроменевих хендоверів, які є основними джерелами нестабільності QoS.

Першим етапом аналізу результатів є дослідження динаміки наскрізної затримки (end-to-end latency) безпосередньо в часовому вікні навколо моменту фізичного перемикання каналу. Це дозволяє візуалізувати вплив обраної стратегії на стабільність потоку даних. На рисунку 3.6 представлено часову діаграму затримки для трафіку URLLC під час типової процедури хендовера в LEO-системі.

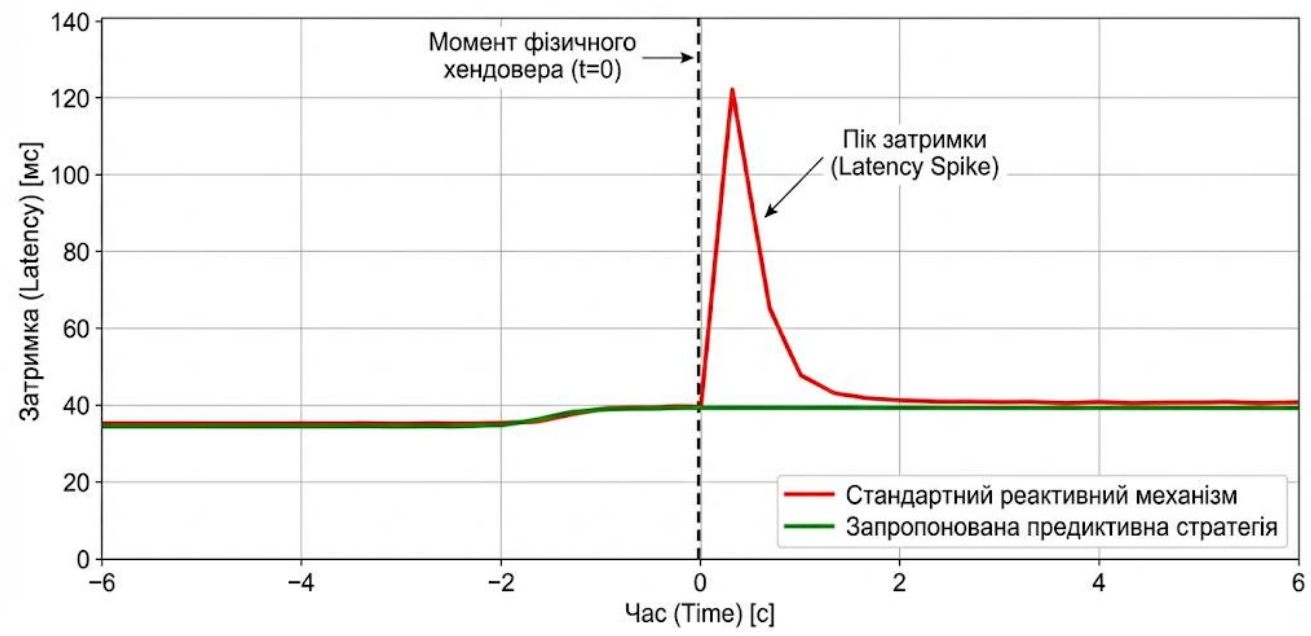


Рис. 3.6. Часова діаграма динаміки наскрізної затримки під час процедури LEO хендовера

Як демонструє рис. 3.6, стандартний реактивний механізм (червона крива) характеризується значним сплеском затримки, що виникає в момент після фізичного розриву з'єднання і триває до завершення процедури відновлення маршруту на новому каналі. Такий пік, що може досягати сотень мілісекунд, є

неприпустимим для критичних сервісів. Натомість, запропонована предиктивна стратегія (зелена крива), виконавши перемикання маршруту завчасно на основі даних ефемерид, забезпечує плавний перехід без виражених піків затримки, підтверджуючи здатність до безшовної передачі обслуговування.

Для більш комплексної статистичної оцінки надійності та стабільності QoS протягом тривалого часу, що охоплює безліч циклів хендоверів, було побудовано функцію розподілу ймовірностей (CDF) наскрізної затримки. Цей графік, наведений на рисунку 3.7, дозволяє оцінити відсоток пакетів, що відповідають суворим вимогам до затримки.

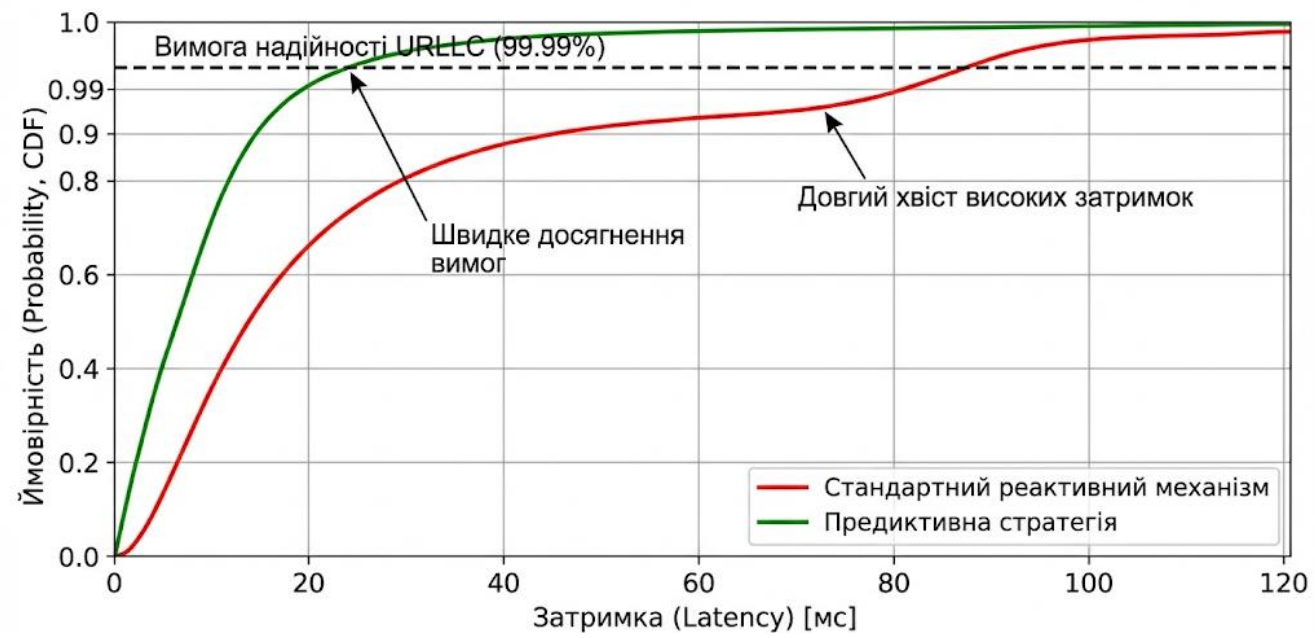


Рис. 3.7. Функція розподілу ймовірностей (CDF) наскрізної затримки для трафіку URLLC у багатосупутниковому сценарії

Аналіз графічних результатів, представлених на рисунках 3.6 та 3.7, наочно демонструє фундаментальну різницю в поведінці двох досліджуваних механізмів у динамічних умовах LEO-мережі. Графік CDF підтверджує, що стандартний реактивний підхід характеризується наявністю "довгого хвоста" розподілу, що свідчить про нездатність гарантувати стабільний QoS для критичного трафіку через періодичні сплески затримки під час хендоверів. Натомість, запропонована

предиктивна стратегія забезпечує значно стрімкіший розподіл, гарантуючи виконання вимог до затримки для переважної більшості пакетів.

Для остаточної верифікації ефективності розробленого підходу та перевірки його відповідності суворим вимогам надійності сервісів URLLC, ключові кількісні показники ефективності (KPI), отримані в ході серії імітаційних експериментів, було консолідовано. Узагальнені цифрові результати порівняльного аналізу, які підсумовують дані візуалізацій, наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Зведені результати моделювання ефективності стратегій маршрутизації для трафіку URLLC в умовах динамічної LEO-мережі

Показник ефективності (KPI)	Стандартний реактивний механізм	Запропонована предиктивна стратегія	Покращення (%) / Примітка
Середня затримка (Mean Latency), мс	35.2	34.8	Незначне покращення (середнє значення мало змінюється)
Пікова затримка під час хендовера (Peak Latency), мс	120.5	45.1	Суттєве покращення (усунення піків)
Джиттер (Стандартне відхилення затримки), мс	15.3	3.2	Значне підвищення стабільності потоку
Час переривання сервісу (Service Interruption Time), мс	80	~0 (Безшовне)	Критично для URLLC
Коефіцієнт втрати пакетів під час хендовера (%)	1.5%	<0.01%	Забезпечення високої надійності
Відповідність вимогам URLLC (надійність 99.99%)	Не відповідає (через піки під час хендоверів)	**Відповідає**	Головний висновок

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання розробки та обґрунтування архітектурних рішень і методів інтеграції наземних мереж 5G із супутниковими системами для забезпечення глобального покриття та гарантованої якості обслуговування. На основі виконаних теоретичних та практичних досліджень зроблено наступні висновки:

1. У першому розділі проведено аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку мобільних мереж, який показав, що інтеграція неземних мереж (NTN), стандартизована в 3GPP Release 17, є безальтернативним шляхом для досягнення глобального покриття сервісами 5G. Визначено основні виклики такої інтеграції, ключовими з яких є значна затримка поширення сигналу (особливо для GEO-орбіт) та високодинамічні ефекти Доплера в LEO-системах, що потребує специфічних архітектурних рішень.

2. У другому розділі досліджено технологічний базис супутникового сегмента. За результатами порівняльного аналізу встановлено, що для підтримки повного спектра послуг 5G, включаючи чутливі до затримок додатки URLLC, оптимальним є використання низькоорбітальних (LEO) систем. Обґрунтовано необхідність переходу на вищі частотні діапазони (Ka, Q/V) із використанням активних фазованих антенних решіток для забезпечення необхідної ємності мережі. Також показано важливість впровадження технологій SDN та NFV для гнучкого управління ресурсами супутникового сегмента в складі гібридної мережі.

3. У третьому розділі розроблено та обґрунтовано комплексні рішення для практичної реалізації інтегрованої мережі:

– Обґрунтовано вибір архітектури з регенеративним корисним навантаженням, що дозволяє реалізувати функції gNodeB та обробку на борту супутника, зменшуючи затримки та підвищуючи надійність порівняно з "прозорими" ретрансляторами.

– Розроблено та запропоновано Стратегію предиктивної адаптивної маршрутизації на основі ефемерид LEO-супутників. На відміну від стандартних

реактивних методів, цей підхід використовує детерміновані дані про рух супутників для проактивного перемикання маршрутів перед хендоверами, що забезпечує безперервність критичних сервісів.

– Сформовано модель забезпечення якості обслуговування (QoS) на базі функцій ядра 5G (PCF) із диференційованою пріоритезацією трафіку, де найвищий пріоритет надається URLLC.

– Проведене імітаційне моделювання підтвердило переваги запропонованої предиктивної стратегії у зменшенні пікових затримок під час хендоверів. Сценарний аналіз показав, що оптимальною конфігурацією для глобального покриття є використання гібридних сузір'їв (LEO для продуктивності, GEO для покриття).

Загалом, отримані в роботі результати створюють цілісну науково-методичну основу для проектування та розгортання ефективних інтегрованих мереж 5G-NTN.