

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

«__»_____2021 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні технології»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Вибір раціональної архітектури 5G мережі на основі розгорнутих
LTE мереж»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТІ-72

Лісовський Олексій Володимирович _____

Керівник:

доцент кафедри ІТМ, к.т.н., доцент

Правило Валерій Володимирович _____

Рецензент:

доцент кафедри ТК, к.т.н., доцент

Явіся Валерій Сергійович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Лісовському Олексію Володимировичу

1. Тема роботи: «Вибір раціональної архітектури 5G мережі на основі розгорнутих LTE мереж», керівник роботи Правило Валерій Володимирович, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж ІТС, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «14» квітня 2021 р. № 1007-с.
2. Термін подання студентом роботи: 7 червня 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: архітектури мереж 4G, 5G.
4. Зміст роботи:
 1. Аналіз основних параметрів, характеристик та архітектур мереж LTE та 5G.
 2. Порівняльний аналіз мереж LTE та 5G та розгляд можливості переходу до 5G мереж на основі архітектур 4G .
 3. Варіант архітектури мережі 5G, побудованої на основі інтеграції з розгорнутими LTE мережами.
 4. Висновки щодо розглянутих мереж та вибору раціональної архітектури.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
6. Дата видачі завдання: 30.10.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення та складання плану на завдання.	30.10.2020 - 07.12.2020	виконано
2.	Опрацювання матеріалу про мережі LTE.	07.12.2020 – 03.01.2021	виконано
3.	Дослідження відомостей про технологію 5G.	03.01.2021 – 11.02.2021	виконано
4.	Порівняльний аналіз двох мереж, пошук спільних і відмінних елементів у їх побудові.	11.02.2021 – 02.03.2021	виконано
5.	Розгляд існуючих та затверджених архітектур розгортки 5G.	02.03.2021 – 11.04.2021	виконано
6.	Практична реалізація побудови нової архітектури 5G.	12.04.2021 – 16.05.2021	виконано
7.	Висновки, підготовка тексту, оформлення роботи.	16.05.2021 – 06.06.2021	виконано
8.	Розробка презентації.	07.06.2021	виконано

Студент

Олексій ЛІСОВСЬКИЙ

Керівник

Валерій ПРАВИЛО

РЕФЕРАТ

Робота містить 61 сторінку, 25 рисунків та 3 таблиці. Було також використано 21 джерело.

Метою роботи є аналіз провідних мереж безпроводового зв'язку, варіанти їх розгортання, а також вибір раціональної архітектури 5G на основі розгорнутих LTE мереж.

Об'єктом дослідження є інтеграція мереж LTE-5G.

Предметом дослідження у даній роботі виступають архітектури мереж LTE та 5G.

У даній роботі досліджено технології LTE та 5G, їх архітектури та функції.

Результатом роботи є розробка нового варіанту архітектури інтегрованих мереж LTE-5G, а також вибір раціональної архітектури розгортання.

Ключові слова: LTE, 5G, UE, EPC, NR, eNB, gNB.

ABSTRACT

The work contains 61 pages of 25 figures and 3 tables. 21 sources were also used.

The aim of the work is to analyze the leading wireless communication networks, options for their deployment, as well as the choice of a rational 5G architecture based on deployed LTE networks.

The object of research is the integration of LTE-5G networks.

The subject of research in this work are the architectures of LTE and 5G networks.

This work investigates LTE and 5G technologies, their architectures and functions.

The result is the development of a new version of the architecture of integrated networks LTE-5G, as well as the choice of a rational deployment architecture.

Keywords: LTE, 5G, UE, EPC, NR, eNB, gNB.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ 4G	10
1.1 Загальна інформація про стандарт LTE.....	10
1.2. Планування мереж LTE.....	11
1.2.1. Оцінка пропускної здатності мережі стандарту LTE.....	11
1.2.2. MIMO - багатоантенні технології в LTE.....	13
1.2.3. Частотне планування	14
1.3 Мережева архітектура LTE	16
1.3.1. Користувацьке обладнання (UE)	16
1.3.2. E-UTRAN (мережа доступу).....	16
1.3.3. Evolved Packet Core (EPC) (Базова мережа).....	18
1.4. Роумінгова архітектура LTE.....	19
1.5. Переваги та недоліки 4G	20
1.6. LTE в Україні	21
Висновки.....	22
РОЗДІЛ 2 ОПИС АРХІТЕКТУРИ ІНТЕГРАЦІЇ LTE-5G.....	23
2.1. Загальна інформація про технологію 5G.....	23
2.2. Стандартизація, архітектура та швидкість технології 5G	23
2.2.1. Стандарти 5G.....	23
2.2.2. Архітектура мережі 5G	25
2.2.3. Швидкість 5G	25
2.3. Особливості архітектури опорної мережі (Core Network) 5G	26
2.4. Технології 5G New Radio (5G NR)	28

2.4.1. Структура сигналів 5G NR	32
2.4.2. Гнучке положення піднесучих.....	34
2.4.3. mMIMO для 5G.....	35
2.4.4. Міліметрові хвилі та часткове використання смуги в NR	36
2.5. Мета створення та призначення мереж 5G.....	38
2.6. Порівняння основних характеристик LTE та 5G.....	41
2.7. Інтеграція архітектур мереж LTE-5G.....	41
2.7.1. Режими розгортання 5G.....	41
2.7.2. Аналіз gNB станцій 5G та відмінності з eNB станціями LTE.....	43
2.7.3. Архітектура ядра 5G та її відмінності від 4G.....	48
2.7.4. Рефармінг частот	49
Висновки.....	49
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ 5G ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ З РОЗГОРНУТИМИ LTE МЕРЕЖАМИ.....	50
3.1. Існуючі та затверджені варіанти інтеграції 5G з LTE	50
3.1.1. Варіанти розгортки 5G в режимі Standalone та Non-Standalone	50
3.1.2. Схвалена архітектура 5G на основі LTE.....	51
3.2. Проектування нового варіанту архітектури LTE-5G.....	54
3.2.1. Необхідні характеристики для інтеграції LTE з 5G та побудова архітектури	54
3.2.2. Принцип роботи архітектури.....	56
3.2.3. Спрощений варіант для Option X.....	57
Висновки.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

LTE	Long Term Evolution – мобільний протокол передачі даних
5G	П’яте покоління мобільних мереж
IoT	Internet of Things
3GPP	3rd Generation Partnership Project - консорціум, який розробляє специфікації для мобільної телефонії
UE	User Equipment – термінал користувача
RAN	Radio Access Network – мережа радіодоступу
eNB	Evolved NodeB
gNB	gNodeB
EPC	Evolved Packet Core
NGCN	New Generation Core Network
NR	New Radio
MIMO	Multiple Input Multiple Output
RRC	Radio Resource Control
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
RLC	Radio Link Control
MAC	Medium Access Control
NSA	Non-Standalone
SA	Standalone
MME	Mobility Management Entity
SAEGW	System Architecture Evolution Gateway
CP	Control Plane – сигнальний трафік
UP	User Plane

ВСТУП

На сьогоднішній день дослідження технологій мереж бездротового зв'язку є одним із важливих завдань. Використання високоякісного та високошвидкісного зв'язку є необхідним. Враховуючи, що мобільна мережа п'ятого покоління є наразі найактуальнішою у світі, її детальний аналіз вкупі з мережею четвертого покоління дасть змогу розробити якісне і чітке рішення щодо інтеграції даних технологій.

Основні завдання дослідження полягають у наступному:

- Аналіз основних параметрів, характеристик та архітектур мереж LTE та 5G.
- Порівняльний аналіз мереж LTE та 5G та розгляд можливості переходу до 5G мереж на основі архітектур 4G.
- Варіант архітектури мережі 5G, побудованої на основі інтеграції з розгорнутими LTE мережами.
- Висновки щодо розглянутих мереж та вибору раціональної архітектури.

Також слід відокремити необхідні характеристики для технології LTE, які дадуть змогу не тільки розглянути інтеграцію з 5G, але й розробити власну або ж альтернативну архітектуру 5G, побудовану так само на основі мережі 4G.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ 4G

1.1 Загальна інформація про стандарт LTE

4G (англ. *4th Generation*) — четверте покоління мобільного зв'язку. До нього були мережі 1G, 2G та 3G. 4G має високу швидкість передачі даних. Для прикладу, четверте покоління швидше за третє в 300-400 разів і не використовує канал для передачі голосу, а працює тільки з цифровими даними. Телефонія переходить у формат VoIP (Voice over IP) і очікується, що в майбутньому це може призвести до відмирання класичного комутування каналів зв'язку на користь чистої інтернет-телефонії. Спочатку Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ) оголосив, що стандартом 4-го покоління може називатися стандарт, що забезпечує швидкість передачі даних по лінії «вниз» не менше 1 Гб / с, в зв'язку з чим стандарт LTE називали стандартом 3,9G, оскільки максимально досяжна швидкість передачі даних в ньому становить 100 Мбіт / с. Справжнім стандартом четвертого покоління МСЕ спочатку визнав виключно стандарт LTE-Advanced, в якому досягається максимальна швидкість передачі даних 1 Гбіт/с.[1] Також слід зазначити, що технологія LTE може працювати в більшій кількості частотних діапазонів, ніж інші технології мобільного зв'язку.

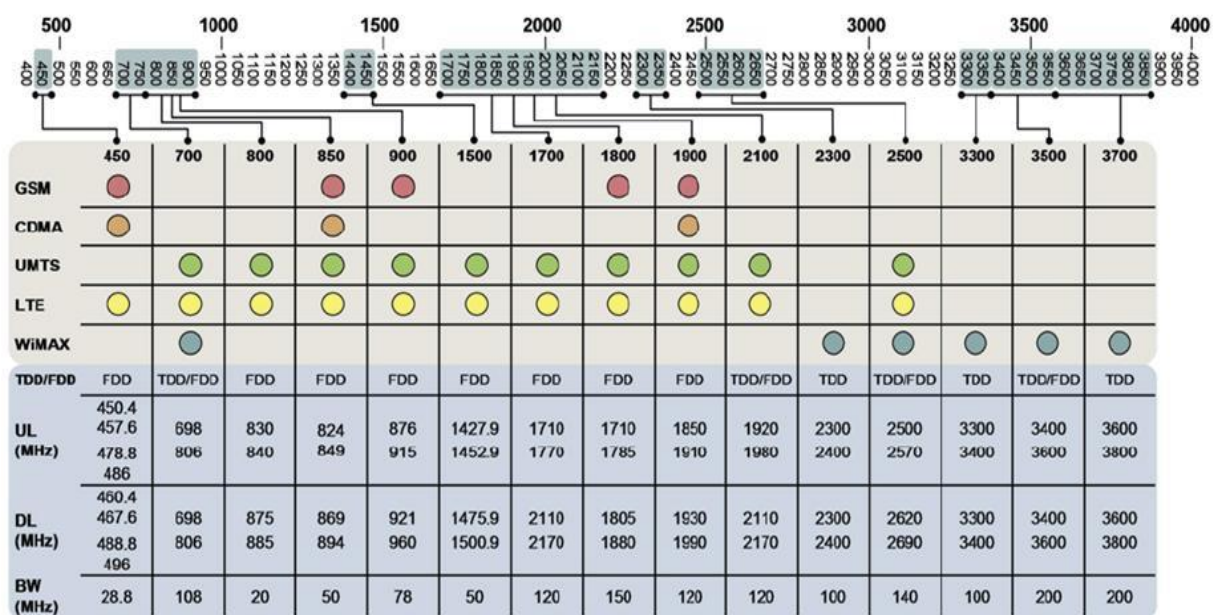


Рис. 1.1. Розподілення частотних ресурсів між технологіями

1.2. Планування мереж LTE

Таблиця 1.1

Відмінності в плануванні мереж мобільного зв'язку різних поколінь

Найменування	LTE	GSM	WCDMA
Планування частотного ресурсу	Розподіл фрагментів смуги системи між користувачами базових станцій	Розподіл частотних каналів між базовими станціями	Не потрібно
Наявність регулярної методики планування	Немає	Є	Є
Комутація	Пакетів (все через IP)	Каналів, пакетів	Каналів, пакетів
Передача інформації	OFDM	Вузькосмуговий сигнал	Широкосмуговий сигнал
Профіль трафіку	VoIP, потокове відео, мобільний інтернет, фоновий трафік	Мова, мобільний інтернет, фоновий трафік	Мова, потокове відео, мобільний інтернет, фоновий трафік
Дисципліна обслуговування	VoIP - система масового обслуговування (СМО) з відмовами. Мобільний інтернет - СМО з чергами і пріоритетами. Потокове відео - СМО без затримок	Мова - СМО з відмовами. Мобільний інтернет - СМО з чергами і пріоритетами.	Мова - СМО з відмовами. Мобільний інтернет - СМО з чергами і пріоритетами. Потокове відео - СМО без затримок

1.2.1. Оцінка пропускної здатності мережі стандарту LTE

Технологія LTE в низхідних і висхідних каналах може забезпечити різні швидкості, які залежать від багатьох важливих параметрів - дуплексування каналів,

існуючий діапазон частот, модуляція піднесучих та її вид, метод завадостійкого кодування даних, технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), керування ресурсами управління та інші. На рисунку 1.2. показано три сценарії, в яких можуть проводитись попередні оцінки параметрів мережі технології LTE, а саме: окреме з'єднання (Single-Downlink), окрема сота з багатьма користувачами (Single-Cell Multi-User), багато сот з багатьма користувачами (Multi-Cell Multi-User).

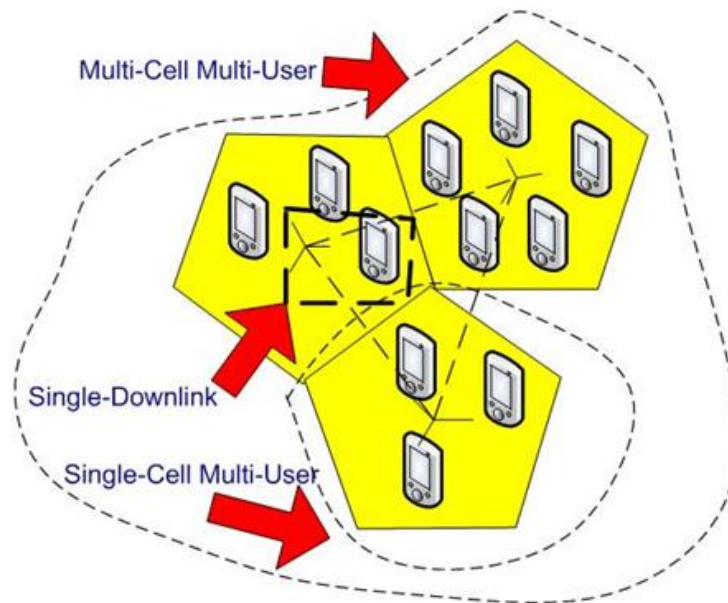


Рис. 1.2. Сценарії для оцінки параметрів мережі стандарту LTE

Single-Downlink - сценарій, в якому оцінюється тільки одне спадне з'єднання між базовою станцією і абонентським обладнанням одного користувача. Зі сторони планування таким чином можна досліджувати параметри службових і призначених для користувача каналів, а також ефективність алгоритмів роботи MIMO.

Single-Cell Multi-User - сценарій, в якому оцінюються з'єднання з потенційно активними користувачами в межах однієї соти. Також дозволяє додатково досліджувати параметри радіомережі з урахуванням всередині стільникового завантаження і процедур планування радіо ресурсів, а також ефективність багатокористувацьких режимів MIMO.

Multi-Cell Multi-User - сценарій, в якому оцінюються основні параметри мережі. Дозволяє досліджувати всі параметри реальної радіомережі з урахуванням внутрішньосистемних перешкод від суміжних сот.

Технічно новим рішенням для радіоінтерфейсу LTE стало використання нових

методів множинного доступу - OFDMA в низхідному каналі (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) і SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) - у висхідному. Також важливо відмітити, що весь наявний спектр розбивається на ортогональні піднесучі по 15 кГц (в низхідному каналі). Кожна з них модулюється певним видом модуляції (від QPSK до QAM64). 12 піднесучих - мінімальна смуга, що виділяється для одного абонента. Використання багатопозиційних методів модуляції вимагає каналів з високим рівнем відношення сигнал/шум, погіршення же радіоумов призведе до зниження порядку модуляції, а, відповідно, і швидкості передачі даних. Таким чином, при поганих радіоумовах максимальні швидкості передачі даних в низхідному каналі можна сміливо розділити на 3 (при QPSK одночасно передаються 2 біти інформації, при QAM64 - 6 біт). Крім порядку модуляції важливо брати до уваги і схему завадостійкого кодування. Наприклад, кодування зі швидкістю 0.5 ще в 2 рази знижує швидкості передачі даних. Також треба відмітити, що саме масштабованість є найважливішою особливістю технології LTE. Займаний ним частотний спектр від 1.4 до 20 МГц сприяє швидкому впровадженню мережі в умовах обмеженості ресурсів. Можливі також смуги 3, 5, 10 і 15 МГц. Ширші смуги дорівнюють більшій швидкості.

1.2.2. MIMO - багатоантенні технології в LTE

MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output) - метод просторового кодування сигналу, що дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при якому передача даних здійснюється за допомогою N антен і їх прийому M антенами. Передаючі і приймаючі антени рознесені настільки між собою, аби досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами. У різних реалізаціях MIMO мається на увазі одночасна передача в одному фізичному каналі кількох незалежних повідомлень. З метою реалізації дії MIMO застосовують багатоантенні системи: на передавальній стороні є N_t передавальних антен, а на приймальній стороні N_r приймальних. Дана структура приведена на рисунку 1.3.

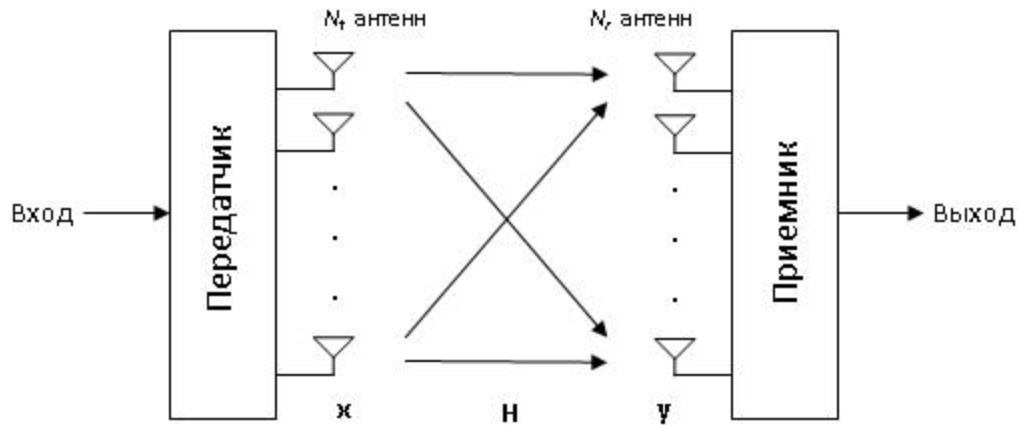


Рис 1.3. Структура МІМО

Існують кілька варіантів застосування МІМО - для збільшення абонентської ємності, при цьому з різних антен передається різна інформація, і для поліпшення покриття. В останньому випадку з декількох антен передається одна і та ж інформація, що дозволяє абонентському пристрою комбінувати сигнал з різних антен, покращуючи його якість.

1.2.3. Частотне планування

На сьогоднішній день більша частина мереж LTE працює в парному спектрі в режимі FDD (Frequency Division Duplex) - частотний рознос вхідного і вихідного каналу, при якому прийом і передача сигналу відбуваються на різних частотах), але інтерес до мереж LTE TDD продовжує зростати - так, все більше країн, які впроваджують технологію LTE, які підтримують режим TDD (Time Division Duplex) - прийом і передачі сигналу відбуваються на одній частоті, але з поділом за часом. Технологія найкраще підходить для додатків, що мають несиметричний трафік.

Всього під технологію LTE виділено понад 40 діапазонів частот (bands), при цьому використання спектра для LTE має регіональні особливості. Наприклад, в США найбільш популярними є діапазони 700 МГц (в основному, band 13 і band 17) і AWS (AWS band (Advanced Wireless Services band) - парні частоти в діапазонах 1710-1755 МГц (передача) і 2110-2155 МГц (прийм) (1,7 / 2,1 ГГц), в Європі - діапазони 1800 МГц (band 3) і 2600 МГц (band 7), в перспективі - 800 МГц (band 20). В Японії перші запуски LTE відбулися в діапазоні 800/850 МГц; 1,5 ГГц; 1,7 ГГц і 2,1 ГГц (в залежності від оператора). Великий інтерес в світі пов'язаний з рефармінгом частот GSM для їх використання в мережах LTE. Особливо це стосується діапазону 1800

МГц, а в деяких випадках - 900 МГц. При цьому більшість регуляторів схвалює технологічно нейтральний підхід, при якому оператори можуть використовувати наявні у них частоти незалежно від конкретної технології.

Розвиток LTE на частоті 1800 МГц в середньому на 60% економічніше, ніж будівництво мереж в високочастотних діапазонах. Використання цього діапазону дозволяє скоротити час виходу технології LTE на ринок і прискорити його розвиток. У більш вигідному становищі опиняться ті компанії, які зможуть провести рефармінг для нижніх частот 800-900 МГц, де розгортання мереж LTE в кілька разів дешевше, ніж в діапазонах вище 2 ГГц.

Розгортання мереж в низькочастотній області спектра більш привабливо з точки зору витрат і оптимально підходить для покриття районів з низькою щільністю населення (передмістя і сільські райони). Низькі частоти, в порівнянні з високими, забезпечують істотно краще проникнення всередині будівель і велику площу покриття, що, з одного боку, дозволяє забезпечити зв'язком великі території, а з іншого - серйозно обмежує щільність базових станцій і загострює проблему внутрісистемної інтерференції.

Високі частоти відмінно підходять для побудови систем LTE в регіонах з високою щільністю населення, де потрібні високі швидкості передачі даних. Однак якщо працювати тільки в високочастотному діапазоні, то неминуче виникають проблеми з радіопокриттям. Фемтостільники, встановлені в місцях з високою концентрацією абонентів (трафіку) і в приміщеннях, допомагають зменшити «тіньові» зони в покритті. Фемтостільники необхідні для поліпшення покриття мережі на перших поверхах будівель, в підвальних приміщеннях і на складах, а також для вирішення абонентських проблем, пов'язаних з перевантаженням мережі в години пік.

Можливість використовувати комбінацію з двох діапазонів (високого і низького) - запорука об'ємного покриття і забезпечення необхідної ємності в 63 місцях, де трафік особливо затребуваний. Для поліпшення покриття усередині будівель рекомендується використовувати фемтосоти. [3]

1.3 Мережева архітектура LTE

Мережева архітектура високого рівня LTE складається з наступних трьох основних компонентів:

- Устаткування користувача (UE).
- Розвинена наземна мережа радіодоступу UMTS (E-UTRAN).
- Еволюційне пакетне ядро (EPC)

Вдосконалене пакетне ядро зв'язується з мережами пакетної передачі даних в зовнішньому світі, такими як Інтернет, приватні корпоративні мережі або мультимедійна IP-підсистема. Інтерфейси між різними частинами системи позначені як Uu, S1 і SGi, як показано на рисунку 1.4:

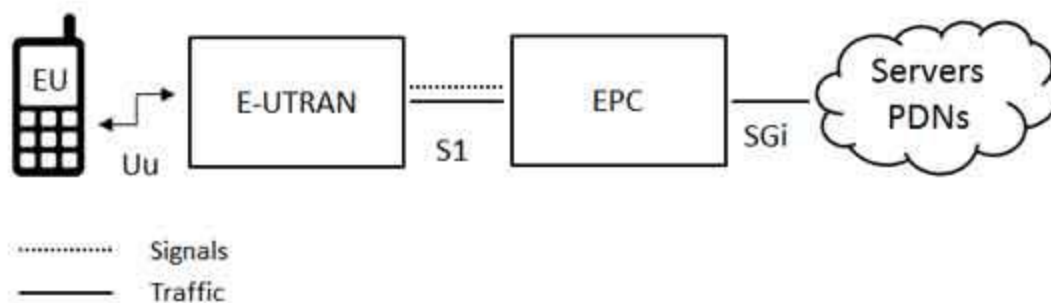


Рис.1.4. Мережева архітектура високого рівня LTE

1.3.1. Користувацьке обладнання (UE)

Внутрішня архітектура призначеного для користувача устаткування для LTE ідентична архітектурі, використовуваної UMTS і GSM, яка фактично є мобільним обладнанням (ME). Мобільне обладнання складалося з таких важливих модулів:

- Мобільне завершення (MT): обробляє всі функції зв'язку.
- Термінальне обладнання (TE): завершує потоки даних.
- Універсальна карта з інтегральною мікросхемою (UICC): вона також відома як SIM-карта для обладнання LTE. Вона запускає додаток, відомий як універсальний модуль ідентифікації абонента (USIM).

1.3.2. E-UTRAN (мережа доступу)

Архітектура розвиненої наземної мережі радіодоступу UMTS (E-UTRAN) проілюстрована на рисунку 1.5:

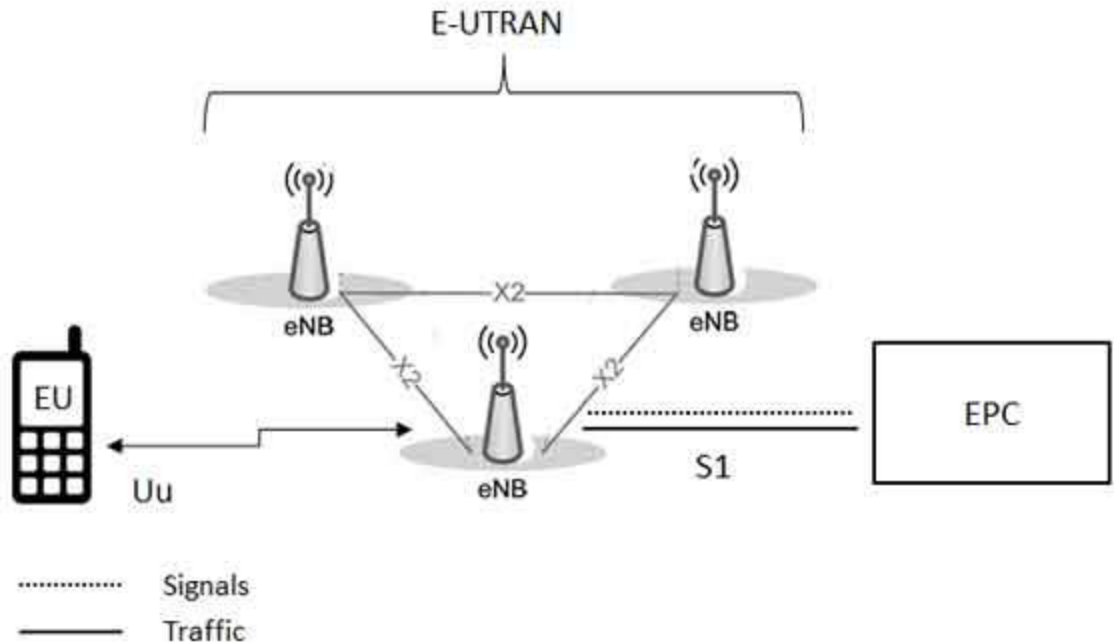


Рис.1.5. Архітектура розвиненої наземної мережі радіодоступу E-UTRAN

E-UTRAN здійснює радіозв'язок між мобільним пристроєм і розвиненим пакетним ядром і має тільки один компонент - розвинені базові станції, так звані eNodeB або eNB. Кожен eNB є базовою станцією, яка управляє мобільними телефонами в одній або декількох стільниках. Базова станція, яка обмінюється даними з мобільним пристроєм, називається його обслуговуючим eNB. LTE Mobile зв'язується тільки з однією базовою станцією і однієї сотої за раз, і eNB підтримує наступні дві основні функції:

- ENB відправляє і приймає радіопередачі на всі мобільні пристрої, використовуючи функції обробки аналогового і цифрового сигналів радіоінтерфейсу LTE.
- ENB управляє роботою на всіх своїх мобільних пристроях низького рівня, відправляючи їм сигнальні повідомлення, такі як команди передачі обслуговування.

Кожен eNB з'єднується з EPC за допомогою інтерфейсу S1, і він також може бути підключений до сусідніх базових станцій через інтерфейс X2, який в основному використовується для сигналізації та пересилання пакетів під час передачі обслуговування.

Домашній eNB (HeNB) - це базова станція, яка була придбана користувачем для забезпечення покриття фемтосот всередині будинку. Домашній eNB належить до

закритої групи абонентів (CSG) і може бути доступний тільки з мобільних телефонів з USIM, який також належить до закритої групи абонентів.

1.3.3. Evolved Packet Core (EPC) (Базова мережа)

Архітектура Evolved Packet Core (EPC) проілюстрована на рисунку 1.6.

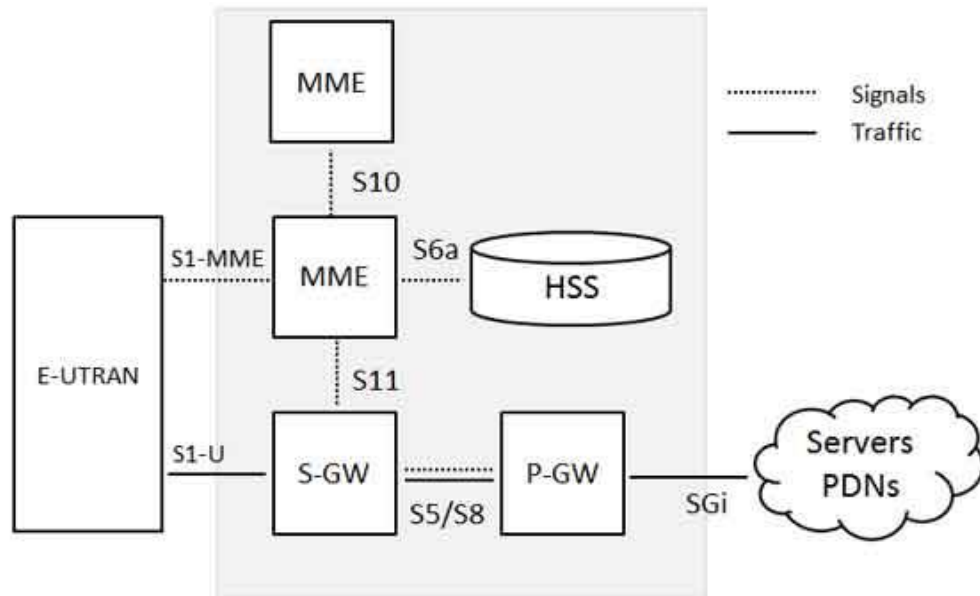


Рис.1.6. Архітектура EPC

- Компонент Домашній абонентський сервер (HSS) перенесений з UMTS і GSM і являє собою центральну базу даних, яка містить інформацію про всіх абонентів оператора мережі.
- Шлюз мережі пакетної передачі даних (PDN) (P-GW) зв'язується із зовнішнім світом, тобто з мережею пакетних даних PDN, що використовують інтерфейс SGi. Кожна мережа пакетної передачі даних ідентифікується ім'ям точки доступу (APN). Шлюз PDN виконує ту ж роль, що і вузол підтримки GPRS (GGSN) і обслуговуючий вузол підтримки GPRS (SGSN) з UMTS та GSM.
- Обслуговуючий шлюз (S-GW) діє як маршрутизатор і передає дані між базовою станцією і шлюзом PDN.
- Об'єкт управління мобільністю (MME) управляє роботою мобільного рівня високого рівня за допомогою сигнальних повідомлень та домашнього абонентського сервера (HSS). [4]

1.4. Роумінгова архітектура LTE

Мережа, керована одним оператором в одній країні, відома як наземна мобільна мережа загального користування (PLMN), і коли підписаний користувач використовує PLMN свого оператора, тоді говорять Home-PLMN, але роумінг дозволяє користувачам виходити за межі своєї домашньої мережі та використовувати ресурси з мережі іншого оператора. Ця інша мережа називається Visited-PLMN. Користувач в роумінгу підключений до E-UTRAN, MME і S-GW відвідуваною мережею LTE. Однак LTE / SAE дозволяє використовувати P-GW як гостьової, так і домашньої мережі, як показано нижче:

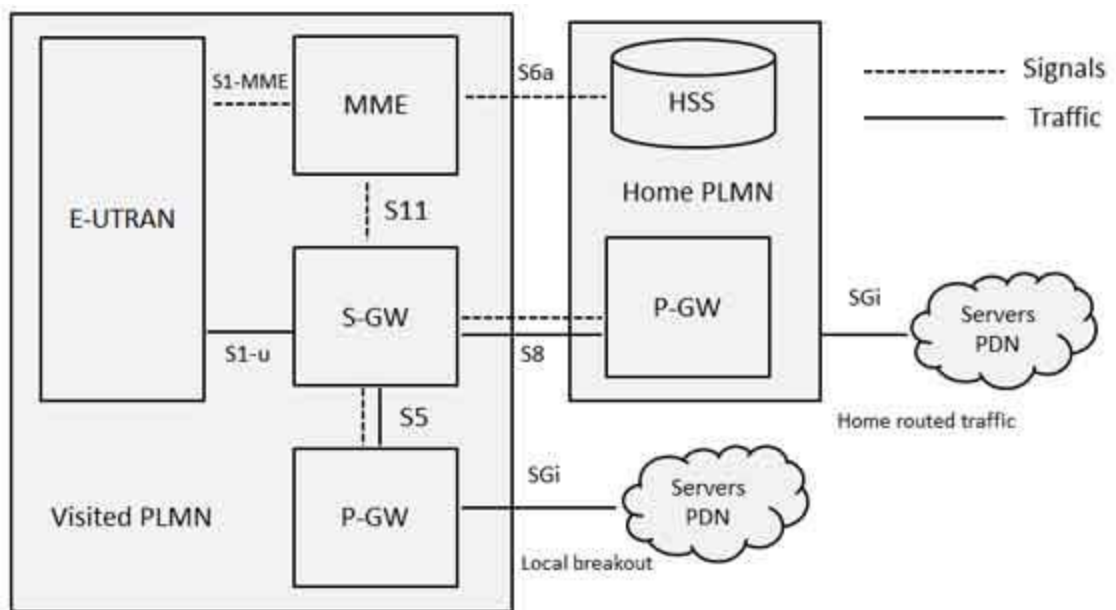


Рис.1.7. Роумінгова архітектура

P-GW домашньої мережі дозволяє користувачеві отримувати доступ до послуг домашнього оператора, навіть перебуваючи в гостьовій мережі. P-GW в відвідуваною мережі дозволяє здійснювати «локальний прорив» в Інтернет в відвідуваною мережі.

Інтерфейс між обслуговуючим і шлюзами PDN відомий як S5 / S8. Це має дві злегка відрізняючих між собою реалізацій, а саме S5, якщо два пристрої знаходяться в одній мережі, і S8, якщо вони знаходяться в різних мережах. Для мобільних телефонів, які не перебувають у роумінгу, обслуговуючий і PDN-шлюзи можуть бути інтегровані в один пристрій, так що інтерфейс S5 / S8 повністю зникає. Складнощі нових механізмів зарядки, необхідних для підтримки роумінгу 4G, набагато більш поширені, ніж в середовищі 3G. Кілька слів про передплатної і постоплатной оплаті

за роумінг LTE наведені нижче:

- **Передоплата** - стандарт CAMEL, який забезпечує передоплату в 3G, яку не підтримується в LTE; отже, передплачений інформація про клієнта повинна спрямовуватися назад в домашню мережу, а не оброблятися локальною відвідуваною мережею. В результаті оператори повинні покладатися на нові облікові потоки для доступу до передплачених даними клієнтів, наприклад, через свої Р-шлюзи в середовищах IMS і не-IMS або через свої CSCF в середовищі IMS.

- **Постоплатна зарядка** - Постоплатна зарядка за використання даних працює в LTE так само, як і в 3G, використовуючи версії TAP 3.11 або 3.12. При локальному відключенні служб IMS потрібний TAP 3.12.

Оператори не мають такої ж міри видимості дій абонентів, як в сценарії домашньої маршрутизації в разі локальних сценаріїв прориву, оскільки сеанси даних абонента зберігаються в відвідуваною мережі; тому, щоб домашній оператор міг збирати інформацію в режимі реального часу як про клієнтів з передоплатою, так і з післяплатою, він повинен встановити інтерфейс Diameter між системами нарахування плати і Р-шлюзом відвідуваною мережі.

У разі локального прориву сценарію служб ims, відвідувана мережу створює докладні записи викликів (CDR) з S-шлюзу, однак ці CDR не містять всієї інформації, необхідної для створення мобільного сеансу TAP 3.12 або обміну повідомленнями запис події для використання сервісу. В результаті оператори повинні корелювати CDR базової мережі передачі даних з CDR IMS для створення записів TAP. [5]

1.5. Переваги та недоліки 4G

Переваги LTE:

- **Висока пропускна здатність:** висока швидкість передачі даних може бути досягнута як в низхідній лінії зв'язку, так і в висхідній лінії зв'язку. Це викликає високу пропускну здатність.

- **Низька затримка:** час, необхідний для підключення до мережі, знаходиться в діапазоні декількох сотень мілісекунд, і тепер стану енергозбереження можна вводити і виходити дуже швидко.

- **FDD і TDD на одній платформі:** дуплекс з частотним поділом (FDD) і

дуплекс з тимчасовим поділом (TDD), обидві схеми можуть використовуватися на одній платформі.

- Чудова взаємодія з кінцевим користувачем: Оптимізована сигналізація для встановлення з'єднання і інших процедур радіоінтерфейсу і управління мобільністю ще більше поліпшила взаємодія з користувачем. Зменшена затримка (до 10 мс) для кращої взаємодії з користувачем.

- Безшовне з'єднання: LTE також буде підтримувати безшовне з'єднання з існуючими мережами, такими як GSM, CDMA і WCDMA.

- Підключи і грай: користувачеві не потрібно вручну встановлювати драйвери для пристрої. Замість цього система автоматично розпізнає пристрій, завантажує нові драйвери для обладнання, якщо це необхідно, і починає працювати з знову підключеним пристроєм.

- Проста архітектура: через простий архітектури низькі експлуатаційні витрати (OPEX).

Недоліки LTE:

- відсутність наступності до технології UMTS / HSPA.
- необхідність модернізації транспортної мережі оператора зв'язку, для якісного надання послуг.

1.6. LTE в Україні

Починаючи з 30 березня 2018 року на території України впроваджується 4G мережа в діапазоні 2600 МГц, а 1 липня 2018 року в діапазоні 1800 МГц. Технологію почали розвивати та використовувати оператори “Великої трійки” - Vodafone, Kyivstar, Lifecell. Станом на 13 травня 2021 року Київстар має найбільшу кількість базових станцій в Україні - 15.2 тисяч, Водафон - 11.8 тисяч, Лайфселл - 7.2 тисяч.

Тестування мереж українських операторів показало, що найвища швидкість мобільного інтернету доступна клієнтам Vodafone. Дослідження проводилося французькою компанією nPerf, одним з лідерів тестування телекомунікаційних мереж з метою оцінки швидкості і якості доступу до мережі інтернет. Дослідження засноване на даних з призначених для користувача пристроїв при замірах швидкості в додатку nPerf. Оцінка включає результати тестів швидкості завантаження і

вивантаження, затримки, веб-серфінгу і переглядів потокового відео. Лідером за швидкістю серед цієї трійки є саме “червоний оператор”: середня швидкість завантаження становить 19 Мбіт/с, швидкість вивантаження - близько 9 Мбіт/с. Vodafone також продемонстрував кращі результати перегляду веб-сторінок. Для порівняння, “блакитний” і “жовтий” оператори мають швидкість завантаження 17 Мбіт/с і 14 Мбіт/с, а вивантаження - 7.8 Мбіт/с і 8.2 Мбіт/с відповідно. Також компанія Ookla, яка володіє додатком Speedtest підвела підсумки конкурсу Speedtest Awards в Україні за 2020 рік і так само визнала Vodafone, як оператора з найбільшою швидкістю, за що й була отримана відповідна відзнака. Слід також зазначити, що мережа 4G доступна і в усіх станціях метро міста Києва станом на 2021 рік.

Висновки:

Отже, у даному розділі було розглянуто технологію LTE, аналіз архітектури, її складових. Також проведено дослідження переваг, недоліків, і стан мережі в Україні на 2021 рік. Технології мобільних мереж розвиваються в стрімкому темпі, і тому потрібна більша швидкість, пропускна здатність, загальний приріст завантаження, вивантаження і меншу затримку. Мережа LTE дала добрий результат у всіх компонентах у порівнянні з більш давніми технологіями першого, другого та третього поколінь.

РОЗДІЛ 2

ОПИС АРХІТЕКТУРИ ІНТЕГРАЦІЇ LTE-5G

2.1. Загальна інформація про технологію 5G

До відносно недавнього часу в світі існувало чотири покоління мобільного зв'язку. В даний час оператори за підтримки постачальників обладнання (вендорів) активно тестують можливості мереж п'ятого покоління. Існує, так зване, правило десяти років. Якщо зазирнути трохи в минуле, можна помітити, що кожне нове покоління мобільного зв'язку з'являлося приблизно через 10 років після появи попереднього: перше покоління з'явилося на початку 80- років, друге на початку 90-х, третє на початку 00-х, четверте в 2009 році. Також, деяка кількість успадкованої інфраструктури мереж 3G і 4G органічно увійде до складу мобільних мереж п'ятого покоління 5G. Стандарт мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) - це новий етап розвитку технологій, який покликаний розширити можливості доступу в Інтернет через мережі радіодоступу. 5G - п'яте покоління мобільного зв'язку, що діє на основі стандартів телекомунікацій (5G / IMT-2020), наступних за існуючими стандартами 4G / IMT-Advanced . Телекомунікаційний стандарт зв'язку нового покоління.

2.2. Стандартизація, архітектура та швидкість технології 5G

2.2.1. Стандарти 5G

Основні стандартизуючі організації 5G:

3GPP (3rd Generation Partnership Project) - альянс з семи організацій, які розробляють різні стандарти телекомунікацій, в які, в свою чергу входять інші партнери. Завдання 3GPP - формулювання технічних вимог, оцінка пропозицій, і остаточне прийняття стандартів. В середині 2017 року була ухвалена версія загального стандарту Release 15, в даний час розробляється Release 16, яка прийнята в 2019 г. Крім розробки загальної архітектури, 3GPP також розробляє стандарти радіо-технологій 5G New Radio (NR) для нових частотних діапазонів, що виділяються під 5G.

ETSI (European Telecommunication Standard Institute), Європейський інститут телекомунікаційних стандартів, який є членом 3GPP, і найбільш активно працює в

області розробки стандартів 5G.

IETF (Internet Engineering Task Force) розробляє рішення модернізації IP-протоколу для підтримки віртуалізації втратити зв'язок із мережею NFV (Network Function Virtualization). Наприклад, IETF розробила технологію зчипки функцій сервісів SFC (Service Function Chaining), яка комбінує віртуалізовані компоненти архітектури 5G, наприклад, базові станції, шлюзи послуг та пакетів даних в єдиному маршруті. Це дозволяє динамічне створення і зчеплення віртуальних мережевих функцій VNF (Virtual Network Functions). IETF працює в тісній взаємодії з 3GPP.

ITU (International Telecommunication Union) - агентство ООН, розташоване в Женеві, яке займається стандартизацією широкого спектра телекомунікаційних технологій. Зокрема, воно координує роботу по спільному використанню спектру радіочастот, в т.ч. для мереж 5G.

Крім цих трьох основних координуючих організацій, є ряд інших, в яких ведеться планомірна практична робота з розробки стандартів IMT2020 (5G).

5GPPP (5G Infrastructure Public Private Partnership), вважається одним з провідних партнерств по стандартизації 5G. Організація ставить амбітні цілі щодо розробки вимог до мережі 5G, наприклад, захоплення ємності мережі в 1000 разів, зниження енергоспоживання призначених для користувача пристроїв на 90%, істотне скорочення часу створення нових сервісів і послуг, повне і безпечне мережеве покриття і з пренебрежимо малою затримкою передачі даних, та ін.

NGMN (Next Generation Mobile Networks) Alliance. Альянс мобільних мереж наступного покоління займається стандартизацією повного спектру рішень 5G. У альянс входить керівництво провідних американських операторів: AT&T, U.S. Cellular і Verizon.

Крім зазначених, існують галузеві та регіональні організації, такі як 5G Americas, Small Cell Forum, які також вносять великий внесок в розробку і стандартизацію рішень 5G. Великий внесок у розробку стандартів вносять також і великі оператори зв'язку, такі як AT & T, Verizon і ін. Вони координують свою роботу з ETSI і ITU, але іноді випереджають ці організації. Тому вирішення цих операторів часто лягають в основу стандартів ETSI і ITU. [7]

2.2.2. Архітектура мережі 5G

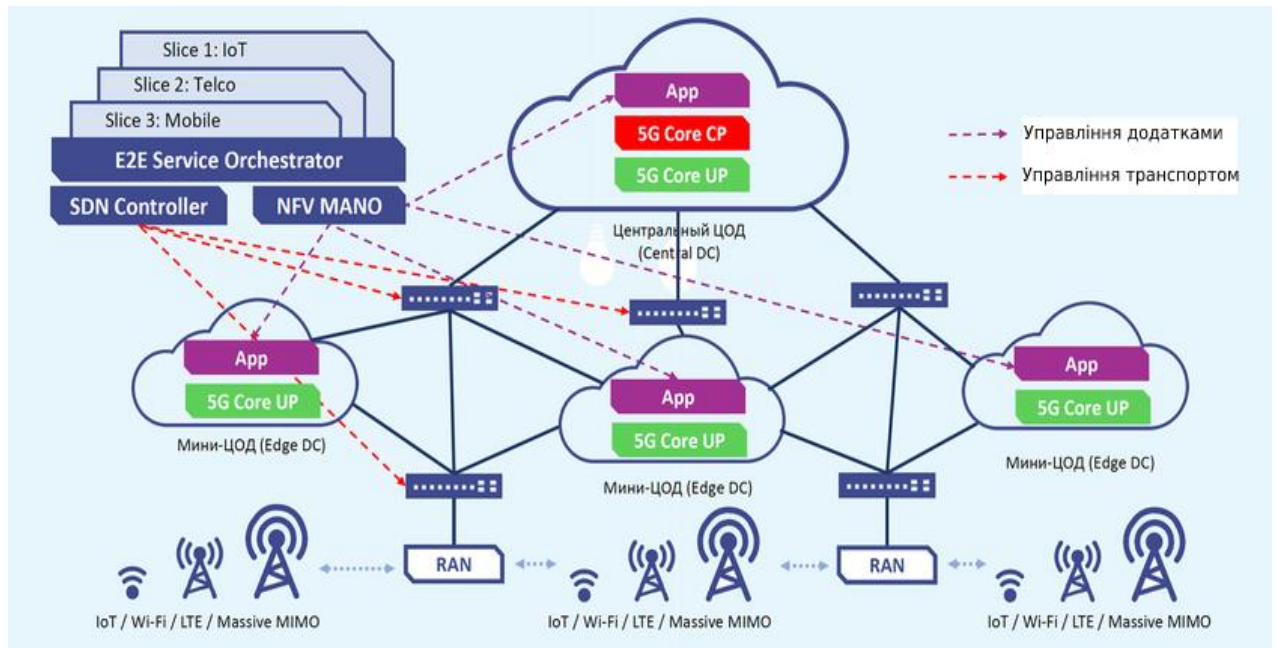


Рис.2.1. Загальна архітектура мережі 5G.

Телекомунікаційними технологіями, включаючи RAN, базові транспортні мережі і можливості служб, займається організація 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Нею підготовлені повні системні специфікації для архітектури мережі 5G, яка в значно більшою мірою орієнтована на надання послуг, ніж попередні покоління 3GPP.

Так, послуги надаються на базі загального механізму тим мережним функціям, яким дозволено ними користуватися. Додатковими якостями мережевої архітектури 5G, які описані в специфікаціях 3GPP, є модульність, повторне використання та автономність втратити зв'язок із мережею.

2.2.3. Швидкість 5G

Значне збільшення пропускної спроможності і практичної швидкості передачі даних потребують значного розширення і підвищення ефективності використання спектра, а також вкрай високої щільності підключень, що недосяжно для стандартів LTE / LTE-A навіть при їх удосконаленні. Так, реалізація мереж п'ятого покоління, особливо підвищення швидкостей передачі даних, потребують суттєвого збільшення частотного ресурсу. Одним з рішень цієї проблеми є рефармінг частот - процедура

заміни використовуваної радіотехнології на виділених оператору зв'язку радіочастотах. Наприклад, за погодженням з регулятором, запуск eNodeB LTE на частотах, виділених оператору під 2G або 3G радіомережі. Для надшвидкісних послуг 5G цього спектру буде недостатньо, необхідний новий спектр в діапазонах вище 6 ГГц. Так, на Всесвітній радіоконференції в 2019 році (WRC-19) було виділено додаткові частотні діапазони вище 6 ГГц для мобільного зв'язку. Мережам мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) властиві високі швидкості (до 20 Гбіт / с по лінії «вниз» і до 10 Гбіт / с по лінії «вгору»).

Також очікується зростання реальної швидкості на одного абонента до 100 Мбіт / с і більше. Перераховані вище значення збільшення швидкості досягаються за рахунок підвищення спектральної ефективності мереж 5G в декілька разів у порівнянні з мережами четвертого покоління. Це в свою чергу стало доступним за рахунок застосування таких технічних рішень: Massive MIMO, використання нової версії радіоінтерфейсу New Radio, більш широка смуга частот.

2.3. Особливості архітектури опорної мережі (Core Network) 5G

Особливість архітектури мережі 5G полягає в тому, що традиційне поняття «архітектура мережі», заснованої на апаратних рішеннях, в мережі 5G втрачає актуальність. Тому 5G частіше називають не мережею, а системою, або «платформою», під якою мається на увазі платформа програмна, а не апаратна. Якщо мережі 1/2/3 / 4G будувалися на базі апаратних рішень (обладнання), то платформа 5G будується на базі програмних рішень, зокрема, програмно-конфігуруючих мереж SDN (Software Defined Network), а також віртуалізації мережевих функцій NFV (Network Function Virtualization).

Функції 5G реалізуються в віртуальних програмних функціях VNF (Virtual Network Function), які працюють в інфраструктурі NFV. Різниця між цими схожими за звучанням поняттями полягає в тому, що VNF - це функція, а NFV - це технологія. У свою чергу, NFV реалізується у фізичній інфраструктурі дата-центрів (data center, DC, центр обробки даних, ЦОД), на базі стандартного комерційного обладнання COTS (Commercial Off The Shelf). Устаткування COTS включає лише три види стандартних, щодо недорогих пристроїв - сервер (обчислювальний пристрій),

комутатор (мережевий пристрій) і система зберігання даних (пристрій зберігання).



Рис.2.2. Перехід до віртуальних платформ SDN/NFV в 5G

Таким чином, обладнання традиційних мереж мобільного зв'язку замінюється на програмні сутності, працюють в дата-центрах на стандартних серверах і віртуальних машинах VM (virtual machines).

Для реалізації програмних функцій, крім віртуальних машин, також будуть використовуватися програмні контейнери (containers), а також програмна архітектура мікросервісів (microservice).

Розподілена архітектура мережі мобільного доступу D-RAN (Distributed RAN) в мережах 4G поступово еволюціонує до централізованої архітектурі C-RAN (Centralized RAN).

В архітектурі 5G функції опорної мережі реалізуються в центральному хмарі Central Cloud (Cloud RAN), на віртуальних машинах VM. Важливу роль у розвитку мереж 5G гратимуть також граничне хмара (Edge Cloud), зокрема, технологія MEC (Mobile Edge Cloud), а також «листочуменне» (Fog Cloud).

Віртуалізація мережі на базі NFV / SDN необхідна також для дуже корисної функції 5G: логічної мережевої нарізки (Network Slicing). Технологія Network Slicing дозволяє на базі єдиного обсягу (пулу) мережевих ресурсів виробляти логічний поділ мереж для різних типів послуг 5G, яким потрібні різні технології радіодоступу RAT (Radio Access Technology), з різними характеристиками середовищ передачі даних.

Це, грубо кажучи, нарізка мережевих ресурсів під різні типи трафіку, причому для кожного Слайса (буквально - шматка мережі) може використовуватися своя технологія передачі даних. Завдяки гнучкості підходу можна задовольнити найрізноманітніші і навіть суперечливі вимоги користувачів різних типів. Для передачі веб-даних цілком підходить LTE - його потрібно тільки трохи доопрацювати, підвищити швидкість.

Для передачі даних з маленькою затримкою буде використовуватися спеціальний слайс, який називається ultra-reliable low latency communication. Він дозволяє передавати дані з вкрай низькою затримкою. Якщо в LTE мінімальна тривалість передачі одна мілісекунда, то тут мінімальна тривалість передачі триватиме частки мілісекунди, а надійність буде дуже високою, до 99,9%.

Окремий слайс в рамках 5G відведено IoT. Він дозволяє передавати дані великим числом пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Крім того, буде слайс для високошвидкісної передачі даних в міліметровому діапазоні, тобто в діапазоні частот від 30 до 300 ГГц. Наприклад, в звичному діапазоні 2-5 ГГц ширина використовуваного частотного каналу, в якому передаються дані, відносно невелика і складає одиниці, рідше - десятки МГц. У діапазоні 40-70 ГГц доступного для використання спектра істотно більше, що дозволить збільшити ширину частотного каналу до сотень і тисяч МГц і більше. Таким чином, міліметровий діапазон - це практично «еквівалент нескінченності» для операторів (в сенсі обсягу доступних каналних ресурсів). Проблема полягає в тому, що доводиться передавати дані тільки пристроїв, які знаходяться в прямій зоні видимості, інакше якість сигналу різко падає.[7]

У певному сенсі 5G стане «лишковим пирогом», що поєднує різні технології, використання кожної з яких буде визначатися в залежності від вимог конкретного користувача.

2.4. Технології 5G New Radio (5G NR)

У зв'язку з високими вимогами, що пред'являються до нового стандарту мобільного зв'язку 5G, були розроблені зовсім новий радіоінтерфейс і мережу радіодоступу. Новий радіоінтерфейс, який отримав назву 5G New Radio або 5G NR,

задовольняє зростаючі потреби у мобільному зв'язку.

Розробка 5G NR або 5G New Radio є ключем до забезпечення роботи системи мобільного зв'язку 5G і забезпечує ряд істотних переваг в порівнянні з 4G.

5G NR був розроблений з нуля з урахуванням вимог і з урахуванням кращих технологій і методів.

5G NR використовує модуляцію, форми сигналів і технології доступу, які дозволять системі задовольнити потреби, серед іншого, послуг з високою швидкістю передачі даних, тих, кому потрібна низька затримка, а також тих, кому потрібна невелика швидкість передачі даних і тривалий час автономної роботи.[8]

Нове радіо 5G здатне забезпечити зв'язок для дуже високої смуги частот з передачею потокового відео, а також зв'язок з малою затримкою для зв'язку з дистанційним управлінням транспортним засобом, а також зв'язок з низькою швидкістю передачі даних з низькою пропускнуою здатністю для зв'язку машинного типу. У нового радіо, використовуваного для 5G, є кілька особливостей:

- Новий радіочастотний спектр: використання мобільного зв'язку стрімко зростає, а ця технологія підтримує набагато більше додатків. Незважаючи на те, що ефективність використання спектра буде поліпшена, технологія не зможе задовольнити величезний потік зростання використання, тому потрібно більше спектра.

Є також перевага більш високих частотних діапазонів, яка полягає в тому, що вони набагато ширше, і вони можуть забезпечувати набагато ширші смуги пропускання сигналу і, отже, підтримувати набагато вищу швидкість передачі даних. Недоліком в деяких аспектах є те, що вони будуть мати набагато більш короткий діапазон, але це також є перевагою, оскільки це також дозволяє багаторазово використовувати набагато більшу частоту.

- Оптимізований OFDM: ще на ранньому етапі було прийнято рішення використовувати форму OFDM як форми хвилі для першої фази 5G New Radio. Він дуже успішно використовувався з 4G, новітніми стандартами Wi-Fi і багатьма іншими системами і виявився оптимальним типом форми сигналу для безлічі різних додатків для 5G. Завдяки додатковій обчислювальній потужності, доступною для 5G, можна

застосовувати різні форми оптимізації. Конкретною версією OFDM, використовуваної в низхідній лінії зв'язку 5G NR, є циклічний префікс OFDM, CP-OFDM, і це та ж форма хвилі, яку LTE прийняв для сигналу в низхідній лінії зв'язку.

- Beamforming (формування променів): Beamforming - це технологія, яка стала реальністю в останні роки і пропонує ряд істотних переваг для 5G. Формування променя дозволяє направити промінь від базової станції до мобільного телефону. Таким чином, оптимальний сигнал може бути як переданий на мобільний телефон, так і отриманий від нього, а також усунені перешкоди іншим мобільним пристроям.

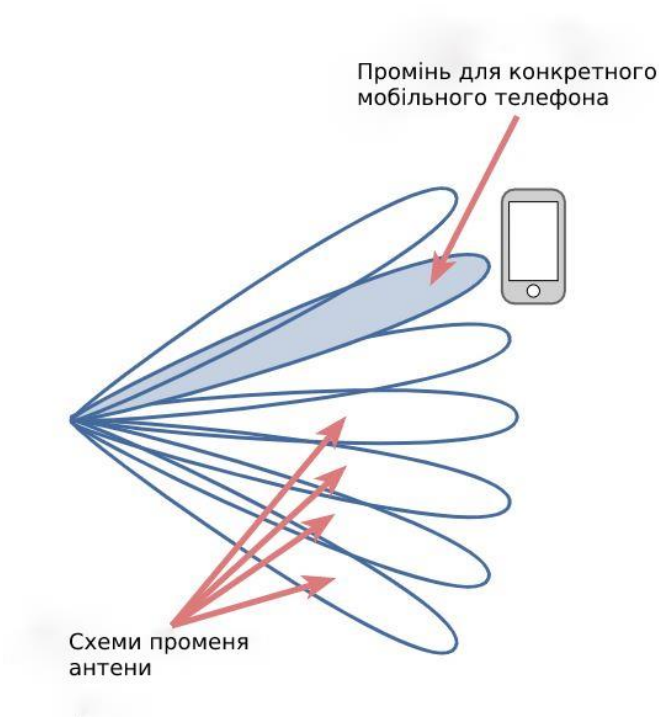


Рис.2.2. Концепція формування діаграми спрямованості антени, яка використовується з 5G NR

Перехід на більш високі частоти дозволяє використовувати антени набагато меншого розміру і можливість програмування високих рівнів спрямованості. На частотах вище 24 ГГц, де антени менше, є можливість мати високопродуктивні променеуправляючі антени, які можуть точно направляти потужність на даний мобільний телефон, а також забезпечувати посилення приймача в цьому напрямку.

- MIMO: MIMO, кілька входів і виходів використовувалися в багатьох бездротових системах від Wi-Fi до поточної стільникової системи 4G, і це забезпечує

деякі значні поліпшення. В рамках 5G MIMO стане однією з основних технологій. 5G буде в повній мірі використовувати переваги багатокористувацької MIMO, MU-MIMO, де вона буде надавати можливості множинного доступу до MIMO за рахунок використання розподіленого просторового розташування різних користувачів.

При реалізації цього gNB (базова станція 5G) відправляє CSI-RS (опорний сигнал інформації про стан каналу) на різне обладнання користувача, а потім в залежності від відповідей gNB обчислює просторову інформацію для кожного користувача. Він використовує цю інформацію для обчислення необхідної інформації для матриці попереднього кодування (W-Matrix), де символи даних конструюються в сигнали для кожного з елементів антеною решітки gNB.

Множинні потоки даних мають свої власні ваги, які включають фазові зрушення для кожного потоку, щоб форми сигналів конструктивно заважали приймача. Це максимізує потужність сигналу для користувача, а також мінімізує сигнал і, отже, перешкоди для інших користувачів.

Таким чином, gNB може спілкуватися з декількома пристроями одночасно і незалежно, використовуючи просторову інформацію. Це означає, що 5G MU-MIMO дозволяє UE працювати без необхідності знання каналу або додаткової обробки для отримання потоків даних.

MU-MIMO на низхідному каналі значно збільшує пропускну здатність антен gNB. Він масштабується з урахуванням мінімальної кількості антен gNB і суми кількості призначених для користувача пристроїв, помноженого на кількість антен на один пристрій UE. Це означає, що з використанням 5G MU-MIMO система може досягти збільшення пропускну здатності, використовуючи антенні решітки gNB і набагато простіші пристрої UE.

- Метод спільного використання спектра: велика частина радіочастотного спектру, хоча і розподілена, використовується неефективно. Один із запропонованих методів - спільне використання спектра.

- Малі соти: оскільки потрібно ущільнення мережі для забезпечення необхідних можливостей передачі даних, пропонується більш широке використання малих сот і мереж малих сот. Мережа малих сот - це група передавальних базових

станцій з низьким енергоспоживанням, які використовують міліметрові хвилі для збільшення загальної пропускної здатності мережі. Мережа малих сот 5G працює шляхом координації групи малих сот для розподілу навантаження і зменшення складності фізичних перешкод, які стають більш важливими на міліметрових хвилях.

2.4.1. Структура сигналів 5G NR

Почати слід з того, що CP-OFDM є рішенням для низхідного і висхідного каналу зв'язку. Тож, висхідним каналом називається канал або лінія передачі від користувача до базової станції, а низхідним - від базової станції до користувача. Ці канали, а саме використовувані для них види або підвиди модуляції, можуть бути однаковими або різними, що направлено в першу чергу на підвищення щільності каналів і на ефективність зв'язку. Під останнім визначенням ми розуміємо і енергоефективність, і зменшення числа бітових помилок.

В останні роки дослідники, що працюють в області бездротового зв'язку, вивчали різні форми сигналів з декількома несучими, пропонуючи безліч варіантів для радіодоступу 5G. Так, сигнали, які використовують мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), добре підходять для дуплексної роботи з тимчасовим поділом. Вони підтримують програми, чутливі до затримок, і вже продемонстрували успішну комерційну реалізацію з ефективним опрацюванням сигналів із все більш широкою смугою пропускання. Крім того, висока спектральна ефективність і сумісність сигналів OFDM з MIMO допомагають задовольнити потреби цього нового глобального стандарту стільникового зв'язку в частині екстремальних швидкостей передачі даних і щільності каналів.

Завдяки методам оцінки і вирівнювання сигнальних каналів сигнали OFDM демонструють високу стійкість в частотно-виборчих радіоканалах. Однак, як правило, в каналі присутня тимчасова дисперсія: частини переданого сигналу приймаються з різними затримками через багатопромінність поширення і відображень. В результаті ортогональність вибірково втрачається, з'являється інтерференція як між бітами всередині символу, так і між символами. Для запобігання перекриття в початок OFDM-символу вставляється циклічний префікс, що містить

кінцеві біти попереднього символу. Прикріпивши копію кінця символу OFDM до початку символу (це і є циклічний префікс), приймач може краще обробляти помилки синхронізації і запобігати міжсимвольні перешкоди.

DFT-S-OFDM є рішенням з більш високою ефективністю саме для висхідного каналу зв'язку. Сигнали OFDM володіють однією негативною рисою - високим значенням відношення пікового рівня потужності сигналу до середнього рівня (peak-to-average power ratios, PAPR). Оскільки підсилювач потужності високої частоти (УМ) в мобільному пристрої споживає найбільшу кількість енергії, розробники системи хотіли б отримати структуру сигналу, що підтримує високоефективний режим роботи УМ-передавача при одночасному задоволенні спектральних вимог 5G. Для висхідного каналу зв'язку (а це лінія від користувача до базової станції) технологія 5G NR пропонує для користувача устаткування (User Equipment, UE - буквально «призначене для користувача устаткування», має на увазі не тільки мобільні, але і стаціонарні пристрої) можливість використання CP-OFDM-модуляції або форми сигналу гібридного формату, званого OFDM з дискретним перетворенням Фур'є (Fourier transform spread OFDM, DFT-S-OFDM). Використовуючи технологію DFT-S-OFDM, передавач модулює всі піднесучі однаковими даними (рисунок 2.3). Це знижує відношення пікового значення до середнього, зберігаючи стійкість до ефектів багатолучевості, і забезпечує гнучкий розподіл частот піднесе OFDM. У тих випадках, коли PAPR з CP-OFDM може становити 11-13 дБ, для вирішення на основі DFT-S-OFDM споживання варіюється в межах 6-9 дБ.[9]

На рисунку 2.3. показано порівняння діаграм OFDM та DFT-S-OFDM, що дасть змогу побачити залежності в обох технологіях, а також порівняння основних характеристик.

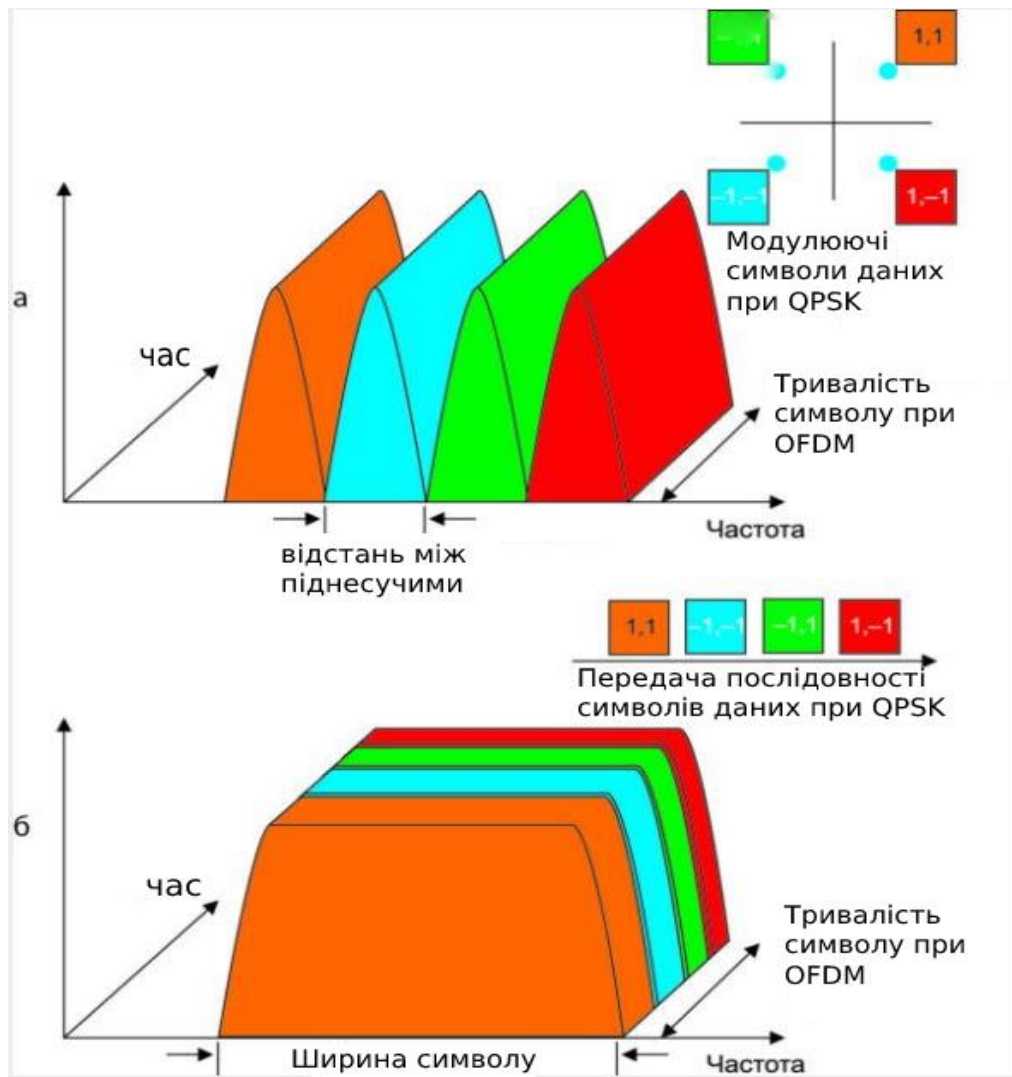


Рис. 2.3. Порівняння часової та частотної діаграм технологій: а) OFDM; б) DFT-S-OFDM

2.4.2. Гнучке положення піднесучих

Робота в кількох смугах частот - від уже існуючих смуг стільникового зв'язку, що лежать нижче частоти 3 ГГц, до більш широких смуг в області 3-5 ГГц і до діапазону міліметрових хвиль - є новим аспектом 5G NR. При збільшенні частоти несучої зростає не тільки кількість обслуговуваних каналів і швидкість передачі даних[10], але і фазовий шум системи. Наприклад, різниця в фазовому шумі між несучими на частотах 1 і 28 ГГц складає близько 20 дБ. Для приймача міліметрових хвиль з вузьким фіксованим рознесенням піднесучих (subcarrier spacing, SCS) і тривалістю символу, прийнятого для LTE, таке збільшення ускладнює демодуляцію сигналу OFDM. Крім того, у переміщених користувачів, із-за доплерівського зсуву, часовий параметр по когерентності каналу в міру підвищення несучої частоти

зменшується, а це означає, що у системи на більш високих несучих частотах менше часу для вимірювання каналу і завершення передачі в одному слоті. Використання вузької відстані між піднесучими в міліметровому діапазоні призводить до неприпустимо великих значень вектора помилок зі значним погіршенням продуктивності. Тому тут, на відміну від систем LTE, використовують змінний коефіцієнт рознесення піднесучих або так звану масштабируемую нумерологію (scalable numerology).

Отже, щоб уникнути вищеописаної ситуації, в технології 5G NR, на відміну від мереж LTE, де передбачено єдиний спектральний розподіл піднесучих, застосовуються OFDM-сигнали з піднесучими з варійованим рознесенням - 15 (відповідає мереж LTE), 30, 60, 120 і 240 кГц [11]. Використання в технології стільникового зв'язку масштабованої нумерології відкриває широкі можливості для гнучкого налаштування мережі при наданні тих чи інших послуг, наприклад для додатків, критичних до рівня затримок (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLCC - надання високонадійного з'єднання з дуже низькою затримкою передачі даних) . Тут доречно використовувати поднесущие з широким спектром при меншій тривалості символу, і навпаки, при передачі трафіку для широкосмугового доступу в Інтернет і низької трафіку «Інтернету речей» - використовувати «вузькі» спектральні моделі піднесучих.

Для вирішення описаних вище проблем консорціум розробників специфікації для мобільної телефонії 3GPP стандартизував змінний коефіцієнт рознесення піднесучих, який варіює зазор в спектрі між ортогональними піднесучими, починаючи з інтервалу 15 кГц, призначеного для LTE, і закінчуючи інтервалом 30, 60 або 120 кГц для діапазону міліметрових хвиль. Застосування нумерології LTE гарантує, що розгортання 5G NR буде мирно співіснувати і узгоджуватися з тимчасовим форматом з мережами LTE.

2.4.3. mMIMO для 5G

Технологія, яка отримала назву Massive MIMO (mMIMO), відноситься до сценарію зв'язку, коли число призначених для користувача терміналів набагато менше, ніж кількість антен базової станції. Велика різниця між антенами gNB і UE

може дати величезний виграш в спектральній ефективності, дозволяючи системі зв'язку одночасно обслуговувати набагато більше пристроїв в тій же смузі частот, ніж сучасні системи 4G (рисунок 2.4).

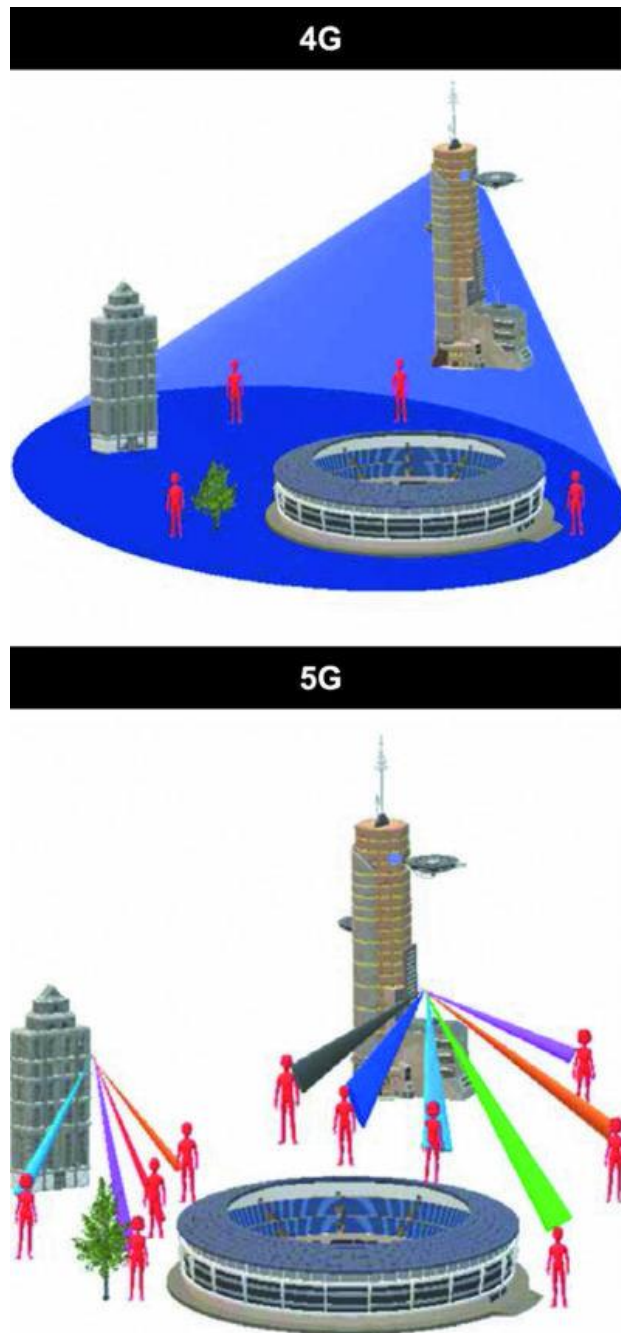


Рис.2.4. Просторове мультиплексування з mMIMO збільшує ємність gNB

2.4.4. Міліметрові хвилі та часткове використання смуги в NR

Системи 5G, що працюють на частотах 28 ГГц або в інших діапазонах міліметрових хвиль, мають перевагу в частині більш доступного спектра, що дозволяє задіяти більшу кількість каналів. Перевага цього діапазону в тому, що його спектр

менш завантажений, ніж спектр на частотах нижче 6 ГГц. Але системи зв'язку, що використовують діапазон міліметрових хвиль, будуть стикатися з цілим рядом різних ефектів, викликаних особливостями їх поширення. Тут мають місце і більш високі втрати у вільному просторі, і атмосферне затухання, і слабе проникнення в приміщення, і недостатня дифракція від навколишніх об'єктів. Щоб подолати ці небажані ефекти, антенні решітки міліметрового діапазону [10] фокусують свої промені і таким чином використовують додаткове посилення. На щастя, зі збільшенням частоти розмір таких решіток зменшується, що дозволяє багатoelementних антен даного діапазону мати приблизно такий же розмір, що і у одного елемента на частотах менше 6 ГГц.

На частотах міліметрових хвиль період когерентності каналу значно зменшується, що накладає жорсткі обмеження на рухливі мобільні додатки. Оскільки фахівці продовжують досліджувати нові способи поліпшення мобільності в міліметровому діапазоні, перші розгортання 5G на цих частотах, найімовірніше, будуть обслуговувати додатки фіксованого бездротового доступу, такі як домашній широкосмуговий доступ, транзитне сполучення і пряме з'єднання між абонентськими пристроями, в обхід маршрутизатора. Проте, якість і надійність безпосередньо самої передачі в мережі 5G на міліметрових хвилях були продемонстровані в мобільній мережі в тестових системах під час Олімпійських ігор в Сеулі і на швидкостях вище 200 км / ч на гоночній трасі, тому структура кадру 5G визнана придатною для перемикачів в умовах навіть екстремального доплерівського зсуву. Поточні зусилля 3GPP пов'язані з вимогами до швидкості передачі даних до 10-20 Гбіт / с і підтримкою високої мобільності до 500 км / год (сьогодні нумерологія Release 15 підтримує швидкості до 100 км / год, в той час як більш високі значення, що відповідають вимогам до використанню eMBB, будуть вказані в Release 16).

Часткове використання полоси. У міру зростання числа додатків 5G різноманітні пристрої й устаткування повинні будуть успішно працювати в багатьох діапазонах з різною доступністю спектра. Одним із прикладів є ситуація, коли устаткування користувача з обмеженою смугою радіочастот функціонує поруч з більш потужним пристроєм, здатним заповнити весь канал, використовуючи

агрегацію несучих, і третім пристроєм, який може одним каналом даних зайняти весь радіочастотний канал.

Хоча широка смуга пропускання забезпечує більш високу швидкість передачі даних для користувачів, вона пов'язана з певними витратами. Якщо для обладнання користувача не потрібна висока швидкість передачі даних, то застосування більш широкої смуги пропускання, ніж потрібно, стає неефективним витрачанням ресурсів обробки як сигналу на несучої, так і після його перенесення в модуляційну область частот.

Для того щоб уникнути зазначеної неефективності, технологія 5G NR представляє концепцію часткового використання смуги каналу BWP (BWP, bandwidth parts - частина смуги пропускання). Відповідно до цієї концепції мережа погоджує для певного обладнання (або користувача) можливість зайняти виділену широкосмуговий несучу, окремо конфігуруємо інше обладнання на використання скороченою вибірки суміжних ресурсних блоків. Це дозволяє численним пристроям з різними можливостями використовувати одну і ту ж широкосмуговий несучу. Така гнучка робота мережі, яка враховує різні вимоги до радіоресурс і можливості обладнання користувача, неможлива в LTE.

2.5. Мета створення та призначення мереж 5G

Мережі мобільного зв'язку попередніх поколінь мали такі призначення і функціонал:

1G: Послуги передачі мови по аналоговій мережі.

2G: Послуги передачі мови по цифровій мережі, низькошвидкісні послуги передачі даних (GPRS, EDGE).

3G: Високошвидкісні послуги передачі даних (HSPA), з можливістю передачі голосу по мережі IP, мобільний доступ до інтернет MBW (Mobile Broadband).

4G: Мобільний широкосмуговий доступ MBW на базі LTE, LTE-A, передача голосу (VoLTE).

Мережі 5G значно розширюють обмежений функціонал мобільних мереж попередніх поколінь. Основними функціональними особливостями мереж 5G є наступні: вдосконалений мобільний широкосмуговий доступ eMBW (enhanced MBW),

наднадійні комунікації з низькою затримкою ULLRC (Ultra Low Latency Reliable Communication), масивні межмашинні комунікації Massive IoT / ПоТ, mMTC (massive Machine Type Communication). На основі цих трьох генералізованих видів функціоналу будується все різноманіття послуг і можливостей мереж 5G.

- Гігабайти в секунду. Мережі 5G здатні значно підвищити швидкість передачі даних через різні технології радіодоступу (RAT), і за допомогою залучення нових спектрів радіочастот 5G NR (New Radio). Користувач отримує практично необмежену смугу пропускання, як для домашнього використання різних сервісів, так і для цілей підприємств (Immersive Telepresence, Industrial IoT та ін.)

- Розумний будинок. Цілий спектр різних сервісів інтернету речей (IoT) буде доступний для вирішення «Розумний будинок» (Smart Home) і «Розумне будівля» (Smart Building): відеоспостереження, управління та автоматизація побутової техніки, управління системами безпеки, сховища контенту, климатика тощо.

- Розумне місто. Рішення «Розумне місто» - це горизонтальне і вертикальне масштабування функціоналу і спектра сервісів «Розумного будинку». Основні сервіси «Розумного міста»: Безпечне місто, електронний уряд e-Government, електронна охорона здоров'я e-Health, електронна освіта e-Education, електронний банкінг e-Bank, електронний збір свідчень ЖКГ Smart Meters, «розумні електромережі» Smart Grid, тощо.

- Робота в хмарі. Сервіс дає можливість не тільки зберігати дані в хмарному сховищі і витягувати їх звідти, а й використовувати прикладні програми, які працюють безпосередньо з хмари. Причому, з можливістю їх використання на будь-якому пристрої і з будь-якого місця. Крім того, є можливість використання інтерфейсів прикладного програмування API, через які хмарні сервіс-провайдери можуть надавати свої послуги абонентам оператора мережі 5G.

- Доповнена і віртуальна реальність (AR / VR). Сервіс віртуальної реальності VR (Virtual Reality) занурює людини в інший світ, впливаючи на його органи чуття, перш за все зір (VR-окуляри). Сервіс доповненої реальності AR (Augmented Reality) комбінує для користувача реальну середу з віртуальними предметами. Ці сервіси придатні не тільки для розваги, ігор, віртуального спілкування в режимі

«телеприсутності», але також можуть істотно поліпшити процес навчання, коли студенти за допомогою VR-окулярів можуть, наприклад, наочно бачити внутрішню будову людини на лекції з анатомії, майстер в цеху може вивчити порядок складання складного агрегату тощо.

- Промислова автоматизація. Мережа 5G, укупі з технологією інтернету речей IoT, за допомогою промислових датчиків IIoT (Industrial Internet of things), а також за допомогою штучного інтелекту II (AI, Artificial Intelligence) здатні істотно підвищити ступінь автоматизації виробництва. При цьому стає можливим в режимі реального часу аналізувати великі обсяги різномірних даних (Big Data) і на основі отриманих висновків (insights) і з використанням машинного і глибокого навчання (Machine learning, Deep learning).

- Бізнес-критичні додатки (Mission Critical Applications). До цих програм можуть ставитися, наприклад, електронна медицина (e-Health), зв'язок при надзвичайних ситуаціях (Mission Critical Communication), тактильний інтернет (Tactile Internet) та інші.

- Безпілотний транспорт (Driverless Vehicles). Безпілотний транспорт може виступати як частина послуги «Розумне місто», однак, може надаватися на власній платформі. У нього входять не тільки безпілотні автомобілі (driverless cars), але також і безпілотні трактори для «розумного сільського господарства» (Smart Agriculture), безпілотні поїзда для метро і приміських залізниць, дрони і інші види громадського і спеціального транспорту. Крім того, на платформі 5G можлива реалізація систем допомоги водієві ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems).

Слід підкреслити, що вище показані лише деякі послуги та рішення платформи 5G. На відміну від мереж попередніх поколінь, спектр послуг яких був жорстко обмежений і дещо розширено в 4G, послуги платформи 5G носять синергетичний і масштабований характер, і не обмежені одного разу заданим функціоналом. Фактично, 5G грає роль платформи для режиму розробки нових послуг і додатків DevOps, коли нові функції створюються розробниками (Development) в тісній координації з командами, які відповідають за їх впровадження і експлуатацію (Operation).

В цілому, можна сказати, що мережа 5G вбирає в себе не тільки мобільні, але також і фіксовані послуги зв'язку, а також високошвидкісний доступ в інтернет з малою затримкою, і, крім того, спеціалізовані та корпоративні мережі для вертикальних галузей економіки.

2.6. Порівняння основних характеристик LTE та 5G

Таблиця 2.1

Порівняння LTE та 5G

	LTE	5G
Затримка (пінг)	10 мілісекунд	<1 мілісекунд
Трафік даних	7.2 ексабайт/місяць	50 ексабайт/місяць
Пікова швидкість передачі даних	1 гігабайт в секунду	20 гігабайт в секунду
Доступний спектр	3 ГГц	30 ГГц
Щільність з'єднання	100 тисяч з'єднань на квадратний кілометр	1 мільйон з'єднань на квадратний кілометр

2.7. Інтеграція архітектур мереж LTE-5G.

2.7.1. Режими розгортання 5G.

Технологія 5G має два режими розгортання: Non-Stand-Alone (NSA) та Stand-Alone (SA). NR 5G в першу чергу підключається до існуючих мереж 4G EPC, надаючи кінцевим користувачам і машинам нові можливості 5G в бездротовому середовищі. У провідній же мережі продуктивність залишається на рівні 4G. Ця конфігурація називається 5G Non-Standard-Alone (NSA), і саме її сьогодні використовує більшість кінцевих користувачів 5G. Фактично ця конфігурація реалізує 5G лише частково. Проте, це прекрасний спосіб прискорити розгортання NR 5G в міру стабільної модернізації мереж 5G Core і xHaul відповідно до затвердженої нещодавно специфікацією 3GPP Release-16 і специфікацією Release-17, які спростять широкомасштабне комерційне впровадження стандартизованої технології.

Режим NSA 5G спочатку націлений на сценарії використання eMBB, в основному орієнтовані на відео, яке до 2025 року буде займати майже 76% всього

трафіку, як прогнозується в останньому звіті Ericsson Mobility. Однак NSA 5G не передбачає можливості мережевого сегментування і структуру якості обслуговування (QoS) 5G, а також не забезпечує наднизьку затримку. Іншими словами, сьогодні eMBB швидше являє собою реалізацію 4G «на стероїдах». Саме цей варіант більшість споживачів буде використовувати, поки базова дротова мережа не буде повністю оновлена.[12]

Режим 5G SA («повноцінна реалізація 5G») має на увазі, що NR 5G підключені до опорної мережі 5G, яка замінює поточні 4G EPC в NSA 5G і забезпечує продуктивність 5G в повному масштабі. Для цього сегментування мережі потрібно реалізувати в бездротового і дротового середовищі, а структура QoS 5G забезпечить категорію сценаріїв використання 5G з urLLC і MMTС. Великі ОМС вже анонсували комерційні послуги 5G SA. Впровадження 5G в повному масштабі для широких мас населення, швидше за все, займе не один рік. Універсального рецепту переходу на 5G, який підійшов би кожному оператору, не існує, оскільки всі вони знаходяться в різних стартових умовах і переслідують свої власні цілі.

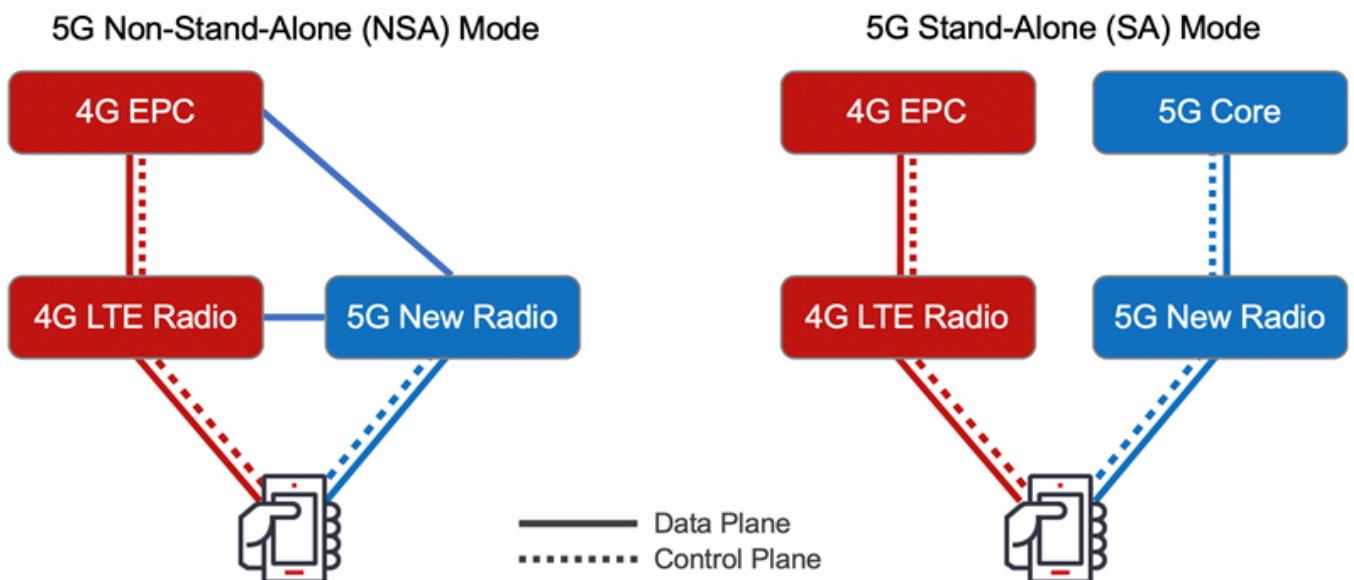


Рис.2.5. Порівняння режимів 5G Non-Stand-Alone (NSA) і 5G Stand-Alone (SA).

Шлях, по якому оператори мобільного зв'язку (MNO) перейдуть до 5G, буде багато в чому залежати від того, як вони планують оплачувати цей перехід. Під час розгортання 4G в 2010-2015 роках віртуалізація була обов'язковою. Оператори використовували безліч різних підходів до розгортання архітектур 4G з

використанням пропрієтарних і віртуалізованих рішень. З 5G віртуалізація просто необхідна. Тепер у операторів мобільного зв'язку є можливість змінити спосіб побудови і експлуатації своїх мереж.[13]

Для операторів мобільного зв'язку, які прагнуть надати споживачам в основному високошвидкісне підключення інших пристроїв з підтримкою 5G, неавтономна архітектура (NSA) має найбільший сенс, оскільки вона дозволяє їм ефективно використовувати свої існуючі мережеві інвестиції в транспорт і мобільне ядро, а не чим розгорнути повністю нову наскрізну мережу 5G. Це може бути об'єднано з зусиллями щодо зниження експлуатаційних витрат мережі за рахунок впровадження віртуалізації і CUPS (поділу площин управління і користувача) з використанням програмно-визначених мереж (SDN). Ці початкові кроки в напрямку 5G дозволяють операторам мобільного зв'язку почати пропонувати послуги 5G, що забезпечують більш високу швидкість передачі даних і отримувати додаткові потоки доходів.

2.7.2. Аналіз gNB станцій 5G та відмінності з eNB станціями LTE.

Більш ніж 10 років назад почали активно розповсюджуватися базові станції. Саме на їх основі на сьогоднішній день побудовані мережі мобільного зв'язку другого, третього, четвертого покоління. Одна базова станція містить в собі декілька важливих елементів, а саме базовий блок BBU (Baseband Unit), і також кілька радіомодулів RRU. Оптичний кабель з'єднує блоки з модулями і поверх даної системи реалізується інтерфейс CPRI (Common Public Radio Interface). BBU здійснює перетворення на сигнальному рівні, а саме - аналогове-цифрове й навпаки, фільтрацію сигналу, а також його посилення, і формує радіочастотний тракт. Також

базовий блок реалізує алгоритми обробки сигналів та протоколи взаємодії базової станції з ядром мережі і терміналом, призначеним для користувача. По суті, BBU - це сервер, висотою 2-3 юніти. Він може за простою бути встановлений в невеликій стійці у виділеному під нього приміщенні, або на даху будівель, також кліматичній шафі.

Наступним кроком розвитку архітектури побудови базових станцій стала концепція хмарних BBU, також називають "Cloud BBU". Вона полягала у відмові від

локальних BBU, з подальшим перенесенням їх функціональності на віртуалізовані ресурси потужних серверів, розміщених в центрах обробки даних (ЦОД). Дана концепція дозволяє підвищити надійність і ємність базових станцій, одночасно знизивши витрати на їх експлуатацію. Для цього здійснюється централізація ресурсів і досягається ефект “масштабу”. Однак цей варіант не знайшов істотного застосування через високі вимоги до характеристик CPRI каналів:

- допустима затримка (RTT) - 5мкс;
- допустимий рівень бітових помилок - 10-12;
- стабільність частоти - 0.002ppm
- пропускна здатність для 4G-LTE в смузі 20МГц в залежності від кількості потоків - до 10G (в цьому випадку вимоги до пропускної здатності CPRI для мереж 5G в смузі 400МГц можуть вирости до 400G).

Архітектура базових станцій gNB мережі 5G являє собою подальший розвиток ідеології розподілених базових станцій і "Cloud BBU". gNB включає в себе центральний модуль gNB-CU (gNB Central Unit) і один або кілька розподілених модулів gNB-DUs (gNB Distributed Unit).[14] 3GPP визначає 8 можливих опцій поділу функцій між CU і DU (рисунок 2.6) При цьому опція 8 відповідає класичній (існуючій) схемі побудови розподіленої базової станції.

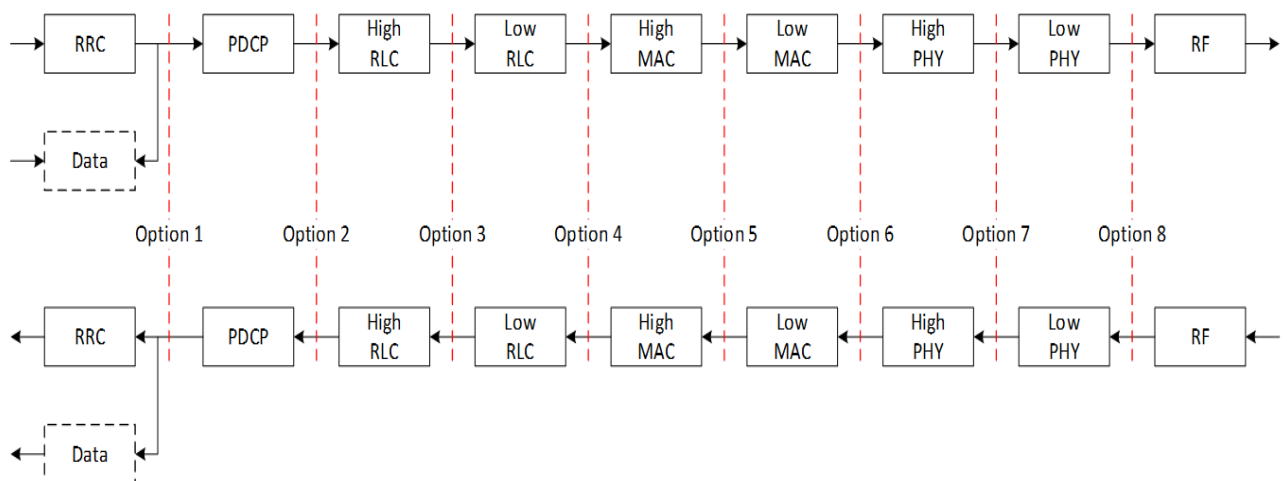


Рис. 2.6. Опції розділення функцій між CU і DU

Рекомендація 3GPP TS 38.401 V15.0.0 визначає архітектуру побудови базової станції, засновану на 2-й опції поділу функцій. В цьому випадку RRC і PDCP реалізуються в центральному модулі (gNB-CU), а RLC, MAC і фізичний рівень - в розподіленому (gNB-DU). Взаємодія між gNB-CU і gNB-DU здійснюється по інтерфейсу F1.

3GPP визначає наступні інтерфейси gNB:

- N2 - інтерфейс площині управління між gNB і модулем управління доступом та мобільністю ядра мережі 5GC (AMF). Є розвитком інтерфейсу S1-C мереж 4G-LTE.
- N3 - інтерфейс площині призначеного для користувача трафіку між gNB і модулем передачі користувальницького трафіку ядра мережі 5GC (UPF). Є розвитком інтерфейсу S1-U мереж 4G-LTE.
- Xn - інтерфейс між базовими станціями gNB.
- X2 - інтерфейс між gNB і eNB мережі LTE.

Основні функції, які реалізуються на різних рівнях:

1. RRC (Radio Resource Control). RRC виконує наступні функції:

- Передача системної інформації. Широкомовна (broadcast) передача системної інформації, до якої відноситься загальна NAS інформація. Частина цієї інформації стосується лише UE, які знаходяться в стані RRC_IDLE.
- Управління RRC з'єднанням (RRC connection control). До даної області відносяться процедури створення, зміни і видалення RRC з'єднання, включаючи пейджинг, активацію початковий захисту (initial security), створення сигнальних радіопоток (Signalling Radio Bearer, SRB) і радіопоток, за якими буде здійснюватися передача даних користувача (Data Radio Bearer, DRB). Також до цієї області відноситься процедура хендовера (Handover) і конфігурація більш низьких рівнів (PDCP, RLC, MAC).
- Міжтехнологічна мобільність (inter-RAT mobility). Крім процедур мобільності, дана область включає в себе активацію захисту і передачу RRC контексту UE.
- Налаштування вимірювань (measurement) і звітність (reporting). Налаштування вимірювань і звітність для різних видів мобільності (intra-frequency,

inter-frequency, inter-RAT), включаючи настройку і активацію періодів вимірювань.

- Інші функціональні області, наприклад, передача спеціальної NAS інформації.[15]

Ключові зміни в порівнянні з рівнем RRC інтерфейсу S1 мереж LTE пов'язані з введенням нового RRC стану (RRC INACTIVE), зробленим для того, щоб мінімізувати сигнальний обмін для окремих класів пристроїв, які постійно підключені до мережі, а також з реалізацією механізму передачі частини системної інформації не в широкомовних, а в виділених каналах конкретних пристроїв.

2. SDAP (Service Data Adaptation Protocol)

SDAP відповідає за обробку потоку QoS за допомогою телефону 5G. Зокрема, SDAP буде відображати конкретний потік QoS в сеансі PDU на відповідний односпрямований радіоканал даних (який був встановлений з відповідним рівнем QoS). Крім того, SDAP позначає передані пакети правильним QFI (QoS Flow ID), гарантуючи, що пакет отримає правильну обробку пересилання при проходженні через систему 5G.

Для кожного сеансу PDU буде налаштований єдиний протокольний об'єкт SDAP. Винятком є подвійне підключення, при якому основна група осередків і додаткова група осередків матимуть окрему конфігурацію SDAP на пристрої.[16]

3. PDCP (Packet Data Convergence Protocol)

PDCP надає свої послуги RRC і верхнім рівням площині користувача, наприклад IP в UE або ретранслятору на базовій станції. PDCP надає наступні послуги верхнім рівням:

- передача даних площині користувача;
- передача даних площині управління;
- стиснення заголовка;
- шифрування;
- захист цілісності.

Ключові зміни в порівнянні з рівнем PDCP інтерфейсу S1 мереж LTE полягають в перенесенні з рівня RLC на рівень PDCP функції відновлення порядку проходження пакетів даних, що з одного боку спрощує реалізацію механізму розщеплення

віртуальних каналів (split bearer) в режимі Dual Connectivity, а з іншого - дозволяє на більш ранній фазі виконувати операції дешифрування і контролю цілісності поступаючих з мережі пакетів даних з порушенням послідовності, що в окремих кейсах може зменшити величину затримки.[17] Також зміна в реалізації можливості дублювання даних на PDCP рівні в рамках концепції подвійного підключення (Dual Connectivity).

4. RLC (Radio Link Control)

Основні функції, які реалізуються на рівні RLC:

- Передача блоків даних протоколу верхнього рівня (PDU) в одному з трьох режимів: режим з підтвердженням (AM), режим без підтвердження (UM) і прозорий режим (TM)

- Виправлення помилок через ARQ (тільки для передачі даних AM)
- Об'єднання, сегментація і повторна збірка RLC SDU (UM і AM)
- Повторна сегментація блоків PDU даних RLC (AM)
- Перегрупування блоків PDU даних RLC (UM і AM);
- Виявлення дублікатів (UM і AM);
- Скасування SDU RLC (UM і AM);
- Відновлення RLC;
- Виявлення та відновлення помилок протоколу.[18]

5. MAC (Medium Access Control)

При відправці даних на інший пристрій в мережі підрівень MAC інкапсулює кадри вищого рівня в кадри, які підходять для середовища передачі (MAC додає преамбулу синхрослова, а також заповнює, якщо необхідно), додає послідовність перевірки кадрів для виявлення помилок передачі, а потім пересилає дані на фізичний рівень, як тільки це дозволяє відповідний метод доступу до каналу. Для топологій з областю конфліктів (шина, кільце, сітка, топології точка-безліч точок) необхідно контролювати, коли дані відправляються і коли чекати, щоб уникнути конфліктів. Крім того, MAC також відповідає за компенсацію колізій, ініціюючи повторну передачу, якщо сигнал затора виявлений. При отриманні даних з фізичного рівня блок MAC забезпечує цілісність даних, перевіряючи послідовності перевірки кадрів

відправника, і видаляє преамбулу і заповнення відправника перед передачею даних на більш високі рівні.[19]

Узагальнені функції MAC приведено нижче:

- Розмежування і розпізнавання кадрів
- Адресація станцій призначення (як окремих станцій, так і груп станцій)
- Передача адресної інформації станції-джерела
- Прозора передача даних LLC PDU або еквівалентної інформації на підрівні Ethernet.
- Захист від помилок, як правило, шляхом створення та перевірки послідовностей перевірки кадрів.
- Контроль доступу до фізичного середовища передачі

2.7.3. Архітектура ядра 5G та її відмінності від 4G.

В основі нової специфікації 5G лежить архітектура ядра мережі 5G, яка забезпечує підтримку пропускну здатності, необхідної від 5G. Нове ядро 5G, як визначено 3GPP, використовує хмарну, сервісно-орієнтовану архітектуру (SBA), яка охоплює всі функції і взаємодії 5G, включаючи перевірку справжності, безпеку, управління сеансами і агрегацію трафіку з кінцевих пристроїв. Ядро 5G далі підкреслює NFV як невід'ємне конструктивне рішення з віртуалізованими програмними функціями, які можуть розгортатися з використанням інфраструктури MEC, незамінною для принципів архітектури 5G.

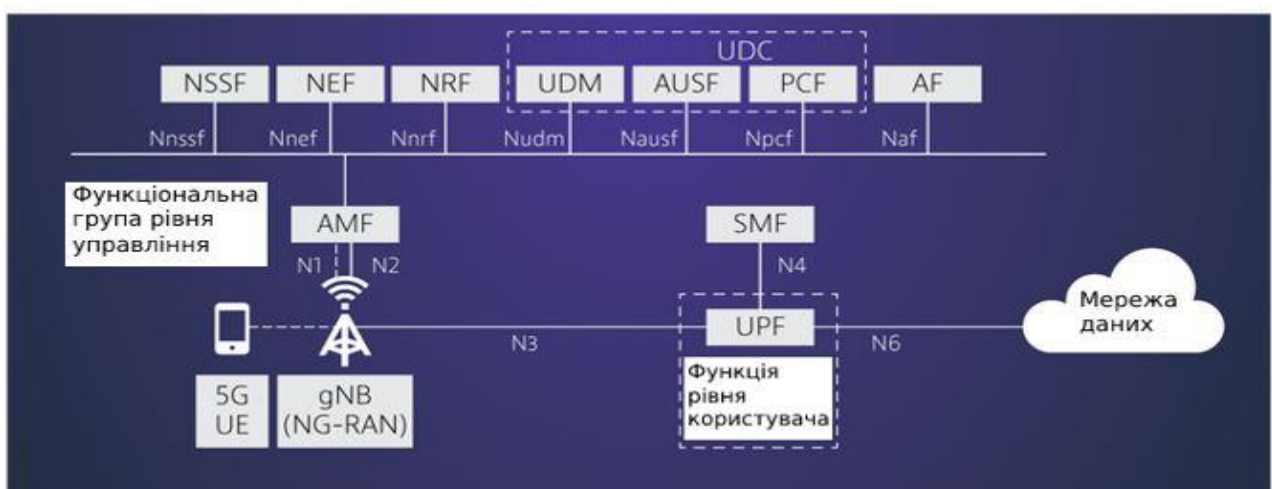


Рис.2.7. Особливості побудови ядра 5G

Зміни на рівні ядра є частиною цілого ряду архітектурних змін, які

супроводжують перехід від 4G до 5G, включаючи міграцію на міліметровий діапазон, функцію massive MIMO, сегментування мережі і, в цілому, кожен окремий елемент різноманітної екосистеми 5G. Ядро 4G Evolved Packet Core (EPC) відрізняється від ядра 5G, так як в 5G на безпрецедентних рівнях використовуються віртуалізація і хмарне ПО. [20]

Серед інших змін, що відрізняють ядро 5G від його попередника 4G, функція передачі даних користувачів (UPF) для поділу протоколів «площини користування» і «площини управління», а також функція управління доступом і мобільністю (AMF), що відокремлює функції управління сеансами від завдань по встановлення з'єднання і управління мобільністю.

2.7.4. Рефармінг частот

Рефармінг частот - явище не унікальне для 5G, але також визначне. Кожне наступне покоління мобільного зв'язку відрізняється від попередніх не просто зміною діапазону, але і новими технологіями кодування. При цьому зберігається можливість роботи на базі інфраструктури попереднього покоління. Тобто станції, задіяні раніше для LTE або, наприклад, для GSM, продовжать функціонувати на тих же частотах, але тепер будуть передавати дані на основі технологій 5G. Рефармінг дозволить заощадити на інфраструктурі, забезпечивши оптимальне покриття для мереж нового покоління. Початковий етап їх запуску на існуючому обладнанні, що обслуговує мережі 4G - це фаза NSA (Non-standalone).

Висновки:

Отже, в цьому розділі був зроблений аналіз технології п'ятого покоління. Було досліджено архітектуру, ядро, складові мережі 5G. На сьогоднішній день у світі починає розповсюджуватись по всіх країнах саме технологія 5G, тому також було зроблено порівняльний аналіз із технологіями четвертого покоління для розуміння відмінностей і можливості інтеграції мереж. Слід зазначити, що сама технологія 5G перевершує в основних характеристиках LTE в 10 разів. Також було виявлено, що інтеграція можлива завдяки схожим інтерфейсам з лише деякими відмінностями їх функцій, рефармінгу частот, особливостям побудови ядра. Архітектура NSA (Non-Stand-Alone) дає змогу розгорнути 5G на основі LTE.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ 5G ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ З РОЗГОРНУТИМИ LTE МЕРЕЖАМИ

3.1. Існуючі та затверджені варіанти інтеграції 5G з LTE

3.1.1. Варіанти розгортки 5G в режимі Standalone та Non-Standalone

- Об'єднаний режим з мультипідключенням (NSA)

Варіант №1:

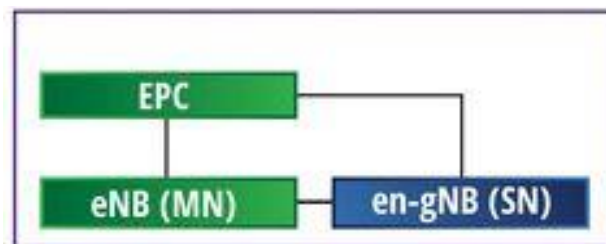


Рис.3.1. E-UTRA-NR з подвійним підключенням (EN-DC)

Варіант №2:

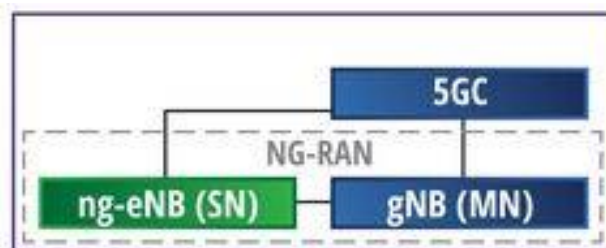


Рис.3.2. NRE-UTRA з подвійним підключенням (NE-DC)

Варіант №3:

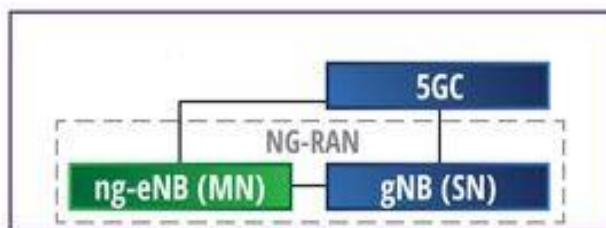


Рис.3.3. NG-RAN E-UTRA-NR з подвійним підключенням (NGEN-DC)

- Автономний режим (SA)

Варіант №1:

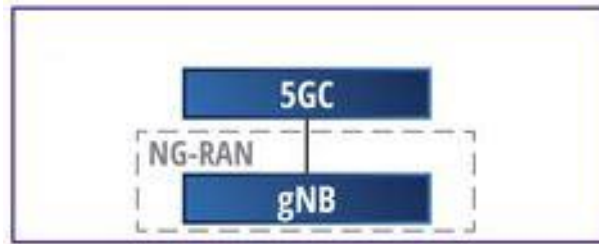


Рис.3.4. NR в автономному режимі (NR SA)

Варіант №2:



Рис.3.5. E-UTRA з підключенням до 5GC (E-UTRA/5GC)

3.1.2. Схвалена архітектура 5G на основі LTE

Найбільш поширена й потрібна операторами зв'язку стратегія розгортання 5G буде полягати в тривалому спільному існуванні мереж 4-го і 5-го поколінь при максимальному повторному використанні інфраструктури, вузлів і мережевих елементів. Це дозволить операторам поступово покращувати свої мережі. З одного боку буде збереження інвестицій в будівництво мереж LTE, а також широку зону покриття мереж LTE. З іншого ж боку - оператори будуть мати нагоду надавати клієнтам нові послуги, що базуються на 5G саме в тих зонах, де ці послуги будуть користуватись попитом.

Одним із найважливіших аспектів для реалізації Non-Standalone опції є концепція подвійного підключення, її також називають Dual Connectivity. 3GPP надала специфікацію в 12 релізі. Мається на увазі підключення терміналів користувача (UE) в стані RRC_CONNECTED одночасно до двох базових станцій, а саме Master eNb і Secondary eNb. Dual Connectivity відрізняється від агрегації частот саме підключенням до двох різних базових станцій, пов'язаних за допомогою X2

інтерфейсу.

Для реалізації Non-Standalone ставляться додаткові вимоги до терміналів користувача (UE) та їх складності, а саме потрібне забезпечення одночасної роботи двох модемів, збільшення розміру буфера прийому, а також додаткове навантаження на ресурси процесора рівня PDCP для відновлення порядку проходження пакетів (у разі режимі MCG split bearer).

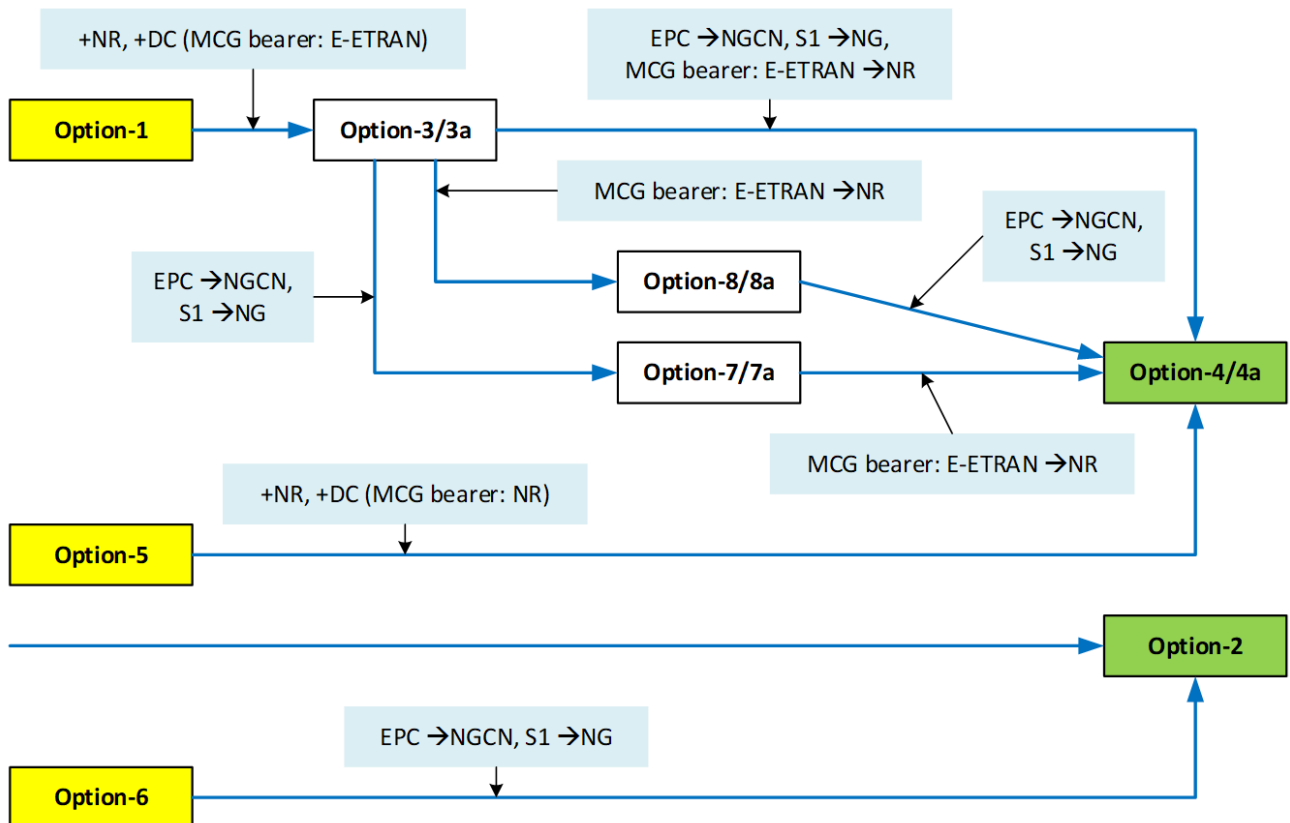


Рис.3.6. Можливі сценарії розгортки мереж 5G

Option 4/4a - саме дана опція являє собою сформульовану фінальну архітектуру комбінованої мережі 5G/LTE. В ній використовується необхідна для цього технологія подвійного підключення. Потребується впровадження ядра NGCN і модернізація базових станцій мережі LTE до ng-eNb. Базується опція саме на технології подвійного підключення. NG використовується в архітектурі в якості інтерфейса, що зв'язує мережі радіодоступу E-UTRA/NR і NGCN, і переносить користувача (User Plane) і сигнальний (Control Plane) трафік. Якірною точкою для термінації NG-C є базові станції мережі радіодоступу NR (gNb).

Option 4:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN);

- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є gNb;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: NGCN-gNb-UE і NGCN-gNb-eNb-UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку Control Plane і LTE User Plane.

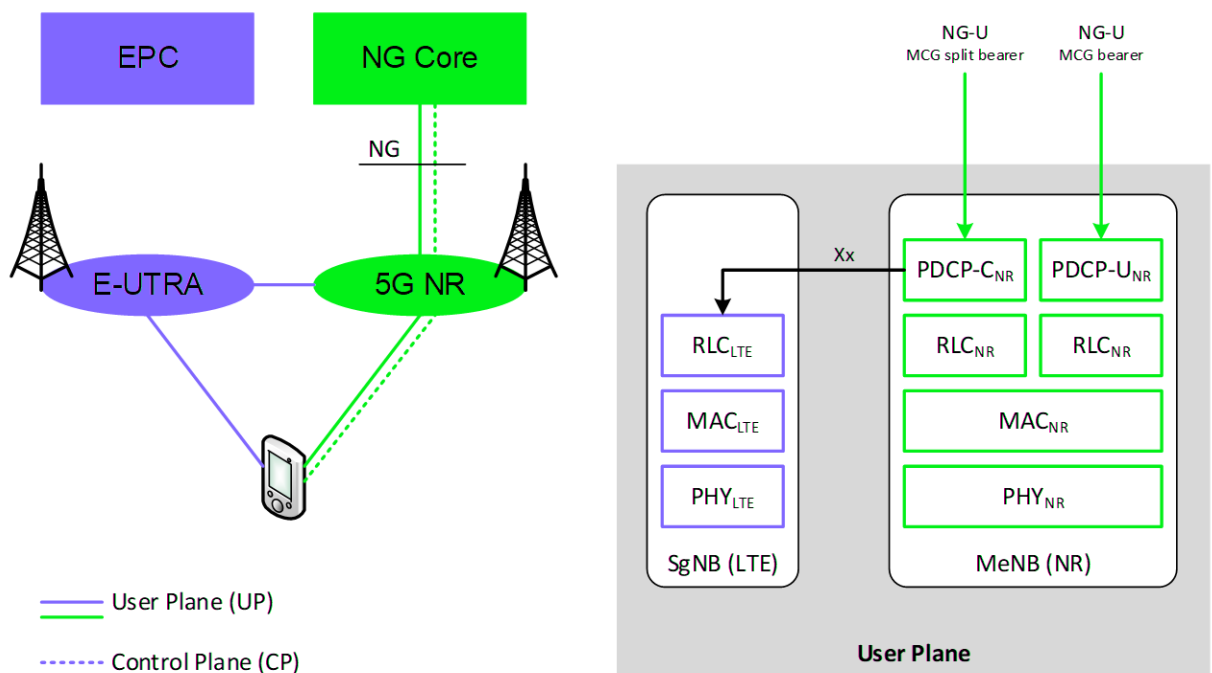


Рис.3.7. Option 4

Option 4a:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є NGCN;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: NGCN-gNb-UE і NGCN-eNb-UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку тільки Control Plane. [14]

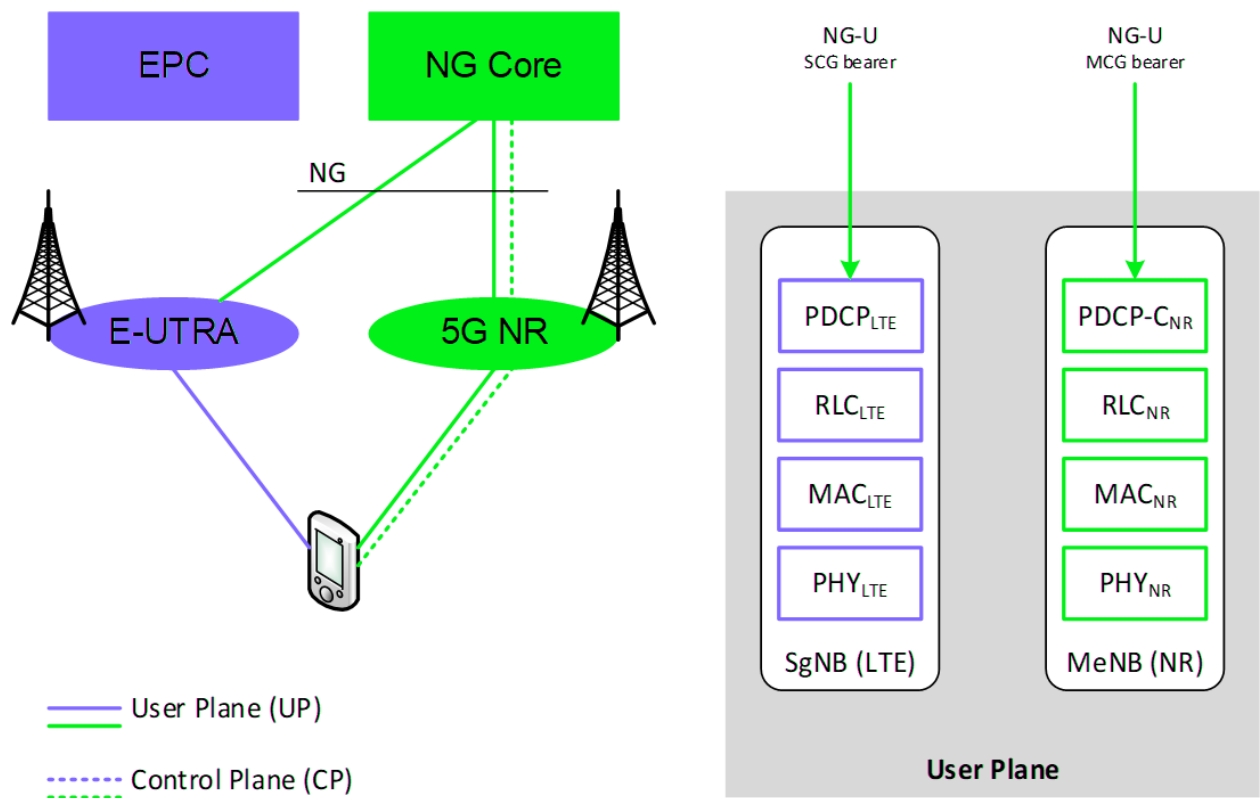


Рис.3.8. Option 4a

3.2. Проектування нового варіанту архітектури LTE-5G

3.2.1. Необхідні характеристики для інтеграції LTE з 5G та побудова архітектури

Таблиця 3.1

Характеристики 4G LTE - Evolved Packed System (EPS) для підтримки 5G NSA

Функція	RAN	MME	SGS N	HSS	SPGW- C	SPGW- U	PCRF	3GPP інтерфейс и
Контроль передплати	+	+	+	+				S6a, S6d, S1AP
Управління дисплеєм	+	+		+				S6a, 4G-NAS
Підтримка мобільності з подвійним підключенням	+	+						S1AP, S1-U

Продовження таблиці 3.1

Максимальна швидкість передачі даних (терабіт/с)	+	+	+	+	+	+	+	Gx, Rx, S5, S1AP, X2, 4G-NAS, 3G-NAS, S1-U
Голосова підтримка	+							
Вплив на безпеку	+	+						4G-NAS, S1AP, S10
Підбір S/PGW		+	+		+			4G-NAS, S11, S6a, 3G-NAS, S4, S6d
Звіт про використання /зарядка	+	+			+			S1-MME, S11, S5, Rf
Підтримка низької затримки	+				+		+	

Отже, нова розроблена архітектура має спеціальну назву option X і складається з наступних елементів:

1. UE (User Equipment);
2. eNodeB E-UTRA;
3. gNodeB 5G NR;
4. MME (Mobility Management Entity);
5. SAEGW (System Architecture Evolution Gateway);
6. Інтерфейси: X2, S1AP, S1-U, S11, SGi.

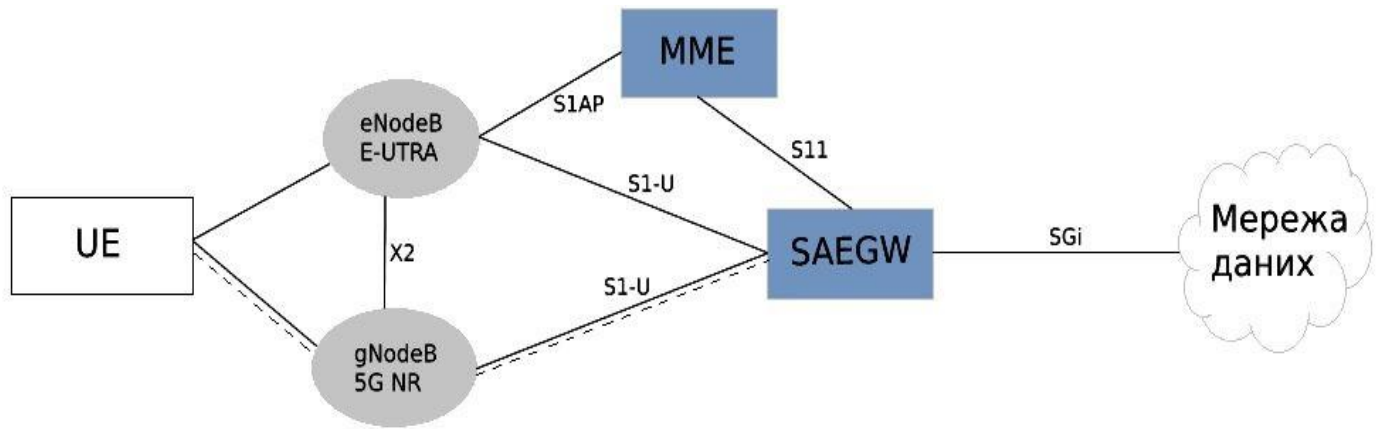


Рис.3.9. Розроблений варіант архітектури 5G на основі LTE (Option X)

3.2.2. Принцип роботи архітектури

- термінал користувача (UE) має подвійне підключення до станцій gNodeB 5G NR і eNodeB E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється через SAEGW на gNb;
- призначений для користувача трафік передається наступними маршрутами: SAEGW-gNB-UE або SAEGW-MME-eNB-gNB-UE.

Дана опція являє собою архітектуру комбінованої мережі 5G/LTE з додатковими елементами MME та SAEGW. Так само тут використовується технологія подвійного підключення. NG використовується в архітектурі в якості інтерфейса, що зв'язує мережі радіодоступу E-UTRA/NR і SAEGW, і переносить користувальницький (User Plane) і сигнальний (Control Plane) трафік.

В свою чергу, MME - суб'єкт управління мобільністю, який представляє ключовий вузол управління мережею доступу LTE, управляє мережею доступу UE та мобільністю, а також встановлює шлях носія для UE. MME також стосується процесу активації / деактивації носія і відповідає за аутентифікацію користувача для UE.[21] Крім того, він перевіряє дозвіл UE розміщуватися в мережі громадської наземної мобільної мережі постачальника послуг та вказує обмеження UE на роумінг.

Шлюз еволюції архітектури системи SAEGW призначений для спрощення та вдосконалення мобільних мереж. SAEGW - це комбінація сервісного шлюзу, який відповідає за маршрутизацію та пересилання пакета даних користувача та шлюзу PDN, який є з'єднувальним вузлом між UE та зовнішніми мережами. Перевагами є те,

що даний шлюз підвищує операційну ефективність, уникаючи необхідності обробляти контекст передплатника за допомогою незалежних служб площині даних, підвищує зручність роботи кінцевих користувачів в мережі і допомагає стимулювати попит на нові послуги, і має простіший перехід до базової мережі, повністю складається з IP, зі спрощеною архітектурою і відкритими інтерфейсами

3.2.3. Спрощений варіант для Option X

Casa Systems Serving Gateway Node (CSGN) - це віртуалізоване рішення, що поєднує функції MME, PGW та SGW, щоб основна мережа ефективно підтримувала зростання трафіку IoT та забезпечувала нові типи IoT-трафіку. Тобто, CSGN - це MME + SAEGW.

Переваги CSGN:

- Масштаб і продуктивність. Оптимізований для віртуального обчислювального середовища, CSGN забезпечує чудову продуктивність і в 5 разів більшу пропускну здатність на віртуальному CPU.
- Гнучке розгортання. Незалежне масштабоване управління та користувальницькі площини, які можуть працювати в центрі обробки даних або на межі мережі та розгортатися як віртуальні машини.
- Підтримка стандарту 5G NSA. Коли ядро та хмарний інтерфейс переходять на 5G, обробка пакетів IoT буде розвиватися. Гнучка реалізація VNF дозволяє плавно переходити до стандартів 5G NR та 5G Core.

Спрощена схема побудованої архітектури не відрізняється суттю від повної, відбувається заміна елементів MME та SAEGW на CSGN. У зв'язку з цим на схемі втрачають сенс деякі інтерфейси, але всіх їх, а також повний функціонал замінних елементів включає в себе CSGN. Опція має назву Option Xs.

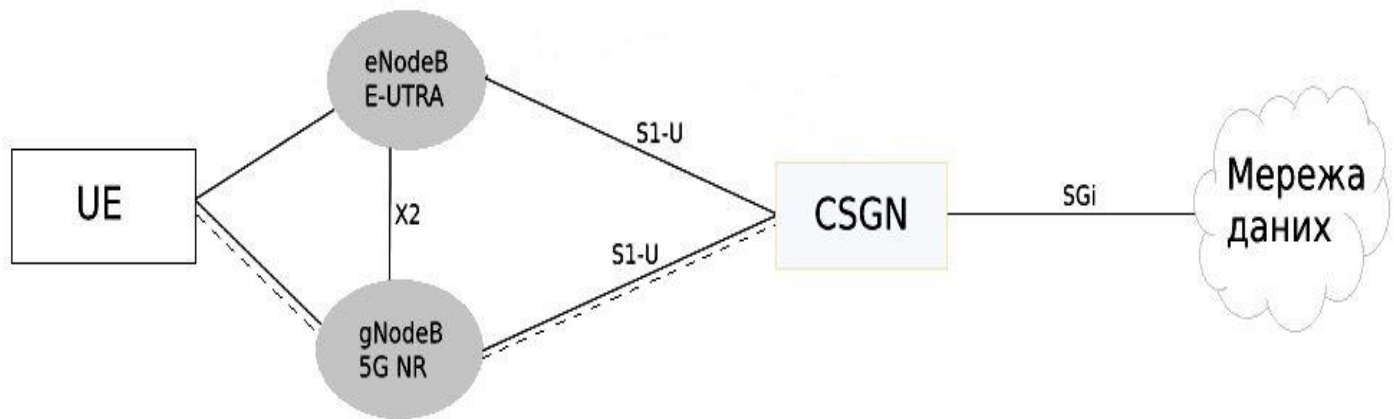


Рис.3.10. Розроблений спрощений варіант архітектури 5G на основі LTE (Option Xs)

Висновки:

Отже, у даному розділі були розглянуті всі можливі варіанти розгортки 5G як самостійної архітектури (Standalone), так і побудованої на базі LTE (Non-Standalone). Розглянуті вже затверджені варіанти розгортання на сьогоднішній день, а також досліджені необхідні характеристики LTE для співпраці з 5G, що допомогло побудувати нову ефективну архітектуру 5G на основі LTE.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Отже, на початку роботи були поставлені такі основні завдання на дипломну роботу:

- Аналіз основних параметрів, характеристик та архітектур мереж LTE та 5G.
- Порівняльний аналіз мереж LTE та 5G та розгляд можливості переходу до 5G мереж на основі архітектур 4G.
- Варіант архітектури мережі 5G, побудованої на основі інтеграції з розгорнутими LTE мережами.
- Висновки щодо розглянутих мереж та вибору раціональної архітектури.

Усі завдання були повністю виконані, описані, а висновки відповідні зроблені.

5G - технологія теперішнього, слід розвивати та розгортати її якомога якісніше, проте наразі всі оператори світу зосереджені на поєднанні 5G з технологією LTE, адже це забезпечує більшу швидкість розгортки і більше охоплення користувачів. Звісно, настане час, коли 5G почнуть ставити вже на базі Standalone архітектур, і це дасть змогу розвинути мережу п'ятого покоління ще більше і ще краще. Схожі функції, побудова частот та архітектури двох останніх поколінь дають змогу їх інтеграції. Також на сьогоднішній день вже є затверджена архітектура розгортання 5G на основі LTE. Розроблена ж власна архітектура потребує більших затрат, як енергетичних, так і фінансових. До того ж, нова архітектура дещо складніша в побудові, проте вона має перевагу у якості передачі сигналу. Наскільки пропорційно затрати і результат нової архітектури відповідають вже затвердженим або ж виглядають краще на їх фоні - складно сказати, але точно можна говорити про те, що Option X/Xs мають право на життя і можуть скласти конкуренцію Option 4/4a.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стандарт LTE [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://1234g.ru/4g/lte/obshchaya-informatsiya-o-standarte-lte>
2. Пропускна здатність мережі LTE [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://ua.waykun.com/articles/ocinka-propusknoi-zdatnosti-merezhi-standartu-lte.php>
3. Планування мереж [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://1234g.ru/4g/lte/planirovanie-setej-lte/chastotnoe-planirovanie-setej-lte>
4. Мережева архітектура [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://coderlessons.com/tutorials/telekom/uznaite-lte/setevaia-arkhitektura-lte>
5. Роумінгова архітектура [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://coderlessons.com/tutorials/telekom/uznaite-lte/lte-roumingovaia-arkhitektura>
6. Сеган, Саша "Що таке 5G?" . PC Magazine в Інтернеті . Зіфф-Девіс. 14 грудня 2018 р.
7. Стаття 5G [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:5G_\(пятое_поколение_мобильной_связи\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:5G_(пятое_поколение_мобильной_связи))
8. 5G New Radio [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/5g-nr-new-radio.php>
9. Проблеми 5G NR [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://wireless-e.ru/standarty/problems-5g-new-radio/>
10. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны // СВЧ-электроника. 2019. № 4.
11. Мережа радіодоступу - 2 частина [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-2>

12. Архітектура 5G - 2 частина [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://www.ciena.ru/insights/articles/spotlight-on-4g-5g-backhaul-networks_ru_RU.html
13. NSA vs SA architecture [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.affirmednetworks.com/sa-and-nsa-5g-architectures-the-path-to-profitability/#:~:text=The%20%E2%80%9CNon%2DStand%20Alone%E2%80%9D,technology%20available%20without%20network%20replacement.>
14. Радіодоступ 5G - 1 частина [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-1.>
15. Radio Resource Control [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://anisimoff.org/lte/rrc.html>
16. Service Data Adaptation Protocol [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.mpirical.com/glossary/sdap-service-data-adaptation-protocol>
17. Packet Data Convergence Protocol [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Packet_Data_Convergence_Protocol
18. Radio Link Control [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_Link_Control
19. Medium Access Control [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Medium_access_control
20. Ядро 5G [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.viavisolutions.com/ru-ru/5g-architecture>
21. MME [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/management-entity>