

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва кафедри)

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

_____ Валерій ЯВІСЯ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“4” червня 2020_р.

Дипломна робота

на здобуття освітнього ступеня “бакалавр”

(назва ОС)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код та назва напряму підготовки)

на тему: Розробка технічних рішень з синхронізації мережі мобільного зв’язку LTE (5G)

Виконав: студент 4 курсу, групи ТЗ-61

(шифр групи)

_____ Корнієнко Олег Вікторович

(прізвище, ім’я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник _____ доцент Тріска Н.Р.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

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

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Освітній ступінь бакалавр

Напрямок підготовки 172 Телекомунікація та радіотехніка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Валерій ЯВІСЯ

(прізвище ініціали) (підпис)

“22” січня 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Корнієнко Олег Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка технічних рішень з синхронізації мережі мобільного зв'язку LTE(5G).

керівник роботи _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 08 квітня 2020 р. №1068-с

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4.Зміст роботи: 1) Обґрунтувати актуальність 5G та розглянути її архітектуру та структуру

2) Розглянути методи наслідування 5G відносно LTE та концептуальні зміни у технології.

3) Проведення аналізу щодо забезпечення мереж синхронізації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 19.09.2020

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	19.09.19 – 25.09.19	
2	Пошук інформації щодо нового покоління	03.10.19 – 15.10.19	
3	Розгляд актуальності технології	16.10.19 – 25.10.19	
4	Аналіз архітектури 5G	03.11.19 – 24.11.19	
5	Аналіз успадкування нового покоління на базі LTE	01.12.19 – 24.12.19	
6	Пошук інформації щодо мереж синхронізації	07.01.20 – 24.01.20	
7	Аналіз існуючих мереж синхронізації	05.02.20 – 17.02.20	
8	Розгляд технологій RTP та SyncE	15.03.20 – 04.04.20	
11	Оформлення пояснювальної записки дипломної роботи, підготовка до захисту	23.04.20 – 16.05.20	

Студент

_____ (підпис)

Корнієнко О.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Тріска Н.Р.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: 76 сторінок, 29 рисунків, 5 таблиці, 19 посилань
Метою даної роботи є аналіз розробок та впровадження 5G. А також аналіз
щодо проблем з синхронізації у мережах нового покоління зв'язку.

Сучасний стан розвитку телекомунікацій характеризується стрімким
переходом від технології LTE до 5G. Для підтримки вимог 5G важливим
фактором грає роль саме синхронізації усіх вузлів мережі.

Ключові слова: LTE, 5G, транспортна мережа, SyncE, PTP, тактова
мережева синхронізація.

ABSTRACT

The diploma work consists of 76 pages, 29 figures, 5 tables, 19 references

The purpose of this work is to analyze the development and implementation of 5G. As well as analysis of synchronization issues in next-generation networks.

The current state of development of telecommunications is characterized by a rapid transition from LTE to 5G technology. An important factor in supporting the requirements of 5G is the synchronization of all network nodes.

Keywords: LTE, 5G, transport network, SyncE, PTP, clock network synchronization.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

5G NR – 5 Generation New Radio

SDN – Software Define Network

NVF – Network Virtuality Function

eMBB – enhanced Mobile Broadband

URLLC – Ultra-Reliable and Low-Latency Communication

mMTC – massive Machine-Type Communication

CP – Control Plane

UP – User Plane

MIMO – Multiply In Multiply Out

OFDM - Orthogonal frequency-division multiplexing

IoT – Internet of Things

NGC – Next Generation Core

PDCP – Packet Data Convergence Protocol

RRC – Radio Resource Control

RLC – Radio Link Control

MAC – Medium Access Control

PHY – Physical layer

NSA – Non-StandAlone

SA – Standalone

CU – Central Unit

DU – Distributed Unit

RU – Radio Unit

RAN – Radio Access Network

gNB – next generation Node Base

eNB – enhanced Node Base
UE – User Equipment
AAU – Active Antenna Unit
UBBP – Universal BaseBand Processing unit
SDAP – Service Data Adaptation Protocol
EPC – ядро мережі LTE
PTP – Precision Time Protocol
SyncE – Synchronous Ethernet
OTN – Optical Transport Network
PON – Passive Optical Network
PRTC - Primary Reference Time Clock
OEC – OTN Equipment Clock
T-BC – Telecom Boundary Clock
PRC – Prime Reference Clock
SDH – Synchronous Digital Hierarchy
TSE – Time Synchronous Ethernet

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	11
1. ЗАГАЛЬНИЙ ПРИНЦИП РОБОТИ ТА АРХІТЕКТУРА 5G.....	13
1.1. Актуальність нового покоління.....	13
1.1.2 Основна концепція 5G	13
1.1.2.1 eMBB (enhanced Mobile BroadBand)	14
1.1.2.2 mMTC (massive Machine-Type Communication).....	15
1.1.2.3 URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication).....	16
1.1.3 Користувацькі послуги	18
1.2 Архітектура 5G	19
1.2.1 Вплив 3GPP на функціональний розподіл та розгортку ядра мережі у транспортній архітектурі мережі.....	20
1.2.2 Область Fronthaul	21
1.2.3 Область Midhaul	22
1.2.4 Область Backhaul.....	22
1.2.5 NGC interconnections	22
1.3 Архітектури транспортної мережі для підтримки хмарних мереж 5G	23
1.3.1 Область C-RAN	23
1.3.2 Область D-RAN	25
1.3.3 З'єднання з NGC.....	26
Висновок до розділу 1.....	28
2. ВЗАЄМОДІЯ ПОКОЛІНЬ 4G ТА 5G	29
2.1 Впровадження 5G.....	29
2.1.1 Рефармінг частот	29
2.1.2 Стадія Standalone.....	29
2.1.2.1 Станції Small cells	30
2.1.2.2 Технології Beamforming та Massive MIMO	31
2.1.3 Стадія Non-Standalone.....	31
2.1.3.1 Еволюція архітектури бездротового транспорту від 4G до 5G	31

2.2 Розширений розгляд архітектури	33
2.2.1 Можливості поетапного оновлення	34
2.2.2 Типова архітектура сучасної БС (3G/4G/5G)	34
2.2.3 Структура протоколів NG-RAN	35
2.2.4 Структура протоколів радіоінтерфейсу	36
2.2.5 Варіанти розгортання мережі	45
2.2.5.1 Варіант 8.....	46
2.2.5.2 Варіант 8а.....	47
2.2.5.3 Варіант 4.....	48
2.2.5.3 Варіант 4а.....	49
Висновок до розділу 2.....	51
3. СИНХРОНІЗАЦІЯ МЕРЕЖ.....	52
3.1 Частотна синхронізація	56
3.2 Фазова синхронізація.....	56
3.3 Часова синхронізація	57
3.4 Синхронізація в мережах PON.....	57
3.5 Приклади синхронізації в мережах мобільного зв'язку	59
3.5.1 Використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS).....	59
3.5.2 Використання РТР протоколу точного часу	60
3.5.3 Використання SyncEthernet.....	64
3.5.4 Комбінація SyncE плюс РТР	70
Висновок до розділу 3.....	72
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	74

ВСТУП

Наразі, сьогоденний розвиток телекомунікаційних та інтернет технологій охарактеризований стрімким збільшенням користувачів. Паралельно цьому збільшується попит та число електронних пристроїв з можливим підключенням до Інтернету, зокрема ідеться мова про мобільні телефони.

Вирішення цих проблем можливо однією з най обговорюваних технологій за останні десятиліття – 5G. Впровадження нового покоління бездротових мереж зв'язку дасть змогу користувачам та абонентам відчувати не тільки покращення якості, швидкості та зменшення затримки сигналу, а й отримати розширений спектр послуг типу «інтернет речей» та іншим вбудованим і «розумним» комп'ютерним системам.

Перший етап 5G починає проходити від рефармінгу частот (Non-standalone) на базі вже існуючої технології LTE (4G), поступово відходячи від вертикальної інтеграції, до другого заключного етапу (Standalone) шлях якого лежить разом з тенденцією попиту ринка на технологію.

Одним з головних завдань мереж є забезпечення системи тактової синхронізації, яка в свою чергу покращить швидкість сигналу та зменшення затримок в пакетній мережі. Важливим чинником являється вибір тієї чи іншої технології синхронізації через, те що грають роль як економічні, так і технічні чинники, а також чинник «інвестицій у майбутнє», з перспективами подальшого розвитку.

Метою даної роботи є дослідження технічних рішень з покращенням мереж синхронізації 5G.

1. ЗАГАЛЬНИЙ ПРИНЦИП РОБОТИ ТА АРХІТЕКТУРА 5G

1.1.Актуальність нового покоління

1.1.2 Основна концепція 5G

Network slicing - концепція, згідно з якою мережеві ресурси диференціюються для потреб різних сегментів споживачів та їх пристроїв. Фізична інфраструктура ділиться на віртуальні області, кожна з яких задіє ті ресурси і технології, які найкраще підходять для вирішення її завдань.

Принято виділяти три «кита» (основні області використання) на яких буде базуватися 5G. Основними послугами для яких потрібне створення нового покоління являються:

- eMBB (enhanced Mobile BroadBand) - надання покращеного широкопasmового мобільного доступу та збільшення смуги пропускання
- mMTC (massive Machine-Type Communication) - можливість підключення дуже великого числа пристроїв (датчики, лічильники, IoT та ін.)
- URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication) - надання високонадійного з'єднання з дуже низькою затримкою передачі даних

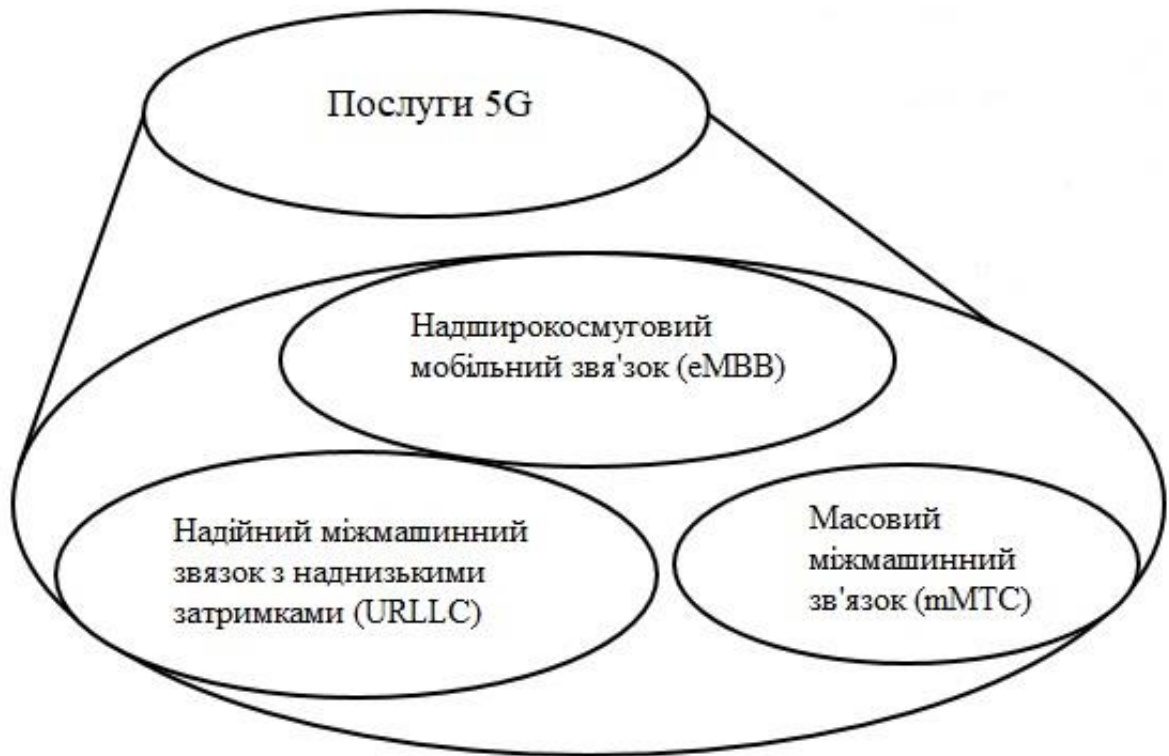


Рис. 1.2 Основні сектори підтримки мережею 5G

1.1.2.1 eMBB (enhanced Mobile BroadBand)

Надання поліпшеного мобільного широкопasmового доступу – поетапний розвиток мобільних мереж. Технологія 5G повинна забезпечити більш високий рівень обслуговування для абонентів і ще більш високі швидкості передачі даних у порівнянні з її попередньою технологією LTE. В якості цільових значень для швидкості передачі даних в 5G розглядаються десятки гігабіт за секунду (а саме до 20 Гбіт/с в низхідному каналі). Для того, щоб забезпечити такі високі швидкості передачі даних використовуються дуже широкий канал (до 1-2 ГГц) і багатоантенні технології передачі даних, в частності технологія MIMO. Так як практично весь діапазон низьких частот (частоти <6 ГГц) вже розподілений, для того, щоб мати можливість використовувати канали шириною в кілька сотень МГц або навіть кілька одиниць ГГц, для покоління 5G передбачається

використання міліметрового діапазону частот (наприклад, 28 ГГц). Саме в цьому діапазоні є необхідна кількість вільних (або умовно вільних) частот. Також для технології 5G використовуються і більш низькі частоти сантиметрового діапазону (наприклад, 3.5 ГГц) і частоти нижче 1 ГГц.

MIMO технології дозволяють формувати діаграму спрямованості (створювати так звані промені, в англ. "beam"), що збільшує спектральну ефективність системи, а також розширює зону покриття мережі. Останнє є особливо важливим при використанні частот з міліметрового діапазону. Нижче наводиться орієнтовна таблиця зі швидкостями передачі даних в залежності від частотного діапазону (джерело).

Таблиця 1.1 Швидкості передачі даних в залежності від частотних діапазонів антенами MIMO

Частотний діапазон, ГГц	Ширина каналу, МГц	MIMO	Максимальна швидкість передачі даних, Гбіт/с
24 - 39	800	2x2 64 QAM	6
2.5 – 5	100	4x4 256 QAM	2
<1	20	2x2 256 QAM	0.1 - 0.2

1.1.2.2 mMTC (massive Machine-Type Communication)

Дана область застосування характеризується можливістю підключення дуже великої кількості пристроїв. Зокрема прикладами таких пристроїв служать різні IoT та PoT, застосовані для «розумних» будинків та в індустріальному масштабі: датчики (датчики пожежної сигналізації, задимлення, температури),

лічильники (води, газу, тепла тощо), сенсори і т.д. Головною рисою таких «інтернет речей» є невелика вартість та низьке енергоспоживання. Це необхідно для того, щоб забезпечити тривалий час (кілька років) роботи від автономних джерел живлення (наприклад, батарейок). Тож обсяги даних, що передаються цими пристроями повинні бути також незначними. Тому високі швидкості передачі даних в mMTC області не є критичним аспектом.

1.1.2.3 URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication)

Даний тип сервісу відрізняється низькими затримками передачі даних (<1 мс) і високою надійністю і доступністю з'єднання. Прикладами сценаріїв або областей застосування, де висуваються такого роду вимоги служать: віддалене управління різними механізмами і роботами; автоматизація виробничих ліній; різні сценарії в області безпілотного транспорту (Vehical to Everything, V2X) і т.д. Для того, щоб підтримати висунуті даними сценаріями вимоги в специфікаціях 5G передбачений набір спеціальних механізмів. Наприклад, підтримка так званих mini-slot, яка дозволяє передавати дані на радіоінтерфейсу між базовою станцією (gNB) і абонентським пристроєм (UE) протягом дуже короткого інтервалу часу (частки мс). Крім цього, в технології 5G помітно вище вимоги до часу обробки даних як на стороні базової станції, так і на стороні мобільного терміналу (тобто часу на обробку даних відводиться значно менше в порівнянні з тим, яке було відведено в технології LTE).

Як видно з наведених вище областей застосування технології 5G, набір вимог, який пред'являється до цієї нової технології, дуже великий. І більш того, деякі області застосування висувають в якійсь мірі конфліктуючі між собою вимоги. Що робить розробку 5G специфікацій і подальшу реалізацію цих специфікацій виробниками обладнання вкрай скрутним і трудомістким

завданням. Нижче наводиться список основних вимог, яким повинна відповідати технологія 5G. Варто відзначити, що більшість наведених значень представляють граничні випадки і навряд чи буде можливість досягти всі ці граничні значення одночасно (наприклад, забезпечити передачу даних зі швидкістю 20 Гбіт / с з затримкою <1 мс для всіх користувачів в мережі).

Таблиця 1.2 Умовні граничні вимоги до мереж 5G

Параметр	Цільові значення	Коментарі
Максимальна швидкість передачі даних:	DL(DownLink): 20 Гбіт/с UL(UpLink): 10 Гбіт/с	При ідеальних радіоумовах (тобто немає помилок при передачі даних), весь радіоресурс використовується і передається одному абонентському пристрою
Максимальна спектральна ефективність:	DL: 30 (біт/с)/Гц UL: 15 (біт/с)/Гц	Так само як і максимальна швидкість: при ідеальних радіоумовах
Ширина каналу:	від МГц до ГГц	Специфікація 5G розроблена на використання різних частотних ресурсів, як в мегагерцовому діапазоні так і в гігагерцовому
Затримки передачі даних:	URLLC: 0.5 мс eMBB: 4 мс	Приведені значення затримки для передачі даних в одну сторону
Надійність передачі даних:	URLLC: $1-10^{(-5)}$ eV2X: $1-10^{(-5)}$	Даний параметр визначає ймовірність успішної передачі X байт даних з певною затримкою URLLC: 32 байта, з затримкою 1 мс eV2X: 300 байт, з затримкою 3-10 мс

Зона покриття :	164 дБ	Дане значення задає MaxCL (Maximum Coupling Loss) – це максимальне затухання сигналу, при якому дані можуть бути успішно прийняті. Значення MaxCL являється різницею потужності передачі і чутливості приймача. Вказане значення MaxCL задано при швидкості передачі даних – 160 біт/с
Час роботи абонентського терміналу:	> 10-15 років	Ці значення задані тільки для mMTC випадків. Даний параметр задає час роботи абонентського терміналу без підзарядки/заміни батарейок. При цьому передбачається, що обсяг переданих даних в висхідному каналі не перевищує 200 байт, а в низхідному каналі не більше 20 байт в день.
Щільність абонентів:	1 000 000 аб/км ²	Максимальна щільність абонентів на один квадратний кілометр
Мобільність:	500 км/год	Максимальна швидкість руху абонента, при якій дотримуються параметри якості обслуговування (QoS)

1.1.3 Користувацькі послуги

Послуги та сервіси які стають більш затребуваними в мережах 5G можна також класифікувати за наданим контентом для користувачів, а саме:

- мультимедійні послуги: відео з роздільною здатністю 4K, 8K, 3D-відео, online ігри, послуги на основі голограм і мультимедіа з повним ефектом присутності;
- хмарні послуги: файлові сховища, державні послуги, бізнес-додатки;
- послуги віртуальної реальності (Virtual Reality, VR);
- послуги доповненої реальності (Augmented Reality, AR): охорона здоров'я, військова промисловість, освіта, розваги;
- інтелектуальні послуги на основі Big Data з метою підвищення ефективності бізнесу (business intelligence, BI), а також експлуатації та управління мережею (network intelligence, NI);
- послуги Інтернету речей (IoT) на основі масового підключення пристроїв: енергетика, транспорт, охорона здоров'я, торгівля, громадська безпека, промисловість, ЖКГ
- послуги з наднизькою затримкою: управління роботизованими механізмами, телемедицина, безпілотний автотранспорт, 3D-ігри

1.2 Архітектура 5G

Інфраструктура 5G концептуально буде створена з удосконаленням програмного забезпечення і буде побудована на архітектурі SDN/NFV. SDN (Software Defined Network) – метод адміністрування комп'ютерних мереж, що дозволяє управляти послугами мережі, коли функціонал управління (control plane) відділений або абстрагований від нижнього рівня пересилання пакетів (data plane), наприклад сервер управління SDN автоматично контролює мережевий ресурс відповідно до запитів додатків. Планування мережі і управління трафіком при цьому відбувається програмним шляхом. Для додатків верхнього рівня надаються інтерфейси прикладного програмування API. Таким чином, введення

нових послуг на мережі прискорюється і полегшується. Також, архітектура SDN не являється новим видом мережі, який потребує заміни обладнання чи кардинальних реконструкцій, SDN використовує обладнання яке вже в експлуатації, хоча приносить якісно інші принципи її роботи та організації управління мережею.

SDN - це архітектурний «каркас» для створення «мереж всередині мережі» із заздалегідь визначеними параметрами і конфігурацією. Таким чином, мережа стає «програмованою», створюваною з наявних ресурсів під конкретні програми і більш відкритою. SDN дозволяє автоматичне конфігурування мереж під певні програми, або набір додатків («бізнес»). SDN дозволяє додаткам запитувати мережеві послуги та маніпулювати ними, а з іншого боку, дає можливість надавати програмам топологію і стан мережі.

Віртуалізація мережевих функцій NFV (Network Functions Virtualization) - технологія віртуалізації фізичних мережевих елементів телекомунікаційної мережі, коли мережеві функції виконуються програмними модулями, що працюють на стандартних серверах (найчастіше x86) і віртуальних машинах (VM) в них. Ці програмні модулі можуть взаємодіяти між собою для надання послуг зв'язку, чим раніше займалися апаратні платформи. Тобто програмним шляхом можна замінити використання деяких пристроїв.

1.2.1 Вплив 3GPP на функціональний розподіл та розгортку ядра мережі у транспортній архітектурі мережі

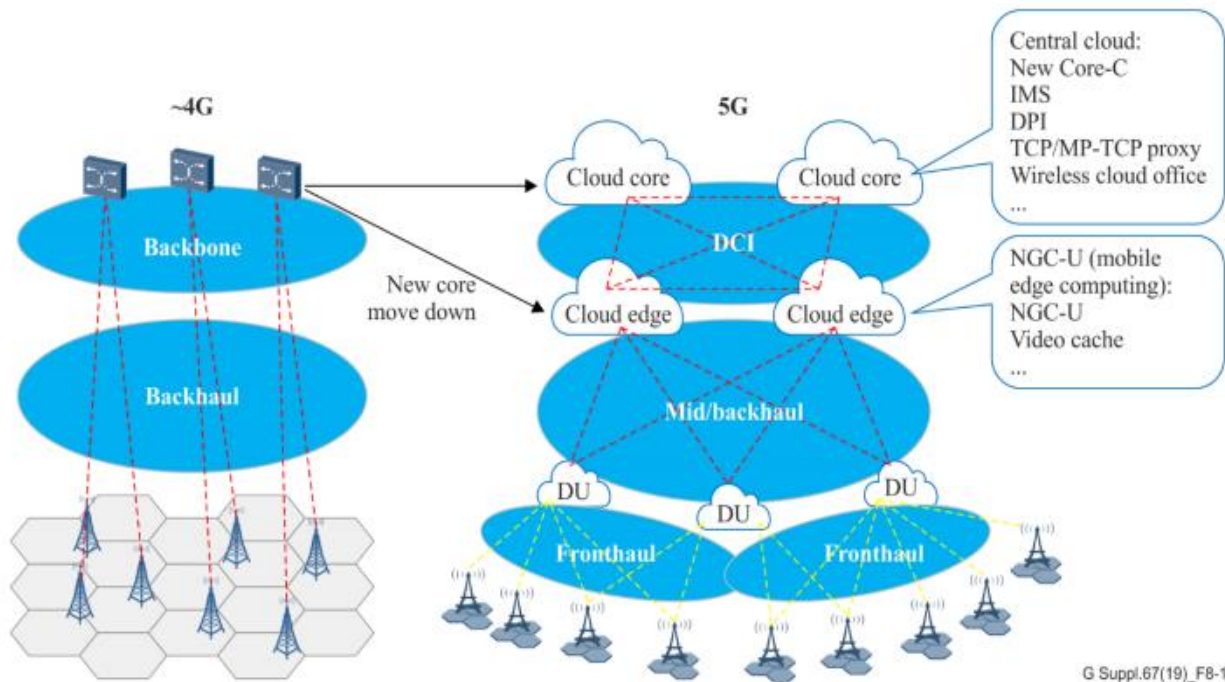


Рис. 1.3 Місце розгортання ядра мережі у 5G

Через те, що 3GPP задає кілька функціональних варіантів розвитку, і керує розгортанням мережі NGC (Next Generation Core) до крайньої хмари (Cloud edge), є чотири можливі місця розгортання транспортної мережі: Fronthaul, Midhaul, Backhaul та NGC interconnection (зв'язки в центральних вузлах мережі).

1.2.2 Область Fronthaul

Функції даної області розташовуються між High-PHY і Low-PHY. Пропускна здатність UNI (User to Network Interface) близько 25 Гбіт/с. Для нової мережі 5G типова пропускна здатність інтерфейсу NNI (Network to Network Interface) становить приблизно 75 Гбіт/с або 150 Гбіт/с (у випадках з урахуванням високої частоти). Для гібридної мережі 4G і 5G, пропускна здатність інтерфейсу NNI повинна становити близько 100 Гбіт/с або 200 Гбіт/с. Вимоги до затримки

жорсткі (<100 нс). Транспортна мережа (Топологія) розгорнута в режимі P2P (Peer to Peer).

1.2.3 Область Midhaul

Функції даної області розташовуються між PDCP (Packet Data Convergence Protocol) та RLC (Radio Link Control). Пропускна здатність інтерфейсу UNI становить приблизно 10 або 25 Гбіт/с, а пропускна здатність інтерфейсу NNI становить приблизно n-разів 10 Гбіт/с або 25 Гбіт/с (це пов'язано з можливостями агрегації DU (Distributed Unit)). Транспортна мережа розгорнута в режимі дерево або режим кільця. Декілька DU можуть об'єднуватися в один CU (Central Unit).

1.2.4 Область Backhaul

Функції даної області розташовуються над вузлом RRC (Radio Resource Control), а вимоги до пропускної здатності аналогічні середнім. Існує два типи трафіку даних DCI (Data Center Interconnection): горизонтальний рух і вертикальний рух. Xn - інтерфейс, який передає координаційні служби між базовими станціями, тому потрібне планування горизонтального трафіку. NG - це інтерфейс, який переносить з базової станції різні сервіси (такі як V2X, eMBB та IoT) до ядра 5G. Зазвичай різні служби розміщуються в різних хмарах, тому планування цього трафіку потрібне також.

1.2.5 NGC interconnections

Це взаємозв'язок між вузлами після того як CN (Core network, ядро мережі) розгорнеться у крайній хмарі (cloud edge). Пропускна здатність інтерфейсу UNI та NNI дорівнює або більше 100 Гбіт/с.

1.3 Архітектури транспортної мережі для підтримки хмарних мереж 5G

В основному, транспортна мережа 5G міститиме Fronthaul, Midhaul та Backhaul блоки. Однак, різні оператори можуть розгорнути свою мережу відповідно до власного сценарію. Таким чином, чотири типи RAN (Radio Access Network) розгортання можуть існувати. Вимоги пропускної здатності для Midhaul та Backhaul майже однакові, а також, пакет на основі гнучких мережевих можливостей (наприклад, IP / MPLS пересилання) являється необхідним як для Midhaul, так і для Backhaul. Таким чином, бажано використовувати одне універсальне транспортне рішення як для Fronthaul, так і для Backhaul.

З іншого боку, потреба в пропускній спроможності для Fronthaul набагато вища, ніж Midhaul та Backhaul, тож простого транспортування топологією P2P для eCPRI-трафіку не достатньо для Fronthaul. Тому з погляду на вимогу пропускної здатності та гнучких мережевих можливостей, транспортну 5G-архітектуру можна класифікувати на два основних типи: C-RAN (Central-RAN) і D-RAN (Distributed-RAN).

1.3.1 Область C-RAN

У цьому сценарії AAU і DU розділені, а DU і CU можуть бути розташовані спільно або відокремлені. Тому тут можуть існувати Fronthaul та Backhaul області, також можливе існування і Midhaul. Відстань між AAU (Active Antenna Unit) і DU становить від кількох кілометрів (0-10 км), а відстань між DU та CU - до десятків кілометрів.

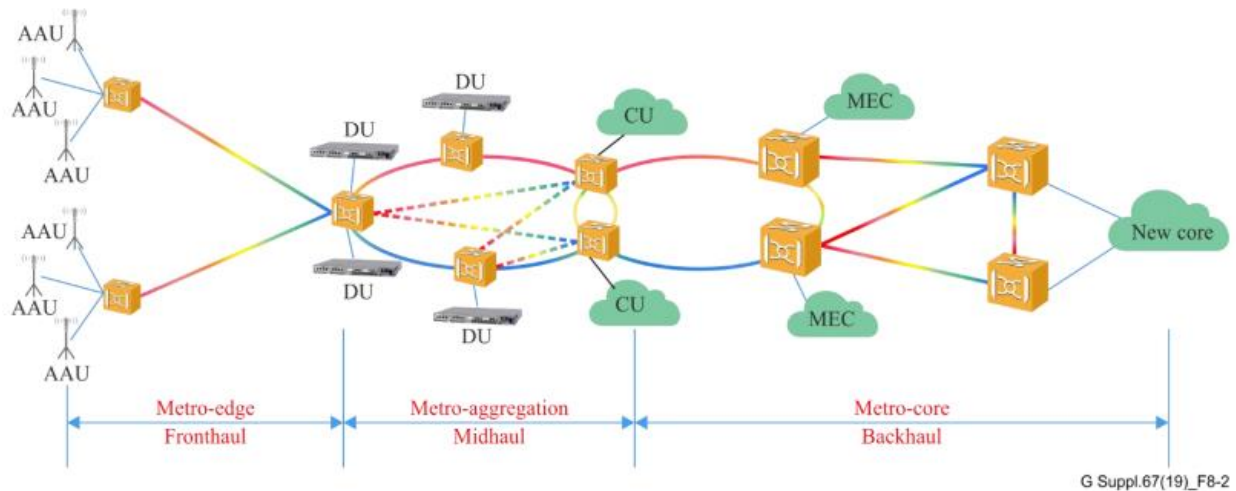


Рис. 1.4 Архітектура області C-RAN

Для Fronthaul області топологія може бути кільцевою або тачка-точка (p2p) на оптичному рівні. Але на рівні OTN буде використовуватися топологія точка-точка для зниження вартості та затримки сигналу. Виходячи з розташування центрально розгорнутих DU, C-RAN можна далі поділити на наступне два типи, як показано на Рис. 1.4:

- Велика C-RAN: DU розташовані в центральному офісі (CO), що, як правило, є точкою перетину кільцевих волоконних шляхів. Кількість DU в кожному CO може дорівнювати від 20 до 60.

- Мала C-RAN: DU розташовані центрально у metro-edge, яка зазвичай розташована у точці передачі кільцевого волокна metro-edge. Кількість DU в межах кожного метрополітену становить близько 5 ~ 10.

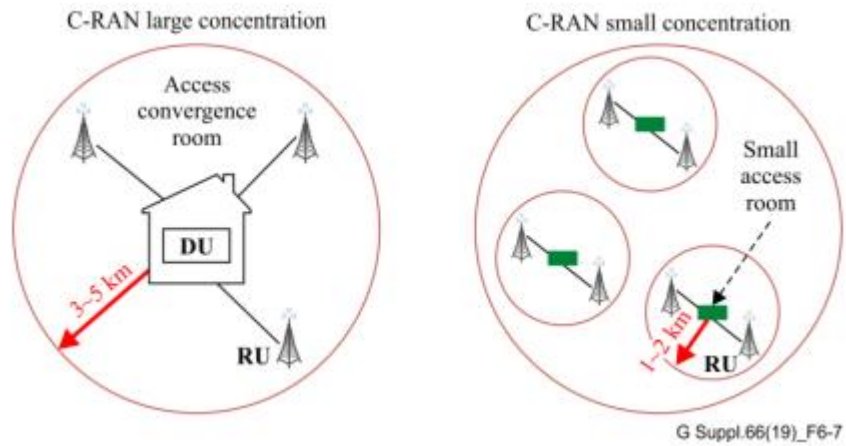


Рис. 1.5 Велика та мала області C-RAN

1.3.2 Область D-RAN

У цьому сценарії AAU і DU розташовуються спільно; DU і CU можуть бути розташовані спільно або відокремлені. Таким чином, існує лише мережа Backhaul і можливо Midhaul, але немає Fronthaul. Малюнок 8-3 ілюструє сценарій D-RAN з лише Backhaul.

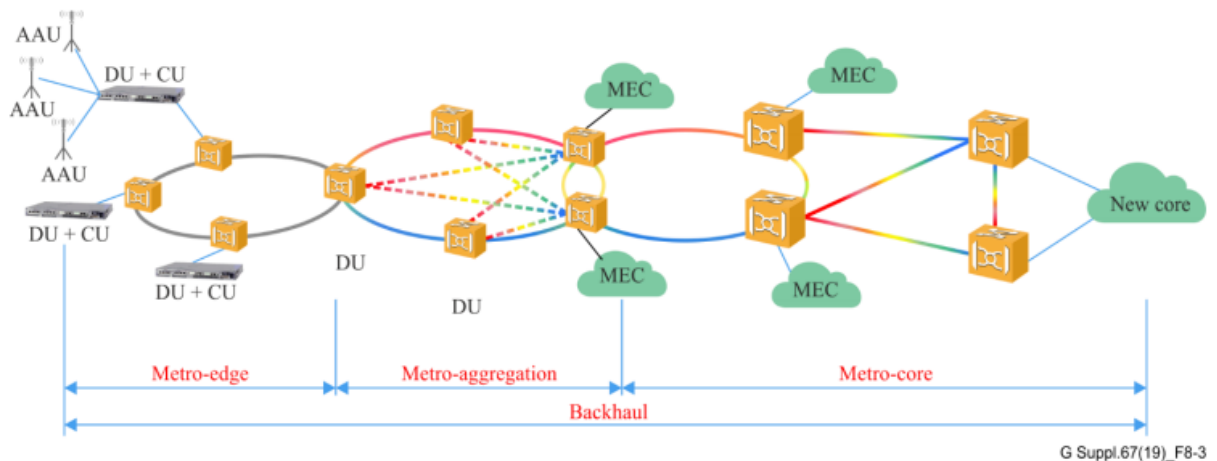


Рис. 1.6 Архітектура області D-RAN

Для D-RAN транспортна мережева перефiрiя metro-edge буде розташовуватися разом з 5G gNB. Щоб покращити використання зв'язку та надійність мережі, зазвичай топологія кільцевих пакетів буде розгорнута на домен metro-edge.

1.3.3 З'єднання з NGC

Таблиця 1.3 Вимоги до взаємодії з NGC

Параметри	Вимоги	Коментарі
Ємність	0.2 – 2 Тбіт/с	Кожен вузол NGC має 500 базових станцій. Середня пропускна здатність кожної базової станції становить близько 3 Гбіт / с, коефіцієнт конвергенції становить 1/4, а звичайна пропускна здатність NGC-вузлів становить близько 400 Гбіт/с. Розглядаються 2 ~ 5 напрямків, тому потужність вузла NGC дорівнює 0,8 ~ 2 Тбіт/с
Затримка	1 мс	Затримка в зворотному режимі (RTT) між NGC
Протяжність	100-200 км	Звичайна дистанція між NGC

Логічна архітектура gNB показана на Рис. 1.7 із центральним юнітом (CU) та розподіленим юнітом (DU). Fs-C і Fs-U забезпечують підключення площини управління (CP) та площини користувача (UP) через інтерфейс Fs.

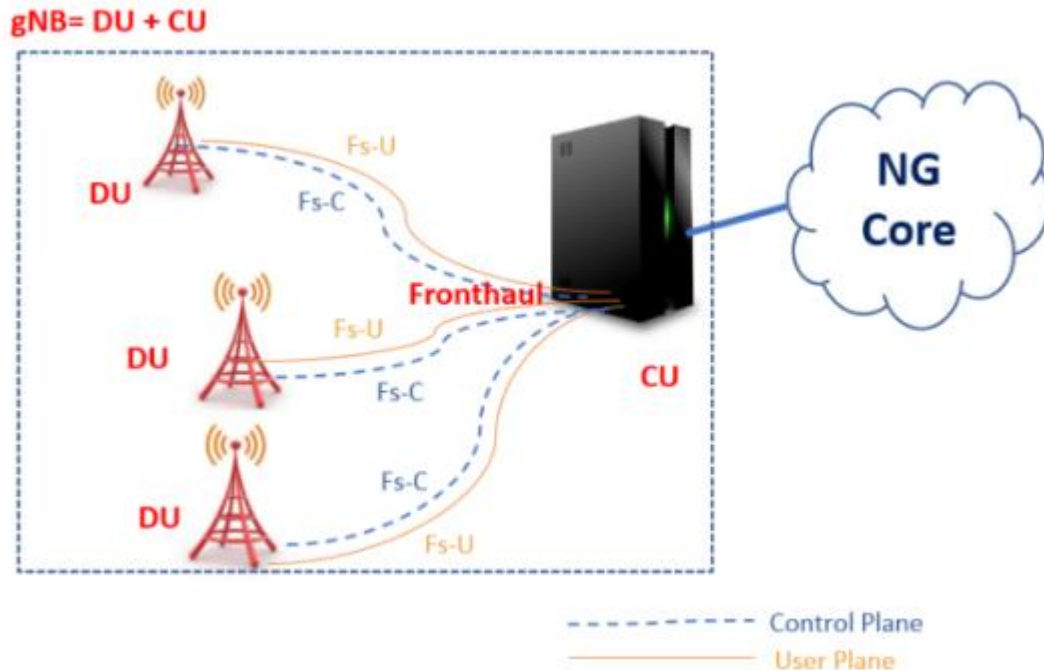


Рис. 1.7 Логічна архітектура gNB

У цій архітектурі центральний підрозділ (CU) та розподільний блок (DU) можна визначити наступним чином.

Центральний блок (або юніт) (CU): це логічний вузол, який включає такі функції gNB, як передача даних користувача, контроль мобільності, спільний доступ до радіодоступних мереж, позиціонування, управління сесіями тощо, за винятком функцій, призначених виключно для DU. CU контролює роботу DU через передні інтерфейси (Fs). Центральний блок (CU) також може бути відомий як BBU / REC / RCC / C-RAN / V-RAN.

Розподілений блок (DU): Цей логічний вузол включає підмножину функцій gNB, залежно від функціонального варіанту розділення. Його роботу контролює MC (metro-core). Розподілений блок (DU) також може бути відомий за наступними назвами, такими як RRH / RRU / RE / RU.

Висновок до розділу 1

В межах даного розділу у достатній мірі розкрито відомості про архітектуру нового покоління 5G та його актуальність. Головні три області задля яких буде побудована 5G являються: область широкосмугового та швидкісного інтернету, область низьких затримок, область масового підключення.

Концептуально новим є розподіл мережі RAN, на юніти, а саме центральний, розподільчий та віддалений, а також розподіл на можливі області Fronthaul, Midhaul, Backhaul. Саме такий розподіл мережі має виконувати вимоги нового покоління 5G.

2. ВЗАЄМОДІЯ ПОКОЛІНЬ 4G ТА 5G

2.1 Впровадження 5G

2.1.1 Рефармінг частот

Рефармінг частот - явище не унікальне для 5G, але також визначне. Справа в тому, що 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). Пізніше у міру підготовки необхідної інфраструктури ми зможемо скористатися SA (Standalone) мережами 5G, що підтримують повний спектр переваг нового покоління.

2.1.2 Стадія Standalone

Нерідко для мереж нового покоління буде використовуватися існуюча інфраструктура, що дісталася в спадок від 4G і більш ранніх поколінь. Завдяки більш гнучкого кодування і розширеним каналах передачі даних швидкість 5G NR буде на 25-50% перевищувати показники LTE.

Разом з тим нас очікує масштабне впровадження як фізичної інфраструктури, так і програмних рішень, які дозволять вичавити максимум з 5G.

2.1.2.1 Станції Small cells

Для розгортання standalone мереж будуть встановлені нові типи станцій і передавальних пристроїв. Так як мова йде про більш коротких хвилях, які менш стійкі до перешкод і перешкод, що породжується навколишнім середовищем, радіус покриття кожної базової станції буде знижуватися. У зв'язку з цим потрібно більш щільна інфраструктура, що складається з так званих Small cells - малих сот.

Як правило, для мобільного зв'язку використовуються станції потужністю 20-40 Ватт. Їх замінять економічніші станції з низьким енергоспоживанням, потужність яких коливається від 2 до 10 Ватт - саме вони забезпечать масове покриття в високочастотному діапазоні і гігабітні швидкості.

Small cells краще вписуються в міське середовище, можуть бути встановлені на щоглах освітлення, стінах будівель, зупинках громадського транспорту, бути виконані у вигляді простого об'єкта - рекламного лайтбоксу або урни.

Самі по собі антени міліметрового діапазону видають швидко затухаючий сигнал, який має обмежену спрямованість - всього 4 градуси. Але, відбиваючись від аналогічних антен протягом свого шляху, сигнал може зберігати силу і міняти напрям, досягаючи користувача.

Для забезпечення стабільної роботи малих сот в будівлях, де конструкції не дозволяють сигналу вільно поширюватися, може бути застосована технологія Distributed Antenna System. Базова станція займе своє місце в технічному блоці, і, будучи з'єднаною за допомогою дротового зв'язку з антенами, зможе передавати сигнал в кожне приміщення.

2.1.2.2 Технології Beamforming та Massive MIMO

В радіозв'язку існує поняття Beamforming - формування променя. Це процес напрямки і концентрації сигналу з певними параметрами в певному напрямку. В рамках 5G одним з практичних рішень для цього стане технологія Massive MIMO (Multiple-In Multiple-Out). Вона допоможе уникнути надмірної повсюдної установки мікростільників.

Під Massive MIMO розуміються станції, що складаються з великого масиву антен, які зможуть більш адресно спрямовувати сигнал і обслуговувати одночасно декількох користувачів, уникаючи перешкод і втрати якості сигналу.

2.1.3 Стадія Non-Standalone

2.1.3.1 Еволюція архітектури бездротового транспорту від 4G до 5G

У процесі еволюції від 4G / LTE до 5G нової транспортної архітектури радіо (NR) основна зміна полягає в тому, що функцію оригінальної базової смуги (BBU) в 4G / LTE можна розділити на три частини, а саме центральний юніт (CU), розподілена юніт (DU) та віддалений юніт (RU). Новий дизайн дозволить краще полегшити віртуалізацію мережі радіодоступу (RAN) з гнучким призначенням обчислювальних ресурсів для трьох різних мережевих об'єктів. Це також дозволяє знижувати швидкість fronthaul області, дотримуючись вимог затримки. Конкретні функції, що перебувають у CU та DU, залежать від розгортання та все ще обговорюються.

На Рис. 2.1 наведено один можливий приклад еволюції від 4G до функціональної архітектури розколу в 5G [CMRI]. Архітектура RAN в 4G складається з розвинутого ядра пакетів (EPC), BBU та віддалених радіовеж (RRH). Коли 4G еволюціонує до 5G, у цьому прикладі частина площини

користувача (UP) функції переміщені з EPC в CU і DU, рівень 2 (L2) не в реальному часі і рівень 3 (L3) функції від BBU до CU, Layer 1 (L1) / L2 в режимі реального часу від BBU до DU та інші L1 функціонують від BBU до RU. Функції EPC перерозподіляються серед ядер наступного покоління (NGC), CU і DU. Інші розподіли функцій між NGC, CU, DU та RU також можуть бути. Два нових інтерфейси між CU та DU і між DU та RU називаються інтерфейсом наступного покоління NGFI 2 та NGFI 1 [IEEE P1914.1], відповідно, і пов'язані з ними транспортні лінії часто називають Fronthaul-II і Fronthaul-I [CMRI]. Архітектура, що складається з трьох елементів, CU, DU та RU, пропонує більшу гнучкість для розповсюдження функціональних можливостей та для змішаних вимог до транспортної пропускної здатності та затримки [IEEE P1914.1].

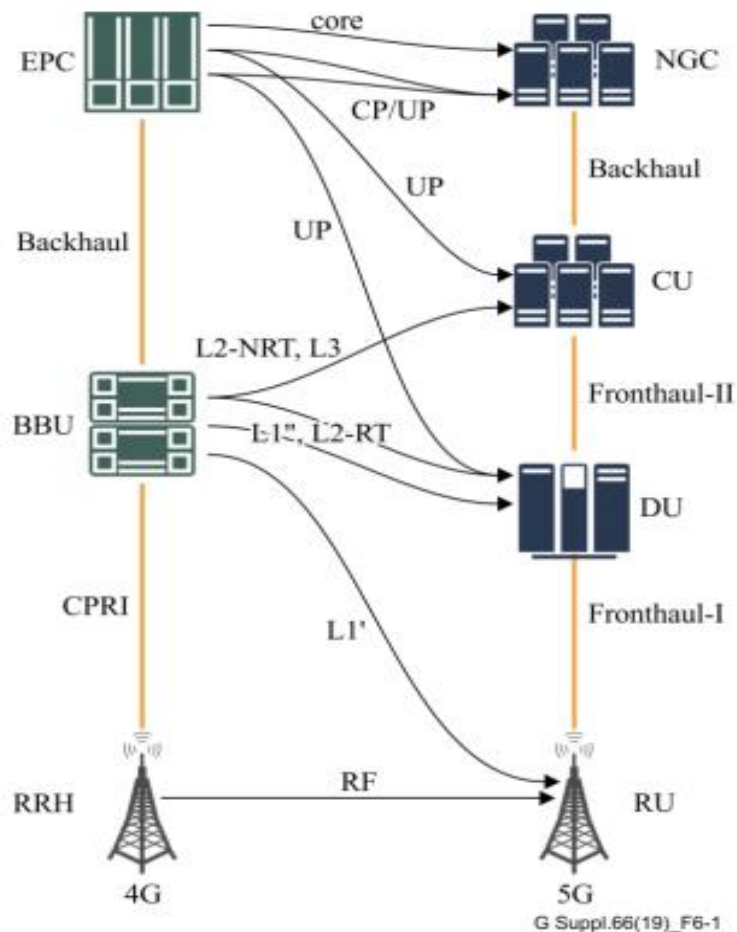


Рис. 2.1 Структурний перехід від LTE до 5G

2.2 Розширений розгляд архітектури

Якщо гворити про архітектури радіо мережі, то основними елементами NR (New Radio) являються: базова станція нового покоління gNB (next generation Node Base), яка буде виконувати функції UP та CP; та ng-eNB (next generation enhanced Node Base) – базові станції мережі LTE, які після оновлення програмного забезпечення зможуть напряду підкчатися до CN. Інтерфейсом зв'язку між базовими станціями буде Xn. Інтерфейсом зв'язку Core Network з базовою станцією буде являтися інтерфейс NG як показано на Рис. 2.2, який являє собою комплекс всіх інтерфейсів при передачі даних. UE (User Equipment) або gNB взаємодіють з двома елементами: AMF – мережева функція яка відповідає за доступ до ядра мережі та за управлінням мобільності абонентських пристроїв в режимі очікування; UPF (User plane Processing Function) – виконує функції, у мережах 4G, SGW (Serving Gateway) та PGS (Public data network Gateway), тобто комутацію трафіку.

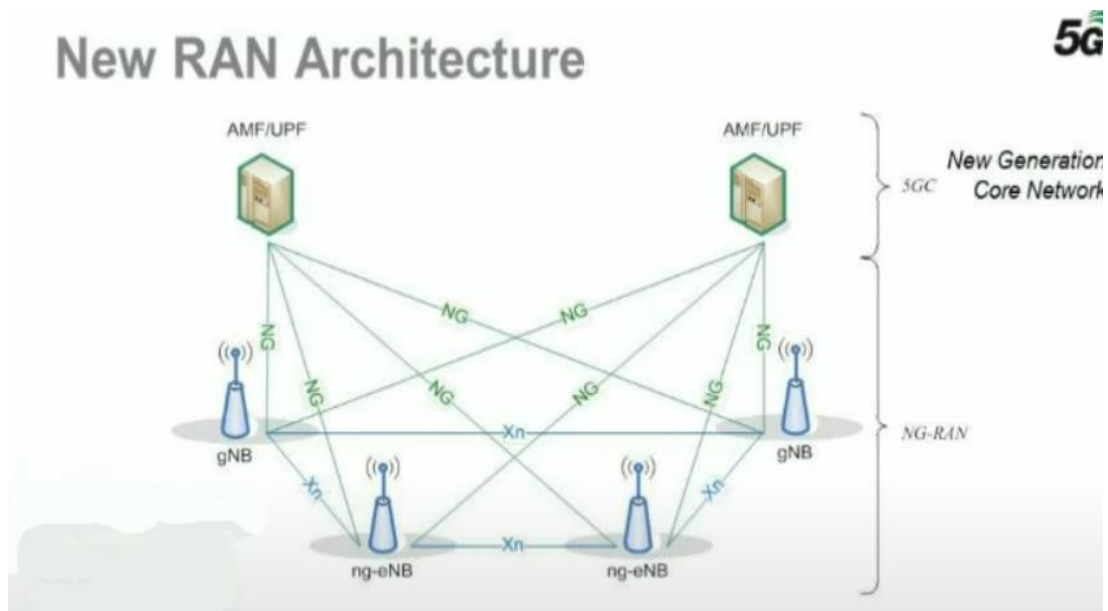


Рис 2.2 Взаємодія базових станцій з ядром 5GC

2.2.1 Можливості поетапного оновлення

Якщо оператор не має можливості оновити ядро мережі CN до NGCN, то стандарт буде передбачати підключення gNB до EPC – ядра 4G. При чому сигналізація CP буде підключатися через базову станцію LTE, eNB. User Plane в свою чергу зможе підключатись з відповідного Gateway-я архітектури LTE, або напруга до базових станцій нового покоління, або через базові станції LTE.

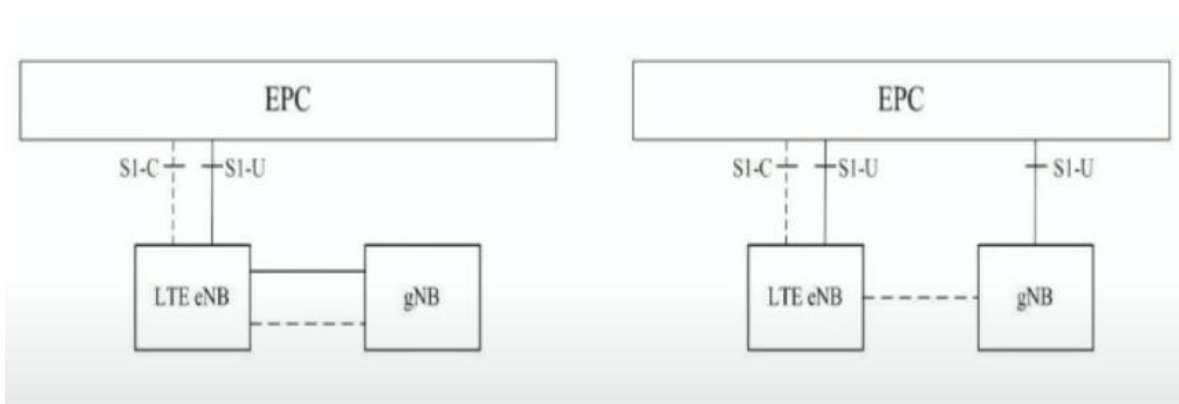


Рис. 2.3 Підключення 5G RAN до EPC

2.2.2 Типова архітектура сучасної БС (3G/4G/5G)

Якщо говорити про типову архітектуру сучасної базової станції, то для того, щоб базова станція могла підтримувати 5G, то мінімально потрібна підтримка технології обробки в основній смузі пропускання, оновлення обладнання та радіомодулів RRU, які будуть встановлені або автономно, або разом з AAU. Для блоку UMPT (Universal Main processing and Transmission unit) потрібно буде оновити програмне забезпечення для підтримки 5G.

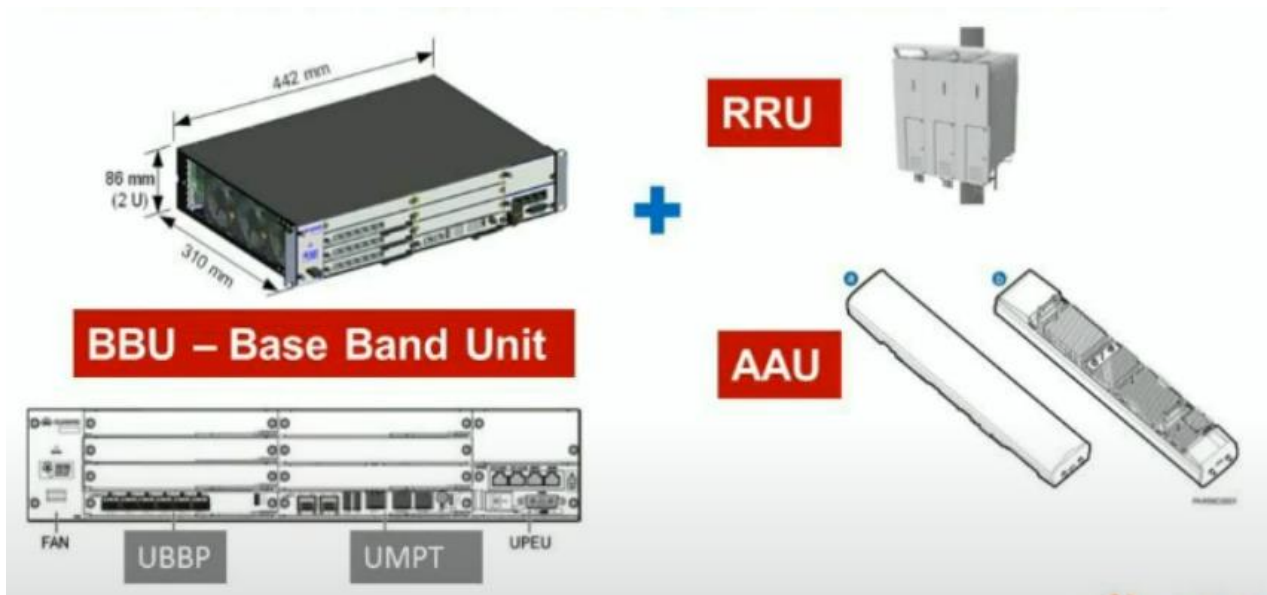


Рис. 2.4 Оновлення базових станцій

2.2.3 Структура протоколів NG-RAN

UP (User Plane) - Користувацький трафік

CP (Control Plane) - Сигналізація

Щодо структури протоколів NG-RAN, то взаємодія UE та 5GCN майже така сама як і у мережі LTE. Non-Access Stratum – пряма взаємодія користувацького пристрою з ядром, та Access Stratum – взаємодія через радіо мережу. При цьому структура така сама як для користувацького трафіку так і для сигналізації.

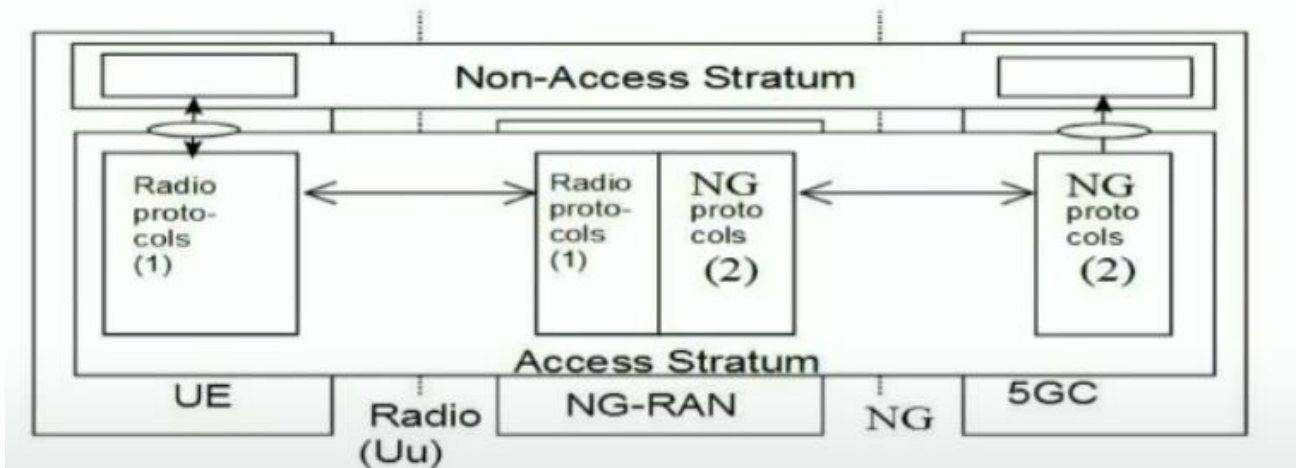


Рис. 2.5 Структура взаємодії UP та CP з ядром мережі

2.2.4 Структура протоколів радіоінтерфейсу

Якщо ми говоримо про взаємодію інтерфесу UP з gNB, то концептуальною різницею буде підрівень, який знаходиться над рівнями PHY, MAC, RLC та PDCP - SDAP (Service Data Adaptation Protocol), який буде розподіляти потоки даних відповідно до тієї чи іншої слайс-мережі. Цей рівень відповідальний за маркерування даних відповідно їх потребам сервісу, для забезпечення відповідної якості сервісу.

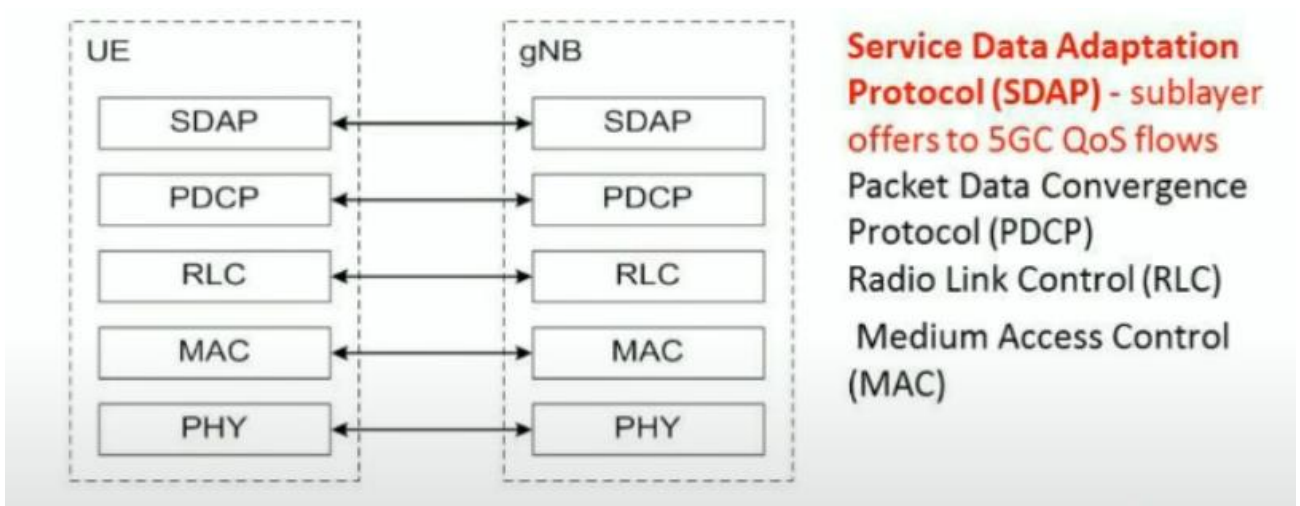


Рис. 2.5 Взаємодія інтерфесу UP та gNB

Для CP структурно, теж майже нічого не зміниться в порівнянні з LTE, NAS (Non-Access Stratum) протокол працює поверх протокола RRC на радіоінтерфейсі.

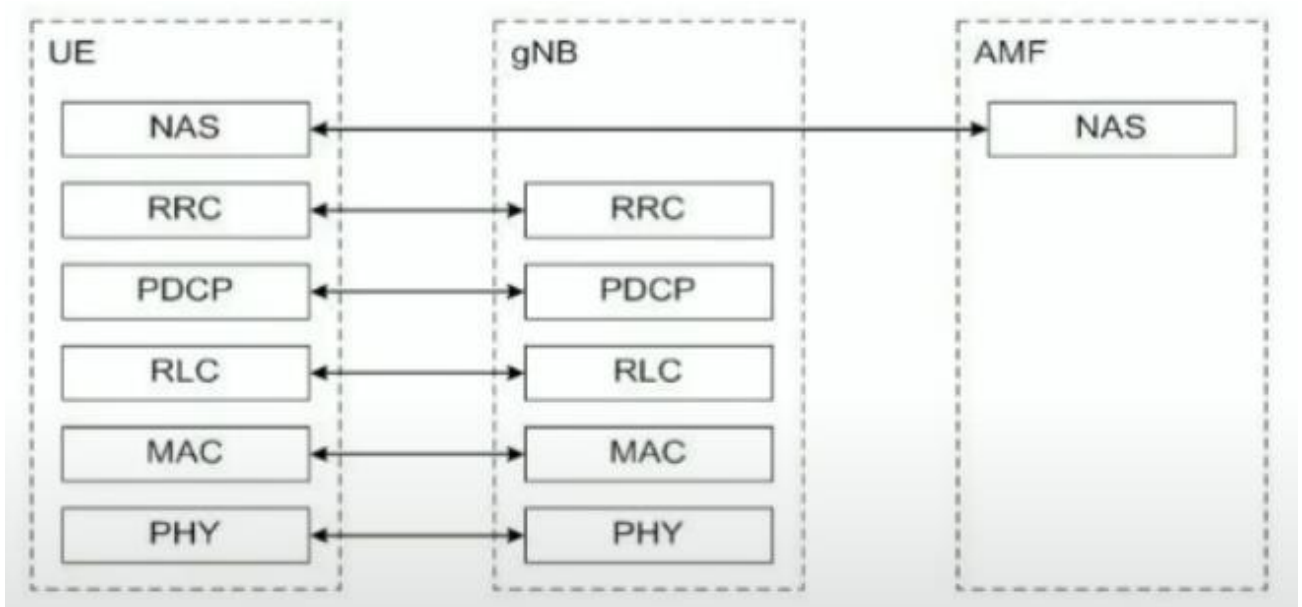


Рис. 2.6 Взаємодія інтерфейсу CP та gNB

RRC (Radio Resource Control) – протокол управління радіоресурсами. Основні функції:

- передача системної інформації
- управління RRC з'єднаннями (RRC connection control)
- управління механізмами міжтехнологічних мобільностей (inter-RAT mobility)
- налаштування вимірювання (measurement) і звітності (reporting)
- передача повідомлень сигнального трафіку який не належить до радіоз'єднання (NAS)

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

SDAP (Service Data Adaptation Protocol) - є новим рівнем, вперше введеному в 15-му релізі 3GPP. Реалізується в рамках інтерфейсу NG-U мереж, побудованих на базі ядра NGCN при взаємодії з базовими станціями не тільки мереж радіодоступу NR (gNb), але і E-UTRAN (ng-eNb).

Забезпечує реалізацію фреймворка архітектури управління якістю (QoS), включаючи:

- маркування низхідних та висхідних пакетів даних відповідними параметрами QFI (QoS Flow ID)
- маппінг між потоками даних з відповідними параметрами QoS і віртуальними каналами (DRB - data radio bearer)

При цьому на стороні користувача терміналу (UE) в UL каналі можливі дві схеми маппінга - явна, при якій пакети маршрутизуються в той чи інший віртуальний канал (DRB) на підставі QFI, або дзеркальна, при якій UE здійснює маппінг UL пакетів за результатами аналізу параметрів відповідних пакетів DK каналу.

PDCP (Packet Data Convergence Protocol)

Основні функції, що реалізуються на рівні PDCP:

- передача даних користувача і даних площині управління;
- нумерація пакетів даних;
- шифрування і контроль цілісності даних;

- відновлення порядку проходження пакетів даних, видалення дублікатів;
- дублювання пакетів даних з метою підвищення надійності передачі;
- маршрутизація пакетів "розщеплених" віртуальних каналів (split bearer) в режимі dual connectivity (тільки для пакетів призначених для користувача даних);
- стиснення заголовків протоколів верхнього рівня відповідно до методу ROHC - Robust Header Compression (тільки для пакетів призначених для користувача даних);
- видалення пакетів даних після закінчення таймера discardTimer (тільки для пакетів призначених для користувача даних).

Ключові зміни в порівнянні з рівнем PDCP інтерфейсу S1 мереж LTE полягають в наступному:

- перенесення 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 з іншого - дозволяє на більш ранній фазі виконувати операції дешифрування і контролю цілісності, надходжених з мережі пакетів даних з порушенням послідовності, що в окремих кейсах може зменшити величину затримки;
- реалізація можливості дублювання даних на PDCP рівні в рамках концепції подвійного підключення (Dual Connectivity).

RLC (Radio Link Control)

RLC може функціонувати в одному з трьох режимів:

- прозорий режим передачі (transparent mode, TM);
- передача без підтвердження (unacknowledged mode, UM);
- передача з підтвердженням (acknowledged mode, AM).

Основні функції, що реалізуються на рівні RLC:

- передача пакетів, які формуються вищерозміщеним рівнем (PDCP PDU);
- незалежна від рівня PDCP нумерація пакетів даних;
- сегментація і де-сегментація пакетів даних (тільки в режимах AM і UM);
- виявлення і корекція помилок передачі RLC PDU методом автоматичного запиту повторної передачі - ARQ (тільки в режимі AM);
- виявлення дублюючих RLC PDU (тільки в режимі AM);
- видалення пакетів даних за запитом вишележащего PDCP рівня - RLC SDU discard (тільки в режимах AM і TM).

При цьому функції сегментації / де-сегментації умовно відносять до підрівня Low-RLC, а інші - до High-RLC.

MAC (Medium Access Control)

Основні функції, що реалізуються на рівні MAC:

- маппинг між логічними і транспортними каналами;
- мультиплексування MAC SDU, що належать одному або кількох логічних каналах, в транспортні блоки (TB), що передаються на фізичний рівень;
- демультимплексування MAC-PDU, отриманих в транспортних блоках від фізичного рівня,
- динамічний розподіл ресурсів з урахуванням пріоритетів користувальницьких терміналів (UE) і логічних каналів, а також звітів про інтерференції - функції менеджера розкладів (scheduler);
- виявлення і корекцію помилок передачі MAC PDU методом гібридного автоматичного запиту повторної передачі - HARQ.

При цьому функції, що реалізує метод HARQ, умовно відносять до підрівня Low-MAC, інші - до High-MAC.

PHY (Physical Layer)

На фізичному рівні виконуються функції, які перераховані нижче. При цьому частина функцій (в залежності від опції поділу) умовно відносять до підрівня Low-PHY, інші - до High-PHY.

Умовна частина функцій Low-PHY:

- розподіл по ресурсним елементам (RE mapping) та об'єднання з ресурсних елементів (RE de-mapping);
- перекодування;
- швидке перетворення Фур'є та зворотне;
- вставка/видалення циклічного префіксу (CP);
- позподіл по потокам (layers mapping) та об'єднання з декількох потоків (layers de-mapping);
- модуляція/демодуляція;

Умовна частина функцій High-PHY:

- вичислення CRC;
- канальне кодування/декодування (chanell coding/de-coding);
- пересічність даних та вирівнювання їх швидкості (rate matching) та відновлення пересічних даних (rate de-matching);
- скремблювання та де-скремблювання;

Подвійне підключення EN-DC (E-UTRAN New Radio - Dual Connectivity) - це технологія, специфіковані 3GPP, і дозволяє впроваджувати локальні 5G сервіси в глобальні 4G-LTE мережі. Призначені для користувача термінали, що підтримують EN-DC, можуть одночасно підключатися до LTE eNB і 5G-NR gNB. Такий підхід дозволяє операторам на першому етапі розгорнути послуги 5G в

високонавантажених зонах без витрат на будівництво повноцінного ядра мережі 5G Core.

Архітектура базових станцій gNB мережі мобільного зв'язку 5-го покоління, запропонована 3GPP, 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). 3GPP (рекомендація TR 38.801 V14.0.0) визначає 8 можливих опцій поділу функцій між CU і DU - див. Рис. 2.7.

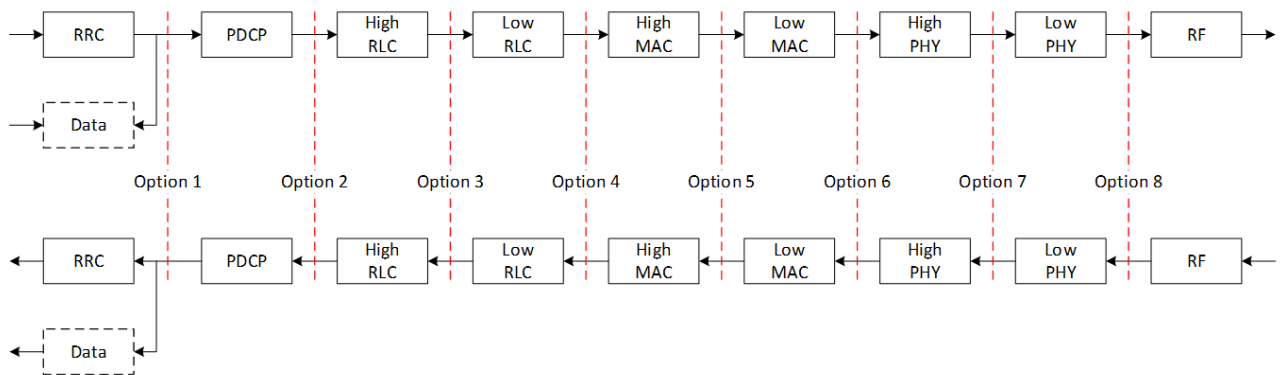


Рис. 2.7 Варіанти розподілу протоколів на юніті

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 здійснюватися по інтерфейсу F1. Є можливим припущення, що виробники будуть проектувати базові станції, вводячи додаткові площини поділу, виділяючи радіоблок з розподіленого модуля за допомогою інтерфейсу F2 (відповідно за опцією 7), а також розносячи PDCP рівень користувальницького трафіку і рівня управління - див. Рис. 2.8.

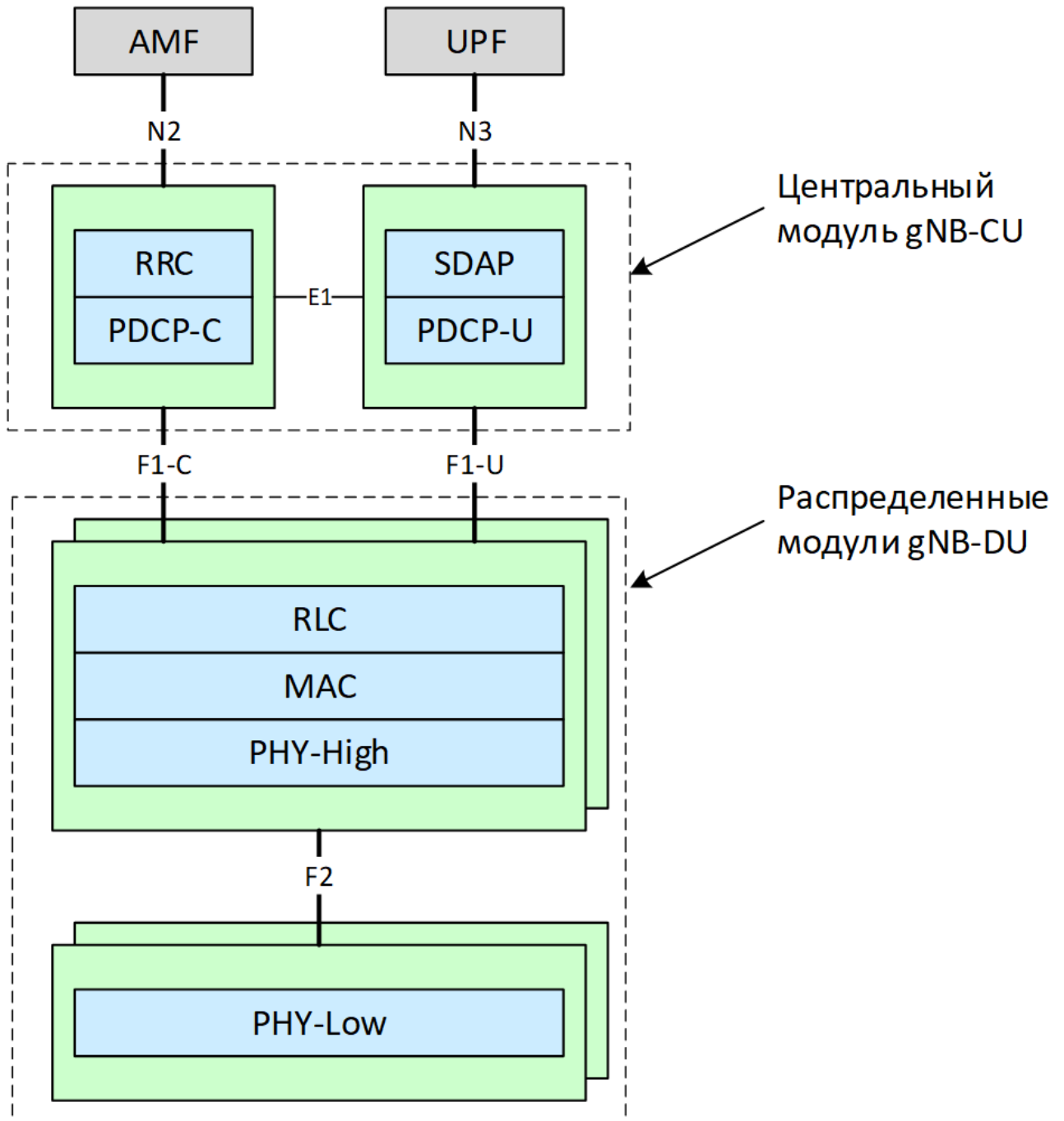


Рис. 2.8 Приклад побудови RAN мережі за другою опцією

- Інтерфейси базових станцій gNB 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.

Очікується, що інтерфейси F1 і F2 будуть стандартизовані 3GPP, що дозволить використовувати gNB-CU і gNB-DU від різних вендорів. Важливим аспектом для реалізації Non-Standalone опцій є концепція подвійного підключення (Dual Connectivity), специфіковані 3GPP ще в 12-му релізі, і має на увазі підключення користувальницьких терміналів (UE) в стані RRC_CONNECTED одночасно до двох базових станцій (Master eNb і Secondary eNb). Ключова відмінність Dual Connectivity від агрегації частот полягає саме в підключенні до двох різних базових станцій, пов'язаних за допомогою X2 інтерфейсу.

При цьому можливі дві схеми реалізації:

- split bearer - в цій схемі на PDCP рівні потік призначених для користувача даних (user plane) віртуального каналу розщеплюється на два підпотоків в напрямку Master eNb і Secondary eNb відповідно;
- switch bearer - в цій схемі потік призначених для користувача даних (user plane) може комутуватися або в напрямку Master eNb, або в напрямку Secondary eNb (без агрегації).

Реалізація Non-Standalone накладає додаткові вимоги до складності користувальницьких терміналів (UE), включаючи забезпечення одночасної роботи двох модемів, збільшений розмір буфера прийому і додаткове

навантаження на процесорні ресурси рівня PDCP для відновлення порядку проходження пакетів (в разі режиму MCG split bearer).

2.2.5 Варіанти розгортання мережі

Існує 8 варіантів розвернення мережі радіодоступу.

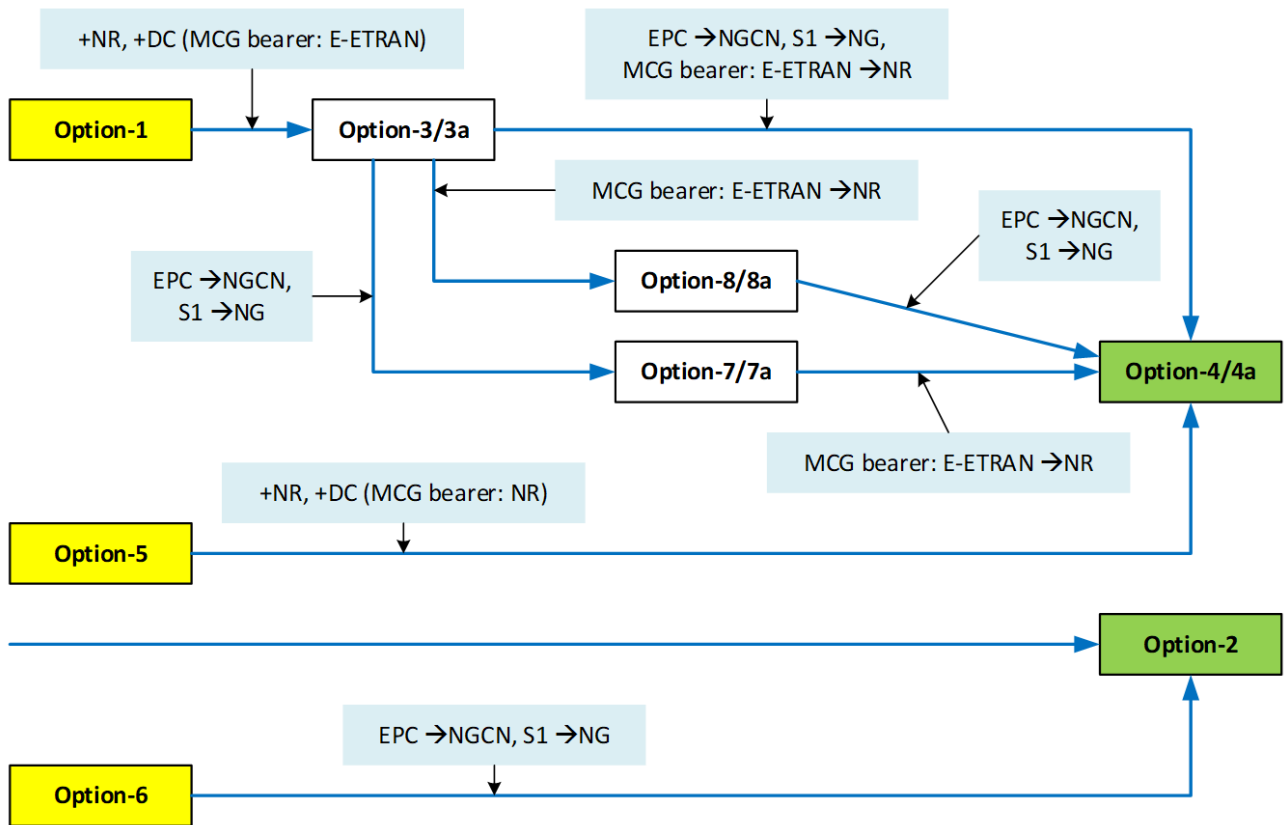


Рис. 2.8 Варіанти реалізації архітектури 5G

При цьому, хотілось би виділити саме 4-у опцію та 8-му, яка відповідає класичній (існуючій) схемі побудови розподіленої базової станції, див. Рис. 2.9.1, Рис. 2.9.2 та Рис. 2.10.1, Рис. 2.10.2.

2.2.5.1 Варіант 8

- використовує ядро мережі LTE (EPC);
- користувальницький термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR та E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точна розширення користувальницького трафіка (User Plane - UP розділений носій) становить gNb;
- користувальницький трафік передається двома маршрутами: EPC ↔ gNb ↔ UE та EPC ↔ gNb ↔ eNb ↔ UE;
- інтерфейс Xx використовується для переносної трафіки Control Plane та LTE User Plane.

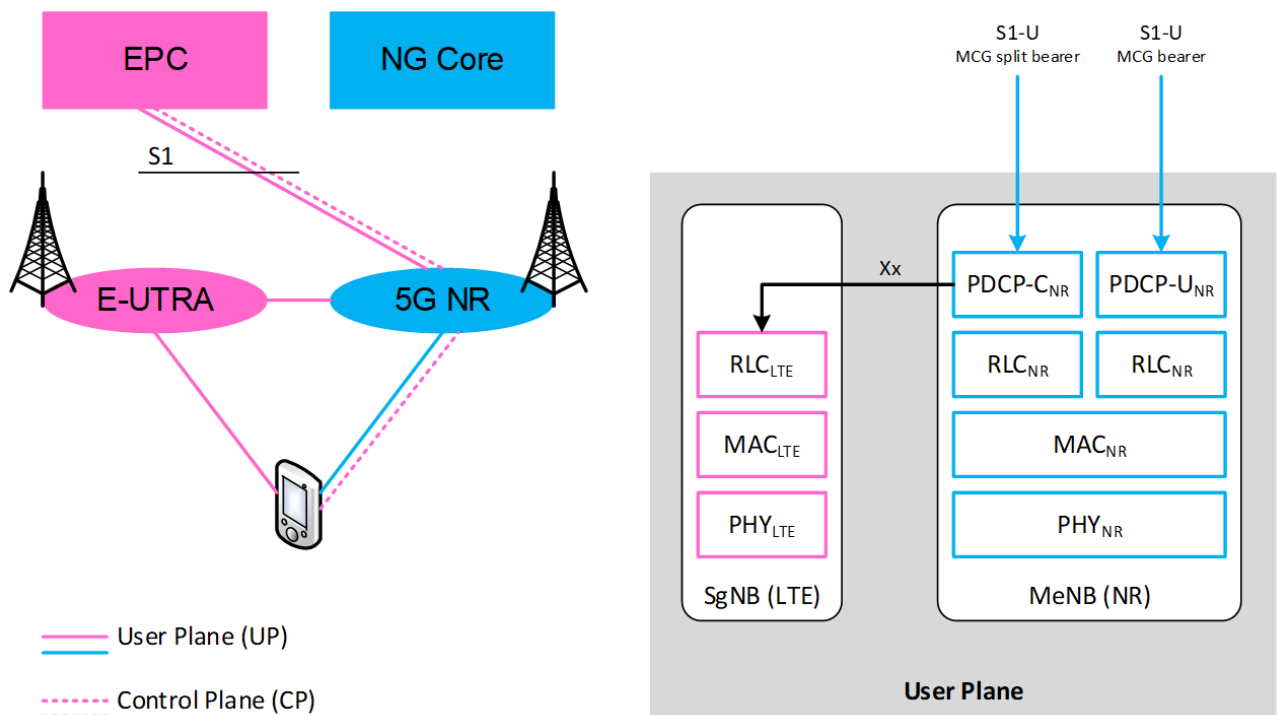


Рис. 2.9.1 Варіант 8 розгортання мережі

2.2.5.2 Варіант 8a

- використовує ядро мережі LTE (EPC);
- користувальницький термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR та E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точне розширення користувальницького трафіка (User Plane - UP розділений носій) - це EPC;
- користувальницький трафік передається двома маршрутами: EPC ⇔ gNb ⇔ UE та EPC ⇔ eNb ⇔ UE;
- інтерфейс Xx використовує для переносної трафіки лише Control Plane.

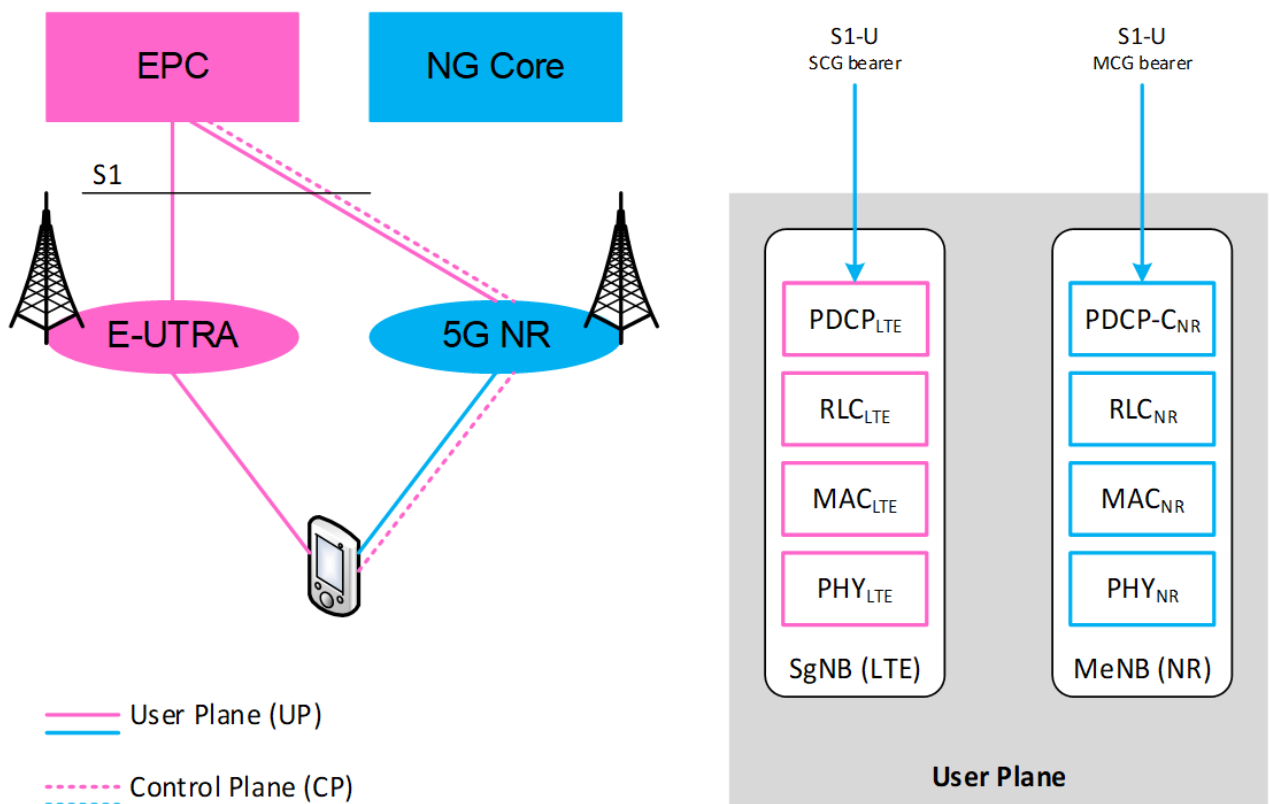


Рис. 2.9.2 Варіант 8a розгортання мережі

Варіант 8/8a - можливо використовувати як перехідний етап на шляху до цільової архітектури 5G LTE від Варіанту 3/3a до Варіанту 4/4a.

У відмінності від Варіанту 3/3a якорної точкою для термінації S1-MME використовуються базові станції радіостанції NR (gNb).

2.2.5.3 Варіант 4

- використовує ядро мережі 5G (NGCN);
- користувальницький термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR та E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точка розширення користувальницького трафіка (User Plane - UP розділений носій) становить gNb;
- користувальницький трафік передається двома маршрутами: NGCN ⇔ gNb ⇔ UE і NGCN ⇔ gNb ⇔ eNb ⇔ UE;
- інтерфейс Xx використовується для переносної трафіки Control Plane та LTE User Plane.

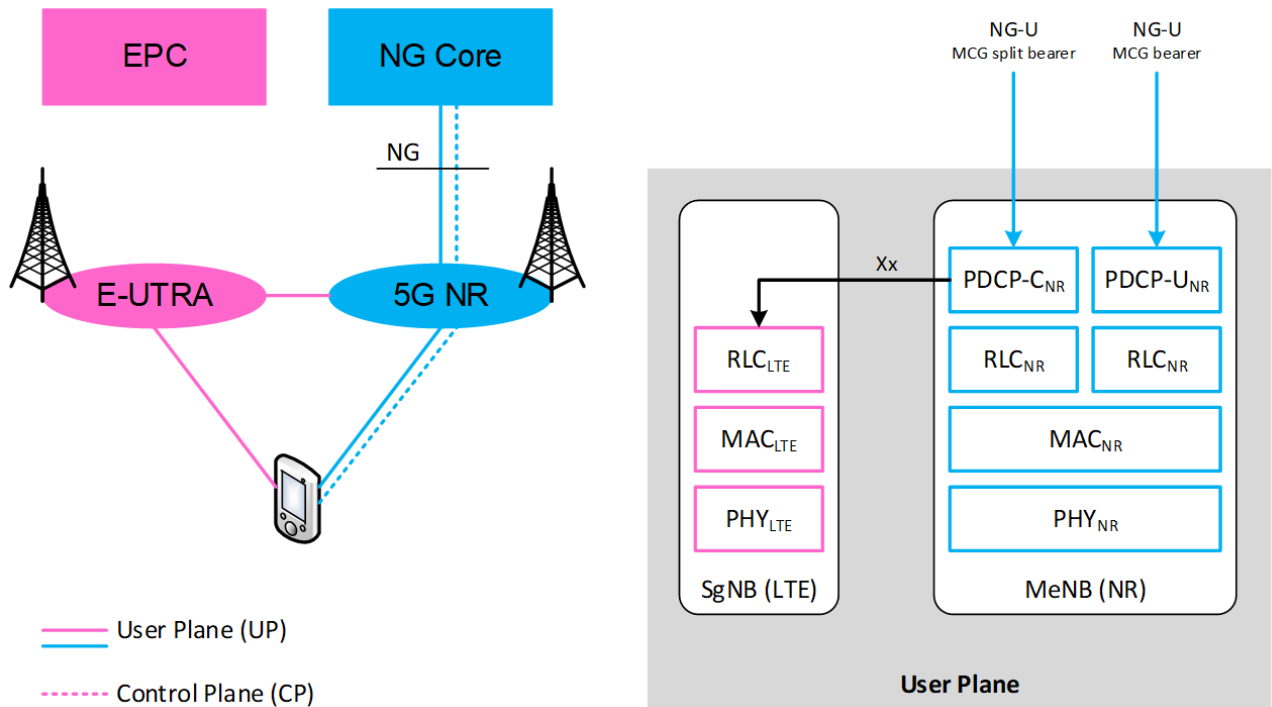


Рис. 2.10.1 Варіант 4 розгортання мережі

2.2.5.3 Варіант 4а

- використовує ядро мережі 5G (NGCN);
- користувальницький термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR та E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розширення користувальницького трафіка (User Plane - розділений носій UP) є NGCN;
- користувальницький трафік передається двома маршрутами: NGCN ⇔ gNb ⇔ UE і NGCN ⇔ eNb ⇔ UE;
- інтерфейс Xx використовує для переносу трафіку лише Control Plane.

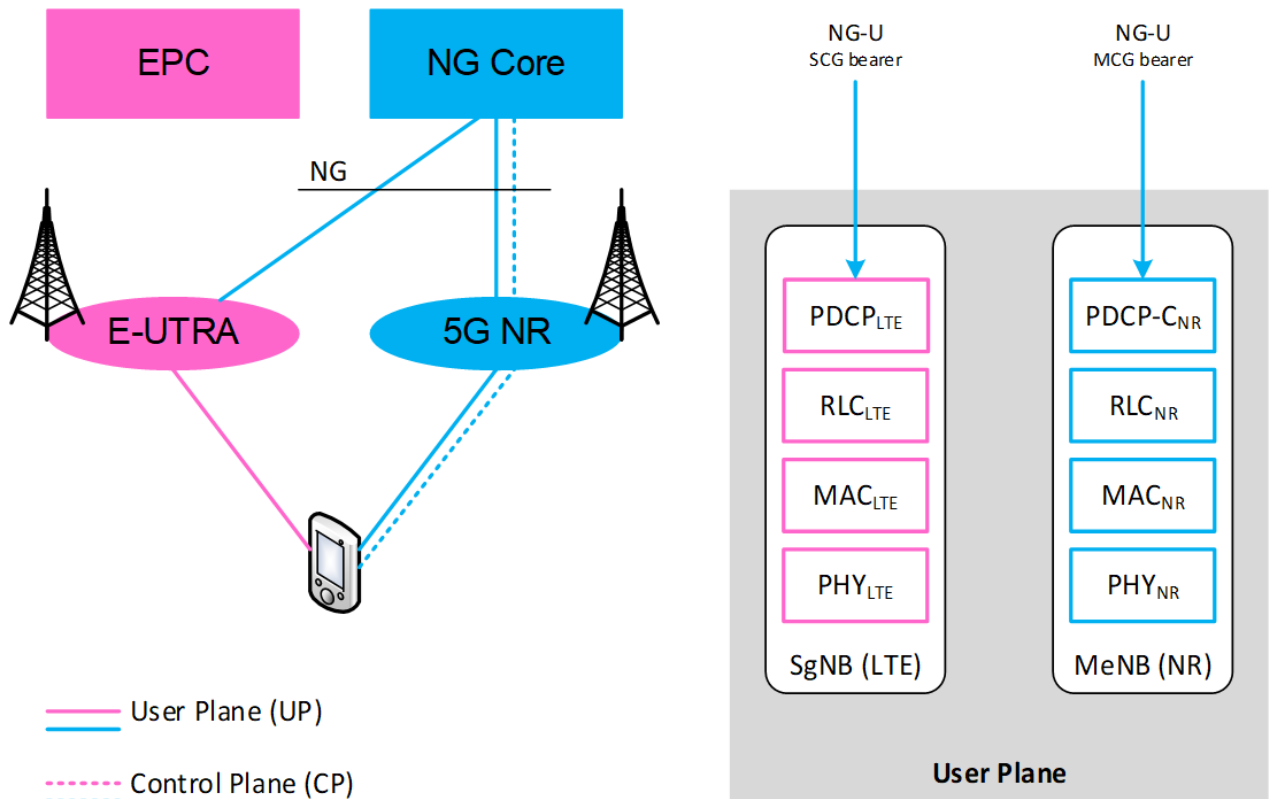


Рис. 2.10.2 Варіант 4а розгортання мережі

Варіант 4/4а - представляє єдину цільову фінальну архітектуру комбінованої мережі 5G/LTE. Використовується технологія подвійного підключення. Требує представлення ядра NGCN та модернізацію базових станцій мереж LTE до ng-eNb. Базирується на технологіях подвійного підключення. В якості інтерфейсу, що використовується, радіо E-UTRA/NR і NGCN, і переносяться користувальницький (User Plane) і сигнальний (Control Plane) трафік використовується NG. Якорною точкою для термінацій NG-C використовуються базові станції радіостанції радіостанції NR (gNb).

Висновок до розділу 2

У цьому розділі було проаналізовано унаслідування та відмінності покоління 5G вже на базі існуючого покоління LTE. У подальшому розвитку 5G буде переходити від етапу Non-Standalone до етапу Standalone з тенденцією попиту ринка на технологію.

Розділення протоколів по юінтам мережі RAN дасть змогу отримати той набір вимог, що висовується до 5G, а також можливість підключення до базових станцій LTE.

Один з кращих варіантів розвитку архітектури 5G являється розгорнення ядра технології та сумісне використання радіодоступу E-UTRA та 5G NR, цей варіант також буде економічно вигідним так як, можна буде використовувати вже працюючі вишки.

3. СИНХРОНІЗАЦІЯ МЕРЕЖ

Ще в період впровадження мереж NGN, 3G та LTE (на початку 2000-х років) виникла потреба адаптації та доопрацювання традиційних підходів та технічних рішень з синхронізації (тобто “класичної” концепції тактової мережевої синхронізації – TMC) для забезпечення синхронізації за частотою / фазою / часом в умовах пакетної мережі з асинхронним способом передавання. В результаті активної багаторічної роботи експертів SG-15 ITU-T, існуючий стан стандартизації технічних рішень в частині синхронізації наразі забезпечує достатню базу для впровадження стандарту IMT-2020/5G, принаймні на початковому етапі. Це стосується перш за все базової транспортної мережі та фрагменту Backhaul, де буде застосовано вже відпрацьовані в існуючих мережах 3G та LTE методи синхронізації – частотну синхронізацію на фізичному рівні (синхронний Ethernet SyncE та синхронна оптична транспортна мережа OTN) в поєднанні з фазовою/часовою синхронізацією за протоколом PTP (IEEE 1588). Удосконалення передбачаються в частині параметрів генераторного обладнання SyncE та синхронної OTN (відповідно до нової Рекомендації ITU-T G.8262.1), а також покращення показників затримок пакетного передавання. Використання більш точного генераторного обладнання на всіх фрагментах пакетної транспортної мережі сприятиме підвищенню показників точності та стабільності з одночасним спрощенням структури мережі синхронізації. Такий підхід узгоджується із загальною концепцією мережі 5G, яка передбачає наближення мережевих ресурсів до точки надання послуг кінцевому споживачу.

У контексті послуг 3G-5G, як правило, говорять про необхідність синхронізації по фазі і / або за часом, тобто про узгодження шкал часу мережевих елементів з використанням стандартизованого двостороннього протоколу передачі міток точного часу PTP (IEEE1588v2). Однак точність фазової синхронізації безпосередньо пов'язана з точністю тактової синхронізації на

фізичному рівні, і тому на практиці все ширше застосовується комбінований сценарій, який передбачає спільне використання синхронного Ethernet для передачі тактової частоти і протоколу RTP для передачі точного часу. Крім того, для синхронізації пакетних мереж широко застосовуються приймачі супутникових навігаційних систем (перш за все, GPS), причому не тільки в базовій транспортній мережі, але і на ділянці радіодоступу. Підвищення вимог до точності синхронізації з урахуванням перспективи впровадження 5G ставить нові завдання перед розробниками спеціалізованого обладнання та інженерами, що займаються проектуванням і експлуатацією мереж синхронізації. Оновлюється і міжнародна нормативна база, зокрема, вимоги до генераторного обладнання різного класу. Прикладом може служити Рекомендація ІТУ-Т G.8272.1 / Y.1367.1, яка визначає основні характеристики поліпшеного первинного еталонного генератора частоти і часу ePRTC (Enhanced primary reference time clock), призначеного для синхронізації майбутніх мереж 5G. У порівнянні з "звичайним" PRTC (primary reference time clock) (Рекомендація ІТУ-Т G.8272 / Y.1367), до генераторного обладнання ePRTC пред'являються більш жорсткі вимоги в частині рівня фазових шумів на виході: - в режимі захоплення опорного сигналу максимальне відхилення часового інтервалу МПЧІ (MTIE – Maximum time interval error) не повинно перевищувати 30 нс при $t \geq 400\,000$ с (у той час як для "звичайного" PRTC значення МПЧІ не повинно перевищувати 100 нс при $t \geq 273$ с); - в режимі утримання максимальний догляд фази за 14 дБ не повинен перевищувати 100 нс.

В даний час провідні виробники працюють над створенням зразків генераторного обладнання, здатних забезпечити подібні показники короткочасної та довготривалої стабільності. Однак навіть якщо така відповідність буде підтверджена в лабораторних умовах, залишається ще цілий ряд завдань, пов'язаних з практичною реалізацією вимог до синхронізації в мережах 5G. Це планування розподільної мережі синхронізації, методики

тестування, метрологічне забезпечення, освіти (підготовка фахівців) та інші питання, які потребують серйозної наукової та практичної опрацювання.

Діючі в даний час Рекомендації представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Огляд стандартів ITU-T по синхронізації пакетних мереж

Направлення стандартизації	Частотна синхронізація – серія G.826x		Фазова (часова) синхронізація – серія G.827x
	syncE	PTP	PTP
Терміни та визначення, метрики	G.8260		
Загальні принципи (базова рамочна рекомендація)	G.8261		G.8271
Норми мереж	G.8261	G.8261.1	G.8271.1, G.8271.2
Генераторне обладнання	G.8262	G.8263, G.8266	G.8272, G.8272.1, G.8273, G.8273.2, G.8273.3
Архітектура мережі синхронізації	G.8264	G.8265	G.8275
Профілі протокола PTP	-	G.8265.1	G.8275.1, G.8275.2

Існуючі технічні рішення по синхронізації в межах базової транспортної мережі, а також на фрагменті Backhaul (між базовою мережею і елементами рівня CU) за умови підвищення ряду параметрів генераторного обладнання в принципі дозволяють забезпечити рівень, необхідний для підтримки 5G. При цьому найкращий результат дає реалізація "класичної" концепції тактової мережі синхронізації на фізичному рівні із застосуванням технології SyncE, яка створює основу для забезпечення більш точної фазової / часової синхронізації на базі

протоколу RTP з урахуванням зростаючих вимог до параметрів затримки. Нині ведеться робота з перегляду параметрів генераторного обладнання SyncE (Рекомендації G.8262.1), що дозволить підвищити точність синхронізації базової мережі як по частоті, так і по часу. Паралельно триває робота по стандартизації параметрів генераторного обладнання, орієнтованого на роботу по протоколу RTP (Рекомендації G.8273.4).

Вимоги до точності синхронізації в мережі радіодоступу, а також на проміжних фрагментах (Midhaul і Fronthaul) ще знаходяться в стадії розробки. На даний момент експерти орієнтуються на існуючі вимоги мереж 4G (LTE) з відхиленням фази близько 1,5 мкс. Вони будуть коригуватися відповідно до розроблюваних специфікаціями стандарту IMT-2020 / 5G з урахуванням того, які технології і послуги на рівні RAN будуть реалізовуватися в першу чергу. При цьому передбачається, що підвищені вимоги до точності / стабільності на ділянці радіодоступу матимуть локальний характер, тобто підстроювання фази буде необхідно для взаємодії обладнання в межах одного майданчика без необхідності передачі опорних сигналів синхронізації від базової мережі.

Проблеми, пов'язані із синхронізацією, виникли одночасно з появою цифрових методів передачі інформації. Дійсно, будь-яка процедура дискретизації, передачі і прийому даних у вигляді бінарного сигналу або кодованого бінарного сигналу, вимагає узгодженості частот передачі і прийому, в іншому випадку передана інформація буде некоректно прийнята.

Зі сказаного вище випливає, що проблеми синхронізації не обмежуються тільки цифровою первинною мережею, але мають важливе значення при розгляді мереж ISDN, передачі даних (МПД), цифрової телефонії, мереж спеціального призначення та інших вторинних мереж. Визначимо, що розуміється під синхронізацією і яке місце вона грає в сучасних цифрових системах зв'язку.

В технології сучасного зв'язку існує три основних поняття синхронізації: частотна, фазова і часова (те ж саме, що і синхронізація за часом).

3.1 Частотна синхронізація

Найбільш важливим типом синхронізації для первинної мережі є частотна синхронізація (ЧС), яка означає узгодженість генераторів різних цифрових пристроїв в мережі по частоті. В цьому випадку в ідеалі всі генератори мережі працюють з однаковою частотою, швидкість передачі цифрової інформації з високим ступенем точності дорівнює швидкості прийому, в результаті в системі зв'язку немає втрат інформації, тобто немає помилок, пов'язаних з порушеннями синхронізації. Істотно, що це і є основною метою експлуатації - домогтися можливо меншого рівня помилок в мережі. Тому саме ЧС представляє головний інтерес операторів зв'язку.

3.2 Фазова синхронізація

Фазової синхронізацією (ФС) називається відповідність фаз приймального і передавального сигналів. Найбільш важлива ця синхронізація всередині різних електронних пристроїв. Для її досягнення використовують різні компоненти (фазовращатели), фазові детектори і т.д. У сучасній практиці систем зв'язку ФС найбільш часто використовується в ланцюгах приймачів сигналу у вигляді петлі ФАПЧ, де здійснюється досягнення ФС між лінійним сигналом і ланцюгом приймача з опорним генератором, який підналаштовує фазу та частоту.

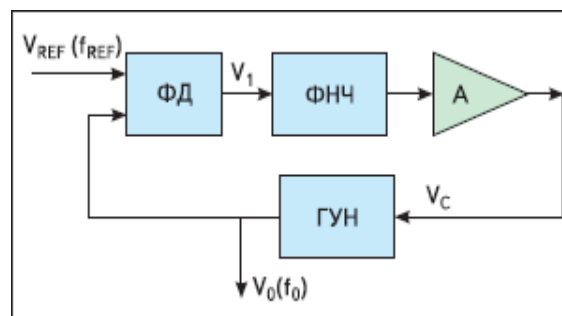


Рис. 3.1 Фазова автоідстройка частоти

3.3 Часова синхронізація

Часова синхронізація (ЧВС) або синхронізація за часом передбачає, що всі пристрої в мережі мають єдиний час. Це час зазвичай узгоджується зі всесвітнім скоординованим часом (UTC - Coordinated Universal Time). Зазвичай завдання ЧВС пов'язана з різними вторинними мережами і системами (МСП, мережами спеціального призначення, системами білінгу і т.д.). Як приклад можна розглянути дуже поширений метод захисту банківських електронних мереж, коли кожному документу присвоюється точна тимчасова мітка. На приймальній стороні мітка порівнюється з поточним часом і аналізується принципова можливість перетворення електронного документа при його передачі по мережі. У разі перевищення затримки передачі певного порогу, документ вважається недійсним. Така схема захисту є досить потужною, однак вимагає, щоб всі робочі станції в мережі були синхронізовані за часом. Слід зазначити, що ЧВС є абсолютно незалежним від частотної синхронізації завданням. У сучасній практиці побудови є кілька методів інтегрального рішення обох задач.

3.4 Синхронізація в мережах PON

У транспортній мережі 5G OTN потрібна частотна та фазова / часова синхронізація для підтримки вимог до повітряного інтерфейсу мобільної системи. На основі мобільної технології 5G, зміщення частоти у радіо інтерфейсі кожного AAU має бути меншим ніж значення у наступній таблиці. Відповідні вимоги синхронізації фази / часу перераховані в [ITU-T G.8271].

Таблиця 3.2 Вимога щодо зміщення частоти

BS class	Accuracy
Wide area BS	± 0.05
Medium range BS	± 0.1
Local area BS	± 0.1

Для задоволення вимог щодо частоти та синхронізації фази/часу, повне рішення підтримки часу слід використовувати в транспортній мережі OTN. Це рішення вимагає, щоб кожен вузол між тактовим (часовим) сервером та кінцевим вузлом програми підтримував тактові функції ОЕС (OTN Equipment Clock), еОЕС (enhanced OTN Equipment Clock) та Т-ВС (Telecom Boundary Clock).

Як правило, сервер опорних частот PRC (primary reference clock) / ePRC (enhanced primary reference clock) розгорнуто в ядрі мережі, а сервер фази/часу PRTC / ePRTC розгорнуто в мережі fronthaul, midhaul, backhaul. Позиція розгортання обмежена кількістю стрибків від тактового сервера до AAU, що описано в HRM [ITU-T G.8271.1]. Для рішення частотної синхронізації вузли OTN між PRC / ePRC і AAU повинні підтримувати тактовий рівень фізичного рівня ОЕС [ITU-T G.8262] або еОЕС [ITU-T G.8262.1]. Для рішення синхронізації фаза/час, вузли OTN між PRTC / ePRTC та AAU повинні підтримувати тактовий рівень Т-ВС РТР [ITU-T G.8273.2].

Доречі, 3G, 4G, 5G OTN побудовані на технології SDH (Synchronous Digital Hierarchy), яка дає можливість передавати дані на великі відстані в оптичних та радіорелейних з'єднаннях, при цьому виділивши з високочастотних потоків потрібний користувачський канал, на базі мультиплексорів. SDH прийшла на зміну PDH ієрархії, яка на цей момент вже не може підтримувати великий трафік та підтримку високошвидкісних потоків.

3.5 Приклади синхронізації в мережах мобільного зв'язку

3.5.1 Використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS)

По суті, використовуючи GNSS, ми будемо розподілену систему тактової мережевої синхронізації. Кожна базова станція і контролери базових станцій мають приймач GNSS. З переданої інформації про час приймач може отримати синхросигнал, який задовольняє всім найсуворішим вимогам, причому як для частотної, так і для фазово-часової синхронізації. До переваг методу можна віднести і те, що метод досить старий, отже, на ринку представлені різні моделі приймачів різних виробників. Крім приймачів, що працюють з американською системою визначення місця розташування GPS, також є пристрої, що працюють з ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou.

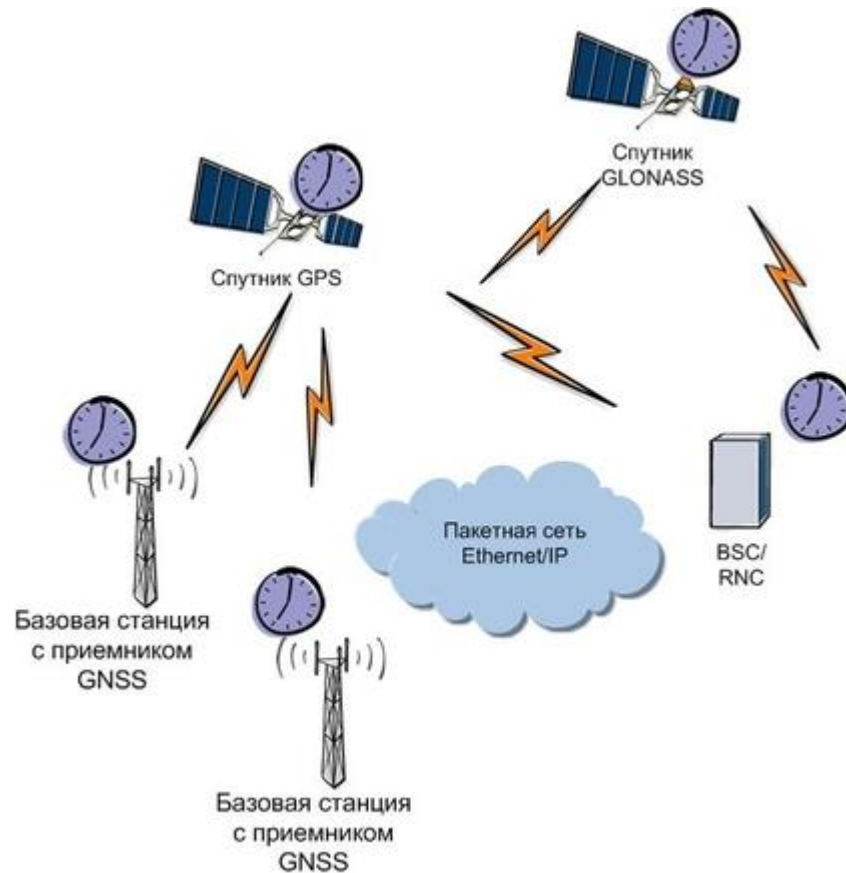


Рис. 3.2 Схема синхронізації з використанням GNSS

До недоліків можна віднести обов'язкове використання антени, обмежена область поширення радіосигналу і те, що система не може працювати в закритих приміщеннях. Крім того, резервування може бути здійснено тільки за допомогою вибору двох приймачів на кожен базову станцію, що здорожує рішення. Тому для рішення даної проблеми у деяких місцях мережі використовують протокол точного часу (PTP), оскільки він може використовуватись незалежно від місця установки.

3.5.2 Використання PTP протоколу точного часу

PTP - протокол синхронізації часу для вузлів, розподілених по мережі. Реалізація протоколу можлива на підставі програмного, апаратно-програмного і

повністю апаратного рішення. Найбільшу точність забезпечує повністю апаратна реалізація, оскільки виключається вплив черг і нерівномірності завантаження процесора. Реалізація формування тимчасової мітки на підставі апаратного рішення забезпечує кращу точність, ніж інші протоколи синхронізації часу, такі як NTP. Сигнал встановлюється завдяки GNSS.

Система PTP може складатися з комбінації пристроїв, що підтримують і не підтримують протокол PTP. Для можливості забезпечення високої точності синхронізації, необхідно, щоб всі пристрої підтримували даний протокол. Наявність на мережі пристроїв, що не підтримують PTP, призведе до значної варіативності затримки, що вноситься цими пристроями, що значно знизить точність підстроювання генераторів ведених пристроїв.

PTP є розподіленим протоколом, який описує, як синхронізувати в режимі реального часу PTP пристрою. Генератори організуються в ієрархічну структуру «ведучий-ведений», в вершині знаходяться опорні генератори (Grandmaster clock), які роздають мітки синхронізації для всієї системи. Основними мережевими елементами PTP мережі є пристрої типу Master і Slave. Мережевий елемент Master є джерелом синхронізації, Slave - приймачем синхросигналів для підстроювання внутрішнього генератора. Залежно від конфігурації, мережевий елемент може бути одночасно і Master і Slave для різних сусідів.

Синхронізація досягається шляхом обміну PTP-повідомленнями, при цьому пристрої використовують дані повідомлення для підстроювання внутрішніх генераторів від опорного генератора відповідно до ієрархії. Grandmaster обмінюється пакетами з веденими пристроями, постійно коригуючи втрату частоти ведених пристроїв відносно опорного генератора. Чим вище частота обміну повідомленнями, тим точніше проводиться підстроювання. При цьому, збільшення частоти обміну повідомленнями синхронізації збільшує

необхідну для RTP смугу пропускання. Протокол RTP працює в логічній області, званої RTP-доменом.

PTP Grandmaster – Use Case

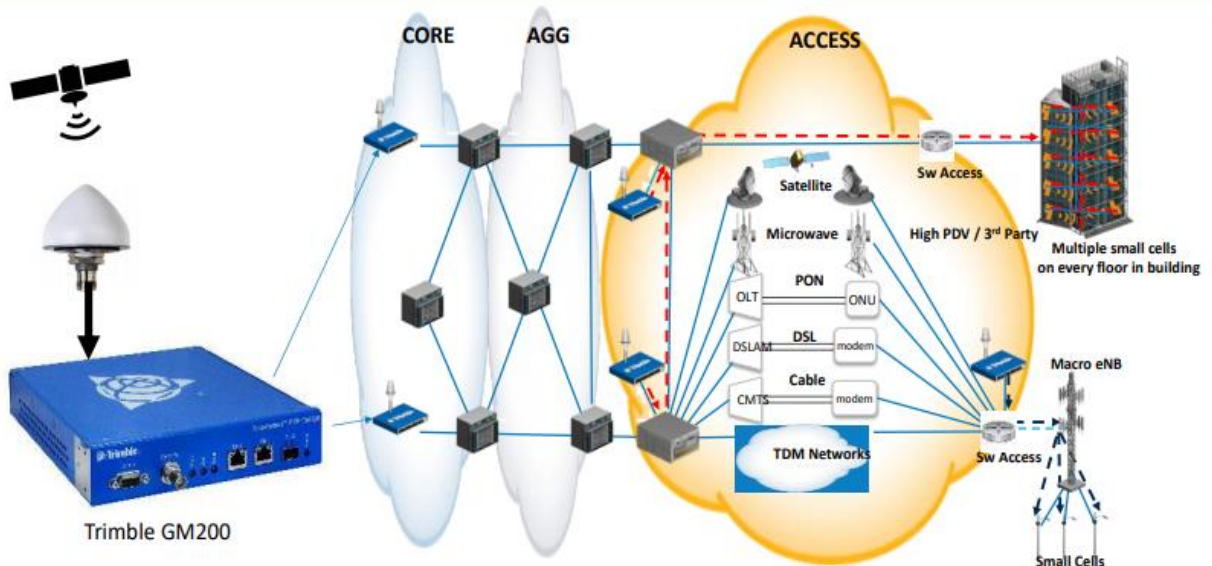


Рис. 3.3 Використання RTP протоколу

В [11] описаний лабораторний експеримент, що імітує передачу сигналів синхронізації по трактах Ethernet з використанням пристроїв, що працюють по протоколу RTP (IEEE1588v2). При цьому досліджували два режими роботи: виділеного каналу і імітації робочого тракту Ethernet з різним ступенем завантаження (інтенсивністю трафіку). При оцінці відхилень тимчасових інтервалів ОТІ було встановлено, що розбіжність фаз веденого і опрного генераторів тісно корелювали з параметрами затримки пакетів. Виявилось, що якщо при незавантаженому тракту якісні показники отриманих сигналів ТС наближаються до якості ТМС, то з ростом завантаження тракту ці показники істотно погіршуються.

Подібні тенденції були зафіксовані і в інших експериментах, проведених як в лабораторіях, так і на реальних мережах. Так, на Рис. 3.4 представлені графіки

розподілу затримок при роботі протоколу RTP в мережі, що складається з 10-ти послідовно включених комутаторів при різного ступеня завантаження тракту.

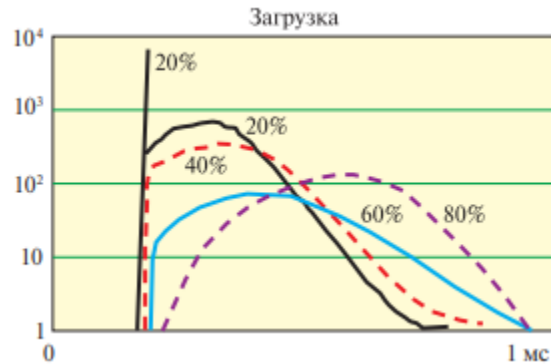


Рис. 3.4 Розподіл затримок в експерименті з 10-ма послідовно увімкнених комутаторів і з різним ступенем завантаження тракту

Аналіз даних показує наступні закономірності:

- зі зростанням завантаження тракту початкова затримка зростає пропорційно завантаженні в послідовності 180, 270, 410 і 650 мкс при завантаженні 20, 40, 60 і 80%, відповідно;
- середня затримка на комутатор змінюється від 18 до 65 мкс;
- при зростанні завантаження розподіл затримок може змінюватися досить довільно (воно наближається або до гауссова розподілу, або до розподілу арксинус).

В середньому, якщо навантаження в тракті більше $1/3$ пропускної здатності, то показники передачі і підстроювання частоти і шкал часу погано контролюються.

Та обставина, що підстроювання ТС за сигналами часу, що передаються за допомогою двостороннього мережевого протоколу канального рівня (в даному випадку протоколу RTP) може забезпечити якісну ТМС (тактова мережева синхронізація) і точну передачу міток часу тільки при підтримці на мережі

високого якості ТМС на фізичному рівні (Іншими засобами), змусило шукати компроміс.

3.5.3 Використання SyncEthernet

Спочатку технологія Ethernet розроблялася виключно для використання в локальних мережах. Методи лінійного кодування інформації на фізичному рівні вибиралися відповідно до завдань, які не припускали передавати синхросигнал. У мережах SDH (СЦІ – Синхронна цифрова ієрархія) спочатку використовувалися лінійні коди NRZ, які пристосовані для передачі синхронізації на фізичному рівні каналу зв'язку. Завдання технології полягає в забезпеченні можливості передачі стабільної частоти на фізичному рівні в складі інформаційного сигналу. На Рис. 3.5 схематично представлений принцип роботи генераторного обладнання несинхронного Ethernet (а) і синхронного Ethernet з генераторним обладнанням Ethernet Equipment Clock - EEC (б). На Рис. 3.6 наведені їх основні характеристики для ієрархії, заснованої на потоці E12 (2,048 Мбіт / с) [6]. Стандарт [6] передбачає більш жорсткі вимоги до EEC опції 2, засновані на потоці E11 (1,544 Мбіт / с).

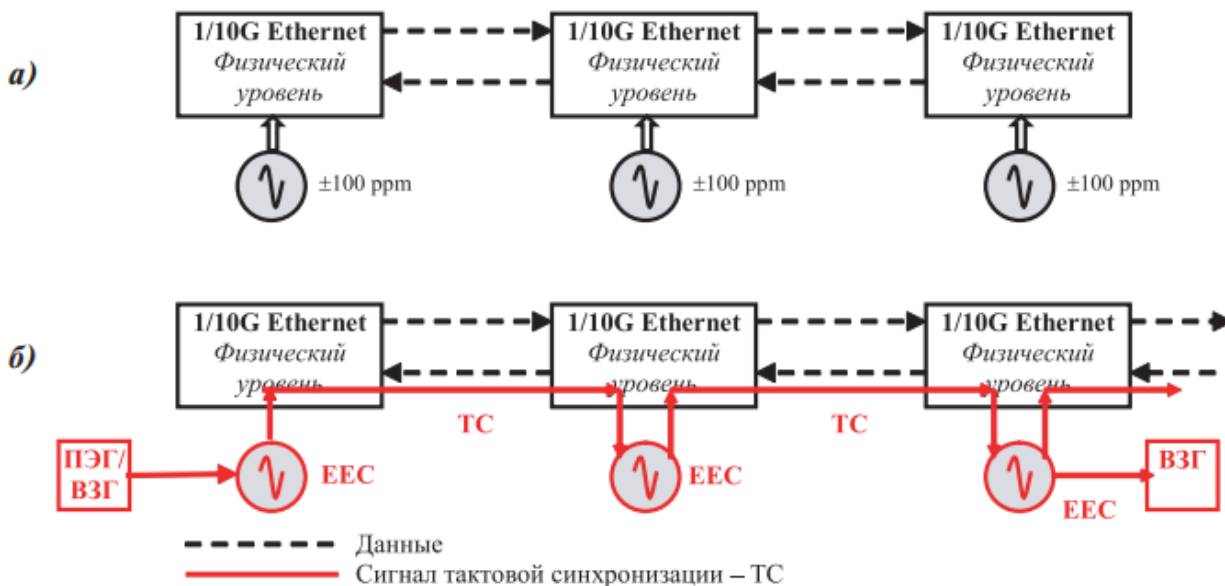


Рис. 3.5 Принцип роботи генераторного обладнання несинхронного (а) та синхронного (б) Ethernet

Параметры	Оборудование		
	Ethernet (обычный)	SyncE (EES), опция 1, G.8262	SEC, опция 1, G.813
Прием по тактам из линии	Да	Да	Да
Точность генераторного оборудования	± 100 ppm	$\pm 4,6$ ppm/год, месяц	$\pm 4,6$ ppm
Поддержка режима работы сети:	± 100 ppm	$\pm 4,6$ ppm	$\pm 4,6$ ppm
- плезиохронного	Да	Да	Да
- синхронного	Нет	Да	Да
Возможность отслеживания ТЧ источника более высокого уровня, например, ПЭГ (PRC):			
- по рабочему тракту (сигналу)	Нет	Есть	Есть
- через выделенный вход (ТЗ)	Нет	Есть	Есть
Полоса пропускания	1...10 Гц		
Джиттер на выходе:			
- для GbE G.8261, Amd.1 (07/2010)	1,5 ЕИ в полосе 2,5 кГц...10 МГц		
- для 10GbE	1,5 ЕИ в полосе 20 кГц...80 МГц		

Рис. 3.6 Коротка анотація основних стандартів SyncE

Синхронний Ethernet передбачає відстеження внутрішнім генератором зовнішнього опорного сигналу (режим «Відстежуваного Primary Reference Clock

- PRC ») подібно до того, як це відбувається в генераторному устаткуванні СЦ. Слід зазначити, що обладнання Ethernet, що підтримує режим SyncE, зазвичай має лінійні плати Ethernet двох типів - з несинхронним і синхронним режимами роботи. Це пов'язане з тим, що деякі програми не вимагають високих показників точності і можуть обслуговуватися звичайними трактами Ethernet.

Технологія синхронного Ethernet успадкувала основні принципи ТМС, успішно зарекомендували себе в «класичних» мережах СЦ, що забезпечує можливість спільної роботи ТМС на основі СЦ і SyncE. За визначенням, технологія SyncE призначена для відстеження тактової синхронізації на рівні СЦ, здатної забезпечити точність ТЧ (тактової частоти) в мережі на рівні первинного еталонного генератору - ПЕГ (PRC), тобто близько 10^{-11} . Однак нові послуги, зокрема, системи LTE, Wi-Max і W-CDMA вимагають підтримки тимчасової синхронізації з точністю близько 1 мкс, що не передбачено стандартами SyncE. Для цих цілей передбачалося використовувати добре зарекомендував себе в виробничих додатках протокол точного часу PTP (IEEE 1588).

З Рис. 3.7 видно, що синхронізація дійсно здійснюється в Ethernet на кожному сегменті мережі між вузлами, але вона не поширюється від сегмента до сегмента. Таким чином, вузол приймає тактовий сигнал, відновлює його, а потім пересилає всім передавальним вузлів.

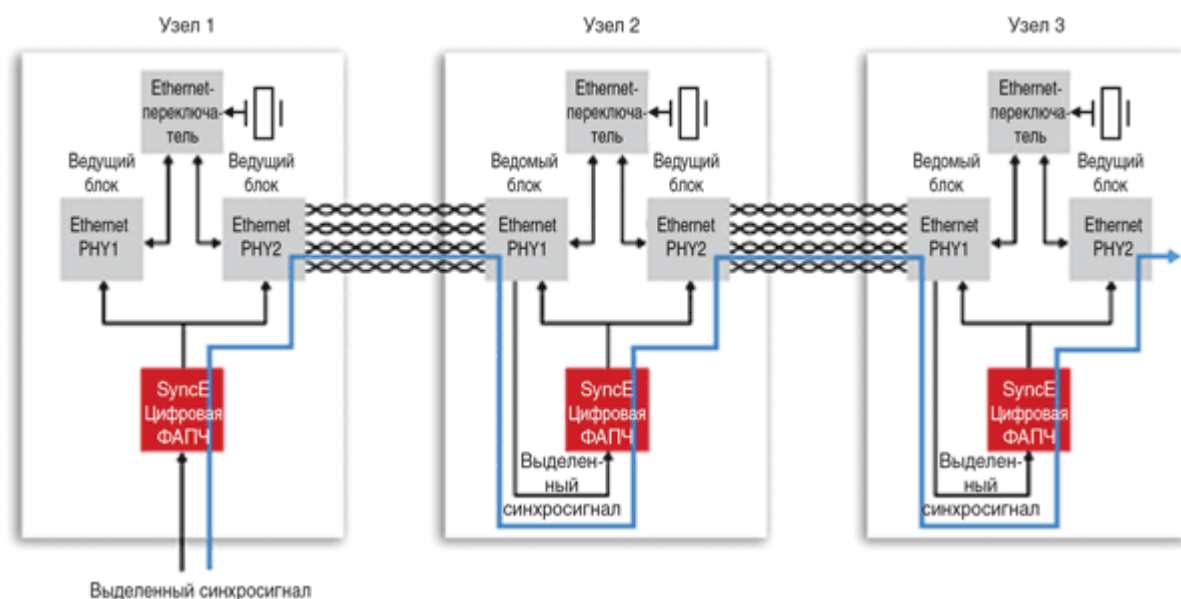


Рис. 3.7 Синхронізація на фізичному рівні

Відновлений сигнал потребує очищення за допомогою ФАПЧ – фазової автопідстройки частоти елементом якого є опорний генератор ЕЕС, що дозволяє усунути джиттер з ланцюга відновлення тактового сигналу до того, як він надійде на передавальний пристрій. Крім того, необхідно вручну налаштувати порти в тракті передачі сигналу синхронізації, що робиться для чергування функцій ведучого і веденого блоків (тільки для мережі 1000Base-T).

У разі оптоволоконної мережі Gigabit Ethernet (1000Base-X) або 10 Gigabit Ethernet (10GBASE) така необхідність відсутня, тому що один волоконний тракт використовується для передачі, інший - для прийому (по одному оптоволокну сигнал передається тільки в одному напрямку) і, отже, функції ведучого і веденого вузлів не потрібні.

Будь-який пристрій фізичного рівня мереж Gigabit Ethernet або 10 Gigabit Ethernet має підтримувати синхронізовану Ethernet-мережу, забезпечуючи відновлений синхросигнал на одному зі своїх виходів. Відновлений синхросигнал очищується за допомогою системи ФАПЧ і передається на вхід 25-МГц кварцового генератора фізичного пристрою. Кілька нових фізичних

пристроїв Ethernet-мережі забезпечують спеціальний висновок для вхідного тактового сигналу. Перевагою цього методу є те, що частота вхідного сигналу може бути вище 25 МГц - чим вище частота синхронізації, тим, як правило, менше джиттер. Крім того, даний метод дозволяє уникнути будь-яких потенційних проблем, пов'язаних з циклом синхронізації фізичного пристрою.

Вимоги до синхронізованою мережі Ethernet.

Можна зробити передчасний висновок про те, що єдина функція системи ФАПЧ, використовуваної в технології SyncE, полягає в очищенні відновленого сигналу від джиттера. Однак в SyncE схема ФАПЧ повинна забезпечувати і інші функції. Наприклад, якщо приймальний пристрій фізичного рівня одного з вузлів від'єднати від лінії, відновлена частота синхронізації обірветься або почне дрейфувати, в залежності від того, як реалізована схема відновлення синхронізації після збою. ФАПЧ загального призначення не відстежить цього великого зміни в частоті на передавальному фізичному пристрої і в результаті не тільки тактовий сигнал не буде переданий, але і, можливо, не відбудеться і передача даних. Схема ФАПЧ в технології SyncE повинна виявляти збій відновленого сигналу синхронізації і вміти переключатися або на інший хороший опорний сигнал системи, або перемикати генератор в режим утримання. Вимоги до SyncE коротко викладено в специфікації внутрішнього годинника синхронної Ethernet-мережі (ITU G.8262 / Y1362). Ці вимоги засновані на специфікації ITU-T G.813 для тактових сигналів стандарту SDH:

- Точність в автономному режимі: точність вихідного сигналу схеми ФАПЧ, коли вона не керується опорним сигналом, повинна бути рівною або вище ніж $\pm 4,6$ ppm протягом одного року. Це дуже висока точність щодо точності традиційної Ethernet-мережі (± 100 ppm).

- Режим утримання: система ФАПЧ постійно розраховує середнє значення частоти синхронізованого опорного сигналу. У разі якщо опорний сигнал не надходить, а також відсутні інші опорні сигнали, ФАПЧ переходить в режим утримання і генерує вихідний синхросигнал на основі розрахункового середнього значення. Стійкість режиму залежить від дозволу усередненого алгоритму і стабільності частоти генератора, використовуваного в якості опорного тактового генератора ФАПЧ.
- Контроль за опорним сигналом: система ФАПЧ повинна постійно контролювати якість вхідних опорних сигналів. Якщо якість погіршується (сигнал зникає, або дрейфує частота), блок ФАПЧ подає сигнал тривоги (переривання) і переключається на інший діючий опорний сигнал.
- Перемикання опорного сигналу без паузи: якщо ФАПЧ-система не виявляє опорного сигналу, вона захоплює інший опорний сигнал. При цьому фаза сигналу не змінюється.
- Фільтрація джиттера і стабілізація дрейфу: блок ФАПЧ можна розглядати як фільтр для джиттера і засіб стабілізації дрейфу. Чим менше ширина смуги петлі, тим менше джиттер і дрейф.
- Стійкість до джиттеру і дрейфу: система ФАПЧ повинна бути стійкою до великого джиттеру і дрейфу на вході і підтримувати синхронізацію, що не генеруючи сигналу тривоги.

Ці жорсткі вимоги можна задовольнити тільки за допомогою цифрової системи ФАПЧ (DPLL), схожою з тією, яка використовується для синхронізації мережі SONET / SDH. Основна відмінність полягає в тому, що система SyncE DPLL повинна захоплювати і генерувати тактові частоти, використовувані в Ethernet (25, 125 і 156,25 МГц), тоді як в SONET / SDH задіяні інші значення тактових частот (19,44 і 155,52 МГц).

3.5.4 Комбінація SyncE плюс PTP

Передбачувана функціональна обмеженість методів SyncE і PTP змусила шукати інші рішення задачі чво пакетних мереж. При цьому у більшості фахівців вже не викликає сумнівів той факт, що передача міток часу з точністю, необхідної для сучасних телекомунікаційних додатків (близько ≤ 1 мкс), повинна спиратися на розподіл ТС високої точності на фізичному рівні [3]. Правильно спланована, надійна розподільна мережа ТМС здатна стати надійною фізичною основою для роботи протоколів передачі часу. Розроблено комбінований сценарій, який передбачає спільне використання синхронного Ethernet для передачі ТЧ і будь якого протоколу більш високого рівня для передачі точного часу (як варіант протоколу PTP). В якості прикладу можна привести технічні рішення, запропоновані Silicon Laboratories Inc в методичних вказівках щодо застосування (AN420. SyncE and IEEE 1588: Sync Distribution for a Unified Network), а також обладнання Extreme Networks E4G для побудови транспортної мережі та підключення базових станцій з підтримкою 1-10 Гбіт / с. Воно включає вбудоване обладнання синхронного Ethernet (EES), обладнання автоматизованого резервування Ethernet Automatic Protection Switching (EAPS) по G.8032 і підтримує протокол PTP.

Новим рішенням стане SyncE з передачею міток часу - TSE. Наявність в структурі SyncE зарезервованих полів дає можливість вводити нові функції, наприклад, передачу сигналів СТЧ (сигнал точного часу). Зараз активно опрацьовується можливість передачі в одному із зарезервованих полів каналу ESMS міток часу (наприклад, у форматі PTP). Таке рішення назване TSE (Time Synchronous Ethernet), дозволить спростити роботу протоколу PTP, забезпечуючи при цьому високу точність передачі часу (Рис. 3.8). Для простоти на малюнку показано розподіл сигналів даних, ТС і СЧ лише в одному напрямку. В цьому

випадку всі вузли в тракті синхронізації повинні підтримувати SyncE і працювати з точністю $\pm 4,6$ ppm. Кількість вузлів в тракті синхронізації бажано підбирати відповідно до «еталонного ланцюжка»: чи не більше 20 ЕЕС між сусідніми ВОГ (вторинний опорний генератор) і не більше 10 ВОГ між сусідніми ПЕГ. При цьому забезпечується така ж точність частоти, як і в традиційних мережах на базі СЦІ (не гірше 10-11 в режимі відстежуваної ПЕГ), а точність фази не гірше 1 мкс і менше. Крім того, підтримується передача часу доби.

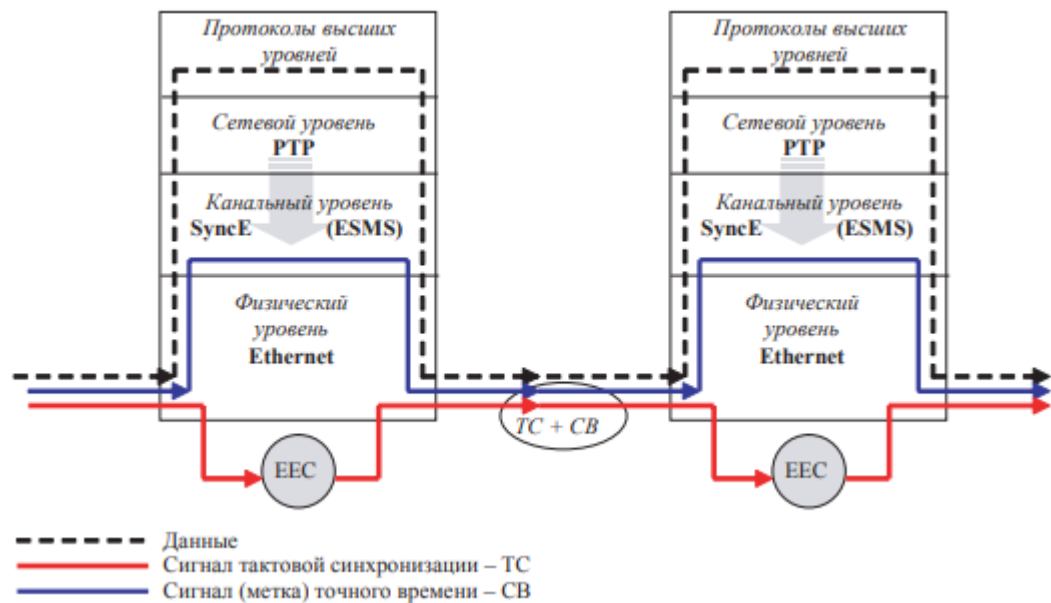


Рис. 3.8 Принцип роботи технології TSE

Висновок до розділу 3

У цьому розділі були проаналізовані мережі синхронізації, їх властивості та недоліки. Головним рішенням для мереж нового покоління являється розробка сумісного використання технології SyncE та протоколу поточного часу PTP, які мають стати основою мереж синхронізації.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У ході написання дипломної роботи було виконано поставленні задачі.

В межах першого розділу у достатній мірі розкрито відомості про архітектуру нового покоління 5G та його актуальність. Головні три області задля яких буде побудована 5G являються: область широкосмугового та швидкісного інтернету, область низьких затримок, область масового підключення.

Концептуально новим є розподіл мережі RAN, на юніти, а саме центральний, розподільчий та віддалений, а також розподіл на можливі області Fronthaul, Midhaul, Backhaul. Саме такий розподіл мережі має виконувати вимоги нового покоління 5G.

У другому розділі було проаналізовано унаслідування та відмінності покоління 5G вже на базі існуючого покоління LTE. У подальшому розвитку 5G буде переходити від етапу Non-Standalone до етапу Standalone з тенденцією попиту ринка на технологію.

Розділення протоколів по юінтам мережі RAN дасть змогу отримати той набір вимог, що висовується до 5G, а також можливість підключення до базових станцій LTE.

Один з кращих варіантів розвитку архітектури 5G являється розгорнення ядра технології та сумісне використання радіодоступу E-UTRA та 5G NR, цей варіант також буде економічно вигідним так як, можна буде використовувати вже працюючі вишки.

У третьому розділі були проаналізовані мережі синхронізації, їх властивості та недоліки. Головним рішенням для мереж нового покоління являється розробка сумісного використання технології SyncE та протоколу поточного часу PTP, які мають стати основою мереж синхронізації.

Отже, можна зробити висновок, що поставлена мета виконана.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стандартизация сетей 5G [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://1234g.ru/5g/standartizatsiya-5g>
2. 5G [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://rb.ru/longread/what-is-5G/>
4. Hann K., Jobert S., Rodrigues S. Synchronous Ethernet to Transport Frequency and Phase/Time // IEEE Communication Magazine. – August 2012. – P. 152–160.
5. Сети 5G: текущее состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://1234g.ru/5g/seti-5g>
6. Основные характеристики и области применения 5G / New Radio [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://anisimoff.org/5g/5g_overview.html#:~:text=URLLC%20\(Ultra%2DReliable%20and%20Low,%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C%20%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D0%B7%D0%B0%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8%20%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85.](http://anisimoff.org/5g/5g_overview.html#:~:text=URLLC%20(Ultra%2DReliable%20and%20Low,%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C%20%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D0%B7%D0%B0%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8%20%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85.)
7. ITU-T Recommendation G.8262/Y.1362 (08/07). Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock (EEC).
8. Logical Architecture and Functional Split Options [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.techplayon.com/5g-nr-gnb-logical-architecture-functional-split-options/>
9. Сеть радиодоступа [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://itechinfo.ru/content/%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8C-%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1>

[%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D0%B0-5g-](#)

[%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C-1](#)

10. Триска Н.Р. Актуальные задачи синхронизации на этапе развертывания сетей 5G. – Одинадцята Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” (ПТ-2017), 18-21 квітня 2017 р. Матеріали конференції. – ІТС НТУУ “КПІ”. – С. 102-104.
11. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р., Худынец Н.Н. Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи. – Т-Comm, № 2-2014. – с.12-17.
12. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Анализ точности передачи сигналов времени и частоты в телекоммуникационных сетях // Наукові записки УНДІЗ. – 2010. – № 2 (14)– С. 39 – 45.
13. ITU-T Recommendation G.8272.1/Y.1367.1 (11/2016) Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks.
14. ITU-T Recommendation G.8272/Y.1367 (01/2015) Timing characteristics of primary reference time clocks.
15. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Синхронный Ethernet как основа частотно-временного обеспечения современных и будущих сетей связи. – Электросвязь, 2013, № 2. – С. 8-12.
16. 5G Network Synchronization [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://gpsworld.com/wp-content/uploads/2018/09/Network-Synch-Webinar-GPSW-Microlab.pdf>
17. Supplement 66 to ITU-T G-series Recommendations (07/2019). 5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context
18. Supplement 67 to ITU-T G-series Recommendations (07/2019). Application of optical transport network Recommendations to 5G transport

19. Технология синхронизации Ethernet-сети [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://russianelectronics.ru/tehnologiya-sinhronizaczii-ethernet-seti/>
20. Архитектура и тестирование систем сетевой синхронизации [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://tf.zone/solutions/architecture-and-testing-of-network-synchronization-systems/>