

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Магістральна мережа 5G»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

Яровий Д.С.

Керівник; к.т.н., доцент каф. ІКСТ
Васильківський М.В.
«11» 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Осадчук В.С.
«12» 12 2023 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІКСТ
Кичак В.М.
д.т.н., проф. Кичак В.М.
«13» 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)

Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“ 18 ” 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Яровому Денису Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Магістральна мережа 5G
керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” 09 2023 року № 247

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року


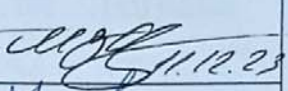
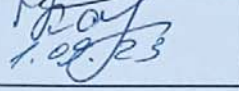
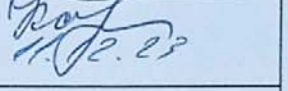
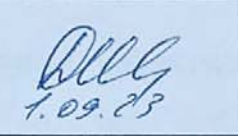

3. Вихідні дані до роботи діапазон значень пропускної здатності магістрального каналу комутатора мережі – 10-100 Гбіт/с; тривалість затримки в магістральному тракті передавання – 250 мкс; довжина магістрального лінійного тракту мережі – 20-200 км; діапазон носійних частот безпроводної мережі – 71-174 ГГц; діапазон значень затримки сигналів в радіотракті супутникового сегменту магістральної мережі – 3-140 мс; довжина радіотракту в супутниковому сегменті магістральної мережі – 800-8000 км; стабільність частоти радіоінтерфейсу - 50 ppb; стабільність частоти в транзитній мережі - 16 ppb.

4. Зміст текстової частини: техніко-економічний огляд архітектури мереж 5G RAN; технології побудови магістрального тракту мереж C-RAN; підвищення ефективності мережі 5G; підвищення надійності мережі 5G; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
архітектура системи мобільного транзитного зв'язку 5G D-RAN; архітектура високорівневої мобільної мережі 5G multi-RAT; схема сегментування транспортної мережі; структура безперервного супутникового каналу передачі даних між користувачем та мережею; схема обробки та передавання даних gNB-DU на супутнику; схема керування ресурсами gNB на супутнику; схема

безперервного та ефективного бездротового зв'язку gNB у прозорій архітектурі мережі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 1.09.23	 11.12.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 1.09.23	 11.12.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 1.09.23	 11.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Техніко-економічний огляд архітектури мереж 5G RAN	17.09.2023р.	
3.	Технології побудови магістрального тракту мереж C-RAN	06.10.2023р.	
4.	Підвищення ефективності мережі 5G	27.10.2023р.	
5.	Підвищення надійності мережі 5G	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Яровий Д.С.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Яровий Д. С. Магістральна мережа 5G – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 142 – стор., 47 – рис., 15 – табл., 69 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності мобільного магістрального і транзитного зв'язку за рахунок оптимізації роботи магістральних систем передавання для забезпечення ефективності, надійності та високої пропускної здатності мереж 5G.

Визначено технічні та економічні аспекти розгляду рішень для малих стільників в контексті мобільного зв'язку, враховуючи обмеження площі покриття та стратегії ефективного використання ресурсів спектру.

Досліджено взаємодіючі та комбіновані методи досягнення оптимальної ефективності мережі 5G в різних умовах та сценаріях використання.

Розглянуто методи створення стійкої та надійної мережі 5G, спроможної надавати послуги в різних умовах та обставинах.

Ключові слова: мобільний транзитний, проміжний та магістральний зв'язок 5G; стратегія ефективного використання ресурсів спектру; стійка та надійна мережа 5G.

ABSTRACT

UDC 621.391

Yarovyi D. S. 5G backbone network - Master's thesis in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, educational programme - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU 2023 - 142 pages, 47 figures, 15 tables, 69 bibliography - in Ukrainian.

The aim of the qualification work is to improve the efficiency of mobile backhaul and transit communications by optimising the operation of backhaul transmission systems to ensure the efficiency, reliability and high throughput of 5G networks.

The technical and economic aspects of considering solutions for small cells in the context of mobile communications are determined, taking into account coverage area limitations and strategies for efficient use of spectrum resources.

Interacting and combined methods of achieving optimal 5G network efficiency in different conditions and scenarios of use are investigated.

The methods of creating a stable and reliable 5G network capable of providing services in different conditions and circumstances are considered.

Keywords: mobile transit, intermediate and backhaul 5G communications; strategy for efficient use of spectrum resources; sustainable and reliable 5G network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ОГЛЯД АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ 5G RAN	13
1.1 Забезпечення неперервного та ефективного зв'язку в гетерогенних мережах	13
1.2 Ефективна архітектурна модель для розгортання мережі LTE.....	17
1.3 Архітектура мережі 5G RAN.....	19
1.4 Забезпечення ефективності та високої якості обслуговування в 5G D-RAN	23
1.5 Висновки до розділу 1	27
2 ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРАКТУ МЕРЕЖ C-RAN.....	29
2.1 Розгортання та оптимізація мережевої інфраструктури для підтримки нового покоління зв'язку	29
2.2 Особливості використання мережі 5G	33
2.3 Ефективне керування ресурсами та оптимізація функцій базових станцій у централізованих архітектурах мережі.....	41
2.4 Оптимізація керування ресурсами та підтримка високоефективного використання бездротового спектру	45
2.5 Аналіз впровадження магістральної мережі для стільникового зв'язку з конфігурацією C-RAN	49
2.6 Підвищення загальної ефективності мережі	55
2.7 Висновки до розділу 2	56
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ 5G.....	57
3.1 Сегментування транспортної мережі	57
3.2 Оптимізація трафіку та підвищення ефективності мережі.....	64
3.3 Оптимальне використання мережевих ресурсів у бездротовому каналі передачі даних для кінцевих користувачів.....	72

	3
3.4 Адаптування топології IAB-мережі із врахуванням вимог користувачів.....	74
3.5 Алгоритм адаптації транзитного трафіку та забезпечення якості обслуговування.....	78
3.6 Забезпечення стійкості та надійності передачі даних із врахуванням архітектури мережі та вимог до якості обслуговування.....	80
3.7 Висновки до розділу 3	81
4 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕРЕЖІ 5G.....	83
4.1 Інтегровані літаючі мобільні мережі.....	84
4.2 Конфігурація мережі 5G із використанням повітряного інтерфейсу	86
4.3 Прозора архітектура мобільної мережі.....	89
4.4 Забезпечення неперервного зв'язку у мережі з інтегрованим доступом з використанням супутникового зв'язку.....	91
4.5 Мережа 5G у відповідності вимогам URLLC та оптимального використання ресурсів	92
4.6 Ефективні способи забезпечення надійності та керування ризиками в мережах 5G.....	94
4.7 Метод оптимізації мережі 5G	96
4.8 Забезпечення ефективного використання можливостей мережі п'ятого покоління.....	98
4.9 Висновки до розділу 4	100
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	101
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	101
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	104
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	104
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	107
5.2.3 Сировина та матеріали.....	108
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	110
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	111
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	112
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	113

	4
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	114
5.2.9 Службові відрядження.....	115
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	116
5.2.11 Інші витрати.....	116
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	117
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	118
5.4 Висновок до розділу 5.....	119
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	120
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	121
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	123
6.2.1 Мікроклімат	123
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	124
6.2.3 Виробниче освітлення.....	125
6.2.4 Виробничий шум.....	126
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	127
6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих факторів НС	129
6.3.1 Дія вибуху на живі організми	129
6.3.2 Визначення об'єму вибухонебезпечної речовини, необхідного для створення вибухонебезпечної концентрації в приміщенні.....	129
6.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи в умовах дії НС	131
6.4 Висновки до розділу 6	131
ВИСНОВКИ.....	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	135
ДОДАТКИ.....	143
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	144

Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	148
--	-----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПС – Безпілотна повітряна система
BS – Базова станція
GNSS – Глобальні навігаційні супутникові системи
CDN – Мережа розповсюдження контенту
CoMP – Координована багатоточкова передача і прийом
C-RAN – Централізована мережа доступу
CU – Центральний модуль
DU – Розподілений модуль
eICIC – Покращена координація міжстільникових завад
IA – Інтегрований доступ
ISL – Міжсупутникова лінія зв'язку
LTE – Стандарт мобільного зв'язку
MASG – Шлюз мобільного вузла агрегації
MW – Мікрохвильовий діапазон
НДР – Науково-дослідна робота
NGC – Ядро наступного покоління
NTN – Неназемна мережа
OLTE – Оптичне лінійне кінцеве обладнання
O-RAN – Відкрита мережа доступу
PE – Пограничний маршрутизатор провайдера
PDCP – Протокол конвергенції пакетних даних
RIC – Інтелектуальний контролер
RTT – Час затримки в обидва кінці
RF – Радіочастота
RU – Радіо модуль
SA – Автономний режим
SDAP – Протокол адаптації службових даних
SRI – Супутниковий радіоінтерфейс

TN – Транзитна мережа

QoS – Якість обслуговування

HARQ – Гібридний автоматичний запит на повторну передачу

UE – Кінцеве обладнання

ШІ – Штучний інтелект

ВСТУП

Актуальність теми. Впровадження 5G в транспортну сферу має великий потенціал і вносить істотні зміни у мобільні комунікації та транспортні системи. Ось кілька ключових аспектів впровадження 5G на транспорті. Однією з основних переваг 5G є надзвичайно висока швидкість передачі даних та низька затримка (зазвичай менше 1 мілісекунди). Це дозволить реалізувати розумні транспортні системи, які потребують швидкого обміну інформацією між автомобілями, інфраструктурою та іншими джерелами даних. 5G дозволяє побудувати величезну кількість малих стільникових базових станцій, що покривають область. Це особливо важливо для транспортних систем, де є велика концентрація пристроїв, таких як автомобілі. URLLC послуги 5G дозволяють надавати послуги з високою надійністю та низькою затримкою. Це корисно для застосувань, таких як автономні автомобілі, де надійність зв'язку та швидка реакція на інформацію мають вирішальне значення для безпеки. Відкриті інтерфейси та дезагрегація радіодоступу дозволяють побудувати більш гнучкі та високопродуктивні мережі. Це дозволяє використовувати різні обладнання від різних постачальників та впроваджувати віртуалізацію та контейнеризацію мережевих функцій. Завдяки 5G, транзитний зв'язок може використовувати загальні пакетні мережеві технології, що робить систему більш ефективною та гнучкою. 5G також сприяє підвищенню енергоефективності радіозв'язку, що важливо для транспортних систем, які мають обмежені ресурси енергопостачання. Впровадження 5G на транспорті вимагає співпраці між операторами мобільних мереж, виробниками автомобілів та іншими учасниками. Однак це відкриває багато нових можливостей для покращення ефективності, безпеки та комфорту транспортних систем. В цілому, впровадження 5G може значно покращити транспортні системи, забезпечуючи їхню ефективність, надійність та безпеку [1-3].

Наприклад, такі важливі питання, як транспортні затримки і вимоги до пропускної здатності, залежать від сценаріїв використання, а також від типу дезагрегації і розгорнутої віртуалізації.

Аналіз останніх досліджень. Основними напрямками для транзитного і магістрального зв'язку 5G є • Транзитний зв'язок, який в 5G є новим критичним до затримок інтерфейсом на основі пакетів, який - разом з eCPRI і O-RAN - еволюціонував від попередніх інтерфейсів на основі CPRI. Радіохмара, яка потребує зв'язку всередині центру обробки даних і через нього з іншими об'єктами, з відповідною віртуалізацією або контейнеризацією мережевих функцій, а також потребами в масштабуванні і гнучкому зв'язку. Точна підтримка синхронізації завдяки радіо 5G TDD. Відповідність підвищеним цілям продуктивності системи 5G на транспорті, зі зменшенням затримок і підвищенням надійності та доступності. Забезпечення безпеки та надійності транзитного та магістрального зв'язку від передбачуваних та непередбачуваних аномалій за допомогою криптографічного захисту. Впровадження нових послуг 5G через транзитні та магістральні мережі з надвисокою надійністю і низькою затримкою, а також підтримка нових сценаріїв використання, таких як промисловість і підприємства, через транзитні та магістральні мережі. Перспективність і адаптивність до різних розгортань, а також підтримка хмарної мережі 5G. Тенденція до більшої відкритості в управлінні мережею, моделюванні об'єктів і пов'язаних з ними інтерфейсів, що підтримується O-RAN та іншими форумами. Зробити мережу програмованою, щоб прискорити створення послуг і уможливити управління мережею, яка охоплює величезну кількість RU, а також нові малі стільники міліметрового діапазону. Тісна співпраця з LTE для забезпечення подвійного зв'язку, режиму NSA, повторного використання майданчиків і транзитної мережі, з подальшою підтримкою застарілих протоколів і технологій. Всі ці аспекти вказують на комплексний підхід до розвитку та впровадження транзитного та магістрального зв'язку 5G з урахуванням потреб різних застосувань та сценаріїв використання [4-5].

Транспортні лінії зв'язку мають бути модернізовані для 5G. Фізичні носії доповнюються оптоволоконном і новими високошвидкісними бездротовими каналами зв'язку, які забезпечують пропускну здатність 10 Гбіт/с і більше.

Послуги мережевого зв'язку зосереджуються на стійкості, гнучкості, безпеці і готовності до розширення мережі і нових послуг у майбутньому. Всі мережеві ресурси мають бути захищені від несанкціонованого використання, а комунікації в мережевому домені мають бути безпечними.

Синхронізація має велике значення, оскільки режим TDD системи 5G вимагає синхронізації фази і часу. У багатьох випадках синхронізація покладається на транспортну мережу.

У транспортних мережах основні цикли планування відбуваються час від часу - приблизно кожні 10 років - і в ці моменти фізична топологія мережі і використання фізичних носіїв також змінюються. Модернізація рівня зв'язку є дещо меншим завданням після того, як фізичне середовище встановлено, оскільки мережеве обладнання на існуючих об'єктах можна замінити легше і з меншими зусиллями, ніж прокласти нове волокно, навіть незважаючи на те, що заміна обладнання пов'язана не лише з капітальними витратами, але й (що більш важливо) з відповідними витратами на навчання і підвищення кваліфікації персоналу для роботи з новими технологіями [6-8].

Для мобільного транзитного і магістрального зв'язку впровадження системи 5G є тригером для циклу модернізації - як мінімум, збільшення пропускну здатності каналів і вузлів, а можливо, і ширшої модернізації мережі, яка може включати, окрім нових мережевих функцій, також заміну каналів і вузлів, які мають низькі показники з точки зору бітових помилок, втрати пакетів, затримок, енергоефективності або безпеки.

Незважаючи на те, що існує безліч проблем, пов'язаних з магістральним і транзитним зв'язком 5G, існують також нові технології та вдосконалення, які дозволяють вирішити ці проблеми. Вказані аспекти демонструють важливість постійного розвитку і модернізації інфраструктури для впровадження нових технологій і забезпечення оптимальної продуктивності мережі.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності мобільного магістрального і транзитного зв'язку за рахунок оптимізації роботи магістральних систем передавання для забезпечення ефективності, надійності та високої пропускної здатності мереж 5G.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- техніко-економічний огляд архітектури 5G RAN на створення високоефективних, інтелектуальних та гнучких мереж для задоволення різноманітних вимог користувачів та застосунків;
- побудова магістрального тракту мереж C-RAN шляхом інтеграції різноманітних технологій для забезпечення ефективності, надійності та високої пропускної здатності;
- методи створення високоефективної та гнучкої мережі 5G, яка може відповідати потребам різноманітних сценаріїв використання;
- підвищення надійності мережі 5G для створення стійкого та продуктивного середовища для користувачів.

З урахуванням викладеного тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною.

Об'єктом дослідження є вдосконалені та оптимізовані магістральні мережі 5G для забезпечення ефективності та надійності зв'язку.

Предметом дослідження є методи подальшої оптимізації та розвитку магістральних мереж 5G, забезпечуючи ефективність та надійність мережі.

Методи досліджень базуються на використанні: методів аналізу поведінки мережі в різних умовах; методів оцінювання техніко-економічних параметрів впровадження та експлуатації магістральної мережі; методів комплексної оптимізації магістральної мережі 5G.

Новизна одержаних результатів:

Визначено технічні та економічні аспекти розгляду рішень для малих стільників в контексті мобільного зв'язку, враховуючи обмеження площі покриття та стратегії ефективного використання ресурсів спектру.

Досліджено взаємодіючі та комбіновані методи досягнення оптимальної ефективності мережі 5G в різних умовах та сценаріях використання.

Розглянуто методи створення стійкої та надійної мережі 5G, спроможної надавати послуги в різних умовах та обставинах.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» у 2023 році.

1 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ОГЛЯД АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ 5G RAN

Оператори мобільного зв'язку мають багато факторів, які слід враховувати при прийнятті рішення про впровадження 5G у своїх мережах. Використання мобільного транзитного зв'язку вже широко застосовується для підтримки існуючих технологій радіодоступу, а деякі оператори також впровадили транзитний зв'язок для LTE.

Використання транзитного зв'язку уможливорює архітектуру C-RAN, яка пропонує певні економічні переваги порівняно з повністю розподіленим (або агрегованим) RAN (D-RAN) на певних ринках. Економічні переваги реалізуються не на всіх ринках; вони залежать від доступності темного волокна і гнучкості контрактів з постачальниками послуг. Технічні переваги LTE C-RAN реалізуються завдяки координації в режимі реального часу між декількома географічно розподіленими радіоприймачами, керованими загальним централізованим блоком базового діапазону. Переваги включають покращену продуктивність на межі стільника і зниження рівня завад [9].

У даному розділі розглянуто техніко-економічні аспекти транзитного, проміжного і магістрального зв'язку 5G RAN, а також дослідити різні сценарії розгортання з точки зору оператора мобільного зв'язку. Основна увага в цій главі буде приділена 3GPP FR1, проте в розділі 2 представлено FR2 в контексті малих стільників.

1.1 Забезпечення неперервного та ефективного зв'язку в гетерогенних мережах

Транзитний магістральний канал Multi-RAT (Radio Access Technology) - це система зв'язку, яка об'єднує різні технології доступу до радіочастот (RAT), такі як LTE (Long-Term Evolution), 5G, 3G (Third Generation), і можливо інші. Ця концепція створює мережевий магістральний канал, який дозволяє пересилати дані між різними технологіями для оптимізації ефективності і надання кращого

обслуговування для користувачів. Основні риси транзитного магістрального каналу Multi-RAT можуть включати:

- Забезпечення можливості автоматичного переходу між різними технологіями залежно від умов мережі та потреб користувачів.
- Ефективне управління комутацією між різними технологіями для максимізації якості зв'язку та швидкості передачі даних.
- Забезпечення підтримки різноманітних послуг, включаючи високошвидкісний Інтернет, мультимедійні послуги та інші, які можуть використовувати різні технології.
- Оптимізація використання радіочастотних ресурсів, щоб забезпечити кращий зв'язок та мінімізувати втрати сигналу.
- Можливість використання різних моделей оплати для користувачів, включаючи передплати, посплати та інші.

Транзитний магістральний канал Multi-RAT грає важливу роль у забезпеченні неперервного та ефективного зв'язку в гетерогенних мережах, де різні технології можуть співіснувати і співпрацювати для оптимізації використання ресурсів.

Існуючі мережі мобільного зв'язку часто підтримують GSM, UMTS і LTE і за останнє десятиліття перейшли від систем передачі на основі TDM до Carrier Ethernet з рівнем транспортної мережі IP. GSM Abis був визначений як інтерфейс TDM, однак зараз всі постачальники реалізують інтерфейс Abis з IP; він ніколи не був стандартизований 3GPP, тому є суто приватною власністю. UMTS спочатку був реалізований як рівень транспортної мережі ATM. Однак пізніше він був визначений як IP у версії 5 3GPP. Більшість операторів зараз перейшли на IP і змінили свою базову мережу передачі з TDM на Carrier Ethernet. З самого початку, у 8-й версії 3GPP, було визначено, що LTE повинен мати рівень транспортної мережі IP. Стратегія та архітектура транзитного зв'язку, розроблені для LTE, часто стають відправною точкою для оператора при аналізі того, що потрібно змінити, щоб додати 5G до своєї мережі. На рисунку 1.1 показана

типова мережа мобільного зв'язку до 5G, яка підтримує інтерфейс GSM Abis, інтерфейс UMTS Iub і інтерфейси LTE S1 і X2.

На рисунку 1.1 показано сайт агрегації RAN, на якому розміщені GSM BSC, UMTS RNC і IP-шлюз безпеки, який часто використовується операторами для захисту транзитного зв'язку LTE, а в разі використання GSM IP Abis шлюз безпеки, ймовірно, також буде використовуватися для захисту інтерфейсу Abis. Сайт агрегації RAN забезпечить подальше з'єднання з відповідними основними елементами мережі для різних технологій радіодоступу, однак це виходить за рамки цієї глави і тому не показано на рисунку 1.1. У цьому розділі основна увага приділяється мережевим елементам в межах вузла підключення RAN і транспортній мережі, розташованій ліворуч від вузла агрегації RAN; це транзитна мережа. Мережеві контролери і шлюз безпеки підключені до шлюзу мобільного вузла агрегації (Mobile Aggregation Site Gateway, MASG) або пограничного маршрутизатора провайдера (Provider Edge, PE), який об'єднує магістральні ланцюги і надає ряд послуг другого і третього рівнів в напрямку мережі радіодоступу. Під час еволюції від TDM до Carrier Ethernet для MASG/PE була дуже поширена підтримка псевдопроводів, однак сьогодні більш поширеною є мережа транзитного зв'язку на рівні 3, яка, як правило, використовує IP VPN. Для забезпечення належного рівня відмовостійкості транзитної мережі рекомендується забезпечити відмовостійкість за рахунок роботи платформ MASG/PE і IPsec GW за схемою 1+1. Залежно від фактичної реалізації мережі між стільниковим вузлом - волоконним концентратором і вузлом агрегації RAN, рекомендується забезпечити відмовостійку передачу з відповідного проміжного вузла, щоб вихід з ладу одного волокна або обладнання не спричинив відключення на великій території.

На рисунку 1.1 шлях передачі між місцем агрегації RAN і першим стільниковим вузлом (стільниковий вузол - волоконно-оптичний концентратор) - це оптичне з'єднання через оптичне лінійне кінцеве обладнання (OLTE). З огляду на проілюстровані вимоги до транзитного з'єднання між декількома RAT, а також вимоги до вузла стільникового зв'язку з мікрохвильовим радіозв'язком,

це, швидше за все, буде мережа Ethernet (1GE) зі швидкістю 1 Гбіт/с. Різні інтерфейси транзитного зв'язку будуть розраховані відповідно до попиту в межах спільної транзитної мережі 1GE. Вузол стільникового зв'язку - волоконно-оптичний концентратор діє як локальна точка агрегації для спільно розташованих базових станцій і станцій, підключених через радіоканал мікрохвильового діапазону (MW), і тому його розміри повинні бути визначені відповідно.

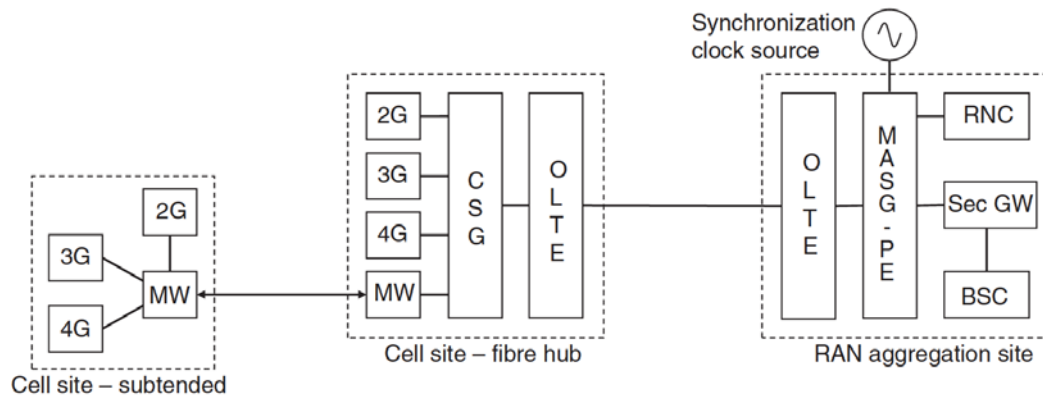


Рисунок 1.1 – Архітектура мобільного транзитного зв'язку до 5G

На рисунку 1.1 показано просту топологію з двома вузлами, однак в операційних мережах можна зустріти багато інших топологій - від лінійних ланцюжків до зірок і топологій типу "дерево" і "гілка". LTE призвела до збільшення обсягів транзитного зв'язку по оптичному волокну навіть у мережах, які традиційно надавали перевагу радіорелейному зв'язку по мікрохвильовій лінії; це зумовлено потребою в більшій пропускній здатності в мережі доступу.

Сайт агрегації RAN на рисунку 1.1 забезпечує мережеву синхронізацію, ілюстровану як підключення годинника до верхньої частини MASG/PE. Для багатьох мереж до 5G вимога синхронізації полягала в підтримці частоти передачі базової радіостанції, і тому достатнім було надання опорної частоти для дисциплінування локального генератора (генераторів). Радіоінтерфейс FDD вимагає стабільності частоти 50 ppb, тому, щоб забезпечити деякий запас для базової станції, транзитна мережа зазвичай забезпечує стабільність 16 ppb. Ця частотна синхронізація, як правило, простежується до джерела тактової частоти

ITU-T G.811 і може бути забезпечена за допомогою лінійного коду HDB3 в ланцюзі E1 або, з моменту переходу на Carrier Ethernet [1], за допомогою Synchronous Ethernet (SyncE) [2, 3].

1.2 Ефективна архітектурна модель для розгортання мережі LTE

C-RAN (Centralized Radio Access Network) та LTE (Long-Term Evolution) магістральний зв'язок відображають дві ключові архітектурні концепції в мобільних мережах, що допомагають оптимізувати використання ресурсів та покращувати ефективність мережі.

C-RAN є концепцією, при якій базові станції (BS) або антени розташовані централізовано, а не розподілено, як у традиційних мережах. Всі важливі функції обробки сигналу та управління розташовані у центральному офісі (Centralized Unit - CU), а фізичні антени та передавачі знаходяться окремо (Remote Radio Heads - RRHs).

LTE (Long-Term Evolution) - це стандарт мобільного зв'язку, який представляє собою покращену технологію для 3G (третього покоління) мереж. Він пропонує високу швидкість передачі даних, низьку затримку та покращену продуктивність у порівнянні з попередніми технологіями.

Взаємодія між C-RAN і LTE магістральним зв'язком полягає у тому, що C-RAN може бути використаний як архітектурна модель для реалізації LTE мережі. В C-RAN, CU може виконувати централізовану обробку сигналу для базових станцій, що підтримують стандарт LTE. Така централізована обробка може покращити координацію між базовими станціями, підвищуючи ефективність використання ресурсів та якість обслуговування для користувачів мережі LTE. Таким чином, C-RAN може слугувати як ефективна архітектурна модель для розгортання мережі LTE, зокрема для оптимізації взаємодії базових станцій та покращення характеристик зв'язку.

У таких мережах часто зустрічаються змішані вимоги до транзитного і магістрального зв'язку для підключення до мережі доступу, оскільки застарілі

технології радіодоступу (GSM і UMTS) вимагають транзитного зв'язку, тоді як LTE вимагає магістрального зв'язку для реалізації C-RAN. Найпоширенішими рішеннями, що використовуються для таких гібридних вимог до магістрального/транзитного зв'язку, є або кілька пар оптоволокна, одна з яких використовується для підключення шлюзу стільникового вузла (CSG), а інші - для підключення до окремих віддалених радіостанцій LTE, або система DWDM, в якій різні довжини хвиль використовуються для паралельної передачі магістральних і транзитних послуг.

LTE C-RAN реалізує архітектуру розділеної базової станції, відокремлюючи функціональність радіочастот від фізичного рівня і протоколів вищих рівнів MAC, RLC і PDCP. У 3GPP це називається розділенням за опцією 8. Цей інтерфейс 8-го варіанту був визначений галузевою групою постачальників, відомою як Common Public Radio Interface (CPRI). У розробці початкової специфікації CPRI брали участь Ericsson, Huawei, NEC і Nokia [4]. Розподіл за варіантом 8 висуває значні вимоги до транспортної мережі з точки зору необхідної швидкості передачі даних і низької затримки. Наприклад, 20 МГц 2×2 MIMO LTE-носії вимагає 2,4576 Гбіт/с пропускної здатності прямого зв'язку, що на порядок більше, ніж пропускна здатність зворотного зв'язку, необхідна для такого носія, враховуючи, що типова максимальна пропускна здатність користувача становить приблизно 195 Мбіт/с (за умови 256 QAM на низхідному каналі). Обмеження щодо затримок є значними, виходячи з цього розподілу; цифри дещо відрізняються у різних постачальників, однак типовим є час затримки в обидва кінці (RTT) 250 мкс. Ця максимальна затримка визначається часовими вимогами протоколу гібридного автоматичного запиту на повторну передачу (HARQ), який використовується як механізм ретрансляції між UE і eNB в мережі LTE. У практичних системах обмеження затримки обмежує максимальну відстань волоконно-оптичного кабелю в один бік до ~ 20 км, це залежить від реалізації.

Рисунок 1.2 ілюструє комбіновану послугу магістрального/транзитного зв'язку, яка надається від вузла агрегації RAN до стільникового вузла. Послуги

GSM і UMTS надаються як традиційний транзитний зв'язок через CSG, в той час як для LTE надається послуга транзитного зв'язку для підтримки трьох віддалених радіопристроїв (також відомих як віддалені радіоголовки).

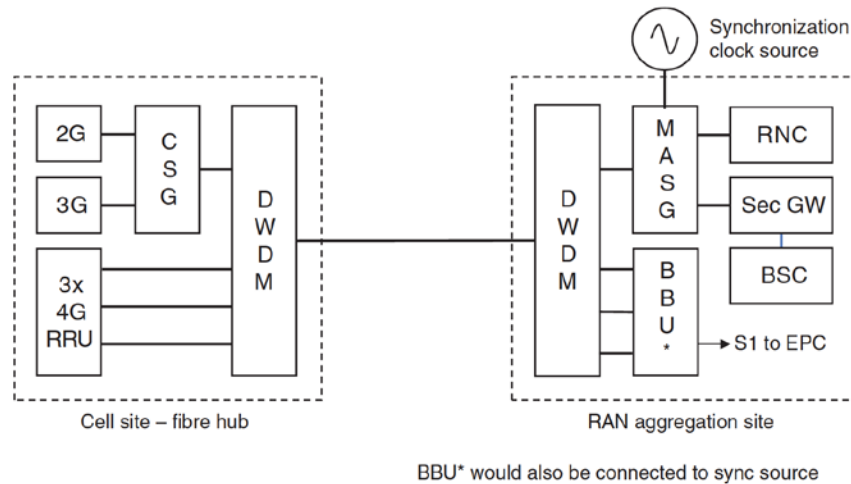


Рисунок 1.2 – Транзитний зв'язок і прямий зв'язок LTE C-RAN

У цьому прикладі канали CPRI передаються по оптичній довжині хвилі через систему доступу DWDM.

Слід зазначити, що архітектура C-RAN з фронтальним інтерфейсом CPRI може використовуватися також для GSM і UMTS, однак вона менш поширена, ніж LTE. Широкий спектр рішень передачі для LTE CPRI був розглянутий NGMN, включаючи мікрохвильові та міліметрові радіосистеми, в їхньому технічному документі [5].

1.3 Архітектура мережі 5G RAN

Архітектура 5G RAN додає нові фактори до процесу прийняття рішень щодо мобільного магістрального/транзитного зв'язку, а необхідність взаємодії з LTE в режимі роботи EN-DC (5G NSA [Non-Standalone Architecture]) додає ще більше міркувань. Важливо зрозуміти, як 5G змінює архітектуру радіорелейного зв'язку, які нові інтерфейси визначаються і як вони співвідносяться з наявними

технологіями транспортних мереж, щоб дати можливість мобільним операторам провести детальний техніко-економічний аналіз для формування майбутньої стратегії і цільової архітектури.

Базову радіостанцію 5G, відому як gNB, можна розділити на три функціональні елементи: Радіо модуль (RU), розподілений модуль (DU) і центральний модуль (CU). Ця функціональна декомпозиція проілюстрована на рисунку 1.3.

gNB складається з радіомодуля, який може бути інтегрований в антенний модуль, у випадку масового MIMO, або працювати як окремий радіомодуль, подібно до LTE RRU. Модуль базової станції поділяється на дві інші функції: DU і CU. Ці назви трохи вводять в оману, оскільки обидві функції можуть бути розподіленими або централізованими, або, як вказують назви, DU може бути розподіленим, а CU - централізованим. Переваги та недоліки різних варіантів будуть розглянуті далі в цьому розділі.

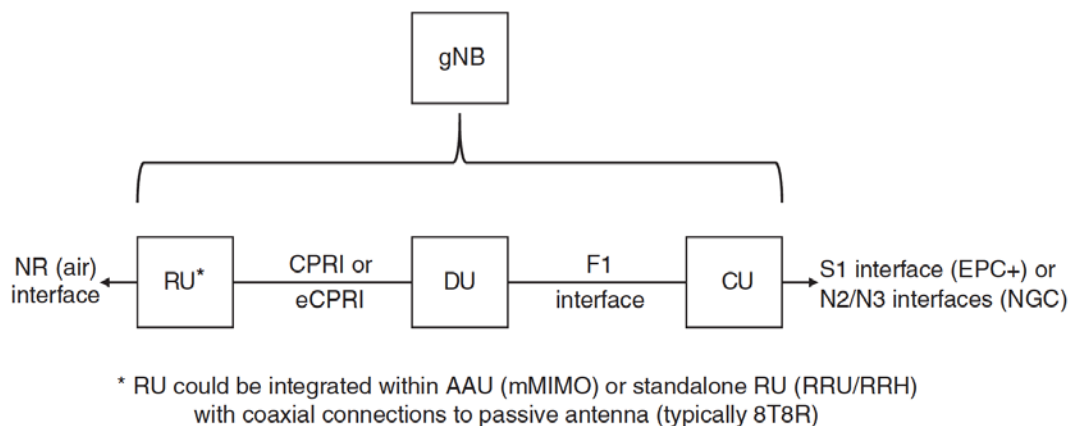


Рисунок 1.3 – Функціональна структура 5G RAN

Функціональність радіопристрою залежить від того, чи є інтерфейс до DU CPRI, як обговорювалося раніше стосовно LTE C-RAN, або eCPRI. eCPRI - це вдосконалена форма CPRI, яка була визначена тими ж чотирма постачальниками - Ericsson, Huawei, NEC і Nokia - у 2017 році як eCPRI версії 1 [6] і надалі оновлена в 2019 році як eCPRI версії 2 [7]. Рушійною силою eCPRI було

зниження вимог до пропускної здатності між RU і DU шляхом перенесення частини обробки на фізичному рівні, що знаходиться в DU, до RU. Це називається нижній фізичний рівень і призводить до розділення опції 7, яка зменшує загальну швидкість передачі даних, необхідну для інтерфейсу, а також підтримує стандартну схему Ethernet. eCPRI вводить новий тип EtherType (AEFE) як ідентифікатор у кадрі Ethernet. eCPRI також вводить потік зі змінною швидкістю передачі даних, який узгоджується з використанням радіоінтерфейсу; опція 8 CPRI - це сигнал з постійною швидкістю передачі даних. Важливо відзначити, що не всі 5G NR RU будуть підтримувати eCPRI; ранні розгортання мають інтерфейси eCPRI для масивних антенних систем MIMO, однак будь-які зовнішні системи на базі RU з MIMO нижчого порядку (8T8R або менше), як правило, використовують CPRI. Оскільки оператори LTE переоснащуються на NR, можливо, за допомогою динамічного розподілу спектра (DSS), інтерфейс прямого зв'язку залишиться CPRI, тому буде потрібен змішаний режим передачі прямого зв'язку.

З точки зору операторів мобільного зв'язку, впровадження eCPRI є вигідною оптимізацією сегменту fronthaul. Зменшення вимог до пропускної здатності порівняно з CPRI означає використання дешевших оптичних приймально-передавальних пристроїв; незалежно від того, чи розташовані RU і DU на одній стільниковій станції, чи впроваджується C-RAN. Ці міркування будуть враховані в ширшому економічному аналізі далі в цій главі.

DU містить повний фізичний рівень у випадку інтерфейсу варіанту 8, однак у більшості сценаріїв розгортання 5G, особливо за межами обладнання фази 1, він, швидше за все, буде підключений до інтерфейсу варіанту 7 і, отже, міститиме вищий фізичний рівень разом з нижчими і вищими протоколами MAC і нижчими і вищими протоколами RLC. Слід зазначити, що для інтерфейсу варіанту 7 обговорюється кілька варіантів розділення; на момент написання цієї статті це все ще залишається відкритою темою в рамках стандартів і галузевих форумів, однак принципи, обговорювані в цій главі, застосовуються до всіх варіантів розділення варіанту 7.

У мережі 5G з конфігурацією EN-DC, CU містить рівень PDCP для площини користувача і управління, а також рівень сигналізації RRC. Розгорнута з ядром мережі 5G, відомим як ядро наступного покоління (NGC), CU також включатиме новий протокол SDAP, який знаходиться над PDCP на рівні користувача. CU відокремлюється від DU стандартизованим 3GPP інтерфейсом F1 [8], це варіант 2 поділу. На ранніх стадіях впровадження 5G зазвичай функціональність CU інтегрується з DU в блоці базової станції 5G. Інтерфейс F1 не працює в режимі реального часу і тому не має високих вимог до затримки, на відміну від інтерфейсу варіанту 7, який обговорювався раніше. Вимоги до пропускної здатності інтерфейсу F1 подібні до традиційного транзитного інтерфейсу S1 (або N2/N3); вимоги до інтерфейсу F1 будуть дещо вищими, проте лише на ~5%.

CU можна розділити на функціональність CU-c і CU-u; цей поділ на площину управління і площину користувача ґрунтується на встановлених архітектурних принципах в рамках 3GPP. Спочатку це почалося в опорній мережі з розділення рівня управління і рівня користувача в межах мережі з комутацією каналів версії 4, і ця специфікація призвела до створення медіа-шлюзу і сервера MSC. Подібні принципи з тих пір були застосовані до ядра з комутацією пакетів. Функції CU-c і CU-u розділені визначеним 3GPP інтерфейсом, позначеним як E1 (рис. 1.4).

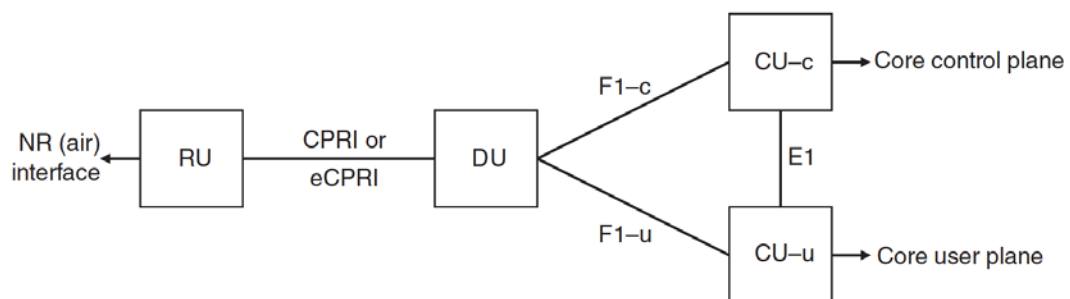


Рисунок 1.4 – Функціональна структура 5G RAN з розділеною AC

Хоча перші впровадження 5G RAN будуть або D-RAN, або на певних ринках C-RAN, цілком ймовірно, що DU і CU будуть об'єднані в одному пристрої базового діапазону. Більшість постачальників вийшли на ринок з цим єдиним варіантом з першого дня. Реалізація розділення DU-CU присутня в дорожніх картах і стане більш поширеною з 2022 року і далі; така архітектура розділення є стандартною для рішення O-RAN, хоча практична реалізація дозволить розмістити DU і CU разом, якщо це буде потрібно.

1.4 Забезпечення ефективності та високої якості обслуговування в 5G D-RAN

Транзитний інтерфейс в архітектурі 5G D-RAN (Distributed Radio Access Network) використовується для обміну даними між різними функціональними блоками мережі. Основні функції транзитного інтерфейсу включають передачу керувальних та трафікових сигналів між DU (Distributed Unit) і CU (Centralized Unit). Архітектурно транзитний інтерфейс в 5G D-RAN складається з двох основних інтерфейсів: F1 та E1.

Інтерфейс F1 використовується для обміну керувальними інформаційними сигналами між DU та CU. Він визначає точки розподілу функцій між централізованою і розподіленою частинами мережі. Точка розподілу може бути на DU або бути розділеною між DU і CU. Інтерфейс E1 використовується для передачі трафіку між DU та CU. Цей інтерфейс є критичним для забезпечення високої швидкості передачі даних і низької затримки між централізованою та розподіленою частинами мережі.

Розміри транзитного інтерфейсу (особливо, пропускна здатність і затримка) є ключовими параметрами для забезпечення ефективності та високої якості обслуговування в 5G D-RAN. Оптимальний розмір транзитного інтерфейсу дозволяє використовувати ресурси мережі ефективно та задовольняти вимоги до швидкості та надійності передачі даних в мережі 5G.

Додавання 5G до існуючого сайту з декількома стільниками RAT матиме значний вплив. Розгортання 5G виявляється набагато складнішим завданням, ніж просто технічна інженерія, воно також включає в себе велику кількість будівельних робіт, щоб дозволити майданчикам і спорудам підтримувати обладнання NR - радіостанції плюс більші пасивні антени і/або масивні активні антени MIMO. Комерційний аналіз впровадження модернізації об'єктів 5G повинен включати всі витрати - від проектування і планування мережі до цивільного будівництва та модернізації електропостачання до обладнання NR і пов'язаних з ним робіт з монтажу, введення в експлуатацію та інтеграції.

Обсяг спектру NR, яким володіє оператор, визначатиме загальні вимоги до пропускної здатності транзитного вузла, а це, в свою чергу, визначатиме швидкість мережі Carrier Ethernet, яку необхідно розгорнути. Вимоги до спектру NR повинні бути додані до вимог існуючого сайту з декількома RAT, щоб визначити загальні вимоги. Враховуючи режим роботи EN-DC, оператор може вирішити розгорнути додатковий спектр LTE в рамках модернізації 5G, щоб ще більше підвищити пікову швидкість передачі даних і загальну пропускну здатність стільникового вузла. Існує кілька підходів до розрахунку вимог до пропускної здатності мобільного зв'язку, і необхідно подбати про те, щоб забезпечити узгодженість з бізнес-стратегією і комерційною стратегією; це повинно включати аналіз прогнозованих рівнів трафіку на кожній ділянці на найближчі роки. Планування пропускної спроможності на основі попиту призведе до визначення конкретних вимог для кожного об'єкта, що може бути дуже трудомістким і, відповідно, дорогим процесом. Тим не менш, такий підхід може бути виправданим у деяких мережах, де важливо мінімізувати інвестиції в певний рік, або в певних географічних регіонах, де більш амбітний підхід до визначення пропускної спроможності просто не може бути виправданий через низькі обсяги трафіку.

Найбільш поширеним підходом у щільно забудованих міських, селищних і приміських районах є розгляд розгорнутих радіоресурсів і розрахунок пікової і середньої пропускної здатності на основі досяжної ефективності використання

спектра. Пікова ефективність використання спектра, ймовірно, буде близькою до теоретичних меж, розрахованих у стандартах 3GPP; середня пропускна здатність буде значно нижчою, оскільки вона буде обмежена перешкодами від сусідніх об'єктів. Зменшення міжсайтових завад є важливим фактором для розгортання архітектури C-RAN, будь то централізований BBU у випадку застарілих RAT або централізовані DU і CU в NR. Централізація DU забезпечує максимальну пропускну здатність завдяки координованому плануванню в реальному часі, однак це пов'язано з проблемами високої пропускної здатності і низької затримки фронтального зв'язку, як зазначалося раніше. Після того, як пікова та середня ефективність використання спектра розраховані для кожного RAT, їх можна підсумувати та додати відповідні накладні витрати на переадресацію.

Накладні витрати на транзитне з'єднання залежать від статусу мережі 5G оператора; від того, чи є вона неавтономною або автономною, залежить, чи буде транзитне з'єднання S1-c і S1-u або N2 і N3, а також від того, чи використовується інтерфейс X2 або Xn. Накладні витрати також різняться між рівнем управління і користувацьким рівнем, однак саме користувацький рівень представляє особливу проблему через великий обсяг трафіку і діапазон корисного навантаження IP-пакетів різного розміру. На прикладі мережі 5G EN-DC площини управління і користувача з'єднуються між базовими станціями (eNB/gNB) і EPC+ і містять протоколи, докладно описані в таблиці 1.1.

У таблиці 1.1 показано типовий стек протоколів мобільного транзитного зв'язку для роботи 5G EN-DC; він не зазнає суттєвих змін при використанні базової мережі 5G. S1-AP в площині управління замінюється на NG-AP, в той час як в термінології базової мережі 5G дані користувача відображаються в одиницю даних протоколу (PDU), яка являє собою рівень 4 (транспортний) і рівень 3 (IP) з таблиці 1.1 S1-u; ця PDU потім відображається в GTP-u. Решта стеку є такою ж для інтерфейсу N3.

Використання IP-безпеки не є обов'язковим; багато операторів впроваджують її для транзитного зв'язку 5G, використовуючи функції інкапсуляції корисного навантаження безпеки та автентифікаційних заголовків.

Найбільш поширеним є тунельний режим IPsec. Він додає IP-адресу до пакету, який адресує кінцеву точку IPsec, забезпечуючи таким чином безпечний наскрізний тунель. Використання IPsec має багато переваг, однак воно викликає певні проблеми з оптимізацією транспортної мережі - про це ми поговоримо далі в цьому розділі. Наведений вище стек протоколів передбачає схему доступу Carrier Ethernet; багато таких схем доступу відображаються на послуги IP VPN третього рівня, як тільки вони досягають вузла агрегації, і в цей момент нижня частина стека протоколів змінюється.

Таблиця 1.1 - Приклад накладних витрат на транзитне з'єднання інтерфейсу S1 для режиму роботи 5G EN-DC.

S1-c interface (from eNB in EN-DC mode)	S1-u interface (from gNB)
S1-AP	User data
SCTP	TCP/UDP/QUIC
IP TNL (v4 or v6)	IP (v4 or v6)
IPsec ESP/AH*	GTP-u
Outer IP (v4 or v6)*	IP TNL (v4 or v6)
VLAN	IPsec ESP/AH*
Ethernet	Outer IP (v4 or v6)*
Underlying network	VLAN
	Ethernet
*IP Security is optional	Underlying network

Розуміючи протоколи і оцінюючи різні розміри пакетів, які можуть виникати, накладні витрати на транзитне з'єднання для вищезгаданого стека протоколів можна розрахувати на рівні 15-20% від корисного навантаження користувачських даних. Після того, як це буде зрозуміло, його можна додати до пікової і середньої спектральної ефективності і результуючої швидкості передачі даних для послуги 5G. Різні підходи до оцінки пропускнуої здатності в бездротових мережах, передбачають розглядати пікові та середні значення швидкості передачі даних. Ось короткий огляд кожного підходу. Сума пікових значень враховує максимальні можливості мережі в сприятливих умовах. Може

призводити до надмірної оцінки пропускну здатності, оскільки пікові значення можуть бути специфічними для конкретних умов.

Метод середніх значень забезпечує стабільніший показник швидкості, який може враховувати зміни умов. Може не відображати можливостей мережі в найкращих умовах.

Метод "Один пік - всі середні" забезпечує баланс між піковими та середніми значеннями, щоб врахувати як вражаючі можливості, так і стабільність. Може вимагати складнішого інженерного підходу та управління трафіком. Кожен з цих підходів має свої сильні та слабкі сторони, і вибір залежить від конкретних вимог мережі та стратегії бізнесу.

1.5 Висновки до розділу 1

Рішення для мобільного транзитного, проміжного і магістрального зв'язку 5G вносять значний внесок у капітальні та операційні витрати, пов'язані з розгортанням мережі радіодоступу наступного покоління. Вибір архітектури RAN і, зокрема, функціональної декомпозиції RAN впливатиме на варіанти проектування транспортної мережі, доступні оператору. Більшість ранніх розгортань 5G базуються на архітектурі NSA EN-DC і, як правило, є дзеркальним відображенням 4G LTE RAN. На багатьох ринках домінує архітектура D-RAN, тоді як на деяких ринках комерційні та регуляторні умови, пов'язані з доступністю темного волокна, сприяють розгортанню C-RAN. Хоча оптоволокну є найкращим рішенням для зв'язку там, де воно доступне і комерційно вигідне, рішення для бездротового зв'язку в мікрохвильовому і міліметровому діапазонах є життєздатною альтернативою. Слід уважно стежити за розвитком 3GPP IAB; потенційна реалізація вимог до зв'язку для масового ущільнення мереж є значною при використанні в оптимальній архітектурі з оптоволоконними і фіксованими бездротовими каналами. Необхідність забезпечення синхронізації частоти і часу доби (фази) залишається важливою функцією транспортної мережі. Ключові показники ефективності, такі як

затримка, варіація затримки пакетів, рівень втрат пакетів і доступність, стають все більш помітними, оскільки суспільство стає все більш залежним від мобільного зв'язку. Продовження використання CPRI для багатьох радіостанцій 5G, а також впровадження динамічного розподілу спектра як засобу міграції пропускної здатності з LTE на NR, призводить до того, що в осяжному майбутньому для багатьох мереж будуть потрібні змішані вимоги до CPRI/eCPRI. Це, разом з O-RAN Open Fronthaul, повинно буде співіснувати в мережах магістрального транспорту. Різниця між оптимальним техніко-економічним рішенням щодо взаємозв'язку і неправильним матиме значний вплив на продуктивність і, відповідно, прибутковість оператора мобільного зв'язку.

2 ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРАКТУ МЕРЕЖ C-RAN

2.1 Розгортання та оптимізація мережевої інфраструктури для підтримки нового покоління зв'язку

Інтеграція 5G в транзитну мережу забезпечить зручний перехід до нового покоління мобільного зв'язку, забезпечуючи при цьому безперервний та ефективний зв'язок для користувачів.

Процес переходу від різних технологій (RAT - Radio Access Technologies) до IP-орієнтованої архітектури в мережах зв'язку вказує на те, що мережі стають все більш орієнтованими на IP та використовують стандартизовані інтерфейси для різних технологій доступу. Це дозволяє операторам отримувати більше гнучкості та легше управляти різними аспектами мережі.

Після того, як модель визначення розмірів для всіх RAT буде завершена, необхідну пропускну здатність потрібно буде зіставити з доступною пропускнуною спроможністю каналів доступу. Транспортним мережевим рівнем 3GPP для 5G є IP; як правило, це все ще реалізується як мережа IPv4, хоча в багатьох мережах користувацькі дані, що знаходяться над TNL, все частіше є IPv6, переведені в IPv4 на інтерфейсі SGi (або N6), якщо цього вимагає хост-сервер. TNL LTE є IP, в той час як більшість мереж вже перевели UMTS з ATM на IP TNL, як визначено в 3GPP Release 5 [9]. 2G Abis ніколи не визначався як IP-інтерфейс у стандартах, проте всі постачальники зараз підтримують власний IP-інтерфейс Abis, тому всі RAT можуть підтримувати IP over Carrier Ethernet [1], який часто називають просто Ethernet (однак це не простий LAN Ethernet).

На рисунку 2.1 показана мережа з декількома RAT з базовими станціями 2G GSM, 3G UMTS, 4G LTE і 5G, розгорнутими в одному стільниковому вузлі, з'єднаному з агрегаційною мережею оптичним волокном, і в другому стільниковому вузлі, віддаленому від волоконного концентратора за допомогою радіосистеми міліметрового діапазону, як правило, E-діапазону (71-76 ГГц в парі з 81-86 ГГц). Хоча базові радіостанції зображені як окремі об'єкти, в реальності

багато з них будуть об'єднані в одну RAN/мульти-RAT базову станцію, в залежності від фактичної реалізації. Основна відмінність від рішення транзитного зв'язку, показаного на рисунку 1.1 для розгортання до 5G, і від цього рішення, показаного на рисунку 2.1 для 5G в середовищі з декількома PPT, полягає в масштабованості пропускної спроможності. Це відбулося по всій магістральній мережі, починаючи з ділянки ліворуч, де мікрохвильовий радіоканал був замінений на радіозв'язок міліметрового діапазону E-діапазону. Радіо E-діапазону має нижчу вартість за біт, ніж типові мікрохвильові радіосистеми, і пропонує значну масштабованість, до 20 Гбіт/с, залежно від доступного спектру і місцевих норм і правил. Однак для придбання нової радіостанції та завершення робіт з планування та встановлення потрібні капітальні витрати; також може знадобитися плата за використання спектру, яка може становити щорічну ліцензійну плату, що сплачується місцевому регулюючому органу. Регулювання спектру E-діапазону в різних країнах світу значно відрізняється. Фактична пропускна здатність радіостанцій E-діапазону буде залежати від обраної смуги радіоканалу, схеми модуляції та відповідного бюджету на радіочастотну потужність.

Місце розташування волоконно-оптичного концентратора було модернізовано до 10 Гбіт/с зворотного зв'язку по оптоволоконному каналу до місця агрегації RAN. Враховуючи цей стрибок від схеми зі швидкістю 1 Гбіт/с для сайту LTE до 10 Гбіт/с для 5G, є ймовірність того, що буде багато вільного простору понад розраховані вимоги до пропускної здатності транзиту з розділу 1.5. У цьому прикладі, однак, ланцюг зі швидкістю 10 Гбіт/с повинен підтримувати місцевий трафік і трафік з додаткового майданчика. При розрахунку вимог до пропускної здатності для такого вузла можна додати коефіцієнт надлишкового резервування, щоб врахувати рівень статистичного посилення мультиплексування. Для підтримки підвищення швидкості з 1 Гбіт/с до 10 Гбіт/с оптичне мережеве обладнання (OLTE) було замінено на обох кінцях оптоволокна; це потребуватиме додаткових капітальних витрат і, ймовірно, також призведе до збільшення операційних витрат, залежно від того, чи це

орендована мережа, чи власна/розгорнута. Навіть в останньому випадку існує ймовірність збільшення операційних витрат, оскільки вартість щорічної технічної підтримки, як правило, становить певний відсоток від вартості обладнання.

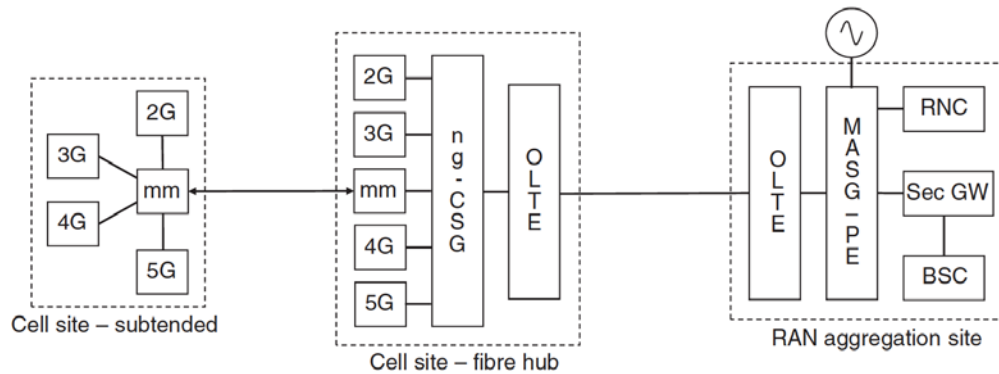


Рисунок 2.1 - Архітектура системи мобільного транзитного зв'язку 5G D-RAN

CSG на рисунку 2.1 позначений як "ng-CSG", тобто "наступного покоління", щоб відрізнити його від CSG на рисунку 1.1, який буде використовуватися на місці до завершення модернізації до 5G.

ng-CSG матиме клієнтські порти 10GE (Gigabit Ethernet) і лінійні порти, а також підтримку 1GE за необхідності. ng-CSG також підтримуватиме необхідні функції синхронізації для забезпечення синхронізації частоти і фази (час доби) відповідно до різних вимог радіоінтерфейсу. Для локальної роботи EN-DC можна встановити інтерфейс X2 між eNB і gNB через локальне з'єднання через CSG, якщо спільно розташовані LTE і 5G працюють з різних базових станцій.

Топологія мережі, показана на рисунках 1.1 і 2.1, не є рідкістю, однак у багатьох випадках, ймовірно, існує більше проміжних вузлів між сайтом стільника і шлюзом IP-безпеки, це, ймовірно, включає в себе ланцюг доступу, що закінчується на IP/MPLS PE-маршрутизаторі, а подальша передача забезпечується через послугу IP VPN, проходячи через основні P-маршрутизатори в разі необхідності. Використання IP VPN в магістральній мережі дозволяє об'єднати багато каналів доступу, в той час як IP/MPLS і VPN в цілому пропонують можливості для підтримки широкого спектру типів трафіку

через загальну IP-мережу і базову передачу, ймовірно, на основі оптичного DWDM. Це спільне IP-ядро може підтримувати фіксований і мобільний трафік, що обслуговує споживачів і корпоративне використання. Гнучкість IP/MPLS дозволяє розділяти трафік в різних VPN, забезпечувати стійку мережеву маршрутизацію за допомогою первинних і вторинних шляхів з комутацією міток, а також масову масштабованість за допомогою високошвидкісного доступу і мережевих інтерфейсів. Базова інфраструктура DWDM зазвичай будується як серія з'єднань типу "точка-точка" з мережевим інтелектом, що надходить з рівня IP/MPLS.

Там, де використовуються такі проміжні вузли, важливо враховувати економічні наслідки додавання великої кількості портів доступу 10GE і подальшу потребу в мережевих інтерфейсах 100GE. У деяких випадках це може бути проста інвестиція в більшу кількість міжмережевих плат, не забуваючи про модернізацію основного рівня DWDM, однак це може призвести до потреби в абсолютно нових маршрутизаторах, а також до витрат на впровадження нових платформ в мережу. Навіть відносно проста топологія, показана на рисунку 2.1, має MASG в місці агрегації RAN; в реальності цей сайт, ймовірно, міститиме мінімум $2 \times \text{MASG} / \text{PE}$ для забезпечення певного рівня відмовостійкості. Відмовостійкість може бути забезпечена подвійним наведенням 1+1 для всіх каналів доступу через обидва MASG; це забезпечить високу доступність за певну ціну, або ж суміжні центри можуть бути прив'язані до альтернативних MASG, щоб мінімізувати вплив виходу з ладу однієї з двох платформ MASG. Термін "MASG" з'явився при розробці псевдопровідних рішень, однак тут він використовується для позначення платформи агрегації, яка може бути L2 і/або L3, включаючи IP-маршрутизатор, в залежності від специфіки конкретного дизайну мережі.

Подібні правила відмовостійкості є загальними для практичної реалізації IPsec GW, враховуючи розмір географічного відключення, яке може статися, якщо IPsec GW вийде з ладу. Вартість дублювання на цих платформах буде значною; оператор повинен розглянути маркетингові наслідки такої відмови,

щоб побудувати надійне фінансове обґрунтування інвестицій у відмовостійкість, а також те, наскільки близько до місця розташування стільникового вузла буде досягнута відмовостійкість. Місце розташування стільника може бути з'єднане одним оптоволоконним кабелем або може бути інтегроване в оптоволоконне кільце з первинними і вторинними (різноманітними) маршрутами, що проходять різними шляхами навколо кільця. Альтернативні підходи до забезпечення відмовостійкості транзитного зв'язку включають використання мікрохвильового або міліметрового радіозв'язку для забезпечення альтернативного маршруту до основного шляху по волокну або навіть використання супутникового зв'язку - варіант, який все частіше використовується операторами мобільного зв'язку для забезпечення відмовостійкості критично важливих сервісів. Бездротове резервне рішення, наземне чи супутникове, може не підтримувати таку ж пропускну здатність, як оптоволоконне з'єднання, проте воно забезпечить безперебійну роботу деяких послуг, а механізми якості обслуговування (QoS), що відповідають 3GPP QCI (відомі як 5QI для 5G NR), використовуються для забезпечення доступності відмовостійкого з'єднання для певних типів трафіку в разі перевантаження [10-14].

2.2 Особливості використання мережі 5G

Розглянемо кілька ключових етапів та аспектів впровадження 5G D-RAN в мережі запуску 5G EE. Використання EN-DC для підтримки одночасної роботи з 4G і 5G мережами дозволяє плавний перехід та використання ресурсів обох мереж. Реалізація інтерфейсу F1 для централізованого CU (Centralized Unit) надає гнучкість та можливість централізованого управління ресурсами.

Всі ці аспекти сприятимуть успішному впровадженню 5G D-RAN в мережі 5G EE, забезпечуючи оптимізацію та гнучкість для подальшого розвитку. Щоб завершити дослідження особливостей впровадження 5G D-RAN, давайте розглянемо приклад використання ВТ. Мережа запуску 5G EE була заснована на архітектурі EN-DC і в першу чергу була зосереджена на вирішенні випадків

використання eMBB. Було прийнято рішення про запуск за допомогою рішення 5G D-RAN, однак був потрібен певний рівень гнучкості, щоб уможливити майбутню функціональну декомпозицію RAN, якщо це буде потрібно. Це може включати реалізацію інтерфейсу F1 для централізованого CU або реалізацію інтерфейсів CPRI і/або eCPRI для підтримки централізованих DU і CU. Процес, описаний вище, було виконано; створено модель пропускнуої здатності мережі, виконано розрахунки доступності та продуктивності, а також підготовлено техніко-економічне обґрунтування для обґрунтування запропонованої стратегії мобільного транзитного зв'язку та цільової архітектури.

Мобільна мережа EE користується перевагами спільного використання мережі з іншим британським оператором мобільного зв'язку через спільне підприємство, відоме як MBNL (Mobile Broadband Network Limited). 3G UMTS - це активне спільне використання мережі, реалізоване як рішення MORAN; 2G GSM, 4G LTE і 5G - це одностороннє розгортання, однак у багатьох випадках фізичний майданчик і структура спільно використовуються разом з електроживленням, а в деяких випадках - пасивні антени і транзитні лінії зв'язку. Основним рушієм є пошук якомога більшої фінансової синергії від спільного використання, дозволяючи при цьому обоє операторам реалізовувати свої індивідуальні бізнес- та маркетингові стратегії. Ці міркування повинні бути враховані в будь-якому техніко-економічному моделюванні.

EE вирішила прийняти стратегію розгортання магістрального зв'язку 5G на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку, на відміну від того, що раніше, де це було можливо, перевага надавалася мікрохвильовій радіорелейній магістралі. Перехід до збільшення обсягів волоконно-оптичного зв'язку розпочався з впровадженням технологій HSPA і продовжився з розгортанням LTE. Основною рушійною силою є підвищені вимоги до пропускнуої здатності сучасних стільникових майданчиків з декількома RAT, особливо коли транзитний зв'язок розподіляється між двома мережевими операторами. Це обмежує практичну реалізацію певних топологій мікрохвильового радіозв'язку і вимагає більшої щільності волокон для додавання розподілених вузлів агрегації для сайтів, які

підключаються через мікрохвильові радіолінії, подібно до топологій, показаних на рисунках 1.1 і 1.5, де один бездротовий сайт з'єднується з сайтом стільникового зв'язку з оптоволоконним живленням. Інші топології включають додавання більшої кількості каналів від волоконно-оптичного концентратора в топології "зірка" і/або ланцюжків каналів, що простягаються від вузла. Останній варіант стає дедалі складнішим з огляду на вимоги до пропускної здатності кожного вузла і каналу.

Однією з проблем спільного використання транзитних каналів є можливість кожного оператора встановлювати власні наскрізні моделі QoS і змінювати їх у міру необхідності для підтримки нових продуктів і пропозицій. Одним із способів забезпечення такої гнучкості є спільне використання на рівні оптичної довжини хвилі, а не на активному рівні Ethernet/IP. Доступні продукти CWDM і DWDM для мереж доступу; важливість DWDM для доступу полягає в тому, що його можна легко підсилити, щоб розширити зону дії схеми доступу, а також він пропонує значну масштабованість. EE обрала рішення DWDM для доступу як основне рішення для магістрального волоконно-оптичного зв'язку для розгортання 5G у густонаселених міських, селищних та приміських районах. Рішення надається Openreach, британським відкритим постачальником мереж фіксованого доступу, і відоме як OSA-FC; це означає "Доступ до оптичного спектру - фільтруюче з'єднання" (Optical Spectrum Access - Filter Connect) [10]. Технічне рішення складається з двох боксів висотою 1U (1 стійка = 44,45 мм у висоту), активного NTU і пасивного фільтруючого модуля; у випадку EE було обрано 16-канальний фільтруючий модуль.

Рисунок 1.6 ілюструє архітектуру мережі мобільного транзитного зв'язку 4G/LTE. 2G GSM підтримується на базовій станції з декількома RAT/однією RAN, яка також підтримує 4G LTE. Базова станція GSM/ LTE зазвичай підключається до CSG через інтерфейс Ethernet зі швидкістю 1 Гбіт/с, однак у випадку високопродуктивної базової станції гігабітного класу LTE це з'єднання здійснюється через інтерфейс Ethernet зі швидкістю 10 Гбіт/с. Послуга гігабітного класу LTE пропонує пікову швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с і

тому вимагає більше 1 Гбіт/с транзитного трафіку. Інтерфейс 10 Гбіт/с є наступним за рівнем деталізації, однак фактична транзитна VLAN формується до 2 Гбіт/с на кінцевому маршрутизаторі. У режимі спільної передачі багатомодова базова станція пропонує єдиний фізичний інтерфейс, який підтримує інтерфейси Abis, S1 і X2. Послуга 3G UMTS, як обговорювалося вище, є MORAN і, отже, підтримує двох операторів мережі. Історично UMTS MORAN підтримував значну пропускну здатність з частотами до 7×5 МГц FDD WCDMA-носіїв на сектор стільника; сьогодні більшість носіїв були переобладнані для використання в якості LTE 2100. Інтерфейс Iub від NodeB до CSG, як правило, є інтерфейсом Ethernet зі швидкістю 1 Гбіт/с, однак сьогодні достатньо з'єднання зі швидкістю 100 Мбіт/с. Базова станція 5G додається до існуючої стільникової мережі і підключається до CSG через інтерфейс Ethernet 10 Гбіт/с для підтримки інтерфейсів S1 (5G в режимі роботи EN-DC і, отже, на цьому етапі підключена до EPC+) і X2. Локальний інтерфейс X2 між спільно розташованими eNB і gNB управляється на місці як пряме з'єднання через CSG; на цьому інтерфейсі реалізовано IPsec для забезпечення автентифікації підключених елементів мережі.

Альтернативною моделі з декількома базовими станціями, представленою в дослідженні, може бути заміна на нове рішення з декількома RAT, яке може підтримувати всі технології радіодоступу, включаючи 5G. Це буде дорого і, швидше за все, економічно недоцільно, якщо тільки інші фактори не стимулюватимуть програму заміни; ці інші фактори можуть включати інтеграцію мережі після злиття двох операторів або оптимізацію проектування майданчика, якщо проблеми фізичного розміщення перешкоджають подальшому зростанню мережі. Насправді багато операторів додадуть 5G як нову базову станцію і з'єднають її з існуючою базовою станцією LTE за допомогою інтерфейсу X2.

На рисунку 2.2 показана радіосистема E-діапазону; вона показана для повноти картини, однак вона не буде розгорнута на кожній ділянці. Переважна більшість об'єктів у початковому плані розгортання 5G є міськими, і тому

ймовірність з'єднання об'єктів за допомогою оптоволокна є високою. Радіостанції міліметрового діапазону E-діапазону будуть використовуватися для розширення зв'язку на всіх майданчиках, які не можуть бути з'єднані оптоволоконом. Радіостанція E-діапазону підключається до CSG через інтерфейс Ethernet зі швидкістю 10 Гбіт/с. Фактична швидкість передачі даних в радіосистемі E-діапазону залежить від радіочастотної конфігурації смуги пропускання каналу і схеми модуляції [15-19].

CSG підключається до активного оптичного мережевого термінального пристрою; він забезпечує стандартний "сірий" оптичний інтерфейс до CSG і кольоровий оптичний інтерфейс (сітка ITU-T DWDM [11]) до оптичного фільтра. Використання активного NTE тут в першу чергу обумовлено регуляторним середовищем у Великобританії; такі регуляторні міркування будуть важливою частиною загального техніко-економічного аналізу. Кольорове з'єднання зі швидкістю 10 Гбіт/с з каналом 1 16-канального фільтруючого модуля залишає ще 15 каналів доступними для майбутньої модернізації пропускної здатності, спільного використання та/або розвитку радіочастотного діапазону (RAN).

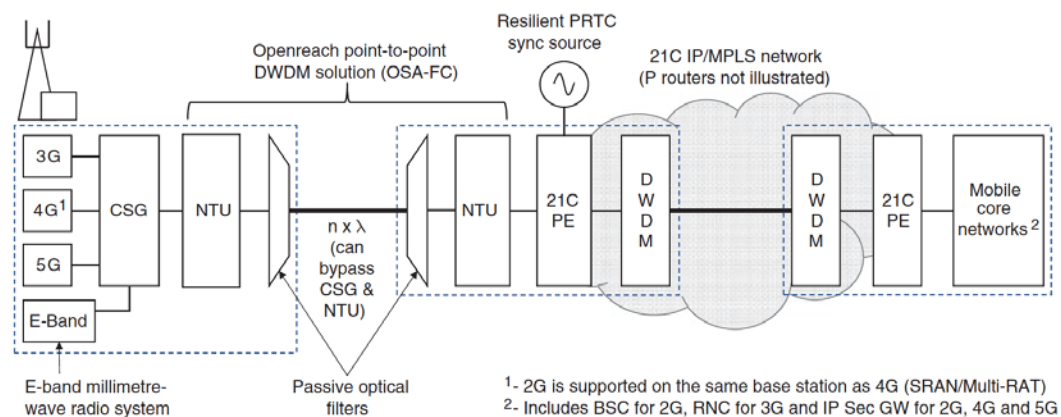


Рисунок 2.2 - Архітектура високорівневої мобільної мережі BT/EE multi-RAT

З точки зору пропускної здатності, якщо навантаження радіотрафіку E-діапазону на певній ділянці, підключеній до оптоволокна, стане більшим, ніж те, яке може бути забезпечене єдиним каналом 10 Гбіт/с, радіостанція E-діапазону

може підключатися безпосередньо до каналу 2 оптичного фільтра, вставивши кольоровий оптичний приймач у порт даних трафіку радіоприймача або використовуючи інший "сірий" порт/модуль на активному кінцевому обладнанні - відносні витрати визначатимуть, який підхід буде оптимальним.

Якщо волокно доступне, то можливі альтернативні варіанти транзиту; CSG може освітлювати темне волокно безпосередньо від оптичного приймача, що підключається, усуваючи необхідність в активному NTE. DWDM-фільтр може знадобитися або не знадобитися для темного волокна; відносну вартість багатожильних кабелів слід порівняти з вартістю DWDM-фільтрів і кольорових оптичних трансиверів. Відносна економічність цих різних підходів буде суттєво відрізнятися на різних ринках і в різних регуляторних режимах.

Транзитний трафік проходить через систему доступу DWDM і закінчується в місці агрегації RAN на PE-маршрутизаторі (роль MASG). Цей PE-маршрутизатор у мережі BT слугує мультисервісним граничним маршрутизатором, оскільки, поряд з агрегацією транзитного трафіку RAN, він агрегує фіксований бізнес-трафік і ширококутний трафік, виступаючи в ролі шлюзу ширококутної мережі для останнього.

Використання висококласних PE-маршрутизаторів у цьому мультисервісному режимі дозволить знизити загальну сукупну вартість володіння за рахунок максимального використання наявних мережевих активів. Через ймовірну велику кількість інтерфейсів/портів доступу 10GE, інтерфейси PE-маршрутизатора, що виходять на мережу, повинні працювати на швидкості 100 Гбіт/с або вище; така високошвидкісна оптика коштує дорого, і тому слід ретельно продумати інженерію мережевого трафіку, підкріплену розумінням досяжного виграшу від статистичного мультиплексування.

PE-маршрутизатор також виступає в ролі точки входу для мережевої синхронізації у вигляді сигналів частотної і фазової синхронізації. Сигнали синхронізації надходять від первинного еталонного годинника синхронізації (PRTC), як правило, це високоточна розширена платформа PRTC (ePRTC). Ця платформа надає еталони частотної синхронізації, які можуть бути розподілені

безпосередньо через SyncE [2, 3, 12] або через пакети Precision Timing Protocol (PTP) [13].

Частотна синхронізація є загальною вимогою для радіосистем і використовується для забезпечення стабільного еталонного значення частоти, щоб дисциплінувати генератор базової станції для роботи в режимах FDD і TDD. Фазова (або часова) синхронізація поширюється через пакети PTP і використовується в деяких передових радіосистемах LTE, таких як покращена координація міжстільникових завад (eICIC) і координована багатоточкова передача і прийом (CoMP), однак саме використання TDD в 5G є рушійною силою значного поширення фазової синхронізації. Робота TDD вимагає дуже точного узгодження часу між сусідніми базовими станціями, щоб перемикання між низхідною і висхідною передачею відбувалося в один і той же момент, щоб уникнути радіоперешкод. Найпоширенішим джерелом синхронізації часу є глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS). Локальне рішення GNSS для стільникового вузла може працювати, однак воно буде вразливе до локальних перешкод і підробок. Мережевий сигнал синхронізації, заснований на розподілених джерелах GNSS, пропонує підвищену доступність мережі. Ці сигнали синхронізації (синхронізація частоти і фази/часу доби) доставляються на базову станцію за допомогою SyncE (тільки синхронізація частоти) і/або IEEE 1588-2008 (синхронізація частоти і фази). Найнадійнішим механізмом доставки є використання синхронного Ethernet і IEEE 1588-2008 в ланцюзі доступу. Перевагою цього механізму є здатність SyncE забезпечувати локальне утримання в разі втрати сигналу фазової синхронізації, тим самим збільшуючи тривалість утримання і підтримуючи повний робочий стан.

Мережеві інтерфейси 100GE підключаються до транспондерів на активному ядрі DWDM-системи, що забезпечує високошвидкісне з'єднання з маршрутизаторами ядра Р. Ці висококласні маршрутизатори з комутацією по мітках вимагають значної пропускної здатності. Мобільні транзитні IP VPN передають цю високошвидкісну магістральну транспортну мережу IP/MPLS до централізованої мобільної магістральної мережі. Термін "централізована",

звичайно, відносний; він буде відрізнятися від країни до країни залежно від географічної присутності певного оператора мережі. У випадку з мобільною мережею 4G, основна мережа розташована в 12 географічно розподілених вузлах, тому, хоча її називають централізованою, насправді вона розподілена по географічних регіонах з метою оптимізації витрат на мережу та покращення якості обслуговування користувачів. На цих мобільних вузлах розміщуються шлюзи IP-безпеки, а також елементи BSC і RNC (разом з деякими мережевими елементами, які раніше розміщувалися на агрегаційних майданчиках RAN).

Крім того, на цих майданчиках розміщуються традиційні вузли ядра мобільної мережі, що підтримують функції комутації каналів і пакетів, а також пов'язані з ними бази даних, механізми політик, засоби безпеки і оптимізації.

Концентратори мобільних базових мереж також надають доступ до мереж розповсюдження контенту (CDN), які забезпечують прямий локальний доступ до широкого спектру популярного відеоконтенту, що дозволяє заощадити на витратах на передачу даних до пірингових/транзитних інтернет-локацій та пов'язаних з ними витратах на інтернет-мережу. Економічне обґрунтування для CDN не є простим. По-перше, оператор повинен вирішити, чи буде третя сторона надавати фізичне обладнання, чи це буде зроблено самим оператором. Досить часто рішення CDN встановлюється стороннім постачальником контенту, однак оператор несе відповідальність за споживання електроенергії та управління будь-якими вимогами до опалення, вентиляції та кондиціонування, щоб забезпечити належні умови навколишнього середовища для серверів CDN. Техніко-економічний аналіз необхідний для того, щоб зрозуміти цінність розгортання CDN і кількість місць, в яких CDN мають комерційний сенс. Нещодавній розвиток ігрових онлайн-сервісів означає, що такі CDN стануть більш широкими сервісними платформами, які надаватимуть широкий спектр послуг, чутливих до затримок. Оператор повинен розробити чітку стратегію взаємодії з постачальниками контенту в цьому просторі. Прикладом цього є партнерство між 4G і Google, в рамках якого послуга онлайн-ігор Stadia від Google розміщується на основних вузлових сайтах 4G [14].

2.3 Ефективне керування ресурсами та оптимізація функцій базових станцій у централізованих архітектурах мережі

Інтерфейс F1 в мережі 5G відноситься до інтерфейсу між централізованим блоком керування (CU) та розподіленими блоками керування (DU) у архітектурі C-RAN (Centralized Radio Access Network). F1 грає важливу роль у забезпеченні комунікації та координації між централізованим і розподіленим обладнанням, допомагаючи в управлінні і керуванні різними аспектами бездротового доступу.

Проміжний перехід (Intermediate Transition) може вказувати на етап впровадження або зміну в архітектурі мережі. Наприклад, при переході від попередніх генерацій мереж (наприклад, 4G LTE) до 5G, може бути потрібен перехідний етап для поступового впровадження нових функцій і обладнання.

У випадку F1, він визначає інтерфейс між CU і DU, де CU (Centralized Unit) забезпечує централізоване керування, а DU (Distributed Unit) виконує розподілені функції базової станції. Цей інтерфейс дозволяє ефективно об'єднувати функції управління та ресурсів для оптимізації мережі.

При перехідному етапі може бути важливим забезпечити сумісність із старішими технологіями, використовуючи перехідні рішення або протоколи. Це дозволяє послугам і мережам плавно впроваджувати нові функції без значного впливу на існуючі системи. Цей інтерфейс та проміжний перехід можуть розглядатися як частини стратегії впровадження та розвитку мережі 5G, забезпечуючи ефективне управління ресурсами та оптимізацію функцій базових станцій у централізованих архітектурах мережі.

C-RAN означає різні речі для різних людей, від хмарної RAN до координованої RAN і кооперативної RAN - все це фактично одне й те саме, однак рівень координації або співпраці залежить від того, де відбувається функціональний розподіл. Рисунок 1.3 ілюструє функціональну декомпозицію 5G gNB на компоненти RU, DU і CU. У цьому розділі розглядається визначений 3GPP варіант 2 поділу, який підтримується за допомогою стандартизованого інтерфейсу F1 [8, 15-19]. Варіант 2 поділу є більш високим рівнем поділу в

архітектурі протоколу gNB і знаходиться між рівнем PDCP і високим рівнем RLC. Рисунок 2.3 ілюструє розташування розділення варіанту 2 та інтерфейсу F1; ця діаграма базується на 3GPP TR 38.801 [20]. Діаграма застосовна до мережі 5G EN-DC, однак єдине, що змінюється, коли оператор переходить до базової мережі 5G, - це включення нового протоколу між даними користувача (поле даних зліва на діаграмі) і PDCP. Цією новою функцією є протокол адаптації службових даних (SDAP), який було впроваджено в площині користувача NR для управління структурою QoS на основі потоку в RAN, наприклад, для відображення між потоком QoS і радіоносієм даних, а також для маркування ідентифікатора потоку QoS.

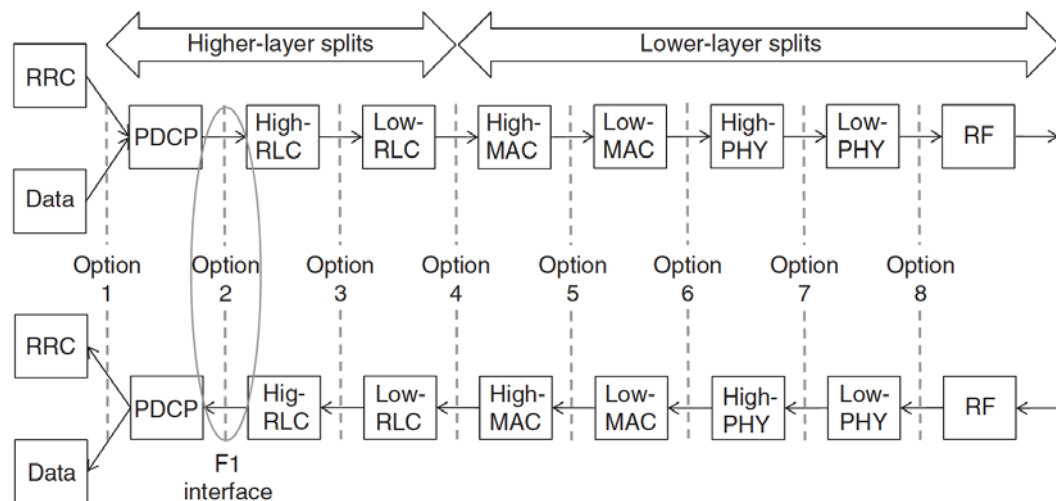


Рисунок 2.3 - Архітектура протоколу RAN та інтерфейс F1

Враховуючи, що інтерфейс F1 дозволяє розщеплення на більш високі рівні, це обмежує кількість переваг координації, які можуть бути досягнуті, оскільки розщеплення на більш високі рівні відбувається в частині стека протоколів, що не працює в режимі реального часу. Тим не менш, є й інші переваги, які можна отримати від розділення DU-CU; CU містить рівень PDCP, який, серед іншого, підтримує шифрування і дешифрування трафіку керуючого і користувацького рівнів на радіоінтерфейсі.

Перенесення цієї функції в довірений домен в мережі оператора дає можливість видалити IPsec ESP (зашифроване корисне навантаження безпеки) з трафіку користувацького рівня через інтерфейс F1. Це не тільки зменшує накладні витрати транспортної мережі, але й забезпечує більш дрібну деталізацію хешування (балансування навантаження), що дозволяє більш оптимально використовувати транзитні канали, особливо якщо агрегаційні канали, розташовані в глибині мережі, працюють на швидкості $n \times 10$ Гбіт/с. Це може мати значний вплив на витрати транспортної мережі, відтермінуючи або усуваючи необхідність модернізації міжмаршрутних каналів $n \times 10$ Гбіт/с до каналів 100 Гбіт/с. Додатковою перевагою перенесення рівня PDSP на довірений сайт є безпека; дані управління і користувацького рівня тепер повністю зашифровані від UE до довіреного вузла (CU) в інфраструктурі оператора мобільного зв'язку, замість того, щоб розшифровувати радіотрафік на сайті стільника, а потім повторно зашифровувати його за допомогою IPsec для подальшої передачі до ядра.

Такі галузеві ініціативи, як O-RAN [21], пропонують додати новий вузол до архітектури мережі 5G; цей новий вузол відомий як інтелектуальний контролер RAN (RIC) і працює на рівні управління. RIC може використовувати машинне навчання для забезпечення оптимізації радіомережі в ряді комбінацій DU/RU, які підключені до загальної CU. Слід зазначити, що RIC також може підтримувати оптимізацію радіозв'язку навіть з розподіленою функцією CU, як у D-RAN - хоча це, ймовірно, буде менш ефективно. O-RAN визначає два типи RIC: RIC, що працює майже в реальному часі, який запускає xApps, і RIC, що не працює в реальному часі, який запускає rApps. Використання програмних додатків дає можливість постійної оптимізації мережі та послуг.

Вимоги до підключення до транспортної мережі інтерфейсу F1 іноді називають "проміжним транспортом", однак нерідко можна почути, що цей інтерфейс називають "транзитним транспортом", тому завжди краще прояснити цей момент при обговоренні функціонального поділу RAN і декомпозиції архітектури. Розмірність інтерфейсу середнього рівня F1 не відрізняється від

розмірності магістральної мережі S1 архітектури EN-DC; сама по собі вона дуже схожа на розмірність магістральної мережі наступного покоління через інтерфейси N2/N3. Аналіз визначення розмірів інтерфейсу F1 показує, що типовий підйом в порівнянні з транзитною мережею S1 становить приблизно 5%; це, ймовірно, знаходиться в межах похибки моделі визначення розмірів інтерфейсу S1. Функції CU можна легко розмістити на загальній обчислювальній платформі без потреби в будь-якому спеціалізованому апаратному прискоренні; таким чином, CU можна реалізувати як програмну функцію в мережевій хмарі, як віртуальну мережеву функцію (Virtual Network Function, VNF).

Враховуючи схожість швидкостей передачі даних між магістральною та проміжною передачею на основі F1, застосовується один і той же набір технічних рішень. Варіант 2 поділу не передбачає специфічних для RAN цілей щодо затримок, і тому, як і у випадку з магістральною мережею, допустимий бюджет затримок базується на пропозиціях послуг, які оператор хоче виробляти і продавати на ринку. Таким чином, для проміжної передачі можна використовувати будь-які оптичні або бездротові транспортні продукти - наприклад, оптоволоконні рішення типу "точка-точка", в тому числі DWDM для доступу, про які йшлося вище, або послуги Carrier Ethernet.

Аналогічно, будь-яке бездротове рішення, яке підходить для транзитного транспортування, може також використовуватися для проміжного транспортування; до них відносяться традиційні мікрохвильові радіолінії і системи радіозв'язку міліметрового діапазону.

Обидва варіанти можуть бути реалізовані у вигляді зв'язку "точка-точка", а також у вигляді систем "точка-багато точок" і "багато точок-багато точок" (mesh).

2.4 Оптимізація керування ресурсами та підтримка високоефективного використання бездротового спектру

У мережі 5G C-RAN (Centralized Radio Access Network), існують два ключові інтерфейси для забезпечення зв'язку між централізованим блоком керування (CU) та розподіленими блоками керування (DU): CPRI та eCPRI. Обидва ці інтерфейси відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та координації мережі. Ці компоненти разом утворюють архітектуру C-RAN у мережі 5G, яка спрямована на оптимізацію управління ресурсами та підтримку високоефективного використання бездротового спектру.

Отже, скоординована мережа RAN реалізується, коли впроваджено поділ на нижньому рівні. Це забезпечує координацію в реальному часі між розподіленими RU, підключеними до спільної функції DU. У цьому випадку CU може бути розміщена поруч з DU або в ще більш централізованому місці; це не має ніякого відношення до обговорення фронтального доступу. Посилання на типові швидкості передачі даних CPRI для 4G LTE C-RAN в розділі 1.3 ілюструє значну пропускну здатність, необхідну для поділу за варіантом 8, а в розділі 1.4 представлено концепцію eCPRI, поділу за варіантом 7. Саме це розділення eCPRI буде підтримувати реалізацію масового MIMO 5G, хоча, як обговорювалося, буде багато систем MIMO нижчого порядку, які реалізуються з використанням CPRI з власними алгоритмами стиснення. Масивні системи MIMO 16T16R і вище вже реалізуються з розділенням eCPRI варіанту 7, і це напрямок розвитку для багатьох майбутніх систем 5G. 3GPP визначає три варіанти розділення опції 7, вони відомі як 7-1, 7-2 і 7-3 (зверніть увагу, що 7-3 - це тільки низхідний канал). На додаток до розділення 3GPP, Альянс O-RAN визначив eCPRI-подібне розділення, відоме як 7-2x (Open Fronthaul). Всі ці варіанти варіанту 7 можуть передаватися через канал на основі Ethernet.

Хоча варіант 7 знижує швидкість передачі даних, необхідну для інтерфейсу DU-RU, він не змінює жорсткі вимоги до затримки в 250 мкс; це засновано на процесі HARQ, який знаходиться на нижньому MAC-рівні стека протоколів 5G

NR. Час 250 мкс стосується допустимого часу в обидва боки (туди і назад плюс час обробки) і, таким чином, обмежує типову відстань в один бік оптоволокна ~20 км. Різні виробники забезпечують різні оптимізації цього інтерфейсу, тому точна максимальна відстань може дещо відрізнятись у різних виробників - однак більша частина бюджету затримки використовується для фізичної передачі по оптоволоконному кабелю.

Передача світлових хвиль відбувається зі швидкістю приблизно дві третини від швидкості світла, коли вони знаходяться в одномодовому оптоволоконному кабелі. Розташування розгалуження варіанту 7 eCPRI показано на рисунку 2.4.

Слід зазначити, що O-RAN [21] може підтримувати неідеальний прямий доступ, який відноситься до прямого доступу, який не відповідає жорстким 250 мкс RTT. Якщо затримка перевищує 250 мкс RTT, можна очікувати, що деякі з переваг нижньопарового розділення не будуть реалізовані за наявності неідеального транспорту. Це особливо вплине на координацію в реальному часі між радіостанціями.

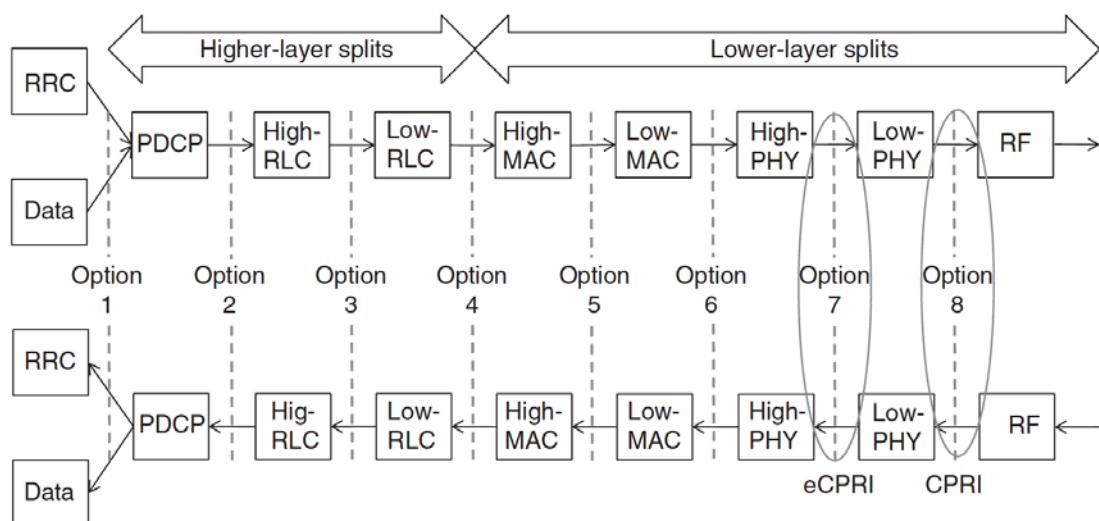


Рисунок 2.4 - Опорні точки eCPRI та CPRI

Варіант 7 розділення призводить до реалізації нижнього фізичного рівня в RU, будь то окремий радіоприймач або інтегрована функція в активній/масивній

МІМО-антені. Це призводить до більш складного технічного рішення, оскільки, по суті, компоненти базової станції, що працюють в реальному часі, розподіляються між двома мережевими елементами - RU і DU.

Хоча функціональний розподіл перемістився з варіанту 8 на варіант 7, DU все ще містить функціональність реального часу і тому не може бути легко віртуалізований на звичайних обчислювальних платформах так, як це можна зробити для CU, що не працює в реальному часі. Це призводить до потреби в спеціалізованому обладнанні для підтримки функціональності високого фізичного рівня. Сьогодні це реалізується за допомогою спеціалізованих апаратних рішень від основних постачальників RAN, однак спостерігається рух до комбінованої загальної обчислювальної платформи з відповідним модулем прискорювача, який просто під'єднується до обчислювального шасі. Це може в кінцевому підсумку змінити економіку побудови радіомереж макростільникового зв'язку. У довгостроковій перспективі ми, ймовірно, станемо свідками значного розвитку обчислювальних потужностей, що зробить непотрібним спеціальне апаратне забезпечення. Для певних додатків малих стільників вже є постачальники, які можуть продемонструвати DU з опцією 7 розділення, що працюють на комерційних обчислювальних платформах, однак ці рішення дуже відрізняються від високопродуктивних рішень з високою пропускну здатністю, необхідних для покриття великих територій макростільникових мереж.

Реалізація функціонального розділення в межах RAN може відрізнитися між RAT і навіть частотними діапазонами в межах RAT. Якщо для різних діапазонів в межах RAT реалізовано різний розподіл, дуже важливо враховувати наслідки, які це матиме для використання агрегації несучих (CA). На рис. 2.5 показано діапазон архітектур gNB, які можуть бути реалізовані завдяки гнучкості, що досягається за рахунок функціональної декомпозиції RAN.

Для зручності розгляду варіантів, на рисунку 2.5 вони позначені номерами 1, 2, 3 і 4.

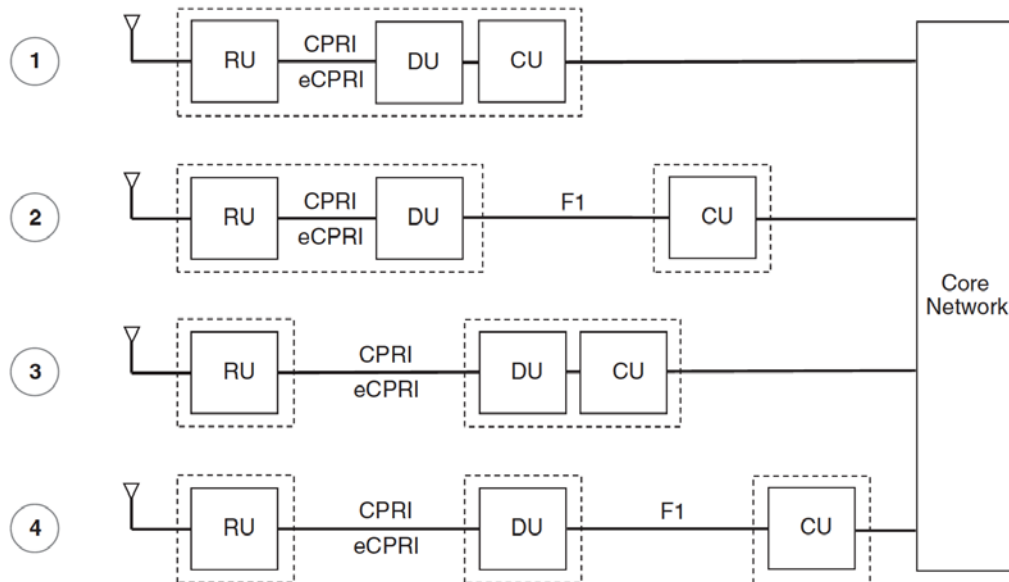


Рисунок 2.5 - Архітектури gNB - варіанти функціональної структури RAN

Реалізація № 1 - це повністю розподілений (також званий повністю агрегований) gNB; він описаний у прикладі використання в розділі 1.7. Реалізація № 2 ілюструє варіант 2, розділений інтерфейсом F1, в якому DU і CU фізично розділені, однак RU(и) розміщені разом з DU.

Реалізація номер 3 є першим з двох рішень для координованого розгортання RAN в реальному часі, в якому RU(и) та DU встановлюються на фізично відокремлених локаціях (сайтах). На схемі вказано CPRI або eCPRI як інтерфейс зовнішнього зв'язку, однак у випадку реалізації O-RAN це буде інтерфейс відкритого зовнішнього зв'язку. У цьому рішенні DU і CU розташовані разом. Реалізація номер 4 ґрунтується на реалізації номер 3 шляхом розділення DU і CU; це дозволить CU забезпечити загальну точку управління і оптимізації для декількох DU. Ця оптимізація може мати форму спільно розташованого інтелектуального контролера RAN, як визначено в специфікаціях O-RAN.

Зауважте, що на рисунку 2.5 не передбачається розділення площини управління CU і площини користувача, як показано на рисунку 1.4. Якщо буде реалізовано інтерфейс E1, то можливі додаткові архітектури з CU-с, розташованим в іншому місці, ніж CU-и. Одна масштабована станція CU-с може підтримувати декілька мережевих елементів CU-и.

2.5 Аналіз впровадження магістральної мережі для стільникового зв'язку з конфігурацією C-RAN

Техніко-економічний аналіз для впровадження C-RAN (Centralized Radio Access Network) у стільникових мережах дозволяє оцінити переваги та витрати, пов'язані з цією технологією. Основні аспекти аналізу повинні включати.

Оцінка зменшення витрат на оренду місць розташування стільника, операційних витрат завдяки наявності всього діапазону частот у підмножині місць, зниження споживання електроенергії на місці розташування стільника. Оцінка впливу на витрати, пов'язані з кількістю та обслуговуванням обладнання на місці розташування стільника. Оцінка покращення спектральної ефективності завдяки статистичному мультиплексуванню та об'єднанню ресурсів цифрової обробки сигналів базового діапазону. Оцінка покращення продуктивності радіомережі через централізоване управління та оптимізацію ресурсів. Оцінка фінансових вигід, таких як зниження витрат та підвищення ефективності.

Порівняння з існуючими витратами на розгортання D-RAN в якості базової лінії. Врахування витрат, пов'язаних з побудовою і експлуатацією нової архітектури RAN. Оцінка загальних витрат та користі, включаючи фінансові та експлуатаційні аспекти. Техніко-економічний аналіз дозволить операторам приймати обґрунтовані рішення щодо впровадження C-RAN, а також надасть можливість дослідити різні сценарії та стратегії для оптимізації витрат та підвищення продуктивності мережі.

Отже, сайт стільникового зв'язку, розгорнутий у конфігурації C-RAN з прямим з'єднанням між локальними RU та централізованим DU, потребує рішення для мережі передачі/транспортування, яке може підтримувати високу швидкість передачі даних та низьку затримку, що вимагається CPRI та/або eCPRI. Техніко-економічний аналіз необхідний, в першу чергу, для обґрунтування впровадження магістральної мережі; отже, переваги C-RAN повинні бути доведені для конкретного оператора. Техніко-економічний аналіз буде використовувати існуючі витрати на розгортання D-RAN в якості базової

лінії. Переваги C-RAN будуть відрізнятися на різних ринках, однак фактори, які слід враховувати, включають зменшення кількості обладнання на місці розташування стільника (що, можливо, призведе до зниження витрат на оренду місця), зниження операційних витрат завдяки наявності всього діапазону частот у підмножині місць, зниження споживання електроенергії на місці розташування стільника, переваги статистичного мультиплексування завдяки об'єднанню ресурсів цифрової обробки сигналів базового діапазону (що зменшує загальні вимоги до базового діапазону) і покращення продуктивності радіомережі, в тому числі завдяки підвищенню спектральної ефективності. На додаток до фінансових переваг C-RAN, оператор повинен враховувати витрати, пов'язані з побудовою і експлуатацією нової архітектури RAN. Такі міркування включають забезпечення відповідних систем передачі для прямого зв'язку, розміщення і живлення базових станцій, будь-які загальні вимоги до обчислень (особливо, якщо CU має бути розміщена глибше в мережі, ніж DU) і відповідну частоту і синхронізацію фази/часу доби для підтримки вимог RAN.

Після прийняття стратегічного рішення про впровадження C-RAN оператору необхідно розробити стратегію транспортної мережі та цільову архітектуру для магістральної мережі. Після цього можна розробляти високорівневі і низькорівневі проекти і починати планування мережі. Модель пропускної здатності радіоінтерфейсу буде основою для розробки технічного рішення для магістральних мереж і вимог до масштабування функцій DU і CU базового діапазону. Обмеження затримки процесу HARQ (функція рівня MAC) стануть ключовим фактором для проектування магістральної мережі. Інтерфейсна схема eCPRI може бути реалізована через оптоволоконне або бездротове з'єднання, або навіть гібрид цих двох способів. На додаток до цих двох усталених методів підключення, в даний час триває проект TIP (Telecom Infra Project) щодо vRAN Fronthaul, який має на меті створити механізми для передачі даних через неідеальний зв'язок; це стосується систем, які не мають необхідної пропускної здатності або перевищують затримку звичайного рішення для передачі даних через мережу [22]. Через значно вищі вимоги до пропускної

здатності інтерфейсу CPRI, порівняно з eCPRI, реалізувати рішення CPRI на бездротових лініях зв'язку складніше, хоча цього можна досягти за низької кількості несучих і антен.

У решті цього розділу ми розглянемо технічні та економічні міркування щодо вибору оптичних та/або бездротових рішень для магістральних мереж. Оптичні мережі на основі оптоволокна передбачають значні початкові витрати на копання траншей, встановлення кабельних каналів, протягування оптоволоконного кабелю через канали та з'єднання. Повністю нова будівля навряд чи буде коштувати тільки для магістрального зв'язку C-RAN. Однак це можливо, якщо об'єднати кілька варіантів використання. Наприклад, мобільний транзитний, проміжний і магістральний зв'язок по фіксованому широкосмуговому волокну до шафи/приміщення, а також послуги Ethernet і IP VPN для бізнесу. Альтернативою самостійному будівництву оптоволокна є оренда темного оптоволокна у діючих операторів або у визнаного конкурентного постачальника оптоволокна. У деяких країнах темне волокно доступне за низькою вартістю; це особливо поширено в Азії і призвело до широкого впровадження C-RAN в міських і приміських районах. На інших ринках темне волокно або дороге, або взагалі недоступне. Альтернативою "темному волокну" є пасивний доступ до інфраструктури; в цьому випадку регулятор може вимагати, щоб діючий оператор дозволив доступ до своїх волоконно-оптичних каналів і, де це можливо, до телефонних стовпів - тих, що зазвичай використовуються для прокладання місцевих дротів. У випадку такого пасивного доступу до інфраструктури мобільний оператор прокладає власні волоконно-оптичні кабелі в існуючих каналах і сплачує узгоджену річну орендну плату (операційні витрати) за подальше використання каналів. Всі варіанти оптоволокна, які ми розглянули вище, є пасивними рішеннями; надається оптоволокно, до якого потрібно буде додати оптичне мережеве обладнання для прокладання кабелю. Альтернативою пасивній оптоволоконній послугі є активна послуга - надання оптичного мережевого рішення, такого як рішення Openreach OSA-FC. Інші освітлені послуги можуть надавати високошвидкісні послуги

Carrier Ethernet, які можуть підтримувати пряме підключення eCPRI, а також підтримувати будь-які інші вимоги до проміжного або зворотного зв'язку з місця розташування стільникового вузла. Нещодавні розробки в технологіях Radio over Ethernet, заснованих на стандарті IEEE 1914.3, пропонують альтернативний підхід до DWDM для магістрального зв'язку CPRI; це також полегшує агрегацію CPRI, eCPRI/відкритого магістрального зв'язку, проміжного і транзитного зв'язку на загальному носії Carrier Ethernet.

Незалежно від того, чи є з'єднання для доступу до магістрального інтернету відкритим або закритим (активним або пасивним), хтось повинен надати оптичне мережеве обладнання, щоб уможливити роботу схеми. Оператор мобільного зв'язку повинен розуміти діапазон доступних варіантів, оскільки це буде основою для загального техніко-економічного аналізу, фундаментальною частиною якого є вибір між самостійним будівництвом - одним з описаних вище методів - і орендою послуги доступу до мережі. Найпростішим технічним рішенням є розгортання оптоволоконних кабелів типу "точка-точка" між місцем розташування стільника і базовою станцією DU. Більшість майданчиків макростільникового зв'язку складаються з трьох секторів, хоча також використовуються майданчики з більшою або меншою кількістю секторів; кожен сектор має бути забезпечений одним або кількома радіопристроями та/або активними антенами. Кожен радіоприймач потребує фізичного з'єднання для підтримки інтерфейсу CPRI або eCPRI; існує кілька варіантів мережевого підключення цього інтерфейсу між стільниковим сайтом і централізованим DU. Локальне з'єднання оптоволоконна з вежею в межах стільникового майданчика може бути багатомодовою або одномодовою парою оптоволоконна, яка з'єднується з віддаленим DU.

Мережеве з'єднання може складатися з пари волоконно-оптичних кабелів для кожного радіомодуля в кожному секторі стільника; це призведе до необхідності використання значної кількості оптоволоконна, хоча його вартість може бути непомірно високою, а прокладка кабелю в місці розташування централізованого DU буде складною. В якості альтернативи існують активні і

пасивні рішення, які можуть зменшити кількість волоконно-оптичних кабелів, необхідних для магістральної мережі. Активні рішення базуються на технологіях CWDM і DWDM; обидві дозволяють перетворити стандартну "сіру" оптику від радіомодулів на "кольорову", яка узгоджується з грубою або щільною сіткою довжин хвиль.

Крім того, активне обладнання забезпечить посилення потужності для магістральної волоконної передачі. Магістральні волоконні системи xWDM, як правило, базуються на роботі з двома волокнами, однак для мереж доступу стає доступним все більший асортимент систем з одним волокном.

Одноволоконне робоче рішення обмежене кількістю підтримуваних каналів, оскільки двонаправлений канал вимагає двох довжин хвиль, тоді як у двоволоконному рішенні потрібна лише одна довжина хвилі на кожному з двох волокон. Пасивний оптичний фільтр може бути використаний як альтернатива активній системі xWDM. У цьому випадку оптичні приймачі, що підключаються до радіомодуля, повинні бути адаптовані до конкретного каналу. Така кольорова оптика коштує дорожче, ніж стандартна сіра оптика. Ще однією проблемою при використанні кольорової оптики є кількість різних прийомопередавачів, які оператор повинен придбати для розгортання і запасних частин. Програмована кольорова оптика пропонує вирішення цієї проблеми, однак такі модулі, як правило, не є термостійкими і не мають достатньо високої вихідної потужності, щоб подолати відстань від волокна до централізованого DU. Виробники оптичних приймачів працюють над вирішенням обох цих проблем, але коли вони це зроблять, термостійкі приймачі, ймовірно, будуть дорогими - принаймні, доки не почнуться значні обсяги поставок. У майбутньому це, безумовно, стане життєздатним рішенням, яке спростить інсталяцію і мінімізує витрати, пов'язані зі зберіганням запасних частин. Останні тенденції в підключенні до мереж доступу, в тому числі мобільного зв'язку, призвели до значного впровадження послуг Ethernet зі швидкістю 10 Гбіт/с. Оскільки ця тенденція продовжується і доступ до Ethernet зі швидкістю 100 Гбіт/с стає масовим, це дозволить впровадити технологію Radio over Ethernet і позиціонувати її як гнучку і

потенційно дешевшу альтернативу фронтальному транспорту xWDM. Оператори мобільного зв'язку повинні провести техніко-економічний аналіз для прийняття рішень, беручи до уваги тип інтерфейсу, який буде використовуватися для підключення до DU. Це може змінюватися від $n \times 10$ Гбіт/с і 25 Гбіт/с до $n \times 100$ Гбіт/с у міру розгортання віртуалізованого DU.

Пряме бездротове підключення було обмежене, але не неможливе з інтерфейсом CPRI версії 8, однак інтерфейс eCPRI версії 7 - зі зниженими вимогами до пропускної здатності - робить бездротові рішення набагато більш життєздатними. Жорсткі вимоги до затримки, що висуваються процесом HARQ, все ще залишаються проблемою, однак сигнал по повітрю поширюється швидше, ніж по волоконно-оптичному кабелю, тому бездротовий зв'язок відіграє важливу роль у забезпеченні зв'язку на далеких дистанціях. Нещодавні розробки в галузі радіосистем міліметрового діапазону, керовані ETSI ISG mWT [23], створили конкурентне середовище постачальників, які пропонують високопродуктивні радіосистеми E-діапазону, здатні підтримувати кілька ланцюгів прямого зв'язку на майданчику з $n \times$ носіями в секторі стільникового зв'язку. Подальші інновації в радіосистемах W-діапазону і D-діапазону забезпечать підтримку достатньої кількості радіоносіїв з необхідною пропускною здатністю радіоканалу в міському середовищі. Радіостанції E-діапазону працюють у смугах частот 71-76 ГГц і 81-86 ГГц; W-діапазону - 92-114,5 ГГц, а D-діапазону - 130-174,5 ГГц.

Для географічних регіонів, які потребують більшого фізичного охоплення, ніж довжина лінії зв'язку, що досягається за допомогою радіосистем міліметрового діапазону, допоможе прогрес у традиційних мікрохвильових радіодіапазонах 6-42 ГГц. Ширші радіочастотні канали, схеми модуляції вищого порядку і вища вихідна потужність передачі збільшать пропускну здатність системи, однак перші два вдосконалення вплинуть на коефіцієнт підсилення системи і, отже, скоротять довжину лінії зв'язку для даної конфігурації. Подальші міркування щодо бездротового зв'язку повинні включати нещодавні досягнення в галузі дводіапазонної роботи, в якій об'єднуються мікрохвильові та міліметрові радіоканали, або розвиток можливостей агрегації несучої в

традиційних мікрохвильових радіодіапазонах, як внутрішньо-, так і міждіапазонних.

Транзит через неідеальний транзитний канал [22] також може відігравати певну роль; тривають дослідження, щоб зрозуміти взаємозв'язок між ідеальним транзитним каналом і продуктивністю радіоінтерфейсу, а також те, як він змінюється залежно від таких факторів, як пропускна здатність, затримка і рівень втрат пакетів через помилки. В рамках дослідження вивчається ряд фізичних систем передачі, таких як DOCSIS, G.Fast, структуровані кабелі Ethernet для локальних мереж і бездротових рішень.

2.6 Підвищення загальної ефективності мережі

Малі стільники (Small Cells) є важливою частиною мережі 5G і грають ключову роль у покращенні покриття, підвищенні пропускної здатності та забезпеченні надійного зв'язку в областях з високою щільністю користувачів або в областях з обмеженим покриттям. Вони розглядаються як важливий елемент для покращення ефективності мережі 5G. Отже, малі стільники допомагають забезпечити рівномірне покриття та надійний зв'язок у всій мережі 5G, а також зменшити навантаження на великі базові станції, покращуючи загальну ефективність мережі.

3GPP визначив два діапазони частот для 5G NR - більшість, хоча і не обов'язково всі, макростільники будуть працювати в FR1; це відноситься до спектру між 410 МГц і 7,125 ГГц. Малі стільники також працюватимуть у FR1, однак у шарі малих стільників також буде розгорнутий більш високий FR2. FR2 відноситься до діапазону між 24,250 ГГц і 52,600 ГГц (WRC19 визначив діапазони, що перевищують поточну верхню межу). Попередні дані з дорожніх карт постачальників свідчать про те, що в багатьох випадках малі стільники FR1 5G будуть являти собою радіостанції з інтерфейсом CPRI для підключення до віддаленого DU, що дозволить координувати і оптимізувати передачу даних FR1 в щільному шарі малих стільників. Дорожні карти продукту FR2 пропонують

комбінований модуль RU і DU з інтерфейсом F1, який буде підключатися до віддаленого CU. Ці різні підходи вплинуть на вибір рішень для підключення, які можуть підтримувати два різних частотних діапазони. 3GPP нещодавно розгорнула пробну систему 5G на базі малих стільників з архітектурою C-RAN; вона працює в режимі EN-DC, всі радіоблоки, LTE і NR, підключені за допомогою інтерфейсів CPRI і налаштовані для роботи в режимі 4T4R. eCPRI для таких радіоблоків починає з'являтися в дорожніх картах і почне поставлятися в масовому порядку, оскільки малі стільники на базі O-RAN розгортаються з eCPRI/відкритим фронтальним зв'язком в стандартній комплектації.

Топологія малих стільників є ключовим фактором при виборі рішень для передачі даних для розгортання малих стільників. Варіанти включають виділення малих стільників з існуючого макростільника, підключення безпосередньо до оптоволоконної мережі, а також гібридні оптоволоконні і бездротові топології, в яких малі стільники виділяються з інших малих стільників, що не відрізняється від топології транзитних магістралей для макростільників, які були розглянуті раніше.

2.7 Висновки до розділу 2

Рішення для магістральної, проміжної і магістральної передачі, які були розглянуті в контексті зв'язку макростільникового зв'язку, застосовні і до малих стільників, хоча можуть знадобитися різні форм-фактори. Цільова ціна рішення для малих сот є набагато складнішою з огляду на обмежену площу покриття; важливо мінімізувати витрати, одночасно максимізуючи спектральну ефективність і, отже, пропускну здатність, що часто є основним чинником для розгортання малих сот. Радіосистеми, що працюють в діапазоні D, є цікавою інновацією, яка допоможе управляти витратами на розгортання малих стільникових мереж, так само як і розробки 3GPP щодо інтегрованого доступу і транзитного зв'язку (IAB) можуть запропонувати можливості для більш дешевого ущільнення мережі, особливо в FR2.

3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ 5G

3.1 Сегментування транспортної мережі

Розподілення транспортної мережі дозволяє операторам мережі більш гнучко керувати та оптимізувати використання ресурсів залежно від конкретних вимог конкретних послуг чи сценаріїв використання. Разом з тим, розподіл мережі на сегменти - це одна з нових функцій 5G, яка вимагає автономного режиму (SA), щоб дозволити користувачеві вибрати певний фрагмент. Слайсинг - це комплексне рішення, що охоплює повітряний інтерфейс, користувацьке обладнання (UE), радіомережу 5G, опорну мережу 5G і транспорт.

Зріз позначається за допомогою типів зрізів/послуг (SST), визначених у стандарті 3GPP 23.501 [1].

SST - це 8-бітне поле, що включає специфічний для оператора діапазон значень від 128 до 255.

Slice Differentiator (SD), 24-бітне поле, відокремлює різні екземпляри зрізу одного і того ж типу зрізу. Комбінація типу зрізу/послуги та диференціатора зрізу називається S-NSSAI (Single-Network Slice Selection Assistance Information - інформація про вибір зрізу в одній мережі; див. рисунок 3.1).

S-NSSAI надається в сигналізації налаштування контексту UE, і цей контекст UE (носій) потім стає специфічним для зрізу, і навпаки, потоки трафіку в різних зрізах використовують різні носії.

Один UE може мати потоки трафіку на різних носіях, що належать до різних сегментів.

Частина системи 5G RAN знає про цей зріз і може використовувати інформацію про зріз для диференційованого підходу в радіоплануванні, конфігураціях повітряного інтерфейсу L1/L2, контролі доступу та інших функціях. Ці теми є специфічними для реалізації в рамках 5G RAN.

S-NSSAI (Single-Network Slice Selection Assistance Information) визначає комбінацію параметрів, яка ідентифікує конкретний зріз мережі та надає

інформацію про вибір цього зрізу для конкретного UE (user equipment). Дозволяє налаштувати мережу для різних послуг та забезпечує диференційоване обслуговування для різних зрізів. S-NSSAI визначається на рівні контексту UE та стає частиною сигналізації налаштування контексту UE. Коли UE підключається до мережі, S-NSSAI передається для ідентифікації та налаштування контексту.

Транспортний рівень може отримувати інформацію про S-NSSAI через відповідні сигналізаційні механізми. Однак S-NSSAI, як такий, не є безпосередньо видимим для транспортних рівнів мережі. Щоб транспортна мережа забезпечувала диференційовану обробку трафіку для конкретного зрізу, інформація про S-NSSAI повинна бути передана на транспортному рівні.

Така інформація про зріз може бути передана через механізми маршрутизації та керування трафіком на транспортному рівні, щоб забезпечити відповідність конфігурацій та параметрів QoS (Quality of Service) для конкретного зрізу. Це важливо для забезпечення оптимального використання ресурсів та відповідного рівня обслуговування для кожного типу послуги або зрізу.

Зрізи грають важливу роль у впровадженні 5G, забезпечуючи гнучкість та диференціацію обслуговування для різних типів послуг та користувачів.

Приклад сигналізації F1-AP наведено на рисунку 3.2, де показано, що S-NSSAI передається в повідомленні налаштування контексту UE між gNB-CU і gNB-DU. S-NSSAI аналогічним чином передається і в NG-AP, тому він доступний для вузлів RAN на етапі налаштування сеансу Protocol Data Unit (PDU).

Таблиця 3.1 - Типи зрізів/послуг

Slice/service type	Description	Value
eMBB	Enhanced mobile broadband	1
URLLC	Ultra-reliable low-latency communications	2
MioT	Massive Internet of Things (IoT)	3
V2X	Vehicle to everything	4
HMTC	High-performance machine-type communications	5

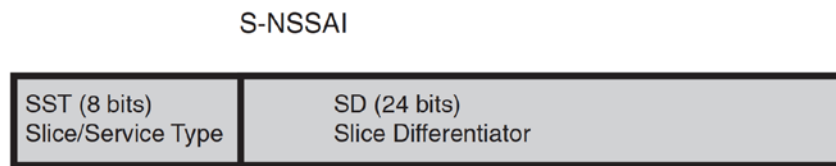


Рисунок 3.1 - S-NSSAI

Алгоритм сеансу нарізки мережі (Network Slicing) в 5G включає кілька етапів, які дозволяють мережі гнучко налаштувати ресурси та конфігурації для обслуговування конкретного типу трафіку або певного зрізу (slice). Основні етапи алгоритму можуть виглядати приблизно так.

Оператор мережі аналізує потреби користувачів та визначає типи послуг, які слід підтримувати, а також параметри, такі як швидкість передачі даних, затримка і інші QoS-параметри. На основі ідентифікованих вимог трафіку оператор мережі визначає різні зрізи. Кожен зріз представляє собою віртуальну мережу, оптимізовану для конкретного типу послуги чи застосування. Для кожного зрізу визначаються параметри, такі як пропускна здатність, затримка, резервування ресурсів, асоційовані мережеві функції та інші. Ці параметри визначають, як ресурси мережі будуть виділені для конкретного зрізу. Мережеві ресурси (частоти, бандова ширина, обчислювальна потужність і т. д.) розподіляються між різними зрізами відповідно до визначених параметрів. Може бути використана динамічна адаптація ресурсів залежно від змін потреб в мережі. Відповідне обладнання та мережеві функції конфігуруються для підтримки визначених параметрів та обслуговування конкретного типу трафіку. Система постійно моніторить ефективність роботи зрізів, аналізує трафік та ресурси, і, при необхідності, оптимізує конфігурації для досягнення найкращої продуктивності та задоволення вимог користувачів. Цей алгоритм дозволяє мережі гнучко реагувати на різні потреби користувачів та обслуговувати різні типи послуг з оптимальним використанням ресурсів.

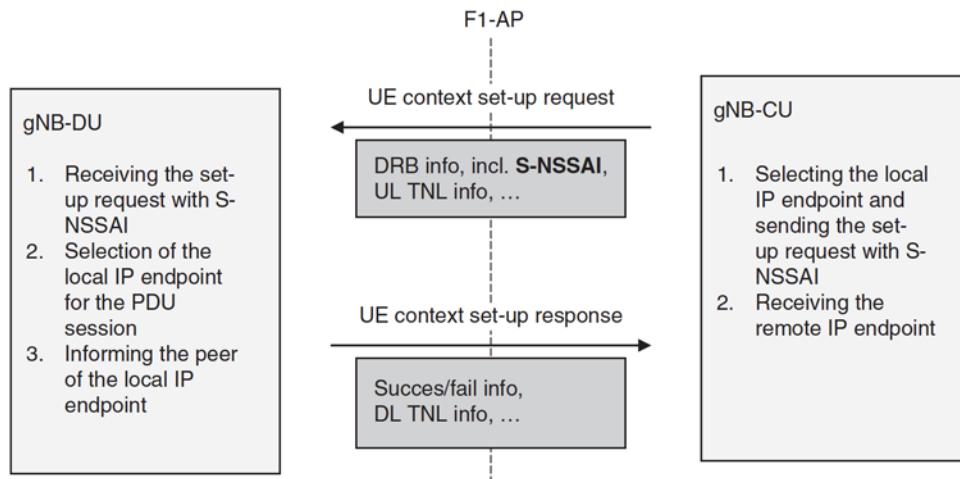


Рисунок 3.2 - Алгоритм сегментування мережі

Цей алгоритм дозволяє мережі гнучко реагувати на різні потреби користувачів та обслуговувати різні типи послуг з оптимальним використанням ресурсів.

У спрощеному прикладі сигналізації F1 на рисунку 3.2 gNB-CU запитує контекст UE, який потрібно налаштувати для певного фрагмента від gNB-DU. Повідомлення запиту на налаштування включають, серед іншого, список DRB (радіопередавачів даних), які потрібно налаштувати, S-NSSAI, а також інформацію про локальну IP-кінцеву точку, яку gNB-DU повинен використовувати у напрямку висхідної лінії. Сигналізація F1-AP визначена в TS 38.473 [25].

У відповідь gNB-DU повідомляє про успіх або невдачу в налаштуванні DRB, а також вказує локальну кінцеву IP-адресу, яку gNB-CU повинен використовувати для потоку даних у напрямку низхідної лінії зв'язку. За допомогою IP-кінцевої точки, що відповідає певному зрізу, сеанс PDU, який передається за допомогою IP-пакетів у транспортній мережі, може бути логічно відокремлений від IP-пакетів, що належать іншим зрізам (або не належать до жодного зрізу), оскільки мережеві пристрої (за умови відповідної конфігурації) асоціюють певну IP-адресу або підмережу з певним зрізом. Такий самий тип конфігурації потрібен і в елементі мобільної мережі. Кінцеві IP-термінали, що

відповідають певним сегментам, слугують, наприклад, як ланцюги підключення до служб зв'язку. Ці послуги можуть бути віртуальними приватними мережами IP (VPN), як у прикладі на рисунку 3.3, але це може бути і щось інше. Зрештою, спосіб позначення інформації про зріз на транспортному рівні залежить від конкретної реалізації. Можуть бути використані й інші методи.

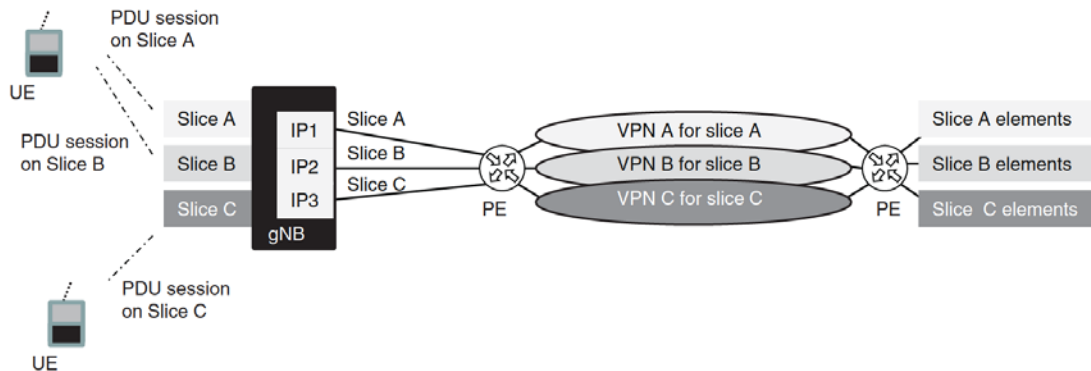


Рисунок 3.3 – Схема сегментування транспортної мережі

Наприклад, налаштування може завершитися невдачею, якщо для сеансу PDU, специфічного для зрізу, немає доступних ресурсів, як це вимагається. Тому можуть знадобитися подальші кроки, такі як контроль доступу та перевірка ресурсів, перш ніж буде надіслано повідомлення про позитивну відповідь. Збій у розподілі ресурсів може бути вказаний як причина збою у повідомленні-відповіді від розподіленого модуля (DU) до центрального модуля (CU).

UE у верхньому лівому куті на рисунку 3.3 має два сеанси PDU, один у фрагменті A, а інший у фрагменті B. Інший UE має один сеанс PDU, що належить до фрагмента C. Для фрагментів A, B і C надаються різні VPN за допомогою послуг IP MPLS VPN, де різні IP-кінцеві точки gNB слугують як ланцюги приєднання. Також можуть використовуватися віртуальні локальні мережі (VLAN). Зв'язок тепер обмежений таким чином, що клієнти (сеанси PDU різних сегментів) в різних IP VPN не досягають один одного, так що сегменти логічно ізольовані.

Крім того, gNB потребує підключення для загальних функцій, таких як площа керування gNB і керування мережею, а також для потоків даних користувачів, що не залежать від сегментів.

Використання IP VPN - це лише одна з можливих реалізацій для логічно розділених мереж з окремим підключенням. Альтернатив багато: Служби Ethernet, такі як E-Line, E-Tree або E-LAN, можуть бути корисними. Для більш жорсткого розділення транспортних ресурсів можна виділити окремий фізичний канал або, наприклад, виділену довжину хвилі у випадку оптоволоконного середовища. Підхід з використанням спільних або виділених фізичних каналів включений у визначення MEF 84 [28].

Якщо фрагмент вимагає гарантованої пропускної здатності, повинні бути відповідні конфігурації QoS і резервування GBR (гарантованої швидкості передачі даних). В IP MPLS VPN шлях з резервуванням пропускної здатності підтримується службами MPLS TE (Traffic Engineering), де ресурси резервуються для кожного з вузлів на шляху. Сегментна маршрутизація також може передбачати обмежені послуги інженерії трафіку.

У випадку виділених фізичних каналів для gNB знадобиться додатковий фізичний канал, що в багатьох випадках є економічно недоцільним, особливо для майданчиків і ринків, де доступність оптоволоконна обмежена. В якості іншого каналу, на додаток до оптоволоконна, можна використовувати бездротовий транспорт, наприклад, мікрохвильовий зв'язок або IAB (Integrated Access and Backhaul - інтегрований доступ і транзитний зв'язок). Тим не менш, виділені транспортні канали для сегментів означають втрату економічних переваг спільного використання ресурсів транспортної мережі.

QoS - це лише один з можливих диференціюючих факторів при розбитті транспортної мережі на сегменти. Безпека є обов'язковою для всіх логічних інтерфейсів, але можуть існувати відмінності в криптографічних алгоритмах, типах послуг, що надаються, обсязі захисту на різних рівнях транспортної мережі або використанні певних, виділених вузлів.

Хоча на рівні системи 5G може бути багато сегментів, не всі вони обов'язково потребують окремих транспортних ресурсів, не як окремі транспортні послуги або окремі фізичні лінії зв'язку, і всі ці сегменти можуть бути прив'язані до загального екземпляру транспортної послуги. На додаток до цього єдиного транспортного сервісу для декількох шарів, окремі транспортні сервіси можуть бути надані для тих шарів, які потребують локальної обробки (локальна функція користувачької площини - UPF і сервер), гарантованої пропускної здатності або інших специфічних характеристик. Це спрощує проектування порівняно з випадком, коли кожен зріз мережі обслуговувався б окремою транспортною мережевою службою, оскільки зменшується кількість окремих транспортних служб, якими потрібно керувати.

Операційне навантаження зростає зі збільшенням кількості необхідних окремих транспортних послуг. Як показано на рис. 3.3, при логічному поділі, коли фрагмент транспорту доступу до gNB розділений за допомогою IP-адрес і/або підмереж/ВЛОМ, кожен фрагмент збільшує кількість IP-адрес, необхідних для gNB, що може бути проблемою, принаймні, для IPv4; але навіть якщо можна виділити багато IP-адрес, це все одно призводить до додаткових операційних зусиль. Крім того, послуга транспортного з'єднання для зрізу також повинна бути надана на стороні транспортної мережі, незалежно від того, чи є ця послуга IP VPN, Ethernet або трафік оптичного рівня. Крім того, може знадобитися налаштування певних функцій QoS. Все це на практиці може накласти верхню межу на кількість сегментів, які можуть розумно підтримуватися в транспортній мережі, хоча, наприклад, IP VPN дуже добре масштабується як з точки зору додавання нових клієнтів, так і з точки зору додавання нових сайтів для існуючих клієнтів.

Оскільки нарізка побудована на наскрізній концепції, адміністративні кордони можуть бути легко перетнуті на транспортному шляху від точки доступу до ядра. Ефективні інструменти управління, які працюють на декількох доменах, є важливими для управління цим типом мережі.

3.2 Оптимізація трафіку та підвищення ефективності мережі

Інтегрований доступ і транзитний зв'язок - це підхід до організації мережі зв'язку, який комбінує різні технології та послуги для надання широкого спектру зв'язку користувачам. Розглянемо кожен з цих термінів докладніше.

Інтегрований доступ (Integrated Access) означає, що користувач має можливість отримати доступ до мережі зв'язку через різні технології і канали. Наприклад, це може бути поєднання мобільного зв'язку, широкосмугового інтернету, фіксованого лінійного зв'язку та інших доступових технологій. Такий підхід дозволяє користувачеві використовувати доступ, який найкраще відповідає його потребам і можливостям в конкретний момент часу.

Транзитний зв'язок (Transit Network) - це мережева інфраструктура, яка надає транспорт для передачі даних від користувача до кінцевого пункту призначення, який може бути в іншій частині мережі або в Інтернеті. Транзитний зв'язок використовується для забезпечення коннективності між різними мережами, областями або операторами.

Комбінування цих підходів в інтегрований доступ і транзитний зв'язок означає, що користувач може використовувати різні типи доступу в залежності від своїх потреб, і транзитний зв'язок гарантує, що дані користувача можуть бути передані від одного пункту до іншого через різні мережі. Такий підхід може бути особливо ефективним для створення гнучких та ефективних мережевих рішень, оскільки він дозволяє використовувати різні технології та ресурси відповідно до потреб користувача і умов мережі.

Побудова нових мереж 5G, особливо в нових високочастотних діапазонах mmWave, вимагає набагато більш щільного розташування стільників, ніж в більш низькочастотних діапазонах, характерних для мереж 4G, оскільки загасання радіосигналу набагато вище на високих частотах. Крім того, розгортання мереж mmWave, як правило, вимагає поширення майже в межах прямої видимості (LOS), оскільки високі частоти не проникають крізь будівлі та інші перешкоди. Тому для початкового розгортання 5G mmWave знадобляться

нові оптоволоконні або бездротові транспортні рішення для забезпечення необхідних менших відстаней між об'єктами. У цьому випадку бездротова передача даних через IAB може забезпечити швидший і економічно ефективніший спосіб для (початкового) розгортання 5G.

Бездротова транзитна мережа за допомогою IAB-вузлів може використовуватися в основному для розширення покриття, щоб зменшити розрідженість волокон, усунути ізольовані прогалини в покритті (наприклад, за будівлями або деревами) і перекинути покриття з вулиці в приміщення (наприклад, настінні або віконні IAB-вузли для стаціонарного розгортання бездротової мережі).

Через вимоги до втрат при поширенні мм-хвиль типова міська мережа вимагає підключення оптоволокна майже на кожному розі вулиці, а через більш високе загасання мм-хвиль навіть для покриття однієї вулиці, як правило, потрібна базова станція майже на кожному ліхтарному стовпі. Як правило, оператори не мають оптоволокна, доступного скрізь, і бездротовий зв'язок з ОВС може значно покращити покриття мережі mmWave.

Збільшення щільності базових станцій також може підвищити пропускну здатність мережі радіодоступу, особливо за рахунок забезпечення кращої якості зв'язку і, відповідно, збільшення швидкості передачі даних.

Таким чином, IAB-вузли також можуть підвищити пропускну здатність мережі радіодоступу, але коли внутрішньосмугова ретрансляція використовується для транзиту, підвищення пропускну здатності, як правило, обмежене, оскільки ті ж самі дані повинні передаватися на додаток до каналу доступу по транзитному каналу або каналам у випадку багатохопового доступу.

У 10-й версії 3GPP робота ретрансляторів була визначена для LTE-Advanced, але ретранслятори LTE не були широко розгорнуті. Ретранслятори LTE були ретрансляторами L3, де ретрансляційний вузол реалізовував повний стек радіопротоколів 3GPP і підтримувався лише один ретрансляційний стрибок. IAB використовує ретрансляцію L2, де для зворотного зв'язку використовуються

лише нижні рівні (PHY, MAC, RLC) стеку радіопротоколів. Крім того, IAB підтримує багатохопову ретрансляцію.

IAB визначено в 3GPP Release 16; Етап 2 описано в 3GPP TS 38.300 та 3GPP TS38.401 [24, 25].

IAB підтримує бездротову ретрансляцію для 5G. Вузол ретрансляції називається IAB-вузлом і забезпечує як доступ, так і транзит за допомогою радіодоступу NR (див. рисунок 3.4). Мережевий вузол, який завершує бездротову передачу даних на стороні мережі, називається IAB-донорським gNB.

IAB-донорський gNB - це gNB з додатковою функціональністю для підтримки IAB. Бездротова передача даних IAB підтримує як одиночні, так і багаторазові переходи.

Архітектура IAB (Integrated Access and Backhaul) в мережах 5G включає в себе інтегрований доступ і транспорт, що дозволяє одночасно використовувати одну і ту ж радіочастоту для забезпечення доступу і зв'язку між базовими станціями.

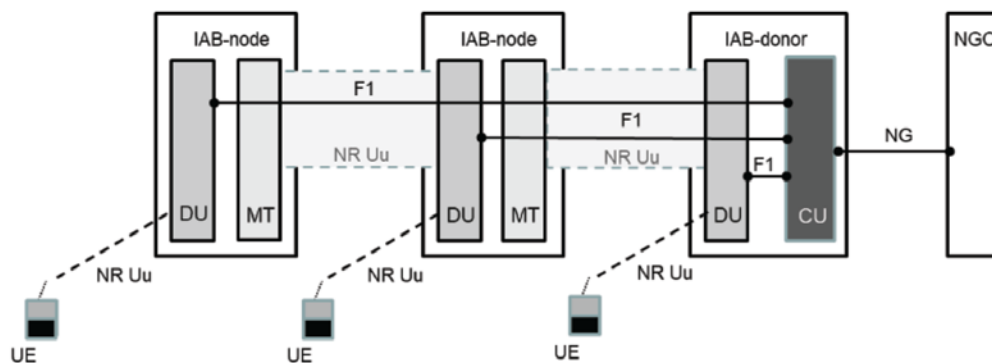


Рисунок 3.4 - Архітектура та функціональний розподіл IAB

Функціональний розподіл в IAB дозволяє оптимізувати використання радіочастотного ресурсу та покращує ефективність зв'язку в мережі 5G. Ця архітектура дозволяє ефективно обслуговувати як індивідуальних користувачів, так і забезпечує високоякісний зв'язок між базовими станціями.

Архітектура IAB використовує переваги розділеної архітектури gNB з CU в IAB-донорі та DU у IAB-вузлі. Для IAB-вузла інтерфейс F1, визначений між gNB-CU і gNB-DU, розширюється через бездротову магістраль, що з'єднує DU в IAB-вузлі (IAB-DU) і CU в IAB-донорі (IAB-donor-CU). Основний мережевий інтерфейс (NG-інтерфейс) закінчується на IAB-донорі - CU. Таким чином, IAB-вузол є вузлом мережі радіодоступу з обмеженою видимістю для основної мережі.

IAB-DU діє як будь-який gNB-DU, що закінчує інтерфейс доступу NR до UE. Крім того, IAB-DU завершує транзитне з'єднання з наступними IAB-вузлами.

Вузол IAB також підтримує функціональність UE, яка називається IAB-MT (Mobile Termination) у специфікаціях RAN (38.xxx) або IAB-UE у специфікації SA 3GPP TS 23.501 [1]. IAB-MT має суперпорти, наприклад, фізичного рівня, рівня 2, RRC (Radio Resource Control) і NAS (Non-Access Stratum), і IAB-MT з'єднує IAB-вузол з IAB-DU іншого IAB-вузла (мультихоп) або з IAB-донором. Крім того, IAB-MT з'єднується з рівнем RRC в IAB-донорському CU і рівнем NAS у функції управління доступом і мобільністю (AMF).

IAB-вузли, які підключені до IAB-донора за допомогою одного або декількох стрибків, утворюють або топологію основного дерева (IAB Mobile Termination (IAB-MT) підключений до одного батьківського вузла), або топологію спрямованого ациклічного графа (Directed Acyclic Graph (DAG)) (IAB-MT можуть бути подвійно підключені до двох батьківських вузлів), див. рисунок 3.5. У специфікаціях 3GPP Release 16, IAB-MT може бути як одинарним, так і подвійним (тобто більше двох батьківських вузлів для даного IAB-вузла не підтримується).

IAB підтримує ретрансляцію як для розгортання SA (тобто тільки NR), так і для не-SA (NSA, тобто подвійне підключення LTE і NR), див. рисунок 3.6. У випадку SA, як UE доступу, так і IAB-MT використовують тільки NR, і обидва підключаються до ядра 5G. Для NSA є два варіанти, які підтримуються у версії 16: • UE доступу є UE NSA і підключаються до EPC (Evolved Packet Core), тоді

як IAB-МТ використовують лише NR (SA) і підключаються до NGC (Next Generation Core). Як пристрої доступу, так і IAB-МТ підтримують NSA, і обидва підключені до EPC.

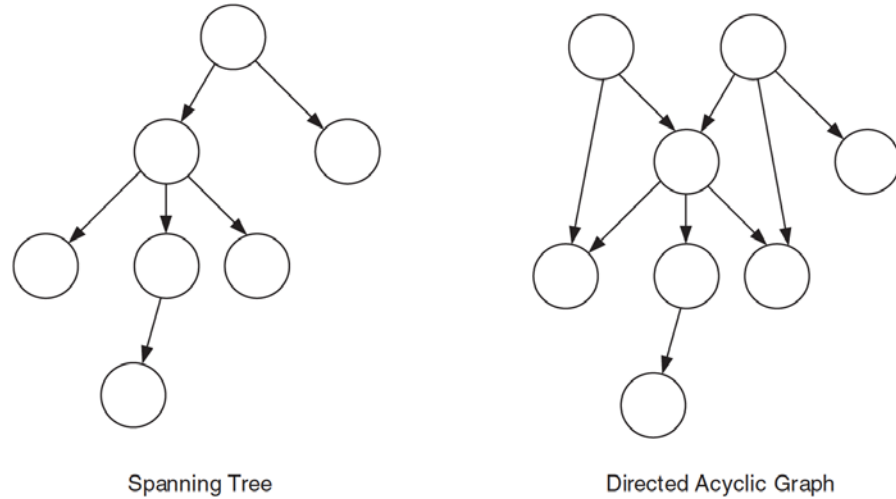


Рисунок 3.5 - Топології IAB, що підтримуються в 3GPP Release 16

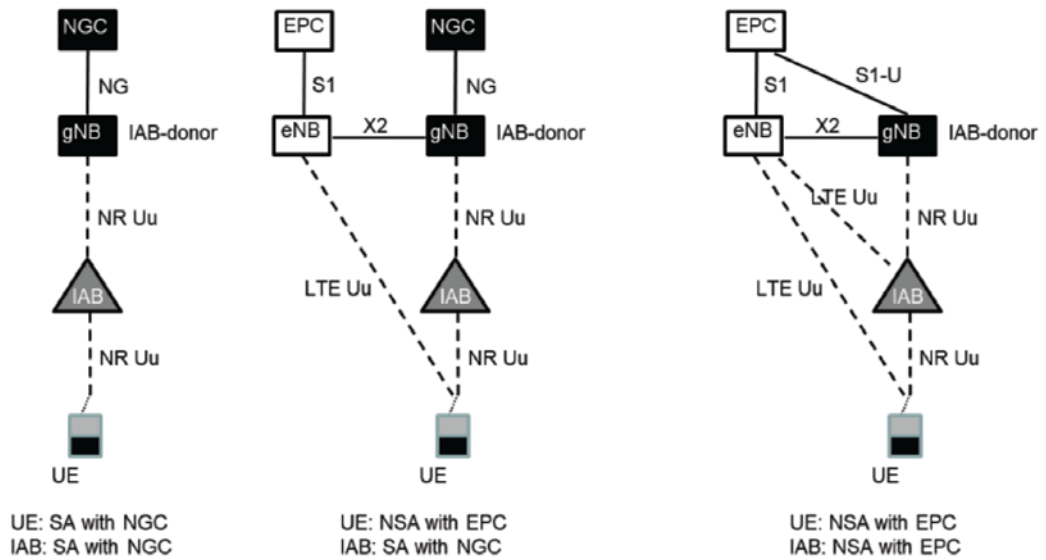


Рисунок 3.6 - Розгортання оптимізованої мережі та подвійне підключення LTE/NR

Специфікація Release 16 підтримує лише стаціонарні IAB-вузли (тобто передбачається, що вони встановлені на фіксованому майданчику і IAB-вузли не

переміщуються). Через блокування mmWave транзитне з'єднання може іноді погіршуватися, і тому IAB версії 16 підтримує адаптацію топології, коли транзитне з'єднання IAB-вузла може бути переключено з батьківського на інший батьківський вузол. Підтримка мобільних IAB-вузлів планується у випуску 18 та наступних версіях.

Підтримується як внутрішньосмуговий (доступ і транзит на одній частоті), так і позасмуговий (транзит на іншій частоті) транзит. З точки зору специфікації, IAB можна використовувати як на FR1 (<6 ГГц), так і на FR2 (mmWave), але на практиці IAB найкраще підходить для FR2, як обговорювалося в попередньому розділі.

IAB підтримує ретрансляцію NR для доступу до NR лише у версії 16. Ретрансляція NR для доступу до LTE буде розглянута в наступних версіях. Існують деякі проблеми з безпекою, які потребують вирішення.

Стек протоколів користувачького рівня для IAB показано на рисунку 3.7.

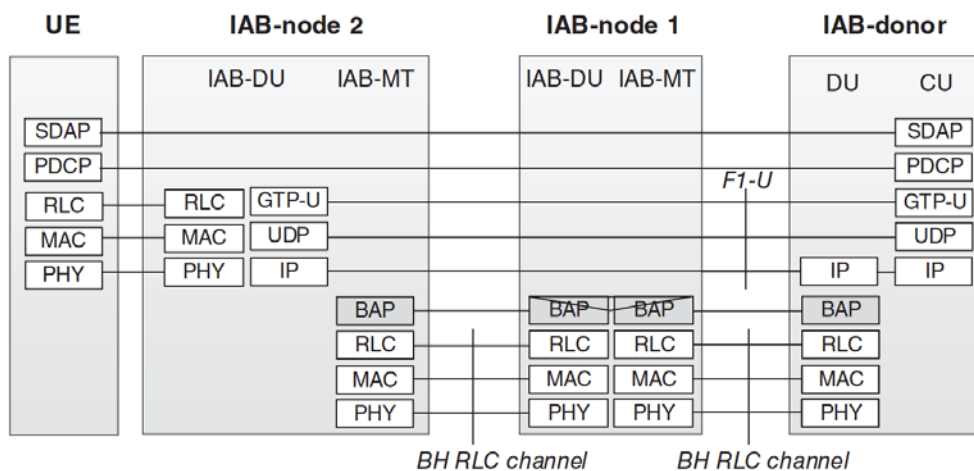


Рисунок 3.7 - Стеки протоколів користувачького рівня для UE, IAB-вузлів та IAB-донора

Стеки протоколів в площині керування (Control Plane) для UE (кінцевий обладнання), IAB-вузлів (вузли внутрішньообластного доступу) та IAB-донора (вузли зовнішньообластного доступу) в мережі 5G включають ряд протоколів

для забезпечення керування та сигналізації в мережі. Давайте розглянемо загальні аспекти стеків протоколів для цих сутностей: Зазвичай протоколи керування та сигналізації включають RRC для радіокерування, а також протоколи, пов'язані з внутрішньообластним та зовнішньообластним доступом для управління трафіком і ресурсами. Тунелювання може використовувати різні протоколи, такі як GTP (GPRS Tunnelling Protocol) або N3 для забезпечення комунікації між різними сутностями. Вказані протоколи і їхні версії можуть змінюватися відповідно до конкретної реалізації 5G мережі та її властивостей.

На ньому показано ретрансляцію L2, де для транзиту використовуються рівні NR PHY, MAC і RLC, а також новий рівень адаптації, який називається Backhaul Adaptation Protocol (BAP). F1-U між IAB-DU та IAB-донорським CU передається через IP (тобто F1-U до IAB-DU, з точки зору стека протоколів, розглядається як стандартний інтерфейс F1-U до будь-якого gNB-DU, визначеного в 3GPP TS38.470). Повний стек F1-U (GTP-U/UDP/IP) розміщується поверх рівня BAP на бездротовому транзиті.

BAP забезпечує маршрутизацію транзитного зв'язку через декілька вузлів у дереві IAB. IP завершується у вузлі доступу IAB так само, як IP завершується у звичайному gNB-DU.

BAP PDU переносяться транзитними (BH) RLC-каналами. Для кожного каналу BH можна налаштувати декілька каналів BH RLC, щоб забезпечити пріоритетизацію трафіку та контроль якості обслуговування. Канал BH RLC налаштовується окремо для кожного переходу (тобто канал BH RLC - це канал з одним переходом і, таким чином, ARQ для кожного переходу підтримується RLC). Носії UE закінчуються в IAB-донорській БС (тобто SDAP - протокол адаптації службових даних і PDCP - протокол конвергенції пакетних даних знаходяться між UE доступу і IAB-донорською БС).

IAB-донор-блок зіставляє отримані пакети GTP-U/UDP/IP з каналами BH RLC і різними маршрутами BH на основі IP-адреси призначення, DSCP і мітки потоку IPv6.

Стеки протоколів площини керування для IAB показані на рисунку 3.8. Як і на рівні користувача, повний стек F1-C (F1AP/SCTP/IP) передається на рівні BAP через бездротові транзитні канали.

Трафік керуючого рівня може передаватися по виділеному каналу BH RLC або мультиплексуватися разом з трафіком користувацького рівня.

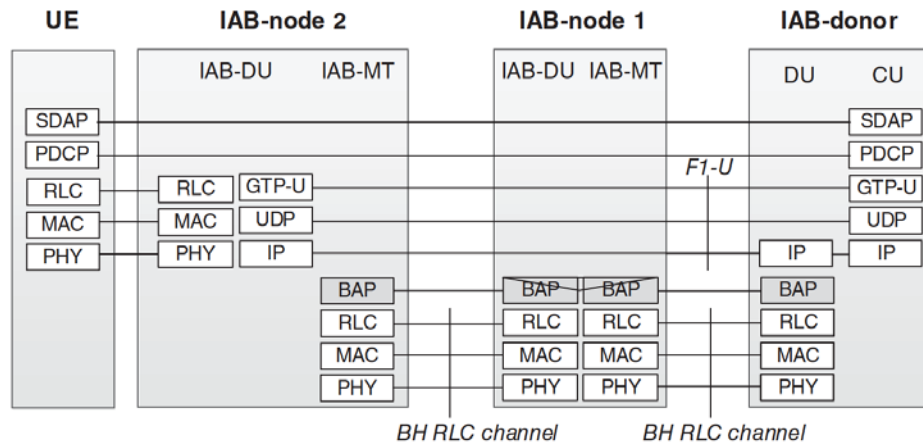


Рисунок 3.8 - Стеки протоколів площини керування для UE, IAB-вузлів та IAB-донора

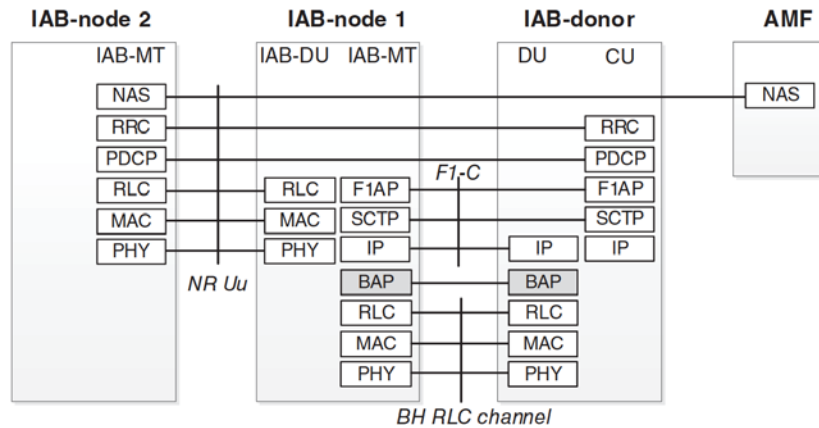


Рисунок 3.9 - Стеки протоколів площини керування для підтримки IAB-MT SRB (для RRC та NAS)

Як F1-U, так і F1-C захищені за допомогою Network Domain Security (NDS) (наприклад, через IPsec), як зазначено в TS 33.501 [26]. Рівень безпеки не

показаний в протоколах, зображених на рисунках 3.7 і 3.8. IP-рівень над ВАР також передає деякий не-F1 трафік, наприклад, сигналізацію для управління асоціаціями IPsec і SCTP (Stream Control Transmission Protocol - протокол управління передачею потоку).

IAB-MT спочатку підключається як UE, і тому він встановлює власні сигнальні радіоносії (SRB) для сигналізації RRC і NAS, а також радіоносії даних (DRB) (наприклад, для трафіку операцій, адміністрування та управління - OAM). Стек площини управління IAB-MT показаний на рисунку 3.9. Ці SRB і DRB транспортуються до батьківського вузла DU так само, як і звичайний трафік UE (тобто відсутній рівень ВАР на першому бездротовому переході). Батьківський вузол інкапсулює ці носії в F1-U і F1-C, щоб передати їх під час наступних транзитних переходів.

3.3 Оптимальне використання мережевих ресурсів у бездротовому каналі передачі даних для кінцевих користувачів

Оптимальне використання мережевих ресурсів у бездротовому каналі передачі даних для кінцевих користувачів є ключовою вимогою для забезпечення ефективності та високої якості обслуговування в бездротових мережах. Це важливо як для операторів мереж, так і для кінцевих користувачів. Розглянемо стратегії та механізми, які використовуються для досягнення оптимального використання ресурсів:

Мережеві ресурси, такі як ширококутовий канал і частотні ресурси, повинні бути ефективно розподілені між різними користувачами та послугами. Це включає в себе динамічне управління ресурсами для пристосування до змін у навантаженні та вимогах до якості обслуговування. Використання ефективних алгоритмів планування ресурсів, таких як пакетне планування (packet scheduling), дозволяє призначати ресурси відповідно до потреб та пріоритетів різних користувачів та послуг. Ефективне керування потоками дозволяє регулювати і адаптувати обсяги передачі даних в мережі в залежності від

актуальних умов. Це включає в себе контроль над швидкістю передачі даних та механізми збалансованого розподілу навантаження.

Впровадження передових технологій, таких як Multiple Input Multiple Output (MIMO), Beamforming, та інших технік збільшення ефективності передачі даних, може сприяти оптимальному використанню ресурсів. Системи повинні бути здатні адаптуватися до змін у бездротовому середовищі, таким як зміни в кількості підключених користувачів, каналний шум, та інші фактори, що можуть впливати на ефективність передачі даних.

Зберігання популярних або часто використовуваних ресурсів (кешування) та передача даних з пам'яті може зменшити необхідність в постійній передачі тих самих даних, поліпшуючи таким чином ефективність. Вказані стратегії спрямовані на те, щоб максимально використовувати наявні ресурси, забезпечуючи при цьому оптимальну якість обслуговування для кінцевих користувачів. Такий підхід особливо важливий у мережах нового покоління, де збільшується обсяг передачі даних та різноманіття послуг.

Як обговорювалося в попередньому розділі, як трафік користувача, так і трафік сигналізації між IAB-DU і IAB-донором-CU передається через інтерфейс F1. Повний стек F1 (GTP-U/UDP/IP для площини користувача і F1AP/SCTP/IP для площини управління) передається через бездротову магістраль. На додаток до трафіку F1, деякі інші IP-пакети (наприклад, SCTP) передаються по бездротовому транзиту.

IP-трафік до IAB-DU маршрутизується через бездротову магістраль за допомогою VAP. IP-пакети, які надсилаються з IAB-донорського вузла до IAB-вузла-DU, спочатку проходять IP-маршрутизацію до IAB-донорського вузла-DU, потім інкапсулюються в VAP PDU в IAB-донорському вузлі-DU; VAP PDU передаються по бездротовому транзиту за допомогою транзитних RLC-каналів і декапсулюються в IAB-вузлі. Аналогічно, IP-пакети з IAB-вузла-DU інкапсулюються в VAP PDU в IAB-вузлі, а VAP PDU декапсулюються в IAB-донор-DU; IP-пакети потім IP-маршрутизуються до IAB-донор-CU.

Керування потоком використовується для зменшення перевантажень у бездротовому магістральному каналі. Протокол користувачького рівня NR, визначений у TS 38.425 [27] і використовуваний через F1-U, включає наскрізне керування потоком між IAB-донором і вузлом IAB-доступу, що обслуговує UE доступу, а також наскрізний контроль потоку. Крім того, для DL визначено покрокове звітування про стан буфера на рівні BAP. У висхідному потоці звичайне звітування про стан буфера і гранти планування UL забезпечують необхідний контроль потоку.

Для того, щоб зменшити затримку висхідного каналу, IAB-вузол може надсилати випереджувальний звіт про стан буфера (BSR), в якому, окрім наявного обсягу даних, також повідомляється очікуваний обсяг даних від дочірніх IAB-вузлів та UE доступу.

3.4 Адаптування топології IAB-мережі із врахуванням вимог користувачів

Процедури сигналізації IAB (Integrated Access and Backhaul) включають в себе різні аспекти, такі як адаптація топології IAB, інтеграція вузлів, міграція вузлів, топологічна перебудова і встановлення каналу BH RLC (Backhaul Radio Link Control). Загалом, ці процедури забезпечують ефективне управління та оптимізацію мережі IAB. Деталі можуть змінюватися в залежності від конкретної реалізації стандартів.

Під час інтеграції нового вузла в мережу IAB відбувається сигналізаційний обмін для інформування інших вузлів про новий елемент мережі. Здійснюється конфігурація ресурсів для нового вузла, включаючи призначення частот, каналів і інших параметрів. Відбувається сигналізаційний обмін для сповіщення інших вузлів про намір міграції вузла IAB. Передача необхідних ідентифікаторів та ключів для забезпечення безпеки під час міграції. Зміна або переналаштування ресурсів для забезпечення підтримки міграції. Відбувається сигналізаційний обмін для повідомлення інших вузлів про зміни в топології мережі IAB. Налаштування ресурсів та параметрів для оптимізації нової топології.

Взаємодія між вузлами для визначення та встановлення каналу BH RLC для забезпечення зв'язку в бекхол-сегменті мережі. Конфігурація ресурсів і параметрів для оптимальної передачі даних у бекхол-сегменті. Вказані процедури зазвичай здійснюються з використанням сигналізаційних протоколів, таких як SCTP (Stream Control Transmission Protocol) або інших протоколів, які визначаються відповідними технічними специфікаціями. Також можуть використовуватися заходи безпеки, такі як IPsec, для забезпечення конфіденційності та цілісності сигналізаційних процедур. Детальні визначення і реалізація цих процедур можуть відрізнятися в залежності від конкретної реалізації мережі та відповідних стандартів.

Існує чотири основних етапи підключення нового IAB-вузла до IAB-донора або іншого IAB-вузла (мультихоп; див. рис. 3.10) [35].

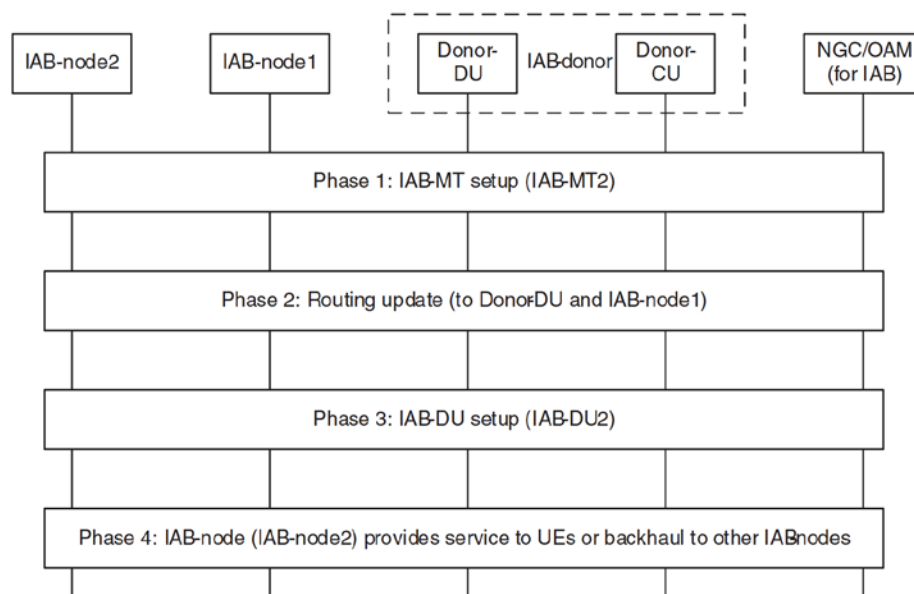


Рисунок 3.10 - Схема об'єднання та взаємодії мережних елементів у складі ефективної системи

1) IAB-MT підключається до мережі як звичайний UE і вказує мережі, що він є частиною IAB-вузла. Під час налаштування з'єднання IAB-MT налаштовуються SRB для сигналізації RRC і NAS, а також сеанс DRB і PDU для

ОАМ. Вводиться новий параметр SIB1, щоб повідомити IAB-МТ, які комірки підтримують IAB. Крім того, на цій фазі налаштовується принаймні один транзитний канал RLC.

2) IAB-донор-CU оновлює інформацію про маршрутизацію як вниз, так і вгору у всіх пов'язаних IAB-вузлах і IAB-донор-DU за допомогою сигналізації F1AP. Новоприєднаному IAB-вузлу надається VAP-адреса та IP-адреса за допомогою сигналізації RRC, таким чином створюючи IP-з'єднання з IAB-вузлом.

3) IAB-DU виконує процедуру налаштування F1AP. Перед початком сигналізації F1AP між IAB-вузлом і IAB-донорським CU налаштовується SCTP і, за бажанням, IPsec.

4) IAB-DU активується, і вузол IAB починає обслуговувати UE та інші вузли IAB.

Для встановлення каналу BH RLC між двома IAB-вузлами або між IAB-вузлом та IAB-донорським DU, IAB-донорський DU спочатку надсилає повідомлення F1AP UE Context Setup/Modification Request до батьківського вузла DU із зазначенням ідентифікатора каналу BH RLC та параметрів QoS. DU батьківського вузла налаштовує вказаний(і) канал(и) BH RLC, створює частину реконфігурації RRC нижнього рівня і надсилає її до IAB-донорського CU у повідомленні F1AP UE Context Setup/Modification Response. Потім ОББ-донор надсилає повідомлення RRC Reconfiguration до дочірнього вузла IAB-МТ, конфігуруючи канал BH RLC на стороні IAB-МТ. Вищеописана процедура повторюється для кожного стрибка, коли канал BH RLC потрібно встановити через декілька стрибків.

IAB-вузол може мігрувати з вихідного батьківського вузла до цільового батьківського вузла в межах одного і того ж IAB-донора, якщо, наприклад, транзитне з'єднання з вихідним батьківським вузлом погіршується або через балансування навантаження. Міграція вузла IAB складається з трьох основних етапів:

1) IAB-MT, що мігрує, виконує хендовер до цільового батьківського вузла. IAB-MT, можливо, надав результати вимірювань IAB-донорському вузлу за допомогою сигналізації RRC. Після цього IAB-донор може надіслати команду передачі як RRC-повідомлення на IAB-MT, який виконує процедуру передачі.

2) Оновлення маршрутизації: Після того, як IAB-MT підключився до нового батьківського DU (IAB-DU або IAB-донор-DU), IAB-донор-CU оновлює маршрутизацію у всіх пов'язаних вузлах за допомогою сигналізації F1AP. З'єднання F1 до мігруючого IAB-вузла DU перенаправляється на цей новий маршрут. Оскільки CU не змінюється, асоціації SCTP і IPsec не змінюються, і з'єднання F1 може продовжуватись.

3) IAB-DU продовжує обслуговувати UE. Оскільки CU не змінюється, IAB-DU не повинен змінювати свої ідентифікатори комірки (PCI або CGI). Таким чином, UE, підключені до IAB-DU, не знають про адаптацію топології. 3GPP Release 16 підтримує тільки внутрішню адаптацію топології. Адаптація топології між БС з частковою міграцією, коли тільки IAB-MT мігруючого вузла IAB підключається до цільової БС-донора IAB, а IAB-DU залишається підключеним до вихідної БС-донора IAB, буде визначена в 17-й версії. Адаптація топології між ЦК з повною міграцією вимагатиме звільнення з'єднання F1 та встановлення нового з'єднання F1 до IAB-DU, оскільки DU може бути підключений лише до одного ЦК-ЦП.

IAB-вузли можуть мати надлишкові маршрути до IAB-донорської БС. Структура подвійного підключення NR використовується для забезпечення резервування маршрутів у межах одного IAB-вузла-донора, і тому топологічне резервування підтримується лише в режимі SA. Потім IAB-MT конфігурується з каналами BH RLC на двох батьківських радіолініях. Існує три основні етапи налаштування топологічного резервування:

1) IAB-MT, підключений до батьківського вузла (головний вузол), виконує вимірювання і передає їх до IAB-донорської БС за допомогою сигналізації RRC. Після отримання результатів вимірювань від IAB-MT, IAB-донор може вирішити додати вторинну гілку для IAB-MT і зв'язатися з вторинним

батьківським вузлом, щоб підготуватися до подвійного з'єднання. Після цього IAB-донорська БС надсилає RRC-повідомлення до IAB-МТ для встановлення вторинного з'єднання.

2) Маршрутизація BAP і відображення каналів BH RLC для пов'язаних вузлів уздовж доданого вторинного шляху налаштовуються за допомогою сигналізації F1AP.

3) Додаються нові TNL-адреси до асоціацій F1-C між IAB-вузлом і DU з подвійним підключенням, якщо вторинна гілка використовує різні IAB-донор-DU.

Після налаштування подвійного з'єднання деякі носії UE, підключені до вузла IAB, можуть почати використовувати вторинний шлях, і, таким чином, подвійне з'єднання може використовуватися для балансування навантаження.

3.5 Алгоритм адаптації транзитного трафіку та забезпечення якості обслуговування

Для IAB додатковий рівень протоколу L2, який називається Backhaul Adaptation Protocol (BAP), вводиться в бездротові транзитні лінії зв'язку поверх рівня RLC. Він підтримує маршрутизацію в топології IAB, а також відображення трафіку на канали BH RLC, таким чином забезпечуючи пріоритезацію трафіку і QoS. Більш детальну інформацію можна знайти в документі 3GPP TS 38.340.

Для маршрутизації в топології IAB кожен заголовок BAP PDU містить BAP Routing ID, який складається з 10-бітової BAP-адреси вузла призначення та 10-бітового ідентифікатора шляху.

На основі BAP-адреси кожен вузол може перевірити, чи повинен цей BAP PDU бути доставлений на верхні рівні цього вузла або перенаправлений на наступний вузол переходу. BAP-адреса IAB-вузла налаштовується IAB-донором за допомогою сигналізації RRC, коли новий IAB-вузол підключається до топології IAB.

Ідентифікатор шляху використовується для розрізнення декількох маршрутів, що ведуть до одного вузла призначення, див. рисунок 3.11. Різні шляхи можуть використовуватися для централізованого балансування навантаження шляхом зіставлення носіїв UE з різними шляхами. Зіставлення носія UE з ідентифікатором шляху налаштовується IAB-донорським CU за допомогою сигналізації F1AP і виконується IAB-донорським DU для низхідної лінії зв'язку і IAB-вузлом для висхідної лінії зв'язку. Будь-яке локальне балансування навантаження не підтримується у випуску 16.

Конфігурація маршрутизації надається IAB-вузлам та IAB-донор-DU через сигналізацію F1AP. Ця конфігурація визначає відповідність між ідентифікатором маршрутизації BAP (BAP-адресою та ідентифікатором шляху), що міститься в заголовку BAP PDU, та BAP-адресою наступного вузла переходу. Конфігурація маршрутизації вузла може містити декілька записів з однаковою BAP-адресою призначення, але різними ідентифікаторами шляху. У даному вузлі ці записи можуть вказувати на однакові або різні вихідні ВН-канали.

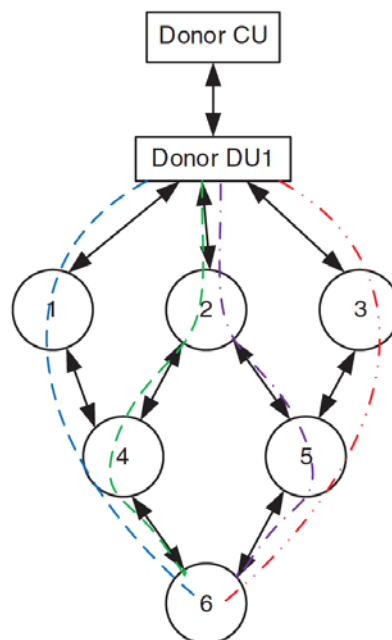


Рисунок 3.11 - Балансування навантаження у мережі для оптимального використання ресурсів і поліпшення продуктивності

Проміжні IAB-вузли можуть перенаправляти BAP PDU на інший шлях, що веде до тієї ж BAP-адреси призначення, якщо на каналі, зазначеному ідентифікатором шляху в заголовку BAP, виникла RLF (Radio Link Failure - відмова радіозв'язку). У висхідному потоці кожен вузол IAB може бути одночасно підключений до двох батьківських вузлів, використовуючи подвійне з'єднання NR між IAB-MT і DU батьківського вузла.

У вузлі доступу IAB-вузла IAB-донора, за допомогою сигналізації F1AP, налаштовує відображення між транзитним RLC-каналом і висхідним трафіком F1 і не-F1, що походить з вузла IAB. Відображення налаштовується окремо для кожного тунелю F1-U GTP-U (TEID), повідомлень F1AP, не пов'язаних з UE, повідомлень F1AP, пов'язаних з UE, кожного UE і пакетів, що не є F1. Кілька носіїв UE можна зіставити з одним каналом BH RLC (зіставлення N:1) або налаштувати окремий канал BH RLC для кожного носія UE (зіставлення 1:1). Останній варіант зазвичай використовується для носіїв GBR.

Аналогічно для IAB-донора-DU, відображення між полями IP-заголовка (IP-адреса, DSCP та/або мітка потоку IPv6) та ідентифікатором каналу BH RLC налаштовуються для низхідного трафіку IAB-донором-CU за допомогою сигналізації F1AP.

У проміжних IAB-вузлах відображення трафіку з вхідного каналу BH RLC на вихідний канал BH RLC налаштовується IAB-донором за допомогою сигналізації F1AP. Відображення включає також BAP-адреси попереднього та наступного вузлів.

3.6 Забезпечення стійкості та надійності передачі даних із врахуванням архітектури мережі та вимог до якості обслуговування

При виникненні RLF у транзитному каналі IAB застосовуються ті ж механізми і процедури, що і для каналу доступу. IAB-MT контролює якість каналу транзитної лінії, і якщо виявлено RLF, IAB-MT ініціює відновлення, використовуючи процедуру відновлення RRC.

Якщо процедура відновлення RRC для відновлення каналу ВН не вдається, IAB-вузол може передати повідомлення про RLF своїм дочірнім вузлам. Це повідомлення надсилається на рівні ВАР за допомогою PDU керування ВАР. Коли дочірній IAB-вузол отримує повідомлення про RLF, він вважає, що канал ВН, від якого він отримав повідомлення, вийшов з ладу (тобто так, ніби він виявив RLF на цьому каналі ВН). Коли ВН-канал до дочірнього IAB-вузла виходить з ладу, батьківський вузол може використати існуючу сигналізацію F1AP, щоб повідомити IAB-донорський CU про вихід з ладу.

Після цього IAB-донор може вжити заходів для перенаправлення з'єднань F1 до уражених IAB-вузлів.

Якщо IAB-вузол сконфігурований з NR-DC і тільки одне з його батьківських з'єднань виходить з ладу, він виконує звичайну процедуру виходу з ладу MCG (Master Cell Group) або SCG (Secondary Cell Group), щоб повідомити про це IAB-донора-КТ. У цьому випадку не потрібно відновлювати RRC, і трафік може бути перенаправлений (локально у вузлі, а також ОВС-донором) за допомогою все ще доступного каналу ВН [36-39].

3.7 Висновки до розділу 3

Підвищення ефективності мережі 5G може бути досягнуте за допомогою ряду стратегій та технологічних підходів. Впровадження алгоритмів ШІ та Машинного Навчання дозволяє автоматизувати управління мережею, прогнозувати витрати енергії, оптимізувати використання ресурсів та адаптувати мережу до змінних умов.

Аналіз великих обсягів даних може надавати цінну інформацію про патерни трафіку, що дозволяє ефективно регулювати мережеві ресурси та покращувати якість обслуговування. Ефективне управління радіоресурсами, такими як частотні та антенні ресурси, дозволяє максимізувати пропускну здатність та мінімізувати витрати енергії.

Віртуалізація мережевих функцій дозволяє гнучко розгортати та управляти сервісами, що підвищує ефективність використання апаратних ресурсів. Розробка та впровадження енергоефективних технологій та протоколів дозволяє знижувати витрати енергії мережі, особливо в умовах великої щільності пристроїв та інтенсивного трафіку. Ефективна архітектура, така як централізована мережа доступу (C-RAN) або відкрита мережа доступу (O-RAN), може сприяти оптимізації роботи мережі та розподілу ресурсів.

Активне управління трафіком, враховуючи різні види послуг та вимоги користувачів, може покращити якість обслуговування та використання ресурсів. Розвинуті системи керування, які враховують гнучкість та динаміку мережі, дозволяють ефективно реагувати на зміни у вимогах та умовах.

Використання продвинутих антенних технологій, таких як Massive MIMO, дозволяє підвищити продуктивність та ефективність мережі. Використання систем кешування для зберігання та швидкого доступу до популярних контенту дозволяє зменшити трафік та оптимізувати використання ресурсів.

Вказані стратегії можуть взаємодіяти та комбінуватися в залежності від конкретних умов та вимог мережі.

4 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕРЕЖІ 5G

Підвищення надійності мережі 5G є ключовим завданням для забезпечення стабільної роботи та задоволення високих вимог до доступності. Використання механізмів резервування та резервного забезпечення дозволяє мережі переходити на альтернативні шляхи чи резервні вузли в разі виникнення проблем. Розділення мережі на сегменти та ізоляція проблемних ділянок може запобігти поширенню проблем і забезпечити роботу інших частин мережі. Забезпечення резервного живлення для мережевого обладнання та інфраструктури допомагає уникнути відключень через випадки відмов живлення. Використання систем моніторингу та діагностики дозволяє операторам вчасно виявляти проблеми та швидко реагувати на них.

Ефективне керування трафіком дозволяє уникнути перевантажень та забезпечити стабільну роботу мережі в умовах високого обсягу комунікації. Впровадження автоматичних процедур відновлення дозволяє системі швидко відновлювати працездатність після виникнення неполадок.

Розробка та впровадження ефективних заходів з кіберзахисту сприяє захисту мережі від атак та неправомірного доступу. Використання технологій MIMO (Multiple Input Multiple Output) та диверсифікація шляхів дозволяє покращити якість зв'язку та забезпечити більшу надійність. Гнучка архітектура, яка дозволяє системі адаптуватися до змін і відновлювати свою працездатність без значного втручання. Використання Штучного Інтелекту для аналізу даних та прогнозування можливих відмов дозволяє приймати заходи перед виникненням проблем. Вказані стратегії разом із застосуванням передових технологій допомагають підвищити надійність мережі 5G, щоб вона відповідала високим стандартам доступності та продуктивності.

4.1 Інтегровані літаючі мобільні мережі

Елементи NTN, як у [39, 40], охоплюють різні підходи, від систем висотних платформ (HAPS) до супутників на геостаціонарній орбіті (GEO). Див. таблицю 4.1. Безпілотні повітряні системи (БПС), наприклад, дрони, покривають висоти, починаючи з набагато менших, ніж 8 км.

Затримка від БП до супутника становить 3-15 мс для НОО (800 км), 27-43 мс для МЕО (8000 км) і 120-140 мс для ГСО. Очікується, що система 5G буде враховувати довгу затримку через NTN для забезпечення QoS. Послуги, які вимагають низької затримки, можуть не підтримуватися.

Корисне навантаження супутника складається або з більш простої ретрансляційної функції (прозорі, яку також називають "зігнутою трубою"), або з регенеративного корисного навантаження. Ці альтернативи показані на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1 – Класифікація функціональних параметрів літаючих платформ.

Platform		Altitude
High Altitude Platform Systems	HAPS	8–50 km
Low Earth Orbit Satellites	LEO	300–1500 km
Medium Earth Orbit Satellites	MEO	7000–25,000 km
Geostationary Earth Orbit Satellites	GEO	35,768 km
High Elliptical Orbit Satellites	HEO	400–50,000 km

Завдяки прозорій архітектурі вся мережа 5G RAN розташована на землі. Корисне навантаження супутника включає в себе перетворення частоти, ретрансляцію сигналу від gNB через наземну станцію і фідерну лінію на супутник, а потім назад для доступу на іншій частоті.

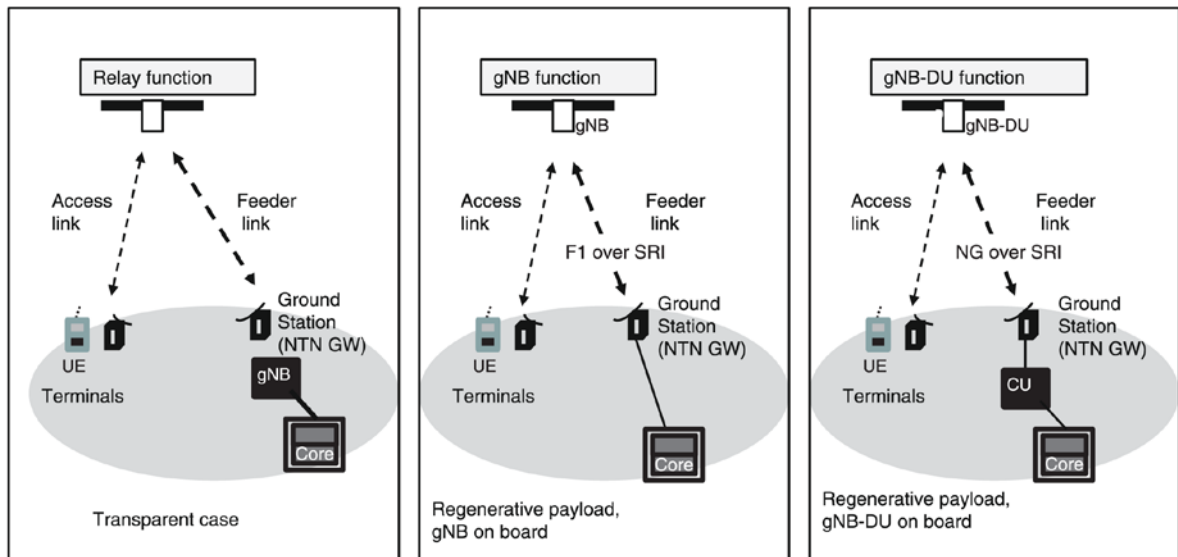


Рисунок 4.1 – Альтернативні архітектури NTN

З регенеративним корисним навантаженням є дві альтернативи: або gNB-DU, або повна функціональність gNB знаходиться в корисному навантаженні супутника, в той час як решта мережі 5G знаходиться на землі.

Перевага регенеративного корисного навантаження полягає в тому, що відстань від базової смуги 5G до землі є коротшою, а затримка для протоколів L1/L2 - меншою. Супутникове корисне навантаження стає складнішим через функціональність RAN на борту. З архітектур, показаних на рисунку 4.1, 3GPP зосередився в Rel-17 і Rel-18 на прозорому корпусі.

Міжсупутникові лінії зв'язку (ISL) включені в регенеративну архітектуру таким чином, що супутник може з'єднуватися з наземною станцією через інший супутник або навіть через декілька ISL.

Як в прозорій, так і в регенеративній архітектурі корисного навантаження наземна станція підтримує фідерний зв'язок із супутником. Потім наземна станція з'єднує їх з іншими елементами мережі 5G.

Для негеостаціонарних супутників рух супутників вимагає підключення через різні наземні станції, а також до різних елементів мобільної мережі на землі.

Термінали також повинні підключатися до елементів мобільної мережі через різні супутники.

Ще однією проблемою є те, що послуга не буде постійно доступною, якщо кількість супутників у сузір'ї недостатньо велика, що є ймовірним, принаймні, на ранній стадії.

4.2 Конфігурація мережі 5G із використанням повітряного інтерфейсу

У прозорому випадку елементи NTN - шлюз NTN (наземна станція) і супутник - виступають як радіочастотні перетворювачі/перемикачі частоти і не переривають протоколи 5G (див. рисунок 4.2).

Весь стек 5G обробляється в gNB на землі, і роль NTN GW полягає в транспортуванні сигналу до супутника (з обраною частотою); роль супутника полягає в ретрансляції сигналу назад до землі на частоті повітряного інтерфейсу 5G. На наземній частині gNB з'єднує UPF зі стандартним інтерфейсом NG. Затримка через супутник тепер відбувається через повітряний інтерфейс 5G. Стек площини управління аналогічно прозоро передається через NTN GW і супутник до ПС [41-43].

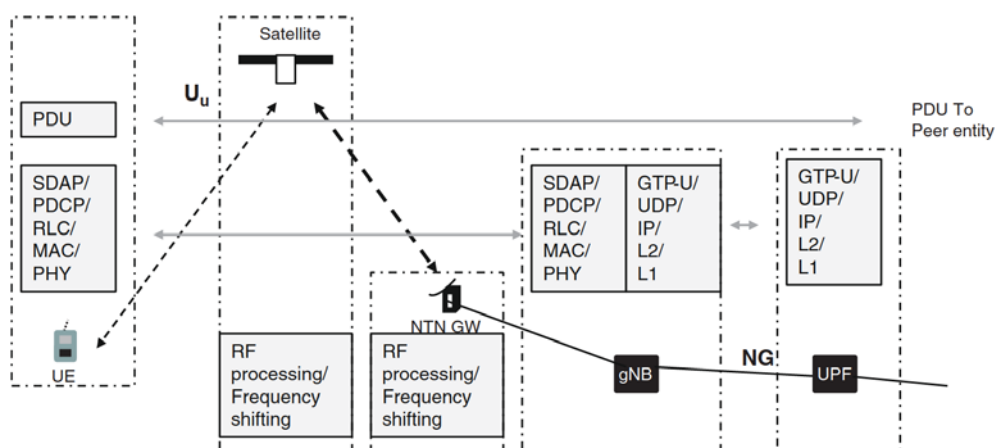


Рисунок 4.2 – Структура безперервного супутникового каналу передачі даних між користувачем та мережею

У випадку з регенеративним корисним навантаженням на супутнику розміщується gNB-DU або повна функціональність gNB. Випадок gNB-DU показаний на рисунку 4.3, а випадок gNB - на рисунку 4.4. Коли на супутнику розміщується DU, F1 передається через супутниковий радіоінтерфейс (SRI), а коли на супутнику розміщується gNB, NG передається через SRI. Обидва інтерфейси потребують налаштування і конфігурації, щоб впоратися з відповідною затримкою.

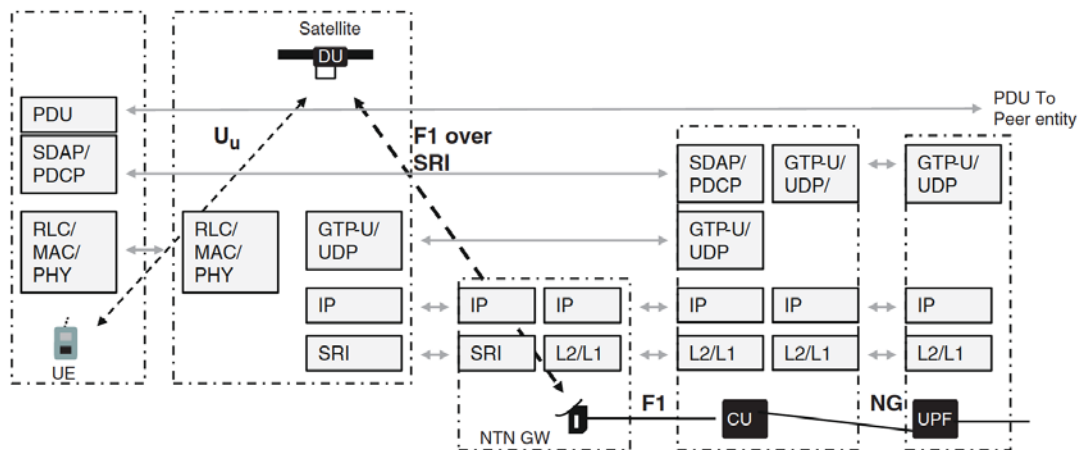


Рисунок 4.3 – Схема обробки та передавання даних gNB-DU на супутнику

На наземній станції NTN GW діє як маршрутизатор між інтерфейсом до мережі 5G і супутником, підтримуючи переадресацію IP-пакетів F1 або NG через SRI. SRI або NTN GW не перериває протоколи 5G, а діє як пристрій транспортного рівня. Протокольні рівні SRI не визначені 3GPP.

NTN GW забезпечує SRI, поверх якого F1 передається через IP. F1 завершується в корисному навантаженні супутника (функціональність gNB-DU), а потім протоколи повітряного інтерфейсу 5G до рівня RLC (RLC/MAC/PHY) розміщуються в gNB-DU, як і раніше, в звичайному режимі. Затримка через супутник тепер відбувається для інтерфейсу F1, а також рух супутника стосується F1. Решта протоколів площини користувача, SDAP і PDCP, завершуються в gNB-CU, який знаходиться на землі за NTN GW.

Перевага такого підходу полягає в тому, що тепер критичні в реальному часі протоколи RLC/MAC/PHY розташовані ближче до НС і затримки менші. Інтерфейс F1 повинен терпіти більшу затримку, ніж зазвичай.

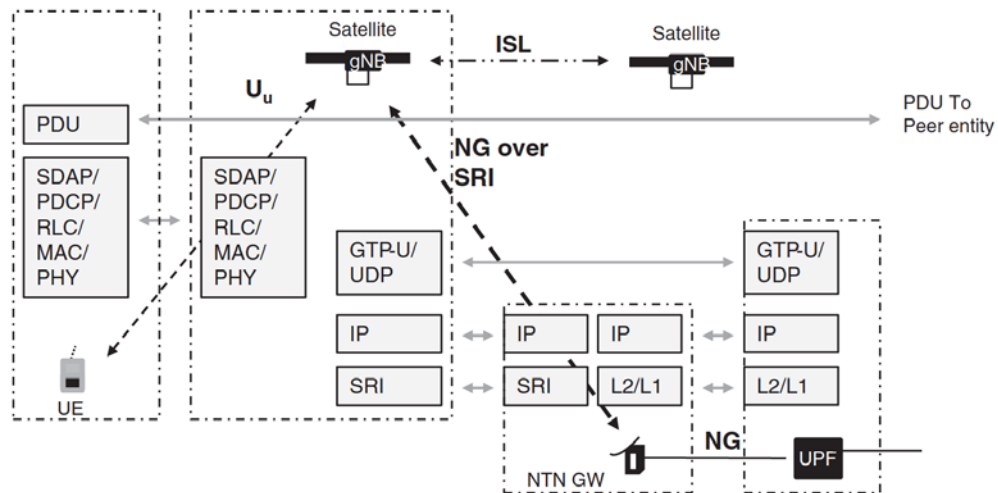


Рисунок 4.4 – Схема керування ресурсами gNB на супутнику

Стек площини управління не показаний, але і тут поділ відповідає функціональному поділу між gNB-DU і gNB-CU, як і у випадку наземної мережі.

Коли функції gNB розташовані на супутнику, саме інтерфейс NG передається через SRI між супутником і NTN GW. У цьому випадку повна функціональність 5G RAN знаходиться на супутнику. Інтерфейс NG повинен терпіти більшу затримку, ніж зазвичай, для роботи протоколу, а також рух супутника тепер впливає на NG. Логічні інтерфейси (F1, NG, Xn) додатково потребують криптографічного захисту в межах мережевого домену, як визначено 3GPP (не показано в стеках протоколів) [44-49].

Порівнюючи альтернативи архітектури, прозорий варіант є найпростішим, оскільки супутник потребує найменшої функціональності, а також всі логічні інтерфейси (окрім Uu) розташовані на землі. Недоліком є більша затримка поширення між UE і базовою смугою, оскільки сигнал повинен пройти вдвічі більшу відстань від землі до супутника. Це викликає необхідність оптимізації повітряного інтерфейсу 5G і роботи протоколу в режимі реального часу,

наприклад, H-ARQ. З будь-якою з регенеративних альтернатив, в межах корисного навантаження супутника підтримуються критеріальні протоколи в реальному часі.

Також можлива підтримка ISL, як показано на рисунку 4.4, коли супутник може з'єднуватися з землею через інший супутник або декілька супутників, а не напряму, якщо наземна станція не досяжна безпосередньо (що може статися, наприклад, посеред океану). У такому випадку шлях до наземної станції може бути знайдений за допомогою одного або декількох каналів ISL.

4.3 Прозора архітектура мобільної мережі

У 3GPP прозора архітектура була першою метою, і кілька удосконалень для цієї архітектури включено в TS38.300 [50]. З прозорою архітектурою gNB логічно складається з двох частин: системи інфраструктури, специфічної для NTN, і власне gNB, яка функціонує, як показано на рис. 4.5.

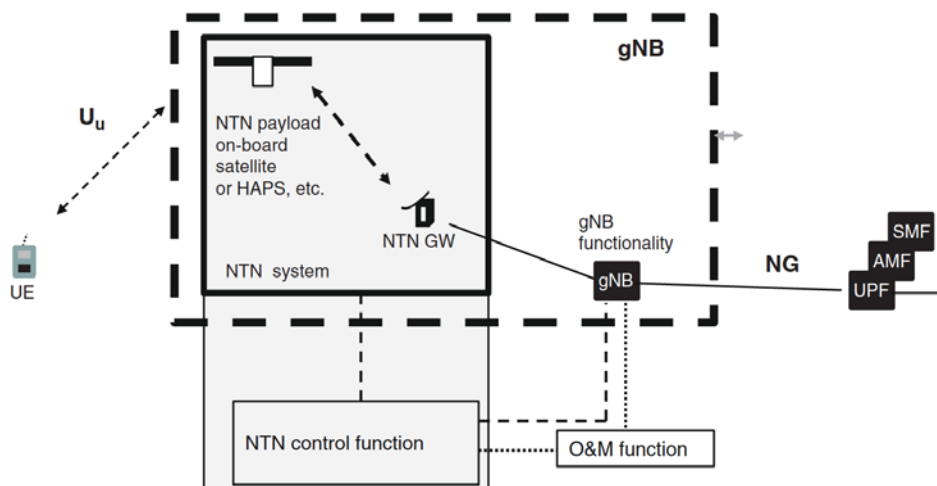


Рисунок 4.5 – Схема безперервного та ефективного бездротового зв'язку gNB у прозорій архітектурі мережі

Логічно, gNB включає не тільки функції gNB, вже визначені 3GPP, але і систему NTN, оскільки повітряний інтерфейс в цьому випадку підтримується

корисним навантаженням NTN, яке знаходиться на повітряному/космічному апараті (наприклад, супутнику або HAPS). Система NTN включає цей літальний/космічний апарат з корисним навантаженням, а потім NTN GW, з фідерним зв'язком між GW і супутником.

Функції системи NTN і gNB об'єднують функцію управління NTN і функцію експлуатації та управління (O&M). Функція управління NTN необхідна для gNB (на додаток до інших функцій) для перемикання фідерної лінії, яка запускає хендовери для користувачьких пристроїв доступу NTN. В іншому випадку функція управління NTN контролює космічний/повітряний апарат, інтерфейс фідерної лінії зв'язку, радіоресурси і NTN GW. Функція O&M забезпечує gNB параметрами конфігурації і інформацією про ефемериди супутників.

Інтерфейс NG до основної мережі є стандартним, як визначено 3GPP. Однак у логічному gNB, зображеному на рис. 4.5, є багато специфічних для NTN інтерфейсів, які виходять за рамки 3GPP і, як такі, не визначені: - Інтерфейс між функціями gNB і NTN GW. - Інтерфейс між функцією управління NTN і gNB. - Інтерфейс O&M.

Також у 3GPP не визначено фідерний зв'язок. Система NTN - це, по суті, чорний ящик, який "розширює" інтерфейс Uu від місцевого gNB через повітряний/космічний апарат в іншу область. Вона схожа на радіочастотний ретранслятор з функцією, коли сигнал зміщується до обраної несучої фідерної лінії зв'язку, а потім корисне навантаження супутника зміщує частоту назад до обраного діапазону 5G. Експлуатація і управління корисним навантаженням NTN, GW і радіоресурсами в системі NTN є функцією управління NTN; реалізація цієї функції здійснюється в рамках інфраструктури NTN.

Опосередковано специфічні для NTN характеристики стають видимими в 5G RAN через обговорювані теми: довга затримка, часовий зсув, продуктивність тощо. Крім того, опорна мережа знає, що в сеансі PDU задіяна система NTN, і може враховувати цю інформацію в своїх функціях доступу і управління сеансами.

4.4 Забезпечення неперервного зв'язку у мережі з інтегрованим доступом з використанням супутникового зв'язку

На додаток до мобільності для UE, яка підтримується в режимі з'єднання за допомогою хендоверів, новим аспектом NTN є те, що фідерний зв'язок також повинен перемикатися при русі супутника. У 3GPP це визначено як функція TNL (транспортного мережевого рівня) і не визначено 3GPP. Рух супутника відомий, тому перемикання може здійснюватися на основі часу і місцезнаходження (ефемеридної інформації) або на основі інших методів, таких як звіти та інструкції між супутником, NTN GW і функцією управління. Коли фідерна лінія перемикається і супутник з'єднується з новою наземною станцією, на стороні доступу відбувається хендовер, тому перемикання фідерної лінії і хендовери для UE відбуваються одночасно [51-53].

Метою перемикання фідерної лінії зв'язку є те, щоб воно не викликало перерви в зв'язку з користувачем (UE). Перемикання фідерної лінії може бути м'яким, якщо супутник підтримує зв'язок з двома наземними станціями одночасно з різними радіоресурсами під час перемикання (див. рис. 4.6).

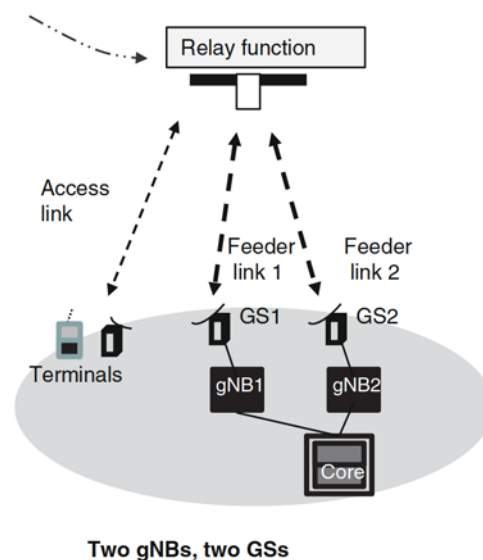


Рисунок 4.6 – Схема безшовного перемикання фідерної лінії

У прозорому випадку, зображеному на рисунку 4.6, при переході до GS2 супутник підтримує фідерний зв'язок 1 з GS1 і gNB1, одночасно встановлюючи фідерний зв'язок 2 з gNB2. Під час переходу до GS2 супутник відображає радіоресурси як від gNB1, так і від gNB2 на сторону доступу, і UE переміщуються за допомогою процедур передачі Xn або NG до gNB2 до того, як з'єднання з GS1 і gNB1 буде розірвано. Перемикання фідерного каналу TNL забезпечує безперебійне підключення для UE.

4.5 Мережа 5G у відповідності вимогам URLLC та оптимального використання ресурсів

З точки зору 3GPP, на стороні транспортної мережі існує багато свободи. Обмеження і передумови встановлюються вимогами до послуг URLLC і архітектурою системи 5G, і те, чи потрібна конкретна транспортна функціональність, залежить від цих вимог і від розгортання 5G. Специфічною сферою, пов'язаною з транспортом, є безпека; логічні інтерфейси криптографічно захищені, як визначено 3GPP, але розгортання повинно бути проаналізоване на предмет конкретних вразливостей і загроз, оскільки транспортні лінії і мережі за визначенням призначені для забезпечення зв'язку. З URLLC багато послуг залежать від того, наскільки безпечними і надійними є мережеві сервіси.

Існує залежність від функціональності системи 5G, оскільки такі вдосконалення, як дублювання PDCP, потенційно впливають на транспортні лінії і приносять їм користь, як обговорювалося в розділі 4, тому транспорт слід розглядати як частину системи. Гнучкість архітектури системи 5G означає, що для URLLC мережеві функції, такі як UPF, можуть бути розташовані близько до місця розташування стільника, щоб скоротити будь-яку відстань транспортної лінії і, відповідно, зменшити затримку поширення в транспортних лініях, зберігаючи при цьому функції для інших (не URLLC) послуг на більшому базовому майданчику. Ці приклади підкреслюють залежність від системи 5G.

Вимоги до послуг в 3GPP TS 22.261 [54] вказують на інші документи: додатки кіберфізичного управління у вертикальних доменах, TS 22.104 [14]; V2X в TS 22.186 [55]; і залізничний зв'язок в TS 22.289 [56].

Кіберфізичні додатки поділяються на комунікаційні потреби, які характеризуються

- Періодичними детермінованими комунікаціями (наприклад, контролер надсилає команди на обладнання кожні 200 мкс)
- Аперіодичними детермінованими комунікаціями (наприклад, індикація несправності від пристрою)
- Недетермінованими комунікаціями, без критичності до часу, або
- Певною комбінацією вищезазначених (змішаний трафік)

Критично важливим фактором, що залежить від сервісу, є час виживання - скільки часу перерви або скільки втрачених пакетів може витримати додаток URLLC, зберігаючи при цьому можливість працювати в звичайному режимі.

Це залежить від програми. Пов'язаним фактором є можливий наслідок перевищення часу виживання: який тип несправності або аномалії спричинений.

Замість єдиних вимог до послуг URLLC, які можна було б використовувати як вхідні дані для транспортного аналізу, вимоги є специфічними для кожної послуги. Для транспорту особливе значення має навколишнє середовище і місце, де надаються послуги. Випадок видобутку корисних копалин відрізняється від послуги URLLC на території корпоративного кампусу.

На додаток до вимог до сервісів і майданчиків, для транспорту багато що залежить від обраної архітектури розгортання мережі: класична базова станція або дезагрегована мережа RAN з хмарними технологіями. Від цього також залежать логічні інтерфейси і необхідне транспортне підключення.

У багатьох випадках транспортна мережа є спільною для різних додатків і сервісів, і транспорт повинен бути спільним з міркувань економії, коли це технічно можливо. Коли послуги URLLC об'єднуються з іншими потоками трафіку, загальна транспортна мережа повинна бути здатна підтримувати всі типи трафіку без шкоди для вимог QoS для будь-якого з потоків. Найвимогливіші вимоги до сервісів, як правило, походять від додатків URLLC.

Нарізка мережі, включаючи пов'язану з нею транспортну нарізку, може слугувати важливим будівельним блоком для послуг URLLC, оскільки може існувати певний зріз (або зрізи), що підтримує вимоги URLLC (використовуючи зріз типу 2), та інші зрізи для інших послуг.

4.6 Ефективні способи забезпечення надійності та керування ризиками в мережах 5G

Деякі з удосконалень системи 5G для підвищення надійності, такі як дублювання PDCP або робота системи 5G в якості моста, можуть також охоплювати транзитні транспортні зв'язки і підвищувати надійність транспорту. Резервні канали і вузли, ймовірно, потрібні в транспорті як частина системи або як окрема транспортна функція; наприклад, для дублювання пакетів на розрізних шляхах. Потреба в цьому залежить від передбачуваної частоти відмов і від цільової оцінки показника надійності.

Проста модель надійності на повітряному інтерфейсі передбачає, що бітові помилки і втрати пакетів можуть бути компенсовані (принаймні до певної міри) повторними передачами і дублюванням пакетів на основі багатоканальних/багатозв'язкових з'єднань. Для транспортних каналів залишковий рівень бітових помилок у добре функціонуючих каналах є незначним, а втрату пакетів, спричинену перевантаженням, можна контролювати за допомогою QoS та методів інженерії трафіку. Залишається лише ймовірність відмов каналів і вузлів, з якою можна впоратися шляхом дублювання пакетів по декількох каналах (багатошляховість).

Щоб отримати ідеальний приріст надійності при багатопроменевій передачі, два або більше шляхів, що використовуються, не повинні страждати від однакових збоїв, принаймні, не одночасно. Відмови на різних шляхах не повинні корелювати. Для повітряного інтерфейсу проста модель в ідеалі припускала, що перша передача і ретрансляція не корелюють, а також, що передачі по одному шляху повітряного інтерфейсу і по іншому шляху

повітряного інтерфейсу не корелюють. У реальному світі це навряд чи завжди так для повітряного інтерфейсу.

Для транспортування використання лише двох волоконних ліній не забезпечує значної відмовостійкості, якщо використовується один і той самий кабель. Щоб мінімізувати кореляцію, можна використовувати волокна в окремих кабельних каналах. Це, як правило, дуже дорого для транспортування на великі відстані, але це може бути набагато доцільніше в конкретній меншій області, як у випадку з послугами URLLC, принаймні для таких випадків, як заводські цехи, гавані, шахти і т.д. Кільцева топологія також може вирішити деякі з цих випадків. Інший варіант - використання окремих середовищ, тобто поєднання оптики і бездротового зв'язку. Деякі альтернативні варіанти показані на рисунку 4.7.

На рис. 4.7 зображено три випадки, коли gNB підключається для надання послуг URLLC до віддаленого багаторівневого комутатора, а через нього - до основних мережевих функцій і сервера додатків. У кожному випадку є дубльовані посилення, але з різною реалізацією [57-58].

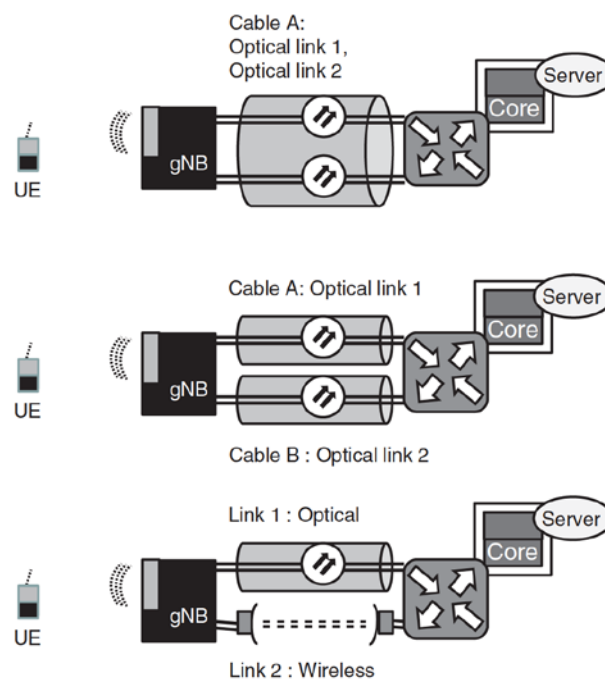


Рисунок 4.7 – Методи забезпечення надійності та неперервності послуг URLLC в системі 5G

Верхній випадок ілюструє високу кореляцію між лініями, оскільки окремі нитки волокна, що використовуються для оптичних ліній 1 і 2, виходять з ладу одночасно, якщо кабель перерізається. У середньому випадку два різних кабелі (позначені А і В) використовують різні фізичні маршрути для двох ліній зв'язку, і ситуація покращується. Найнижчий випадок показує комбінацію оптичних і бездротових ліній зв'язку, де можна очікувати, що відмови будуть некорельованими для багатьох можливих сценаріїв несправностей.

Що стосується методів дублювання, то на додаток до дублювання PDSP і GTP-U в системі 5G, можливе дублювання на рівні додатків по всій системі 5G, при цьому система 5G працює як міст.

На мережевих рівнях технологіями дублювання пакетів є, наприклад, в IEEE Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER) (див. [17]), розроблена в сімействі стандартів TSN, а потім IETF DetNet (див. [58]) для архітектури DetNet.

4.7 Метод оптимізації мережі 5G

На іншу частину URLLC, низьку затримку, сильно впливає рівень транспортної мережі через фізичну відстань і пов'язану з цим затримку поширення. Основний спосіб пом'якшити цей вплив - розмістити основні мережеві функції і сервери додатків досить близько до місця розташування стільникового вузла, як показано на рисунку 4.8.

Приклад на рисунку 4.8 показує випадок, коли послуга URLLC надається місцевим UPF, розташованим у віддаленому центрі обробки даних, тобто, можливо, в межах декількох кілометрів від сайтів стільникових мереж, і зосередженим на обслуговуванні додатків URLLC. Послуги MBW надаються в регіональному/центральному дата-центрі з більшою кількістю серверів і більшою обчислювальною потужністю.

У цьому прикладі URLLC може використовувати фрагмент мережі, де в транспортному домені сеанси URLLC PDU маршрутизуються до локального CU-U (функція користувачької площини), звідти до локального UPF і далі до

локального сервера, щоб мінімізувати затримку і мінімізувати кількість міжсайтових транспортних зв'язків. Мережева функція CU-C підтримується регіональним/центральною центром обробки даних разом з функціями площини керування основною мережею (AMF і SMF).

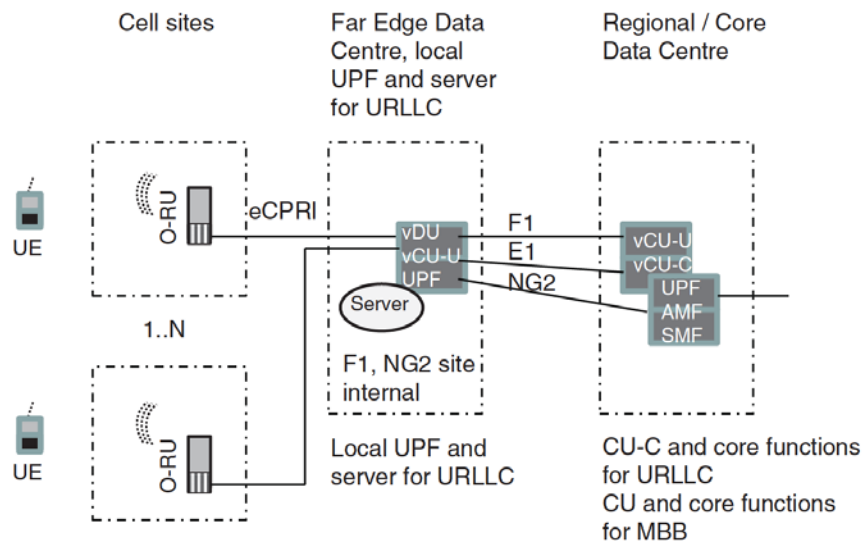


Рисунок 4.8 – Схема комбінації локальних UPF і серверів в мережі 5G

Послуги МВВ знаходяться на іншому сегменті мережі, а мережеві функції підтримуються регіональним або основним центром обробки даних. Варіації в розташуванні мережевих функцій існують як на стороні RAN (функції CU, DU і, далі, поділ на функції CU-U і CU-C), так і на стороні ядра мережі, тому гнучкість архітектури 5G стає помітною і там.

Механізми, пов'язані з плануванням на транспортних рівнях для гарантованої максимальної затримки, вказують на підходи типу інженерії трафіку і технології IEEE TSN.

4.8 Забезпечення ефективного використання можливостей мережі п'ятого покоління

Приватні мережі 5G часто згадуються в контексті так званої Четвертої промислової революції, також відомої як Індустрія 4.0. Хоча Індустрія 4.0 значною мірою зосереджена на обробній промисловості, і хоча технологія 5G, безумовно, відіграє важливу роль у розширенні цифровізації та автоматизації виробництва, очікується, що приватні мережі 5G відіграватимуть значну роль у всіх галузях промисловості.

Приватні мережі допомагають вирішити навіть базові проблеми бездротового зв'язку в таких галузях, як сільське господарство, гірничодобувна промисловість, видобуток нафти і газу та виробництво електроенергії, через відсутність покриття громадської мережі та неможливість використання систем WiFi. Ринки приватних мереж також охоплюють сектори громадської безпеки та залізничного зв'язку, які потребують критично важливих сервісних можливостей з часто майже загальнонаціональним покриттям. Тут основна увага приділяється промисловим випадкам використання зі значно меншим покриттям, таким як промисловий кампус, порт або підземна шахта.

Дискретні та переробні галузі виробництва, такі як хімічна, нафтова, паперова, харчова, автомобільна та електронна промисловість, отримують вигоду від ефективного і надійного приватного бездротового зв'язку 5G. Приватні мережі 5G також сприятимуть розвитку галузей послуг, таких як логістика і транспорт. Тому, наприклад, порти і аеропорти часто є першими користувачами приватних мереж 5G. Крім того, інші підприємства сфери послуг і розваг уважно стежать за розвитком 5G, щоб підтримувати свою конкурентоспроможність і ефективність. Послуги державного сектору, як правило, повинні використовувати новітні технології для підвищення економічної ефективності, і тому 5G набуває вирішального значення в лікарнях і сфері охорони здоров'я.

Серед поширених галузевих застосувань високопродуктивного бездротового зв'язку можна виділити наступні • Високоякісне відео в режимі реального часу у висхідному напрямку для дистанційного керування машинами і додатків штучного інтелекту (ШІ), таких як контроль якості. Масовий бездротовий відеомоніторинг у великих промислових кампусах. Зв'язок з низькою затримкою для управління машинами і зв'язку між автономними роботами, що працюють в парі. Підключення до Ethernet для промислових протоколів, що не належать до IP. Високопродуктивна мобільність для автоматизованих керованих транспортних засобів, як всередині, так і зовні приміщень.

Коли поєднуються різні вимоги до продуктивності, стає очевидно, що WiFi не є адекватною технологією. Наприклад, великі промислові об'єкти, такі як порти, потребують зв'язку на територіях площею в десятки квадратних кілометрів. Хоча 4G є чудовою мобільною технологією для використання в приміщеннях і на великих відкритих територіях, їй не вистачає можливостей для підтримки надширококутного зв'язку з низькою затримкою до 10 мс по радіо. Технологія 5G розроблена для підтримки нового спектру, що забезпечує високу пропускну здатність зв'язку, а також оптимізованого радіоінтерфейсу 5G для наднизької затримки навіть до 1 мс.

Таким чином, приватний 5G матиме вирішальне значення в широкому спектрі галузей, на додаток до традиційних виробничих підприємств. З іншого боку, приватні мережі 5G не замінять потребу в послугах зв'язку загального користування операторів мобільного зв'язку, які забезпечують загальнонаціональний і глобальний зв'язок для підприємств і галузей. Приватні мережі 5G також не замінять існуючі випадки використання WiFi на підприємствах, наприклад, ноутбуки з WiFi з офісними додатками.

4.9 Висновки до розділу 4

Підвищення надійності мережі 5G важливо для забезпечення стійкої та неперервної роботи в різних умовах. Забезпечення декількох з'єднань та шляхів між пристроями та базовими станціями забезпечує резервне з'єднання у випадку відмови або перешкод. Розділення мережі на сегменти дозволяє локалізувати проблеми та попереджувати їх розповсюдження на весь мережевий обсяг. Застосування резервного живлення та енергозберігаючих технологій дозволяє уникнути відмов через відключення електроживлення.

Використання технологій віртуалізації може допомогти переносити резервні функції на інші вузли в разі відмови або навіть автоматично виявляти та виправляти помилки. Використання систем моніторингу та автоматичного резервного керування дозволяє операторам вчасно виявляти та вирішувати проблеми.

Забезпечення високого рівня безпеки для запобігання атакам, які можуть призвести до відмов чи порушень в мережі. Використання аналізу великих обсягів даних для передбачення можливих проблем та управління резервними рішеннями.

Розробка механізмів, які дозволяють мережі самостійно виявляти проблеми та вживати заходи для їх виправлення. Застосування архітектур, які підтримують автоматизацію та автономне управління, може значно покращити надійність.

Стандартизація процесів та взаємодія між різними компонентами системи дозволяє створювати взаємодіючі та сумісні елементи мережі. Вказані заходи в сукупності допомагають створити стійку та надійну мережу 5G, яка може забезпечити неперервне обслуговування у різних умовах та обставинах.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Магістральна мережа 5G» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Магістральна мережа 5G» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	60	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	57	0	57
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		58,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та

проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	62	62
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	61,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [59]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 58,0$, $k_{\text{теор}} = 61,3$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 58,0 + 0,4 \cdot 61,33 = 59,33 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G», даний рівень становить 59,33 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та

іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [59]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 16430,00 \cdot 21 / 21 = 16430,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту дослідження магістральної мережі 5G	16430,00	782,38	21	16430,00
Ст. науковий співробітник	15900,00	757,14	21	15900,00
Консультант (аналітик цифрових мереж)	16000,00	761,90	10	7619,05
Технік 1-ї категорії	7200,00	342,86	21	7200,00
Всього				47149,05

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Магістральна мережа 5G» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [59];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 59,22 \cdot 5,00 = 296,12 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Налаштування робочого місця дослідника	5,00	2	1,10	59,22	296,12
Інсталяція програмного забезпечення моделювання мереж 5G	6,00	4	1,50	80,76	484,55
Налагодження моделі магістральної мережі	8,00	5	1,70	91,53	732,21
Тренування моделі	3,20	5	1,70	91,53	292,89
Проведення цифрового експерименту	6,00	3	1,35	72,68	436,10
Формування бази даних результатів	10,00	3	1,35	72,68	726,83
Всього					2968,70

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$Z_{\text{дод}} = (47149,05 + 2968,70) \cdot 12 / 100\% = 6014,13 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{од}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (47149,05 + 2968,70 + 6014,13) \cdot 22 / 100\% = 12349,01 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Магістральна мережа 5G».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,0 \cdot 97,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 203,70 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
USB-пам'ять (16 ГБ)	97,00	2,0	-	-	203,70
Диск оптичний (CD-R)	24,00	3,0	-	-	75,60
Диск оптичний (CD-RW)	29,00	3,0	-	-	91,35
Картридж для плотера (HP-2106)	422,00	2,0	-	-	886,20
Картридж для принтера (HP-2002)	1125,00	1,0	-	-	1181,25
Начиння канцелярське	167,00	4,0	-	-	701,40
Органайзер офісний	172,00	4,0	-	-	722,40
Папір для заміток (A5) 500-70	134,00	2,0	-	-	281,40
Папір канцелярський офісний (A4) 500-80	192,00	2,0	-	-	403,20
Папір креслярський (A1)	27,00	10,0	-	-	283,50
Папір креслярський (A3)	14,00	15,0	-	-	220,50
Всього					5050,50

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Магістральна мережа 5G», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 4890,00 \cdot 1,05 = 5134,50 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Імітатор магістральної мережі FITCH	1	4890,00	5134,50
Контролер Controller HD5g	1	3120,00	3276,00
Маршрутизатор RB16gHD	1	3685,00	3869,25
Програмно-конфігуруєма мережа	1	5640,00	5922,00
Програмований комутатор Programmable switch DC90	1	4590,00	4819,50
Спеціалізовані радіоінтерфейси	2	1929,00	4050,90
Всього			27072,15

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 14500,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 15225,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Блок управління сесіями (SMF - Session Management Function)	1	14500,00	15225,00
Модуль вибору мережевого шару (NSSF - Network Slice Selection Function)	1	4850,00	5092,50
Модуль виклику прикладних функцій (AF - Application Function)	1	6890,00	7234,50
Модуль управління політиками (PCF - Policy Control Function)	1	4680,00	4914,00

продовження таблиці 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Термінал (імітатор навантаження)	1	8200,00	8610,00
Термінал (імітатор приймача)	1	6500,00	6825,00
Всього			47901,00

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 8640,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 9072,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Модуль управління доступом і мобільністю (AMF - Access and Mobility Management Function)	1	8640,00	9072,00
Модуль передачі даних користувачів (UPF - User Plane Function)	1	7200,00	7560,00
Модуль управління даними користувачів (UDM - Unified Data Management)	1	5980,00	6279,00
Уніфікована база даних для зберігання різних абонентських даних (UDR - Unified Data Repository)	1	12560,00	13188,00
Всього			36099,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б.}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{б.}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{е}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (37899,00 \cdot 2) / (4 \cdot 12) = 1579,13 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	37899,00	4	2	1579,13
Місце дослідника спеціалізоване	6870,00	5	2	229,00
Офісна оргтехніка	7280,00	4	2	303,33
Програмне забезпечення Microsoft Co	9650,00	3	2	536,11
Програмно-аналітичний комплекс	25899,00	4	2	1079,13
Лабораторія досліджень	408000,00	25	2	2720,00
Всього				6446,69

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{vni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{vni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{vni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,30 \cdot 160,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 360,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	0,30	160,0	360,00
Імітатор магістральної мережі FITCH	0,05	120,0	45,00
Контроллер Controller HD5g	0,01	120,0	9,00
Маршрутизатор RB16gHD	0,02	120,0	18,00
Місце оператора спеціалізоване	0,06	160,0	72,00
Офісна оргтехніка	0,50	3,0	11,25
Програмно-аналітичний комплекс	0,25	160,0	300,00
Програмований комутатор Programmable switch DC90	0,01	120,0	9,00
Термінал (імітатор навантаження)	0,10	120,0	90,00
Термінал (імітатор приймача)	0,08	120,0	72,00
Всього			986,25

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cb} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cb} = 21\%$.

$$B_{cb} = (47149,05 + 2968,70) \cdot 21 / 100\% = 10524,73 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 50\%$.

$$I_e = (47149,05 + 2968,70) \cdot 50 / 100\% = 25058,87 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загально виробничі) витрати

До статті «Накладні (загально виробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (47149,05 + 2968,70) \cdot 100 / 100\% = 50117,75 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_в + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сн} + I_в + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 47149,05 + 2968,70 + 6014,13 + 12349,01 + 5050,50 + 27072,15 + 47901,00 + 36099,00 + 6446,69 + 986,25 + 10524,73 + 0,00 + 25058,87 + 50117,75 = 277737,83 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,95$.

$$ZB = 277737,83 / 0,95 = 292355,61 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Приймемо $I=4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n=0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n=1$, коли результати роботи будуть

використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 2$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 3$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 292355,61$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [59].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^2 \cdot 3 \cdot 4 / 292,4 \cdot 0,08 = 7,88.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Магістральна мережа 5G» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G» складають 292355,61 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Магістральна мережа 5G» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Обов'язки роботодавця щодо забезпечення працівникам комфортних та безпечних умов для здійснення роботи, а також права працівників на такі умови передбачено ст. 13 Закону України «Про охорону праці». Даний закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних органів державної влади відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Під час дослідження магістральної мережі 5G на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла; понижена контрастність;
- пряма і відбита блискість.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження та розумове перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо розробку заходів щодо безпечного виконання поставленого завдання.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Вимоги щодо організації та обладнання робочих місць: площа, відведена на одне робоче місце має становити не менше 6 кв. м., а об'єм – не менше 20 куб. м. Конструкція робочого місця повинна забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози (тобто такої, яка дозволяє працівникові виконувати роботу з мінімальним напруженням тіла, і яка дозволяє уникнути перевтоми в ході і після закінчення робочого процесу). Раціональна робоча поза має важливе значення для збереження здоров'я працівника, оскільки тривале перебування його в незручній і напруженій позі може призвести до таких захворювань, як сколіоз (викривлення хребта), варикозне розширення вен, плоскостопість тощо. Установлено, що робота в зігнутому положенні збільшує затрати енергії на 20%, а при значному нахиленні — на 45% порівняно з прямим положенням корпусу [61].

За потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця операторів необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 - 2 м.

Робочі місця слід розташовувати відносно джерела природного світла (вікон) таким чином, щоб світло падало збоку, переважно зліва. Також робоче місце має відповідати сучасним вимогам ергономіки:

- стіл повинен мати висоту поверхні 680 - 800 мм., ширину 600 - 1400 мм. і глибину 800 - 1000 мм. (такі параметри забезпечують можливість виконання операцій в зоні досяжності працівника);
- робочий стілець робочий стілець має бути підйомно-поворотним, з можливістю регулювання висоти, бажано зі стаціонарними або змінними підлікотниками і напівм'якою нековзкою поверхнею сидіння, що легко чиститься і не електризується;
- екран комп'ютера має розташовуватися на оптимальній відстані від користувача, що становить 600 – 700 мм., але не менше за 600 мм. з урахуванням літерно-цифрових знаків і символів.

Приміщення, де здійснювалося дослідження магістральної мережі 5G за безпекою ураження електричним струмом належить до приміщень без підвищеної безпеки (сухе, мало заповнене, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами і малим числом заземлених приладів).

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв виконується як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях, де розміщені робочі місця операторів (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном), надійно захищені діелектричними щитками або сітками з метою недопущення потрапляння людини під напругу.

Персональні комп'ютери і периферійні пристрої підключаються до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. У штепсельних з'єднаннях та електророзетках, крім контактів фазового та нульового робочого провідників, мають бути спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Їхня конструкція має бути такою, щоб приєднання нульового

захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Стан повітря робочої зони у виробничому приміщенні називають мікрокліматом або метеорологічними умовами. Мікроклімат або метеорологічні умови виробничих приміщенні, визначаються за такими параметрами:

- температурою повітря у приміщенні, С;
- відносною вологістю повітря, %;
- рухливістю повітря, м/с;
- тепловим випромінюванням, Вт/м³.

Всі ці параметри поодиночі, а також у комплексі впливають на фізіологічну функцію організму його терморегуляцію і визначають самопочуття.

Дослідження магістральної мережі 5G за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [62]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії згідно ДСН 3.3.6.042-99 [63] наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для створення і автоматичної підтримки в приміщенні незалежно від зовнішніх умов допустимих значень температури, вологості, чистоти і швидкості

руху повітря обладнані системами опалення та кондиціонування повітря. Систематично проводиться вологе прибирання.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Оточуюче нас повітря (атмосфера) є найважливішим фактором забезпечення життя. В природних умовах повітря, як правило, не забруднене отруйними речовинами і життю людини не загрожує. Органи чутливості людини не дозволяють з достатньою точністю визначати якість повітря і запобігати загрозі отруєння.

В приміщенні, де здійснюється дослідження магістральної мережі 5G, у повітрі можуть перевищувати ГДК такі речовини як вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні через відкриті вікна та заноситься на одязі і взутті працівниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

6.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення відіграє важливу роль у житті людини. Біля 90% інформації сприймається через зоровий канал, тому правильно виконане раціональне освітлення має важливе значення для виконання всіх видів робіт. Недостатня освітленість або її надмірна кількість знижують рівень збудженості центральної нервової системи і, природно, активність усіх життєвих процесів. Раціональне освітлення є важливим фактором загальної культури виробництва. Неможливо забезпечити чистоту та порядок у приміщенні, в якому напівтемрява, світильники брудні або в занедбаному стані.

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [64]. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 6.4:

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір розрізнення об'єкта	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість		КПО, e_n , %			
						Комбіноване	Загальне	Природне освітлення		Сумісне освітлення	
								Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II		великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Штучне освітлення в досліджуваному приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення).

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСП08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

6.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум – це сукупність різних за гучністю і тоном звуків, які виникають у повітряному середовищі. В досліджуваному приміщенні наявний як постійний, так і непостійний шуми. Нормування непостійного шуму, а також орієнтовна оцінка загального рівня постійного шуму здійснюється

скоректованим за частотою загальним рівнем звукового тиску – так званим рівнем звуку, який вимірюється в дБА за шкалою «А» шумоміра.

Непостійний шум характеризується еквівалентним рівнем звуку LA екв., що являє собою середньоквадратичний рівень звуку непостійного шуму, який має такий самий вплив на людину, як і постійний шум.

Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску не повинні перевищувати 50 дБА (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму (згідно ДСН 3.3.6.037-99 [65])

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Рівень шуму в приміщенні не перевищує допустимих значень.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Розрізняють природні та штучні джерела електромагнітних полів (ЕМП). У процесі еволюції біосфера постійно перебуває під впливом ЕМП природного походження (природний фон): електричне та магнітне поля Землі, космічні ЕМП, передусім ті, що генеруються Сонцем. У період науково-технічного прогресу людство створило і все ширше використовує штучні джерела ЕМП. У теперішній час ЕМП антропогенного походження значно перевищують природний фон і є тим несприятливим чинником, чий вплив на людину з року в рік зростає.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за ГОСТ 12.1.045-84

[66]. Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях з ВДТ мають відповідати нормативним значенням (ДСанПіН 3.3.6-2002 [67], ГОСТ 12.1.045-84 [66]). Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 [68] (табл. 6.6).

Таблиця. 6.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)	0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)	0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм	35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу	20кВ/м

Для дотримання наведених нормативів слід використовувати офісну техніку з сертифікатом якості та дотримуватися встановлених режимів праці та відпочинку з ПК.

6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих факторів НС

6.3.1 Дія вибуху на живі організми

Під час вибуху людина може отримати вибухову травму, що являє собою багатофакторне ураження, яке виникає внаслідок сукупної уражаючої дії на організм людини ударної хвилі, газових струменів, вогню, токсичних продуктів вибуху та горіння, уламків тощо.

Частою формою ушкоджень при вибуховій травмі є повний або неповний відрив сегмента кінцівки. Крім важкого травмування тканин, у ділянці безпосередньої дії вибухової речовини спостерігають також ушкодження всього організму у вигляді контузій і численних внутрішньомозкових крововиливів. Поєднання місцевих змін і загальних розладів у поранених із вибуховими травмами нерідко створює передумови до порушення життєво важливих функцій організму [69].

6.3.2 Визначення об'єму вибухонебезпечної речовини, необхідного для створення вибухонебезпечної концентрації в приміщенні

Вихідні дані: до складу пожежовибухонебезпечної суміші входять: метан – 80 %, етан – 10 %, пропан – 5 %, бутан – 5 %. Розміри приміщення: 13 × 7 × 3,3 м.

Об'єм вибухонебезпечної речовини, необхідний для створення вибухонебезпечної концентрації можна знайти за формулою

$$V = \frac{V_{BII}}{100} C_{HKM} \text{ [м}^3\text{]}, \quad (6.1)$$

де V_{BII} – вільний об'єм приміщення, м³;

$C_{НМК}$ – нижня концентраційна межа (НКМ) суміші, % об.

Вільний об'єм приміщення визначається за формулою

$$V_{ВЛ} = 0,8V_{ПР} [\text{м}^3], \quad (6.2)$$

де $V_{ПР}$ – об'єм приміщення, м^3 .

Згідно відомих розмірів приміщення знайдемо об'єм приміщення:

$$V_{ПР} = abh [\text{м}^3], \quad (6.3)$$

де a, b, h – довжина, ширина та висота приміщення, відповідно, м.

Нижню концентраційну межу поширення полум'я (спалахування) C суміші декількох горючих речовин при початковій температурі суміші $25\text{ }^\circ\text{C}$ можна орієнтовно визначити за формулою Ле-Шателе

$$C = \frac{\sum_{k=1}^n C_k}{\sum_{k=1}^n C_k / C_{mk}} [\% \text{ об.}], \quad (6.4)$$

де n – кількість горючих елементів суміші;

C_k – концентрація k -го компонента в суміші, % об.;

C_{mk} – нижня концентраційна межа поширення полум'я k -го компонента суміші, % об.

Вибираємо НКМ усіх складових пожежовибухонебезпечної суміші: метан – 5/15 %, етан – 2,9/15 %, пропан – 2,1/9,5 %, бутан – 1,8/9,1 %.

Отже, підставляючи відомі значення у формули (6.3, 6.2, 6.4, 6.1), отримаємо

$$V_{ПР} = 13 \cdot 7 \cdot 3,3 = 300,3 (\text{м}^3);$$

$$V_{ВЛЛ} = 0,8 \cdot 300,3 = 240,2 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$C_{НКМ} = \frac{80 + 10 + 5 + 5}{80/5 + 10/2,9 + 5/2,1 + 5/1,8} = 4,06 \text{ (\% об.)};$$

$$V = \frac{240,2}{100} 4,06 = 9,75 \text{ (м}^3\text{)}.$$

6.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи в умовах дії НС

На підприємствах, які виробляють або використовують вибухонебезпечні речовини, слід передбачати заходи на особливий період з максимально можливих скорочень запасів і термінів збереження таких речовин, що знаходяться на під'їзних шляхах підприємств, на проміжних складах і у технологічних ємностях, мінімально необхідних для функціонування виробництва.

Для зменшення необхідної кількості вибухонебезпечних речовин у особливий період потрібно передбачати, як правило, перехід на безбуферну схему виробництва. Злив вибухонебезпечних речовин в аварійні ємності слід передбачати, як правило, з використанням автоматичного ввімкнення зливних систем при обов'язковому його дублюванні пристроєм для ручного вмикання випорожнення небезпечних ділянок технологічних схем.

6.4 Висновки до розділу 6

Визначено об'єм вибухонебезпечної речовини, необхідного для створення вибухонебезпечної концентрації в приміщенні. Розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії НС.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень у магістерській роботі було отримано такі основні результати:

5G дійсно відкриває нові шляхи використання мобільної мережі на благо людства, надаючи користувачам послуги в різних сферах застосування більш ефективно і результативно. На рівні мобільної системи випадки використання, які раніше були можливі лише в окремій мережі, можуть поступово зближуватися з мобільною мережею, коли з'являються нові типи послуг, такі як можливість передачі даних за технологією URLLC. Спочатку голос був перенесений з фіксованої мережі на мобільну, потім широкосмуговий мобільний зв'язок, а 5G має потенціал для перенесення інших послуг на мобільну сторону, завдяки можливості розбиття мережі на частини.

У багатьох сферах 5G є важливим будівельним блоком і сходинкою для ще більш розширених можливостей, які можуть продовжити шлях, розпочатий 5G, як з боку радіозв'язку, так і з боку мережевого зв'язку. Для повітряного інтерфейсу це означає нові частотні діапазони і використання масивного MIMO і формування променя для використання новітніх радіотехнологій. На мережевому фронті, ймовірно, буде ще більше оптимізована природність і дружність хмар, що дозволить легше розгортати різні типи хмар, публічні і приватні, великі і малі, з можливістю об'єднувати пов'язані додатки в одну хмару. Для цього мережева сторона прагне до повністю гнучкої і розширюваної структури з широким спектром послуг.

Зокрема, для мобільного транзитного і магістрального зв'язку це цікавий етап, оскільки вимоги дуже високі: сувора часова чутливість магістрального зв'язку, реалізація мережевих зрізів, URLLC, що вимагає надвисокої надійності і низької затримки, контейнерні мережеві функції в хмарі, що вимагають великої гнучкості і динамічності від мобільного транзитного і магістрального зв'язку, а для високочастотного діапазону - велика кількість стільникових вузлів, інтегрованих в решту мережі. Всі ці напрямки розвитку повинні підтримувати

безкомпромісну безпеку з високою доступністю в мережевому домені. Безпека буде не просто важливою, а обов'язковою умовою, оскільки для більшості, якщо не для всіх додатків, мережа повинна бути надійною для всіх послуг, що надаються через неї. Успішна бізнес-модель також вимагає автоматизованих операцій, які дозволяють швидко надавати нові послуги мережевого підключення і мінімізувати складність в експлуатації.

Розглянули систему 5G і радіомережу 5G зсередини, а також нові технології та підходи, які впроваджує 5G, включаючи вже згаданий масовий радіосигнал MIMO, послугу URLLC, мережеве розщеплення і дезагрегацію радіомережі 5G. З точки зору оператора 5G розглянуто, які міркування є найбільш важливими як з технологічної, так і з економічної точки зору в мережі 5G, а потім конкретно в транзитному і магістральному зв'язку 5G.

Проаналізовано та узагальнено ключові вимоги до транзитного і проміжного зв'язку 5G на основі інформації, наданої 3GPP і двома попередніми главами. Пропускна здатність, очевидно, є ключовою вимогою для будь-якого транспортного зв'язку, і це перша вимога, яка спадає на думку. Іншими розглянутими питаннями були затримка, доступність, надійність, безпека і синхронізація, і всі вони зазнали значних удосконалень і змін порівняно з попередніми поколіннями. Оскільки транзитний і магістральний зв'язок значною мірою є аспектом впровадження, встановлення чітких вимог дозволяє створювати різні типи рішень відповідно до конкретних випадків.

Деякі з тем системи 5G заслуговують на подальше обговорення наслідків і значення для транспорту. Розподіл мережі на сегменти є основною новою розробкою в 5G, і це стосується також і транзитного транспорту. Ще однією сферою, пов'язаною з транспортом, є IAB, яка може бути дуже ефективним інструментом, що забезпечує зв'язок на рівні доступу 5G. Серед інших питань, які були розглянуті, були транспортні мережі NTN, URLLC і неопублічні мережі для промислових застосувань, а також розвиток "розумних" міст. Все це має або може мати великий вплив на транзитний і магістральний зв'язок 5G.

В економічній частині роботи були розраховані витрати на проведення досліджень та проведена оцінка важливості та наукової значимості роботи

В розділі "Охорона праці" проаналізовані умови праці в лабораторії для досліджень, виконано організаційно-технічні та санітарно-гігієнічні заходи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васильківський, М., Коломієць, А., & Будащ, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>
2. Levrau, L. and Remedios, D. Guidelines for a cost optimised 5G WDM-based fronthaul network. 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC).
3. Васильківський, М., Болдирева, О., Варгатюк, Г., & Будащ, М. (2023). Оптимальні сигнально-кодові конструкції для підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку 5G та 6G. Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2023. – № 2. (319). – С. 48–55. doi: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-48-55
4. М. Васильківський, О. Болдирева, Б. Климчук, і В. Говорун, «Оптимальні технології побудови волоконно-оптичних систем доступу», ВОТТП, вип. 2, с. 89–99, Чер 2023. doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-12
5. Lei W, Soong ACK, Liu J, Wu Y, Classon B, Xiao W, et al. 5G System design - an end to end perspective. Springer International Publishing; 2020.
6. Global System for Mobile Communications Association (GSMA) position paper on 5G Spectrum; March 2020.
7. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А. і Ксьондз, Н. 2023. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО. 52 (Ver 2023), 128-139. DOI:<https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-16>.
8. The CPRI Specification eCPRI 2.0. Common public radio interface: eCPRI interface specification; May 10, 2019.
9. Liu X. Optical communication technologies for 5G wireless. In: Optical fiber communication conference (OFC), Short course 444; 2019.

10. Bi Q. Ten trends in the cellular industry and an outlook on 6G. *IEEE Commun Mag* 2019;57 (12):31-6.
11. X Liu, N Deng. Chapter 17: Emerging optical communication technologies for 5G. In: Willner A, editor. *Optical fiber telecommunications VII*; 2019.
12. Liu X. Evolution of fiber-optic transmission and networking toward the 5G era. *iScience* 2019;22:489-506. Available from: [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(19\)30476-6.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(19)30476-6.pdf).
13. X Liu, N Deng. Chapter 17: Emerging optical communication technologies for 5G. In: Willner A, editor. *Optical fiber telecommunications VII*; 2019.
14. X. Wu, D. Zhang, Z. Ye, H. Lin, X. Liu. Real-time demonstration of 20 3 25Gb/s WDM-PON for 5G fronthaul with embedded OAM and type-B protection. In: *Optoelectronics and communications conference (OECC)*, Paper TuA3-2; 2019.
15. H. Li. Vision and trend analysis for transport networks in 5G era. In: *Asia Communications and photonics conference (ACP)*, Plenary Talk; 2020.
16. J. Li. Recent advances in next-generation optical transport networks. In: *European conference on optical communication (ECOC)*, Invited Talk in Workshop 14; 2020.
17. F. Saliou, L.A. Neto, G. Simon, F.N. Sampaio, A.E. Ankouri, M. Wang, et al. 5G & optics in 2020 - Where are we now? What did we learn? In: *European conference on optical communication (ECOC)*, Invited Talk We2J-1; 2020.
18. M. Filer. The coherent 400 Gb/s revolution. In: *Lightreading optical networking digital symposium*; May 28, 2020.
19. Ishimura S, Kao H, Tanaka K, Nishimura K, Suzuki M. SSBI-free 1024QAM single-sideband direct-detection transmission using phase modulation for high-quality analog mobile fronthaul. In: *Proceeding ECOC'2019*, post-deadline paper PD.1.2; 2019.
20. Che D. Digital SNR adaptation of analog radio-over-fiber links carrying up to 1048576-QAM signals. In: *Proceeding ECOC 2020*, post-deadline paper PDP 2.1; 2020.

21. Ji H, Sun C, Shieh W. Spectral efficiency comparison between analog and digital RoF for mobile fronthaul transmission link. *J Light Technol* 2020;38(20):5617[^]23.
22. Liu X. Hybrid digital-analog radio-over-fiber (DA-RoF) modulation and demodulation achieving a SNR gain over analog RoF of .10 dB at halved spectral efficiency. submitted to OFC 2021; 2021.
23. Liu X, Zeng H. Cascaded waveform modulation with an embedded control signal for high-performance mobile fronthaul, US patent 10,205,522 10; 2019.
24. Pilipetskii A, Bolshtyansky M, Foursa D, Sinkin O. SDM power-efficient ultra high-capacity sub-marine long haul transmission systems (tutorial). In: *Optical fiber communication conference (OFC) 2020*, paper M3G.5; 2020.
25. Kawahara H, Saito K, Nakagawa M, Kubo T, Seki T, Kawasaki T, et al. Real-time demonstration of 600Gbps/carrier WDM transmission and highly-survivable adaptive restoration on field installed fiber. In: *OECC/PSC2019*, TuB2-2, Fukuoka, Japan; 2019.
26. Hamaoka F, Sasai T, Saito K, Kobayashi T, Matsushita A, Nakamura M, et al. Dual-carrier 1-Tb/s transmission over field-deployed large-core pure-silica-core fiber link using real-time transponder. In: *OECC/PSC2019*, PDP1, Fukuoka, Japan; 2019.
27. Li J, Zhang A, Zhang C, Huo X, Yang Y, Zhang J, et al. Field trial of real time 200G and 400G flex-rate transmission using 69 Gbaud signal. In: *European conference on optical communications (ECOC)*, paper Th.1.A.2; 2019.
28. Yu Y, Wang G, Shen S, Wang S, Zhao C, Gui T, et al. Real-time demonstration of C-band 19.2Tb/s field trial by constellation shaping 16QAM in 2000-km G.654.E terrestrial link. in *European conference on optical communications (ECOC)*, P71; 2019.
29. Zhang H, Zhu B, Pfau T, Aydinlik M, Nadarajah N, Park S, et al. Real-time transmission of single-carrier 400Gb/s and 600Gb/s 64QAM over 200km-Span link. In: *European conference on optical communications (ECOC)*, paperTu.2.D.6; 2019.

30. Zhou YR, Smith K, Duff S, Wang H, Pan W, Hackett P, et al.. Field trial demonstration of real-time 1.2Tb/s (2 3 600Gb/s) optical channel over a live G.652 fiber link achieving net spectral efficiency of 8bit/s/Hz. In: Asia communications and photonics conference/international conference on information photonics and optical communications 2020 (ACP/IPOC), paper T2B.3; 2020.

31. Hamaoka F, et al. Dual-carrier 1-Tb/s transmission over field-deployed G.654.E fiber link using real-time transponder. IEICE Trans Commun 2020;E103-B(11):1183-9 VOL.

32. Tao M, Zheng J, Dong X, Zhang K, Zhou L, Zeng H, et al. Improved dispersion tolerance for 50G-PON downstream transmission via receiver-side equalization. In: Optical fiber communication conference, paper M2B.3; 2019.

33. Rosales R., et al. First demonstration of an E2 class downstream link for 50Gb/s PON at 1342nm. In: 2020 European conference on optical communications (ECOC), paper Tu2J-5; 2020.

34. Cheng N, Shen A, Luo Y, Zhang X, Cheng K, Steponick J, et al. Multi-rate 25/12.5/10-Gb/s burst-mode upstream transmission based on a 10G burst-mode ROSA with digital equalization achieving 20dB dynamic range and sub-100ns recovery time. In: 2020 European conference on optical communications (ECOC), paper Tu1J-7; 2020.

35. Li B, Zhang K, Zhang D, He J, Dong X, Liu Q, et al. DSP enabled next generation 50G TDM-PON. J Opt Commun Netw 2020;12:D1-8.

36. Zeng H, Shen A, Cheng N, Chand N, Liu X, Effenberger F. High performance 50G-PON burst-mode upstream transmission with fast burst synchronization and recovery. In: ITU-T SG15/Q2, Geneva; July 2019.

37. Zeng H, Shen A, Cheng N, Chand N, Liu X, Effenberger F. High-performance 50G-PON burst-mode upstream transmission at 25Gb/s with DSP-assisted fast burst synchronization and recovery. In: Asia communications and photonics conference, paper T1G.3, Chengdu, China; November 2019.

38. Shen A, Cheng N, Luo Y, Liu X. 50G-PON burst-mode upstream transmission at 25Gb/s using a commercially available 10G APD/TIA/AGC ROSA. In: Contribution C1737, ITU-T SG15/Q2, Geneva; February 2020.
39. Funada T, Tanaka N. G.hsp50Gpmd: preamble time of 50G-PON upstream burst-mode receiver. In: Contribution C1539, ITU-T SG15/Q2, Geneva; February 2020.
40. Li C, Chen J, Li Z, Song Y, Li Y, Zhang Q. Demonstration of symmetrical 50-Gb/s TDMPON in O-band supporting over 33-dB link budget with OLT-side amplification. *Opt Exp* 2019;2:18343-50.
41. Cheng N, Liu X, Shen A, Effenberger F. Reducing 50G-PON downstream dispersion penalty with a suitably configured booster SOA. In: Contribution D24, ITU-T SG15/Q2 Meeting; March 2021.
42. Le Cheminant G, Zhang K, Houtsma V, Harstead E, Liu X. TDEC (transmitter dispersion and eye-closure) method for equalizer-enabled 50G-PON. In: Contribution D37, Q2/15 Interim Meeting, Xi'an, China; April 2019.
43. Nettet D, Cano I, Leyba D, Le Cheminant G. Experimental investigation of modified TDEC approach to PON Tx characterization in G.HSP. In: Contribution D128, Q2/15 interim meeting, Dusseldorf, Germany; October 2019.
44. Liu X, Shen A, Cheng N. Jitter tolerance mask for 50G-PON. In: Contribution D12, ITU-T SG15/Q2 Meeting; February 2021.
45. Oksman V, Coomans W, Liu X, Shen A, Strobel R. Proposal for jitter specification. In: Contribution C-2590, ITU-T SG15/Q2; April 2021.
46. Liu X, Luo Y, Effenberger F. 50G-PON FEC codeword length options. In: Contribution C-1733, ITU-T SG15/Q2, Geneva; February 2020.
47. Ip E, et al., Field trial of vibration detection and localization using coherent telecom transponders over 380-km link, *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, post-deadline paper F3B.2; 2021.
48. Liu X. Advances in optical communication systems and networks in the 5G era. *Optoelectronics and Communications Conference (OECC)*, Plenary Talk; 2021.

49. Han Y, Wilson B, Amitai A. HSP LDPC performance curves. In: Contribution D13, ITU-T SG15/Q2 Meeting; May 2020.
50. Mahadevan A, et al. 50G PON FEC evaluation with error models for advanced equalization. In: Optical fiber communications conference and exhibition (OFC), paper Th1B.6; 2020.
51. Schaefer NFJ, Schedelbeck G, Strobel R. Correlated errors in G.HSP. In: Contribution D10, ITU-T SG15/Q2 meeting; May 12, 2020.
52. Liu X, Shen A, Cheng N, Luo Y, Effenberger F. Performance improvements in bandwidth-limited and digitally-equalized 50G-PON downstream transmission via block-interleaving over four LDPC codewords. In: Optical fiber communication conference, paper M3G.6; 2021.
53. Van Hoof W, Lefevre Y, Fredricx F. On the need for configurable bit interleaving for downstream 50GG.hsp. In: D16, ITU-T SG15/Q2 meeting; October 2020.
54. Shen A, Liu X, Effenberge F, Luo Y. Downstream synchronization state machine supporting OLT-configurable bit-interleaving in 50G-PON. In: D20, ITU-T SG15/Q2 meeting; October 2020.
55. Schaefer FJ, Schedelbeck G, Strobel R, Van Hoof W, Lefevre Y. G.HSP: ONU downstream syn-chronization state machine. In: Contribution to the ITU-T Q2 conference call on March 24, 2020.
56. Shen A, Liu X, Luo Y, Effenberger F. 50G-PON downstream synchronization state machine. In: D46, ITU-T SG15/Q2 Meeting; April 2020.
57. van Veen D, Houtsma V. Strategies for economical next-generation 50G and 100G passive optical networks [Invited]. IEEE/OSA J Opt Commun Netw 2020;12(1):A95-103.
58. Borkowski R, Straub M, Ou Y, Lefevre Y, Jeliü Z[~], Lanneer W, et al. World's first field trial of 100 Gbit/s flexible PON (FLCS-PON). In: European Conference On Optical Communications 2020, PDP2.2; 2020.

59. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

60. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.

61. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_prapor_0_00-7_15-18_01_ua.php.

62. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

63. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

64. ДБН В.2.5-28-20018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

65. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

66. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.

67. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>

68. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.

69. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
МАГІСТРАЛЬНА МЕРЕЖА 5G
назва магістерської кваліфікаційної роботи

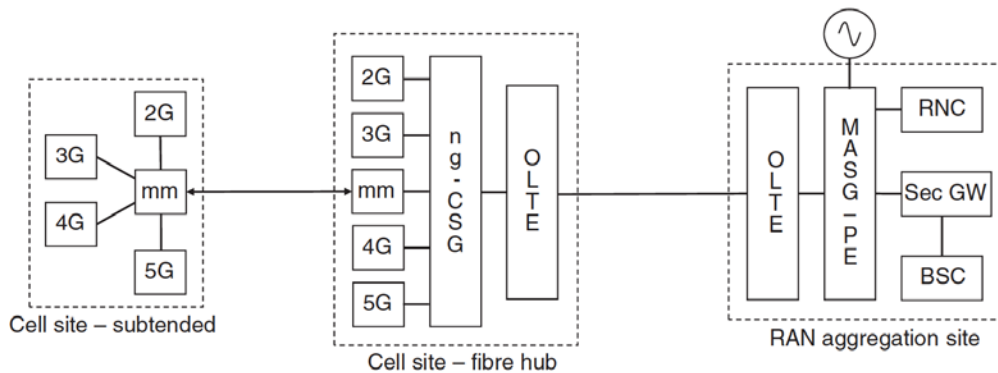


Рисунок 1 - Архітектура системи мобільного транзитного зв'язку 5G D-RAN

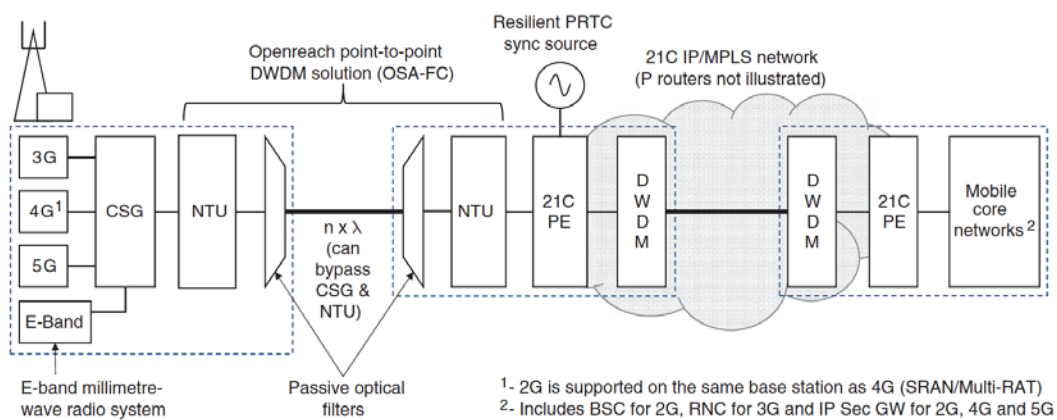


Рисунок 2 - Архітектура високорівневої мобільної мережі BT/EE multi-RAT

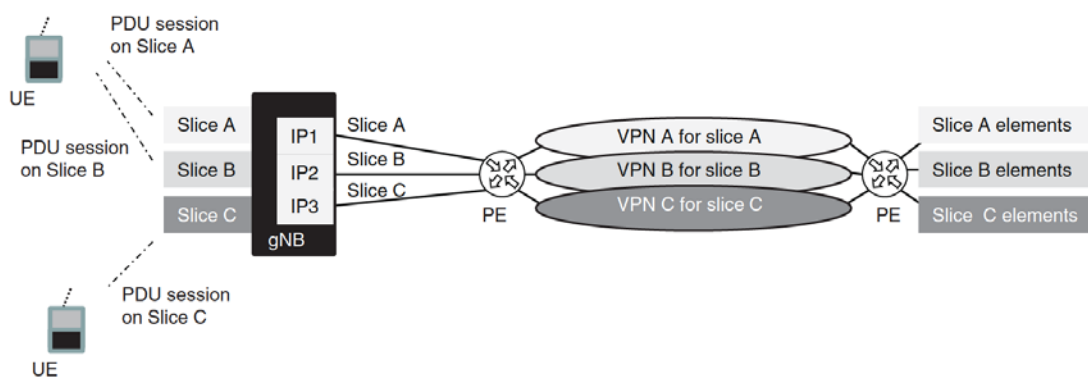


Рисунок 3 – Схема сегментування транспортної мережі

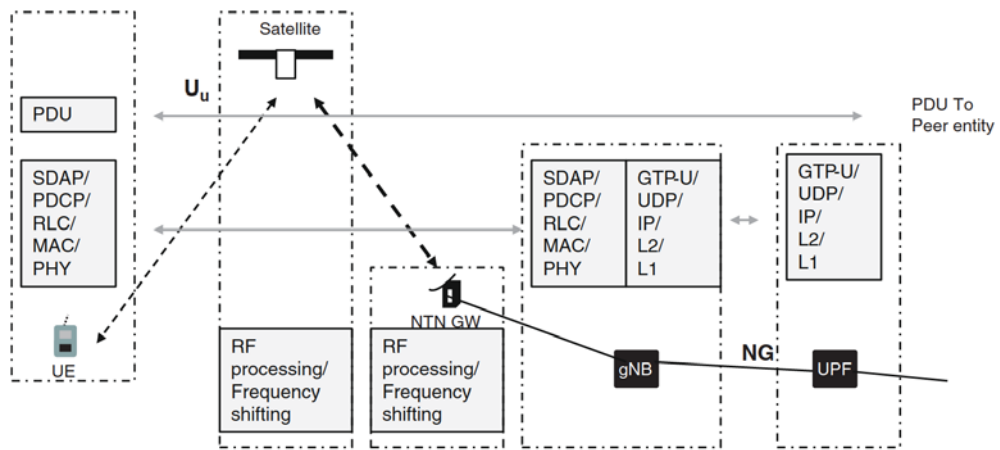


Рисунок 4 – Структура безперервного супутникового каналу передачі даних між користувачем та мережею

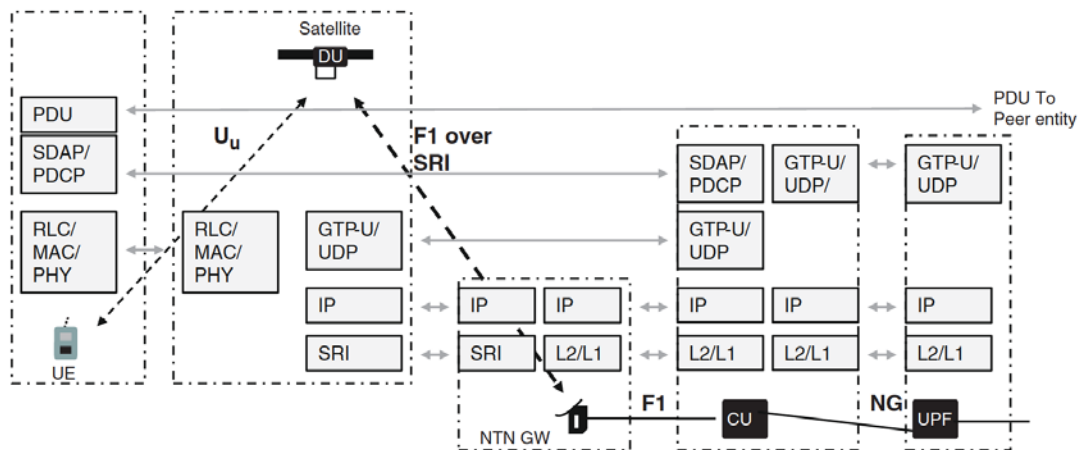


Рисунок 5 – Схема обробки та передавання даних gNB-DU на супутнику

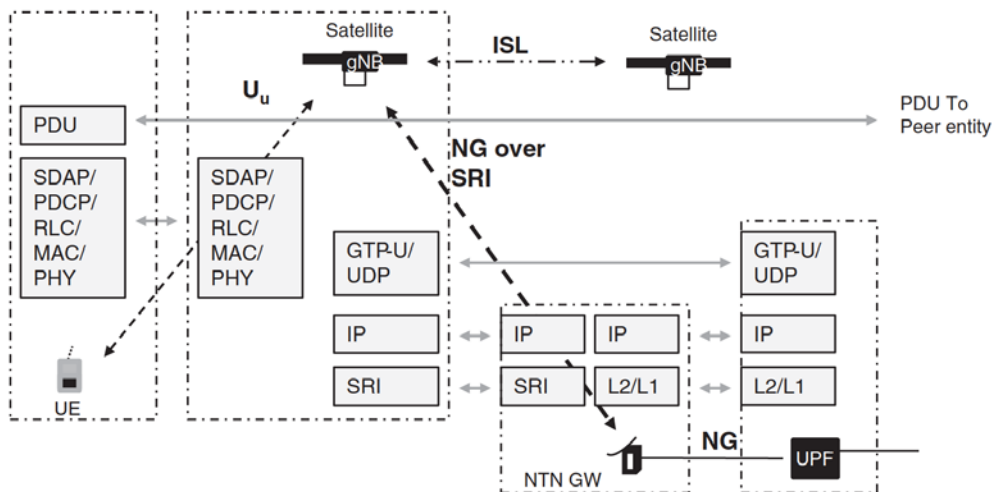


Рисунок 6 – Схема керування ресурсами gNB на супутнику

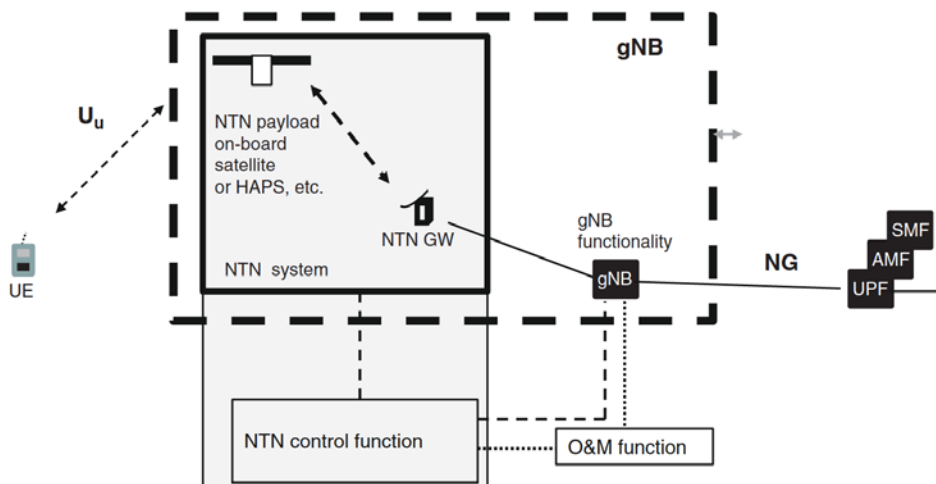


Рисунок 7 – Схема безперервного та ефективного бездротового зв'язку gNB у прозорій архітектурі мережі

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Магістральна мережа 5G

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет
інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 99,41 % Схожість 0,59 %

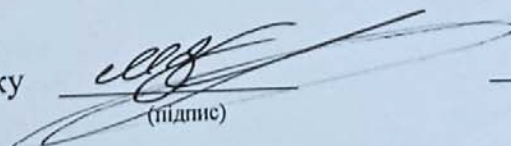
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

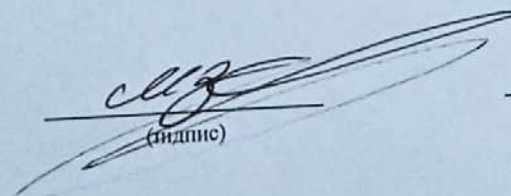
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Яровий Д.С.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)