

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Мережа доступу 5G»

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

Червоний А.О. Червоній А.О.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ

Васильківський М.В. Васильківський М.В.
«11» 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС

Осадчук В.С. 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

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Червоній Андрію Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Мережа доступу 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

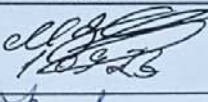
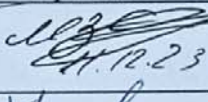
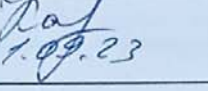
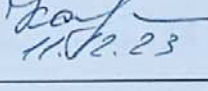
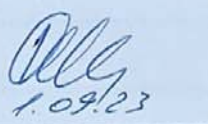
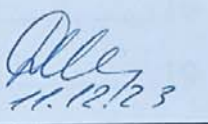
3. Вихідні дані до роботи ширина спектру робочих частот при носійній 6 ГГц - 100 МГц; ширина спектру робочих частот при носійній 39 ГГц - 800 МГц; ширина спектру робочих частот при носійній 50 ГГц - 3000 МГц; кількість базових станцій при носійній 6 ГГц - 50 на кв.км; кількість базових станцій при носійній 39 ГГц - 150 на кв.км; кількість базових станцій при носійній 50 ГГц - 300 на кв.км; спектральна ефективність радіоканалу при носійній 6 ГГц - 6 біт/с/Гц/стільник; спектральна ефективність радіоканалу при носійній 39 ГГц - 15 біт/с/Гц/стільник; спектральна ефективність радіоканалу при носійній 50 ГГц - 15 біт/с/Гц/стільник; пропускна здатність мережі при носійній 6 ГГц - 13 Гбіт/с/кв. км; пропускна здатність мережі при носійній 39 ГГц - 120 Гбіт/с/кв. км; пропускна здатність мережі при носійній 50 ГГц - 900 Гбіт/с/кв. км.

4. Зміст текстової частини: дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G; частотно-часові характеристики мережі доступу 5G; ефективне впровадження та експлуатація мереж 5G; забезпечення синхронізації в мережах 5G; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
схема сегментування мережі доступу; архітектура ІДТТ; схема взаємодії швидкісних комунікацій в мережі 5G; схема магістрального/середньوماгістрального доступу; схема інтелектуального

контролера в архітектурі O-RAN; схема ефективного керування інтерференцією в системах TDD та забезпечення оптимальної продуктивності мережі; оптимальна модель мереж мобільного зв'язку з точки зору використання ресурсів та забезпечення покриття.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|--|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Спеціальна частина | Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ |  18.09.23 |  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. | Дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G | 17.09.2023р. | |
| 3. | Частотно-часові характеристики мережі доступу 5G | 06.10.2023р. | |
| 4. | Ефективне впровадження та експлуатація мереж 5G | 27.10.2023р. | |
| 5. | Забезпечення синхронізації в мережах 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)

Червоній А.О.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Червоній А. О. Мережа доступу 5G – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 144 – стор., 56 – рис., 16 – табл., 58 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності, надійності, енергоефективності та інших ключових характеристик мережі доступу 5G для формування стратегії її подальшого вдосконалення та розвитку.

Здійснено аналіз функціональних параметрів мережі 5G, таких як пропускна здатність, затримка, енергоефективність, ідентифікація та вирішення конфліктів, керування ресурсами, інтеграція послуг.

Виконано визначення ефективності мережі 5G в різних умовах, таких як густина користувачів, обсяг передачі даних та відстань між пристроями та базовими станціями.

Розглянуто методи оптимізації та вдосконалення мережі 5G, включаючи удосконалення алгоритмів управління ресурсами, розробку нових технік маршрутизації, використання технологій машинного навчання тощо.

Здійснено удосконалення методів гнучкого впровадження та експлуатації мережі 5G для забезпечення адаптації до швидко змінного середовища та інновацій, включаючи можливість розширення та модифікації.

Виконано дослідження технічних засобів та протоколів для забезпечення синхронізації в мережах 5G. Включення моніторингу та систем корекції для підтримання оптимальної синхронізації.

Ключові слова: пропускна здатність; затримка; енергоефективність; алгоритмів керування ресурсами; оптимальна синхронізація.

ABSTRACT

UDC 621.391

Chervonii A. O. 5G Access Network - Master's thesis in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, Educational programme - Telecommunication Systems and Networks - Vinnytsia: VNTU, 2023. 144 p., 56 figs., 16 tables, 58 bibliography - in Ukrainian.

The purpose of the qualification work is to improve the efficiency, reliability, energy efficiency and other key characteristics of the 5G access network to formulate a strategy for its further improvement and development.

The functional parameters of the 5G network, such as bandwidth, latency, energy efficiency, conflict identification and resolution, resource management, and service integration, are analysed.

The efficiency of the 5G network is determined in different conditions, such as user density, data transmission volume and distance between devices and base stations.

Methods for optimising and improving the 5G network are considered, including improving resource management algorithms, developing new routing techniques, using machine learning technologies, etc.

Methods for flexible implementation and operation of the 5G network have been improved to ensure adaptation to a rapidly changing environment and innovation, including the possibility of expansion and modification.

Research on technical means and protocols to ensure synchronisation in 5G networks was carried out. Monitoring and correction systems are included to maintain optimal synchronisation.

Keywords: throughput; delay; energy efficiency; resource management algorithms; optimal synchronisation.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ..... | 5 |
| ВСТУП..... | 7 |
| 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 5G..... | 11 |
| 1.1 Транзитний і магістральний зв'язок в системі 5G | 11 |
| 1.2 Організація зв'язку в системі 5G..... | 12 |
| 1.3 Цілі та технології проектування системи 5G | 14 |
| 1.4 Методи підвищення ефективності мережі 5G..... | 16 |
| 1.5 Архітектура мережі доступу | 19 |
| 1.6 Висновки до розділу 1 | 28 |
| 2 ЧАСТОТНО-ЧАСОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ 5G..... | 30 |
| 2.1 Аналіз використання спектру для максимального покриття, ефективності та задоволення потреб різних видів послуг | 30 |
| 2.2 Підвищення продуктивності та ефективності мобільних мереж в контексті розвитку технології 5G | 32 |
| 2.3 Пропускна здатність мережі доступу..... | 36 |
| 2.4 Створення високопродуктивної мережі 5G..... | 38 |
| 2.5 Підвищення ефективності передачі даних в мережах 5G..... | 40 |
| 2.6 Забезпечення оптимальної продуктивності та задоволення потреб різноманітних користувачів та застосунків..... | 43 |
| 2.7 Забезпечення ефективної маршрутизації інформаційного трафіку через різні мережі..... | 46 |
| 2.8 Забезпеченні високоякісного обслуговування додатків миттєвого реагування та безперервної доступності..... | 48 |
| 2.9 Відкрита RAN мережа | 51 |
| 2.10 Удосконалення мобільних мереж доступу до нових технологій та послуг | 53 |
| 2.11 Технологічний розвиток 5G | 56 |

| | |
|--|-----|
| | 3 |
| 2.12 Висновки до розділу 2 | 57 |
| 3 ЕФЕКТИВНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ МЕРЕЖ 5G | 59 |
| 3.1 Вимоги до продуктивності та гнучкості мережі доступу | 59 |
| 3.2 Доступність та надійність мобільної мережі..... | 74 |
| 3.3 Висновки до розділу 3 | 91 |
| 4 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МЕРЕЖАХ 5G | 92 |
| 4.1 Коригування помилок часового вирівнювання в мережах TDD..... | 92 |
| 4.2 Часове коригування у системах МІМО..... | 103 |
| 4.3 Висновки до розділу 4 | 103 |
| 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА..... | 105 |
| 5.1 Оцінювання наукового ефекту..... | 105 |
| 5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи..... | 109 |
| 5.2.1 Витрати на оплату праці..... | 109 |
| 5.2.2 Відрахування на соціальні заходи | 112 |
| 5.2.3 Сировина та матеріали..... | 112 |
| 5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі..... | 114 |
| 5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт | 115 |
| 5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт | 116 |
| 5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень | 117 |
| 5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей | 118 |
| 5.2.9 Службові відрядження..... | 119 |
| 5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації | 120 |
| 5.2.11 Інші витрати..... | 120 |
| 5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати..... | 121 |
| 5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи | 122 |
| 5.4 Висновок до розділу 5..... | 124 |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 125 |
| 6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи..... | 126 |

| | |
|---|-----|
| | 4 |
| 6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії | 128 |
| 6.2.1 Мікроклімат | 128 |
| 6.2.2 Склад повітря робочої зони..... | 129 |
| 6.2.3 Виробниче освітлення..... | 130 |
| 6.2.4 Виробничий шум..... | 131 |
| 6.2.5 Виробничі випромінювання..... | 132 |
| 6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Визначення параметрів захисту в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій..... | 133 |
| 6.3.1 Дія радіації на живі організми | 133 |
| 6.3.2 Визначення часу закінчення дезактивації місцевості, зараженої внаслідок аварії на АЕС..... | 134 |
| 6.4 Висновки до розділу 6 | 136 |
| ВИСНОВКИ..... | 137 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 139 |
| ДОДАТКИ..... | 145 |
| Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА | 146 |
| Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень | 150 |

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. Актуальність досліджень мереж доступу 5G визначається кількома ключовими факторами, які впливають на сучасне суспільство та технологічний прогрес.

Мережі 5G обіцяють надзвичайно високу швидкість передачі даних та широкосмуговий зв'язок. Це важливо для задоволення зростаючих потреб у високоякісному мультимедійному контенті, стрімінгу відео, ігор, а також для розвитку нових технологій, таких як віртуальна реальність. Впровадження 5G є ключовим елементом розвитку розумних міст і транспортних систем. Висока швидкість та низька затримка дозволяють реалізацію технологій автономних автомобілів, систем управління транспортом та інфраструктурою.

Мережі 5G створюють ідеальне середовище для розвитку Інтернету Речей. Забезпечуючи підтримку великої кількості підключених пристроїв, 5G дозволяє розширювати застосування IoT в різних галузях, включаючи промисловість, сільське господарство, охорону здоров'я та багато інших. Використання 5G може покращити ефективність використання радіочастотного спектру та забезпечити масштабованість мережі для вирішення ростучого обсягу трафіку та кількості підключених пристроїв.

Дослідження в галузі мереж доступу 5G сприяє інноваціям та гнучкості. Відкриті стандарти та нові архітектури, такі як Open RAN (O-RAN), дозволяють створювати більш гнучкі та інтегровані мережі. Розгортання мереж 5G створює нові можливості для бізнес-моделей операторів мобільних мереж та інших гравців у галузі зв'язку. Конкуренція за якість послуг та покращені можливості зв'язку сприяє активному дослідженню [1-3].

Розвиток нових технологій також створює виклики у сфері кібербезпеки. Дослідження в області безпеки 5G є важливим, оскільки мережі стають більш складними та піддаються новим видам загроз. Узагальнюючи, дослідження

мереж доступу 5G є актуальними через їхній потенціал змінювати різні сфери життя та суттєвий вплив на технологічний прогрес.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G є ключовим етапом для розуміння та оптимізації її роботи.

Дослідження дозволяє виявити області, де можна покращити ефективність мережі, включаючи пропускну здатність, затримку та інші ключові показники. Аналіз функціональних параметрів допомагає встановити та вдосконалити параметри QoS для задоволення вимог різноманітних послуг. Дослідження витрат енергії та функціональних аспектів, що впливають на енергоспоживання, сприяє розробці енергоефективних рішень. Вивчення параметрів, пов'язаних з надійністю та безпекою, допомагає виявляти потенційні ризики та розробляти заходи для їх запобігання [4-6].

Дослідження дозволяє враховувати змінні умови експлуатації, такі як велика щільність пристроїв, рухливість користувачів і т.д. Вивчення використання радіоресурсів, мережевих ресурсів та інших ресурсів для максимізації ефективності та зниження витрат.

Дослідження функціональних параметрів дозволяє адаптувати мережу до новітніх технологій та стандартів, таких як розвиток 5G. Аналіз функціональних параметрів допомагає знаходити способи оптимізації витрат на обслуговування та підтримку мережі. Дослідження дозволяє вивчити, як мережа 5G взаємодіє з іншими мережами, такими як 4G, Wi-Fi, для забезпечення безперервного зв'язку.

Необхідність дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G впливає із складності її структури та постійного розвитку технологій, що вимагає постійного вдосконалення та оптимізації [7, 8]. 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.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності, надійності, енергоефективності та інших ключових характеристик

мережі доступу 5G для формування стратегії її подальшого вдосконалення та розвитку.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G із врахуванням складності її структури та постійного розвитку технологій, що вимагає постійного вдосконалення та оптимізації;

- дослідження ефективності та продуктивності мережі доступу 5G у різних умовах експлуатації, таких як густина користувачів, тип передачі даних та відстань до базової станції;

- методи ефективного впровадження та експлуатації мережі 5G із врахуванням постійного вдосконалення, а також гнучкості для адаптації до швидко змінюючогося середовища та технологічних інновацій;

- методи забезпечення синхронізації в мережах 5G із використанням різноманітних технічних засобів та протоколів, а також постійного моніторингу та корекції для забезпечення оптимальної продуктивності мережі.

З урахуванням викладеного тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною.

Об'єктом дослідження є мережі доступу 5G максимальної продуктивності для задоволення вимог різних застосувань.

Предметом дослідження є методи вдосконалення мереж доступу 5G для забезпечення різних вимог та викликів.

Методи досліджень базуються на використанні: методів моделювання та симуляції мереж для вивчення їхньої роботи в різних умовах; методів тестування продуктивності мережі; методів машинного навчання для аналізу великих обсягів даних та виявлення патернів у роботі мережі; методів оцінювання ефективності та надійності заходів безпеки, використовуваних в мережах доступу 5G.

Новизна одержаних результатів:

Дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G враховує кілька ключових аспектів, що стосуються складності структури та динамічного розвитку технологій.

Здійснено аналіз функціональних параметрів мережі 5G, таких як пропускна здатність, затримка, енергоефективність, ідентифікація та вирішення конфліктів, керування ресурсами, інтеграція послуг.

Виконано визначення ефективності мережі 5G в різних умовах, таких як густота користувачів, обсяг передачі даних та відстань між пристроями та базовими станціями.

Розглянуто методи оптимізації та вдосконалення мережі 5G, включаючи удосконалення алгоритмів управління ресурсами, розробку нових технік маршрутизації, використання технологій машинного навчання тощо.

Здійснено удосконалення методів гнучкого впровадження та експлуатації мережі 5G для забезпечення адаптації до швидко змінного середовища та інновацій, включаючи можливість розширення та модифікації.

Виконано дослідження технічних засобів та протоколів для забезпечення синхронізації в мережах 5G. Включення моніторингу та систем корекції для підтримання оптимальної синхронізації.

Вказані аспекти дослідження допомагають зрозуміти, як мобільні мережі 5G працюють в різних умовах та як можна постійно вдосконалювати їхню ефективність та надійність.

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 ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 5G

1.1 Транзитний і магістральний зв'язок в системі 5G

При наданні послуг 5G транспорт на магістральному і транзитному рівнях є невід'ємною і важливою частиною інфраструктури системи 5G.

Елементи мобільної мережі 5G як в ядрі 5G, так і в радіоканалі 5G включають IP-кінцеві точки для зв'язку з одноранговими мережами; потім вони з'єднують магістральні або транзитні мережі, які працюють як власний мережевий домен, із засобами фізичного рівня, такими як оптоволоконний кабель і мережеві пристрої, які відокремлені від елементів мобільної мережі і мають власне мережеве управління.

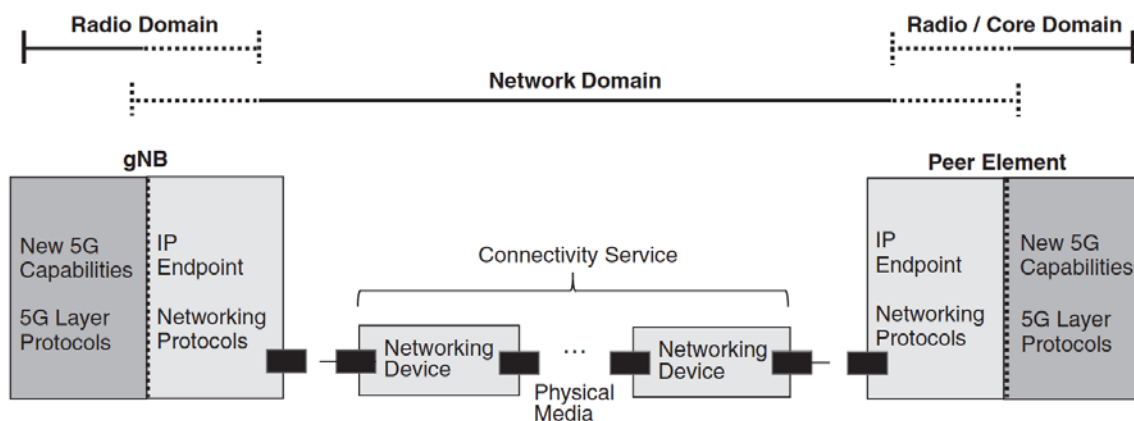


Рисунок 1.1 – Мережевий домен в системі 5G.

На рисунку 1.1 показано, як gNB взаємодіє з одноранговим елементом, який може бути іншим елементом 5G RAN або елементом опорної мережі 5G. Мережеві пристрої та фізичні транспортні середовища забезпечують необхідне підключення, яке в багатьох випадках корисно абстрагувати як послугу підключення.

Кінцеві IP-пристрої gNB, пов'язані з ними процеси і IP-інтерфейси знаходяться дещо в сірій зоні між радіо- і мережевим доменом: вони є частиною радіодомену в тому сенсі, що вони є частиною базової станції. Вони також є частиною мережевої області, оскільки обробляються мережеві протоколи, а не радіопротоколи.

Часто радіоелементи 5G (включаючи IP-кінцеві точки) адмініструються радіокомандою, а зовнішні мережеві пристрої - транспортною командою. У мережевому домені пристрої можуть додатково експлуатуватися виділеними командами на основі компетенції (наприклад, оптичний рівень управляється одним пулом компетенції, бездротова передача - іншим, а IP-рівень - ще однією командою експертів).

В МКР термін "транспорт" використовується як взаємозамінний з терміном "мережа" для позначення протоколів від транспортного фізичного рівня і засобів передачі даних до рівня IP, а також протоколів, розташованих над рівнем IP, таких як UDP і SCTP. Протоколи рівня 5G включають, наприклад, GTP-U і прикладні протоколи, такі як NG-AP, а також всі внутрішні радіопротоколи 5G RAN, такі як PDCP, RLC, MAC і радіо L1.

Транзитний зв'язок відноситься до мережевого інтерфейсу ядра RAN (NG2, NG3), проміжний зв'язок - до внутрішнього інтерфейсу F1 RAN (який є високорівневою точкою розділення транзитного зв'язку, визначеною 3GPP), а прямий зв'язок - до внутрішньої низькорівневої точки розділення транзитного зв'язку RAN (яка визначена O-RAN).

1.2 Організація зв'язку в системі 5G

Послуга зв'язку надається власними силами транспортної команди або використовується послуга зв'язку третьої сторони. Часто використовується комбінація цих двох варіантів - деякі рівні мережі або географічні райони обслуговуються власними транспортними засобами, тоді як інші покладаються на зовнішніх постачальників послуг.

Угоди про рівень обслуговування (SLA) описують основні характеристики послуги на рівні інтерфейсу "користувач-мережа" (User-to-Network Interface, UNI). MEF (Metro Ethernet Forum) - це організація, що займається стандартизованими визначеннями послуг, які є корисними для транзитного і магістрального зв'язку 5G.

Концепція послуги зв'язку включає в себе CE (Customer Equipment) і PE (Provider Edge) - CE означає обладнання на стороні клієнта, а PE - одноранговий елемент на стороні постачальника послуг. Ця термінологія використовується, наприклад, в IP-мережах VPN.

Коли послуга абстрагована, користувач послуги агностично ставиться до того, як реалізована фактична мережа і яким є поточний робочий стан окремих мережевих зв'язків і вузлів, що лежать в її основі. Це спрощує багато питань для користувача, оскільки йому не потрібно турбуватися про деталі реалізації.

Аспекти реалізації іноді стають видимими, наприклад, коли змінюється основний шлях мережі, що призводить до зміни відчутної затримки, або коли виникають мережеві аномалії, такі як бітові помилки. Поки вони знаходяться в межах SLA послуги, користувач не повинен бути стурбований. Важливою є можливість контролювати відповідність фактично отриманого рівня обслуговування узгодженому SLA, за який користувач платить.

При наданні послуг на рівні пакетів існує багато можливих тем, що впливають на якість обслуговування. Зрештою, можна орендувати все волокно, і в цьому випадку користувач має тверду гарантію і може вирішити використовувати повну пропускну здатність без перешкод з боку інших джерел трафіку, але це не у всіх випадках можливо, і пропускну здатність волокна може бути розподілена по довжинах хвиль або по пакетних (IP) вузлах.

З точки зору реалізації транзитного і магістрального зв'язку, бездротові пристрої, фотонні пристрої і комутатори, маршрутизатори і шлюзи безпеки рідко поставляються одним і тим же виробником. Взаємодія різних виробників забезпечується пристроями, що відповідають відповідним стандартам, а для гарантування коректної роботи необхідне тестування на сумісність. Спрощення

рішення може призвести до значних переваг, але досягти цього нелегко. Відкриті інтерфейси та підхід до програмованої мережі є ключовими для мережевої інтеграції, ефективної експлуатації та запланованої продуктивності.

Придбання ділянок і прав на прокладання волоконно-оптичних кабелів коштує дорого і займає багато часу, тому одним з можливих варіантів є розподіл транспорту - особливо фізичних ресурсів, таких як оптоволокно, а також, можливо, і операцій на більш високих рівнях - таким чином, щоб одна організація володіла і керувала мережею. Цей суб'єкт може бути нейтральним хостом, тобто стороннім "незалежним суб'єктом", який пропонує послуги кільком орендарям.

Всі ці аспекти впливають на транзитний і магістральний зв'язок 5G, який на практиці є мультитехнологічним і мультипостачальницьким, з декількома можливими операційними моделями.

1.3 Цілі та технології проектування системи 5G

Радіо 5G є важливим кроком у розвитку можливостей мобільних мереж. Досі мобільні мережі в основному забезпечували зв'язок для смартфонів, планшетів і ноутбуків. 5G введе традиційний мобільний широкосмуговий зв'язок на новий рівень з точки зору швидкості передачі даних, пропускну здатності та доступності.

Крім того, 5G забезпечить додаткові можливості, включаючи масове підключення до Інтернету речей (IoT) і критично важливий зв'язок. Цілі 5G проілюстровані на рисунку 1.2. 5G - це не лише новий радіосигнал, нова архітектура чи ядро, але й кількість нових варіантів використання. Очікується, що 5G матиме фундаментальний вплив на все суспільство з точки зору підвищення ефективності, продуктивності і безпеки. Мережі 4G були спроектовані і розроблені в основному телекомунікаційними операторами і постачальниками для використання в смартфонах. Набагато більший інтерес до мереж 5G проявляють інші сторони, включаючи різні галузі промисловості та

міста, щоб зрозуміти можливості 5G і сприяти його впровадженню. 5G - це можливість з'єднати все в майбутньому. Радіо 5G може принести значні переваги з точки зору продуктивності та ефективності мережі, див. підсумок на рис. 1.3. Ми очікуємо значно вищу швидкість передачі даних - до 20 Гбіт/с, значно нижчу вартість біта, вищу спектральну ефективність, вищу енергоефективність мережі та меншу затримку. Значення базуються на наступних припущеннях: ● Найкоротший час передачі на рівні 5G становить <0,1 мс, що забезпечує час передачі туди і назад 1 мс. Енергоефективність передбачає, що середня пропускна здатність трисекторної макро-базової станції на 100 МГц у годину завантаженості становить 1 Гбіт/с, частка завантаженості - 7%, а середнє енергоспоживання базової станції - 2 кВт. Покращення ефективності в 10 разів порівняно з LTE досягнуто завдяки методам енергозбереження при низькому навантаженні та широкопasmовій несучій до 100 МГц в діапазоні 3,5 ГГц. Пікова швидкість 1,5 Гбіт/с передбачає використання TDD з модуляцією 4×4MIMO і 256QAM у смузі 100 ГГц, а пікова швидкість 5 Гбіт/с передбачає використання TDD з модуляцією 2×2MIMO у смузі 800 МГц. Спектральна ефективність 10 біт/с/Гц/стільник передбачає використання масивного формування променя MIMO (Multiple Input Multiple Output) і чотирьох антенних пристроїв. Типова ефективність низхідної лінії зв'язку LTE становить 1,5-2,0 біт/с/Гц/соту в реальних мережах і +50% більше при використанні 4×4MIMO [10-13].

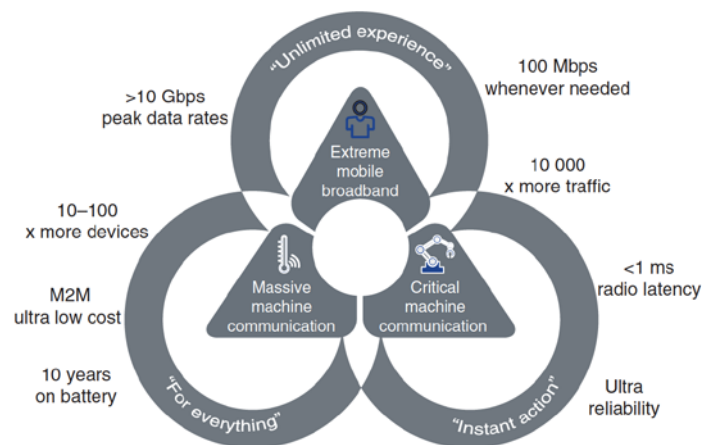


Рисунок 1.2 – Функціональні параметри мереж 5G

| Gain vs LTE | Target value | Technology |
|-----------------------------|-----------------|--|
| 10 times lower latency | <1 ms | <ul style="list-style-type: none"> • New radio frame design • Distributed architecture |
| 10 times energy efficiency | <0.01 kWh/GB | <ul style="list-style-type: none"> • Wideband carrier • Lean carrier |
| 5 times data rates | 1.5–5.0 Gbps | <ul style="list-style-type: none"> • Large bandwidth • 4 times 4 MIMO |
| 3 times spectral efficiency | >10 bps/cell/Hz | <ul style="list-style-type: none"> • Massive MIMO • Wideband carrier |

Рисунок 1.3 – Класифікація характеристик технології 5G

1.4 Методи підвищення ефективності мережі 5G

Високі цілі мереж 5G вимагають низки нових технологій. Основні нові технологічні компоненти показані на рисунку 1.4.

1) Новий спектр. Дуже високі швидкості передачі даних (до 5-10 Гбіт/с) вимагають пропускну здатності до 800 МГц, яка доступна у більш високих частотних діапазонах. 5G - це перша радіотехнологія, призначена для роботи в будь-яких частотних діапазонах від 450 МГц до 90 ГГц. Низькі діапазони потрібні для гарного покриття, а високі - для високої швидкості передачі даних і пропускну здатності.

Частоти вище 30 ГГц мають довжину хвилі <1 см і зазвичай називаються міліметровими хвилями (mmWs). Іноді в позначення ммВт включають також нижчі частоти (24-28 ГГц). Специфікації LTE не визначені для діапазону вище 6 ГГц.

2) Масивне MIMO з формуванням променя значно збільшує спектральну ефективність і покриття мережі. Формування променя стає більш практичним на більш високих частотах, оскільки розмір антени залежить від довжини хвилі. На практиці масивне MIMO може використовуватися на частотах вище 2 ГГц на базових станціях і на частотах до ммВт навіть у пристроях. Масивне MIMO буде частиною 5G з першого дня, що дозволить уникнути будь-яких проблем із

застарілими пристроями. Користувацьке формування променя не підтримувалося в першій версії LTE, а було додано лише пізніше в 3GPP [14-16].

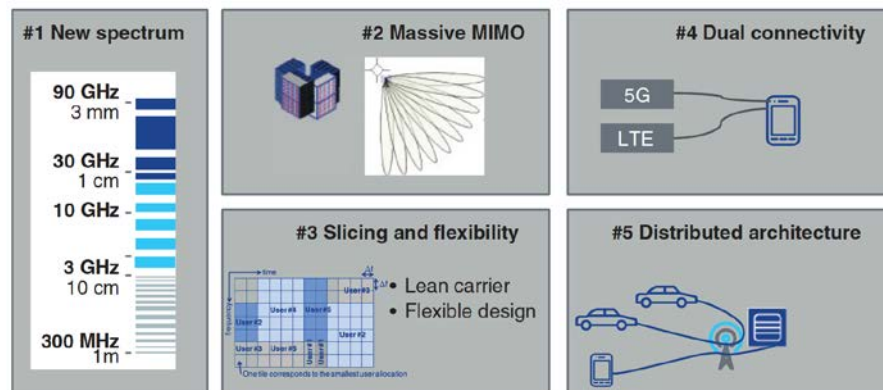


Рисунок 1.4 – Основні компоненти технології 5G

3) Гнучкий дизайн повітряного інтерфейсу і нарізка мережі. Фізичний і протокольний рівні в 5G потребують гнучкого дизайну, щоб підтримувати різні варіанти використання, вертикальні сегменти, різні частотні діапазони і максимізувати енергетичну і спектральну ефективність. Розподіл мережі на сегменти дозволить створити віртуальні мережі для різних сценаріїв використання в межах однієї мережі 5G.

4) Подвійне підключення. 5G може бути розгорнута як автономна система, але частіше за все 5G розгортається разом з LTE. Пристрій 5G може мати одночасне підключення до 5G і LTE. Подвійне підключення може збільшити швидкість передачі даних користувача і підвищити надійність з'єднання.

5) Розподілена архітектура з хмарною гнучкістю. Типова архітектура в мережах LTE повністю розподілена в радіодіапазоні і повністю централізована в опорній мережі. Низька затримка вимагає наближення контенту до радіомережі, що призводить до локального прориву і периферійних обчислень з множинним доступом (MEC). Масштабованість вимагає використання переваг хмарних технологій в радіомережах з периферійною і локальною хмарною архітектурою. 3GPP завершив першу версію специфікацій 5G у грудні 2017 року, а до кінця 2018 року було заморожено специфікації та досягнуто стабільності специфікацій

для NSA (Non-Standalone Architecture). Нижче ми перераховуємо основні рішення:

- Форма сигналу. Рішення для низхідної лінії зв'язку - це форма сигналу на основі OFDM (ортогонального мультиплексування з частотним розділенням каналів) з циклічним префіксом (CP), який схожий на форму сигналу LTE. Форма сигналу висхідної лінії зв'язку також є OFDM з однією несучою (SC-FDMA/DFT-S-OFDM) для розширення покриття. Рішення для висхідної лінії зв'язку відрізняється від LTE, де у висхідній лінії використовується лише одна несуча. Наявність подібних рішень для низхідної і висхідної лінії зв'язку в 5G спрощує формування променя за допомогою зворотного каналу, уникнення перешкод, зв'язок між пристроями (side-link) і внутрішньосмуговий транзит. В OFDM спостерігається зниження покриття на 1-2 дБ порівняно з однесучою системою, тому у висхідній лінії зв'язку 5G також необхідна однесуча система. Кодування каналів. Канали даних використовують кодування з перевіркою парності низької щільності (LDPC), а канали управління - полярне кодування або кодування Ріда-Мюллера в залежності від кількості біт.

Обидва рішення кодування відрізняються від LTE, де канали передачі даних використовують турбо-кодування, а канали управління - згорткове кодування і кодування Ріда-Мюллера. Основною причиною використання LDPC є складність декодування: для процесу декодування за допомогою LDPC потрібно значно менше площі кремнію, ніж для декодування за допомогою Turbo. LDPC також використовується в останніх специфікаціях IEEE Wi-Fi, але є деякі відмінності між 3GPP та IEEE у використанні LPDC. Рішення щодо кодування каналу управління було менш критичним через малу швидкість передачі даних в каналі управління. Нумерологія 3GPP показана в таблиці 1.1. 5G розроблений для підтримки ряду інтервалів між піднесучими і інтервалів планування, залежно від вимог до пропускної здатності і затримки. Інтервали між піднесучими між 15 кГц і 120 кГц визначені у версії 15 для каналів передачі даних і 240 кГц для сигналу синхронізації (SS). Вузькі піднесучі інтервали використовуються з вузькою смугою пропускання 5G і краще підходять для екстремального покриття.

Якщо розглянути типове розгортання 5G в діапазоні 3,5 ГГц, то смуга пропускання може становити 40-100 МГц, а відстань між піднесучими - 30 кГц. Відповідні показники для LTE становлять 20 МГц смуги пропускання і 15 кГц піднесучих. Відстань між піднесучими в 5G розрахована на 2^N , кратні 15 кГц. Якщо довжина слоту становить $>0,125$ мс у вузькосмугових випадках і потрібна низька затримка, то можна використовувати так званий міні-слот, де час передачі коротший, ніж один слот. Також можна об'єднати кілька слотів разом [17-20].

Таблиця 1.1 - Нумерологія 5G у версії 3GPP 15

| Subcarrier spacing [kHz] | 15 | 30 | 60 | 120 | 240** |
|-----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Symbol duration [μ s] | 66.7 | 33.3 | 16.6 | 8.33 | 4.17 |
| Nominal CP [μ s] | 4.7 | 2.41 | 1.205 | 0.60 | 0.30 |
| Nominal max carrier BW [MHz] | 50 | 100 | 200 | 400 | — |
| Max FFT size | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | — |
| Min scheduling interval (symbols) | 14 | 14 | 14 | 14 | — |
| Min scheduling interval (slots)* | 1 | 1 | 1 | 1 | — |
| Min scheduling interval (ms) | 1.0 | 0.5 | 0.25 | 0.125 | — |

1.5 Архітектура мережі доступу

Загальна архітектура системи 5G була перероблена відповідно до наступних ключових принципів:

- Бездержавні основні мережеві об'єкти
- Розділення управління та обробки даних
- Підтримка як архітектури, орієнтованої на дані, так і на послуги
- Підтримка централізованого зберігання даних
- Підтримка локального та централізованого надання послуг
- Мінімізація доступу та залежності від основної мережі

Загальна архітектура показана на рисунку 1.5, що ілюструє окремі елементи площини управління та площини користувача, а також окреме зберігання даних в мережі.

Площина управління має наступні основні елементи: • Функція управління доступом і мобільністю (AMF), що охоплює функціональність управління мобільністю на стороні опорної мережі, а також є закінченням для інтерфейсу площини управління RAN до ядра (NG2 на рисунку 1.6). Крім того, автентифікація та авторизація здійснюються в AMF, і, відповідно, мережа NAS закінчується в AMF. Функція управління сеансами (Session Management Function, SMF), що охоплює функціональність роумінгу, розподіл і управління IP-адресами UE, а також вибір і управління функцією користувачької площини.

SMF також є кінцевою точкою для функцій управління політикою і тарифікації. Функція управління політикою (Policy Control Function, PCF), що забезпечує правила політики для функцій площини управління.

PCF отримує інформацію про абонента від функцій зберігання даних. Локальні та централізовані шлюзи - функції площини користувача (User Plane Functions, UPF) - які є точками з'єднання у зв'язку з мобільністю. UPF охоплюють маршрутизацію і переадресацію пакетів, а також піклуються про забезпечення якості обслуговування для даних користувача. Можливі перевірки пакетів і забезпечення дотримання правил політики також охоплюються UPF [23].

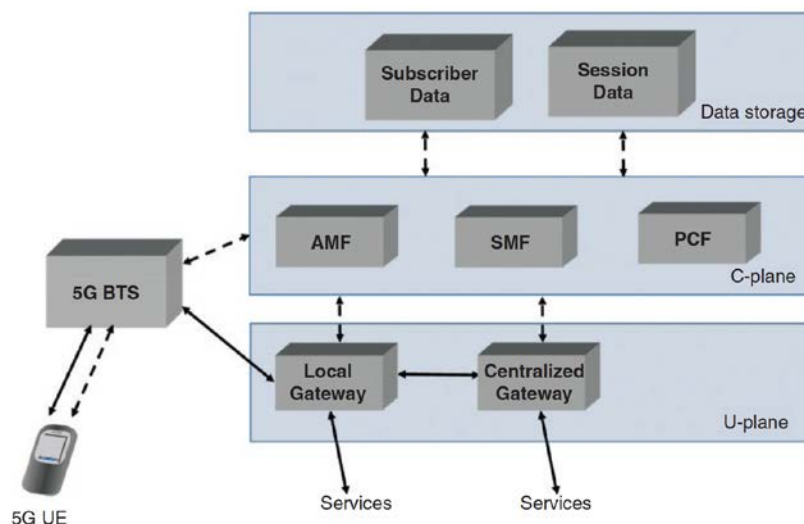


Рисунок 1.5 – Загальна архітектура мережі 5G.

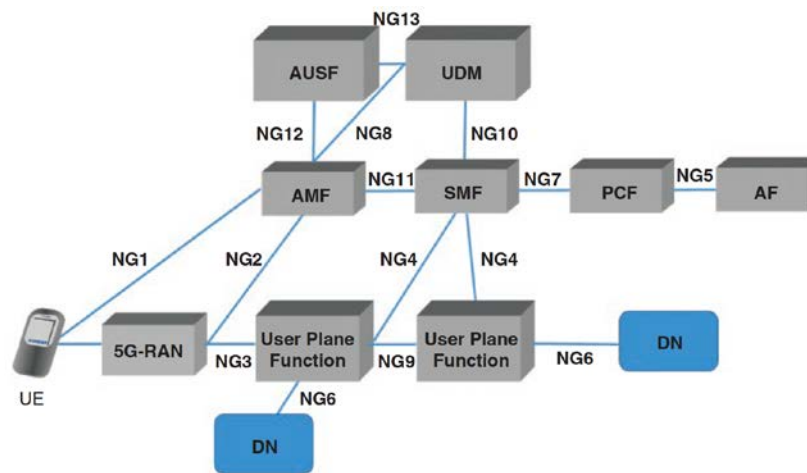


Рисунок 1.6 – Архітектура 5G з ключовими точками відліку

Основні опорні точки в архітектурі 5G показані на рисунку 1.6, де уніфіковане управління даними (Unified Data Management, UDM) відповідає за зберігання і обробку облікових даних для автентифікації. Інша інформація про підписку також зберігається в UDM.

Можна виділити наступні основні опорні точки, повний перелік яких можна знайти в 3GPP TR 23.799.

NG1: Контрольна точка між UE і AMF, що відображає в основному сигналізацію NAS між UE і AMF.

NG2: Опорна точка між (R)AN і AMF, що відповідає сигналізації від 5G RAN (в деяких випадках може також бути від LTE RAN) до AMF.

NG3: Контрольна точка між (R)AN і UPF, через яку передаються дані користувацької площини між RAN і ядром. Це схоже на інтерфейс S1-U з LTE, як описано раніше в цьому розділі.

NG4: Контрольна точка між SMF і UPF.

NG5: Опорна точка між PCF і прикладною функцією (AF).

NG6: опорна точка між UPF і мережею передачі даних (DN). Як показано на рисунку 1.6, DN може бути локальною у випадку послуг, які виконуються локально або мають вимоги до виконання локально, наприклад, через жорсткі вимоги до затримки.

NG7: Референтна точка між SMF та PCF.

NG8: Контрольна точка між UDM та AMF. Це дозволяє отримувати дані користувача та дані сеансу.

NG9: Контрольна точка між двома основними UPF.

NG10: Контрольна точка між UDM і SMF.

NG11: Контрольна точка між AMF і SMF.

NG12: Контрольна точка між AMF і функцією сервера автентифікації (AUSF).

NG13: Контрольна точка між UDM та AUSF.

Не всі контрольні точки були повністю визначені, але в 15-й версії вже були включені інтерфейси між ядром і радіо, які можна зіставити з архітектурою LTE, наприклад, NG3, що відповідає S1_U. Звичайно, сигналізація NAS також буде повністю визначена відповідно до контрольної точки NG1, хоча ця сигналізація здійснюється через радіоінтерфейс через 5G-RAN до AMF [24].

Робота разом з радіо/ядром LTE є важливим елементом, особливо для мереж першої фази. На рисунку 1.7 показані варіанти автономної і неавтономної архітектури. Автономна архітектура є найбільш ілюстративним прикладом повної системи 5G з використанням як радіоканалу 5G, так і ядра 5G, тоді як варіант 3 з якорем LTE і використанням радіоканалу 5G лише із застарілим ядром EPC на базі LTE представляє рішення першої фази.

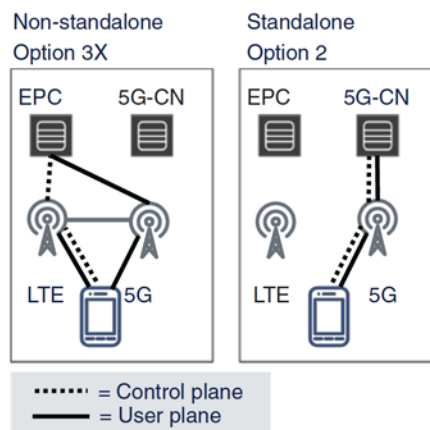


Рисунок 1.7 – Варіанти архітектури сегментів мережі 5G

Інші варіанти архітектури були завершені пізніше в 15-й версії, так званим "пізнім виходом", з розробкою тестових кейсів на відповідність вимогам UE пізніше в 2021/2022 роках.

Для неавтономного випадку існують додаткові альтернативи, залежно від того, як будуть маршрутизуватися дані користувацьких літаків. У разі маршрутизації даних лише через LTE, з'єднання на рівні користувача завжди буде здійснюватися через LTE, тоді як іншою альтернативою буде маршрутизація даних на рівні користувача лише через 5G. Якщо потік даних не повинен надходити з обох мереж, можна встановити окремі з'єднання користувацького рівня з базовими станціями LTE і 5G, як показано на рисунку 1.8 [25].

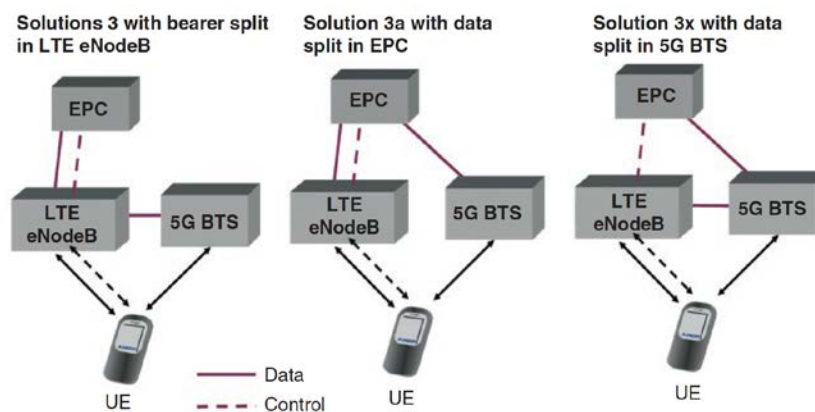


Рисунок 1.8 – Маршрутизація даних на рівні користувача з подвійним зв'язком між 5G і LTE

Неавтономна робота вимагає використання інтерфейсу типу X2 між LTE eNo-deB і 5G BTS (gNodeB або gNB). Це було визначено в 15-й версії 3GPP так само, як визначено інтерфейс X2 сьогодні, що дозволяє працювати з декількома постачальниками. У рішеннях 3 і 3x включена опція розділеного носія, що вимагає безперервної маршрутизації потоку даних через інтерфейс X2. Це також необхідно враховувати при визначенні розмірів транзитної мережі.

Мережа 5G gNB складається з двох елементів: розподіленого блоку (DU), що знаходиться на радіочастотному майданчику з антенами, і центрального блоку (CU), розташованого в більш центральному місці. На рисунку 2.8 показано ЦБ і РБ в архітектурі RAN. Один CU може обслуговувати декілька DU. Радіопротоколи версії 15, що визначають функціональний розподіл на вищому рівні, розподілені так, як показано на рисунку 1.9.

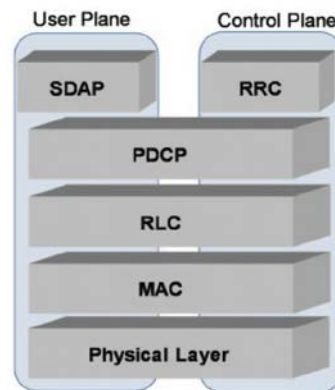


Рисунок 1.9 – Стек радіопротоколів 5G

DU обробляє критичні за часом функції наступним чином: ● Фізичний рівень, що охоплює ШПФ/БПФ, модуляцію, побудову каналу L1, кодування каналу, процедури та вимірювання на фізичному рівні. Рівень управління доступом до середовища (MAC), що забезпечує управління мультиплексними логічними каналами, виконання HARQ, обробку CA, а також управління плануванням або новими функціями, такими як управління променем. Рівень управління радіоканалом (RLC), що відповідає за корекцію помилок і сегментацію. Коли ретрансляція на фізичному рівні не вдається, можна використовувати ретрансляцію на рівні RLC, якщо це дозволено бюджетом затримки.

CU піклується про менш критичні до часу завдання обробки, охоплюючи наступні протоколи: Протокол адаптації службових даних (SDAP), який обробляє потоки QoS та їхнє відображення на радіоносії даних. SDAP забезпечує нову концепцію QoS, яка обговорюється далі в цьому розділі. Протокол

конвергенції пакетних даних (Packet Data Convergence Protocol, PDCP), що виконує стиснення заголовків, операції безпеки і гарантує доставку в порядку черговості без дублікатів. Нижні рівні (RLC) передають пакети до PDCP без переупорядкування, що дозволяє дублювати пакети, використовуючи декілька каналів (у версії 16 - навіть до чотирьох каналів). Управління радіоресурсами (RRC), що відповідає за передачу системної інформації, встановлення з'єднання, контроль з'єднання, мобільність і вимірювання [26-28].

Інтерфейси між RAN і ядром будуються з використанням протоколу користувацьких дейтаграм (UDP) з протоколом тунелювання GPRS (GTP) для передачі даних і протоколом передачі керування потоком (SCTP) для передачі керуючих сигналів, як показано на рисунку 1.10.

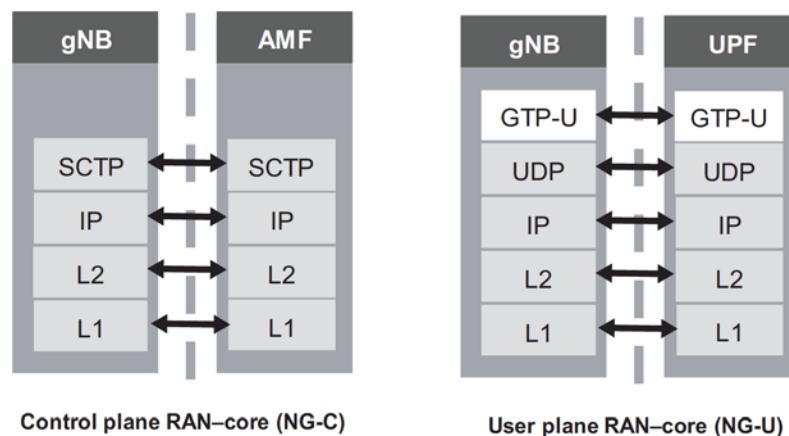


Рисунок 1.10 – Стек протоколів 5G для інтерфейсу RAN-ядра

Для інтерфейсу F1 на базі 3GPP використовується той же набір протоколів, що і між мережею радіодоступу і ядром 5G. Функціональність CU може бути розділена між функціями управління і користувацької площини. У цьому випадку між частинами CU-C і CU-U також існує інтерфейс E1, визначений в 3GPP. Інтерфейс E1 призначений лише для сигналізації управління, яка також проходить через SCTP. Інтерфейс F1 показаний на рис. 1.11.

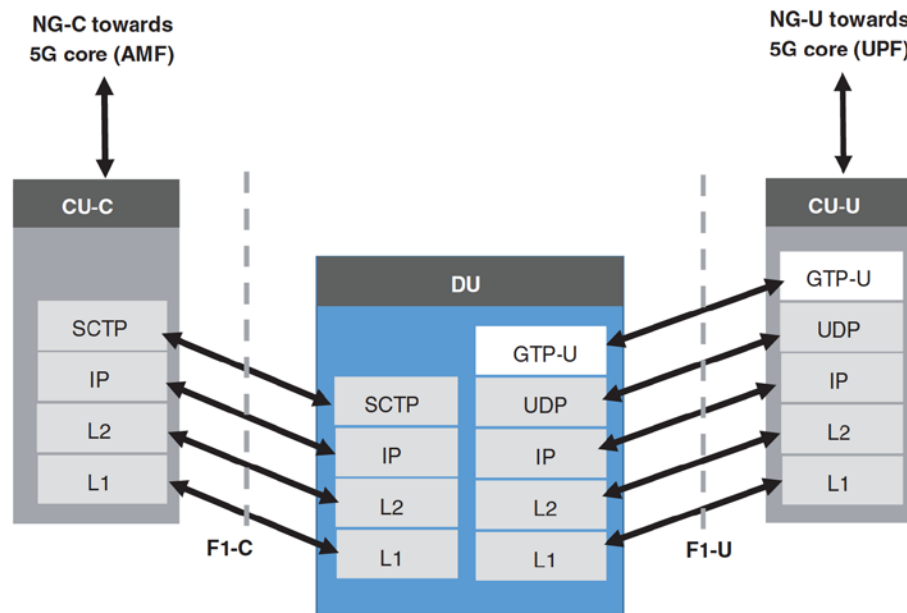


Рисунок 1.11 – Стек протоколів 5G для інтерфейсу RAN-ядра

Окрім визначеного 3GPP функціонального розділення вищого рівня (з L1, MAC і RLC) в DU, існує також інший підхід, визначений в CPRI [1] і надалі розглянутий за межами 3GPP в O-RAN (Open RAN), який охоплює різні підходи до функціонального розділення нижчих рівнів. Інтерфейс eCPRI слідує оригінальному інтерфейсу CPRI, який базується на надсиланні зразків I/Q і призводить до дуже високих швидкостей передачі даних при збільшенні кількості антен. Остання специфікація eCPRI була випущена в серпні 2019 року і містить кілька варіантів розділення. Спільним для всіх цих варіантів є те, що передаються не зразки I/Q, а біти всередині фізичного рівня. Це зменшує необхідну пропускну здатність у порівнянні з I/Q вибірками, в той час як більше обробки відбувається вище в мережі. Різні розбиття L1, показані на рисунку 1.12, представляють різні варіанти в eCPRI, але варіанти 7.2 і 7.3 є найбільш практичними, оскільки вони залишають операцію формування променя на стороні радіо (RU). Проте, у варіанті 7.1 необхідна смуга пропускання є меншою, ніж при надсиланні чистих зразків I/Q за допомогою підходу CPRI [29].

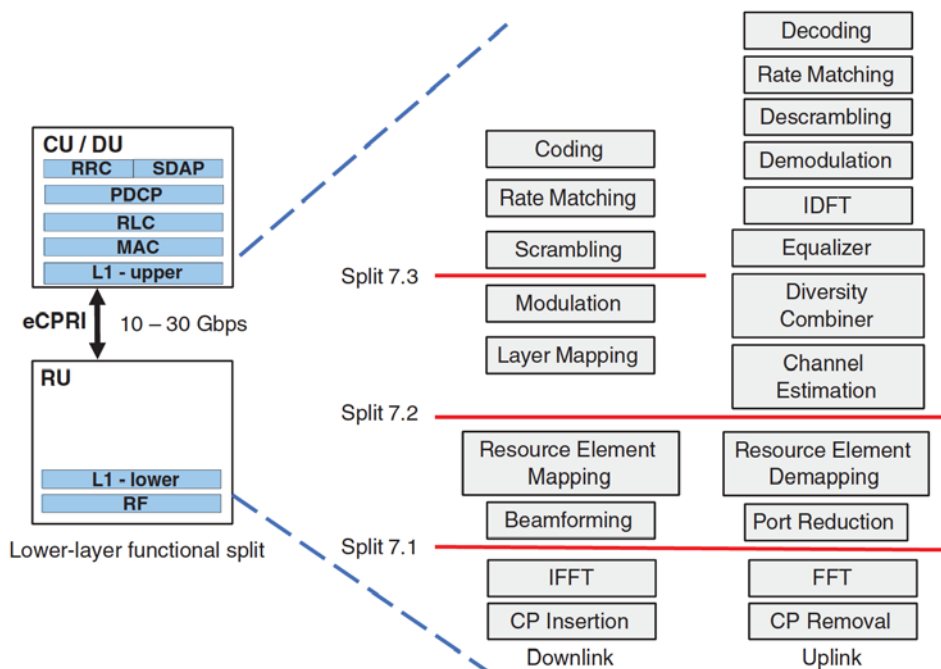


Рисунок 1.12 – Варіанти розділення L1 для 5G eCPRI

Сам eCPRI може передаватися через рівні Ethernet або IP, що дозволяє використовувати обидві альтернативи, як показано на рисунку 1.13. У випадку Ethernet, UDP не використовується для місця користувача, як показано на рисунку 1.13 [30].

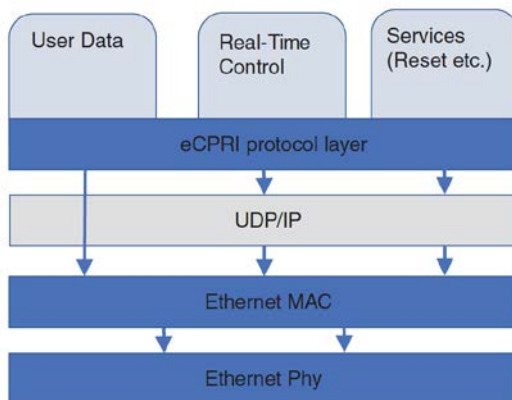


Рисунок 1.13 – Стек протоколів 5G eCPRI для послуг eCPRI

Альтернативний варіант IP (IPv4 або IPv6) також може передаватися через Ethernet, хоча в принципі можливі й інші підходи. Важливою відмінністю від зразків I/Q тепер є більша толерантність до змін шляху передачі і затримок,

навіть якщо вимоги досить жорсткі; більше не потрібне таке ж темне волокно, як у випадку з CPRI, але можна використовувати мережу на основі пакетів/комутацію. Окрім елементів, показаних на рисунку 1.13, існує також додаткова функціональність (не вся детально визначена в eCPRI v 2.0) для: • Синхронізації для вирівнювання кадрів і часу • Експлуатації та обслуговування з'єднань • Контролю та обміну інформацією про управління Як згадувалося раніше, зараз ведеться робота над варіантом 7.2 інтерфейсу O-RAN, а також над іншими інтерфейсами, які не охоплені специфікаціями 3GPP. Нижче в цьому розділі ви дізнаєтеся більше про поточний розвиток O-RAN.

1.6 Висновки до розділу 1

Проектування системи 5G включає в себе визначення конкретних цілей, які мають бути досягнуті, і вибір технологій для впровадження цих цілей. Основні цілі та технології проектування системи 5G включають.

Забезпечення високої швидкості передачі даних та здатності обробки великого обсягу інформації для задоволення потреб у великій пропускну здатності. Мінімізація часу затримки для підтримки вимог до реального часу, особливо для застосувань, таких як автономні автомобілі та телемедицина.

Забезпечення підтримки для великої кількості одночасно підключених пристроїв, зокрема в умовах великих скопищ користувачів. Розробка та впровадження технологій для зниження витрат енергії мережі та пристроїв для підтримки сталого розвитку та економії ресурсів.

Створення гнучкої архітектури для легкої інтеграції з іншими технологіями та мережами, забезпечення взаємодії та координації. Забезпечення високого рівня надійності мережі та захист від кіберзагроз для забезпечення стійкої роботи та конфіденційності даних.

Створення основи для інновацій та майбутнього розвитку, забезпечення можливостей для легкого впровадження нових технологій та сервісів.

Використання високочастотних діапазонів для підвищення пропускнуої здатності та швидкості передачі даних.

Застосування багатьох антен для покращення ефективності передачі та збільшення густоти підключення. Розділення мережі на віртуальні частини для оптимізації під конкретні вимоги конкретних послуг.

Забезпечення надійного та низькозатримкового зв'язку для застосувань, де важлива висока надійність та швидкість реакції. Використання техніки для направленої випромінювання сигналу для покращення з'єднання та збільшення дальності покриття.

Використання хмарних технологій для підтримки гнучкості, масштабованості та інтеграції. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації управління мережею та оптимізації ресурсів. Визначені технології та цілі дозволяють створювати потужні та ефективні мережі 5G, що відповідають потребам сучасного світу та майбутнім викликам.

2 ЧАСТОТНО-ЧАСОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ 5G

2.1 Аналіз використання спектру для максимального покриття, ефективності та задоволення потреб різних видів послуг

Спектр є ключовим активом для оператора. Доступний спектр багато в чому визначає максимальну пропускну здатність та покриття мережі. Спектр також має тенденцію бути дуже дорогим. У цьому розділі обговорюється очікуваний спектр на ранній стадії розгортання 5G і характеристики різних варіантів спектру. На рисунку 2.1 показано типове використання спектру для 5G. Основним спектром нижче 6 ГГц у всьому світі буде спектр середнього діапазону 2,5-4,9 ГГц. Спектр близько 3,5 ГГц є привабливим для 5G, оскільки він доступний у всьому світі, а його обсяг є високим. 5G на частоті 3,5 ГГц може використовувати існуючі місця розташування базових станцій. Мета полягає в тому, щоб зрівняти покриття існуючих LTE1800/2100 з масивним формуванням променя МІМО на частоті 3,5 ГГц, що призведе до практично повного міського покриття 5G. 5G також повинен мати низькі діапазони 600-2500 МГц, щоб забезпечити глибоке проникнення в приміщення і великі зони покриття. Широке покриття важливе для нових сфер використання, таких як Інтернет речей та критично важливий зв'язок. Низький діапазон може бути 600 МГц, 700 МГц, 1800 МГц або 2100 МГц, або будь-який інший існуючий діапазон LTE [31].

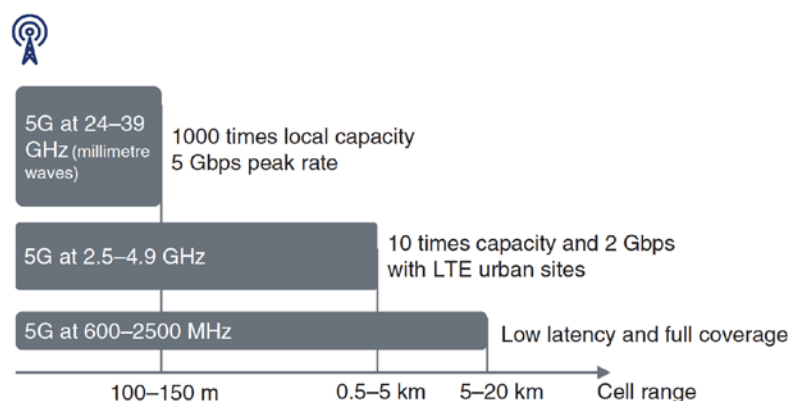


Рисунок 2.1 – Аналіз використання спектру в мережі 5G

Рисунок 2.2 ілюструє різницю у зовнішньому покритті для різних частот у порівнянні з висхідною лінією зв'язку 1800 МГц. У розрахунках використовується модель поширення Окумура-Хата, низхідна лінія на 3 дБ краща, ніж висхідна, і масивне посилення МІМО на 6 дБ порівняно з 2×2МІМО. Цей розрахунок показує, що 5G на низхідній лінії 3500 МГц з масивним МІМО може відповідати покриттю висхідної лінії 1800 МГц. Висхідна лінія зв'язку на 3500 МГц не відповідає точно 1800 МГц, тому агрегація з низькою смугою, наприклад, 700 МГц, була б корисною. Розрахунок показує, що 3500 МГц є привабливим діапазоном для 5G, а також те, що масове МІМО є важливим технологічним компонентом 5G.

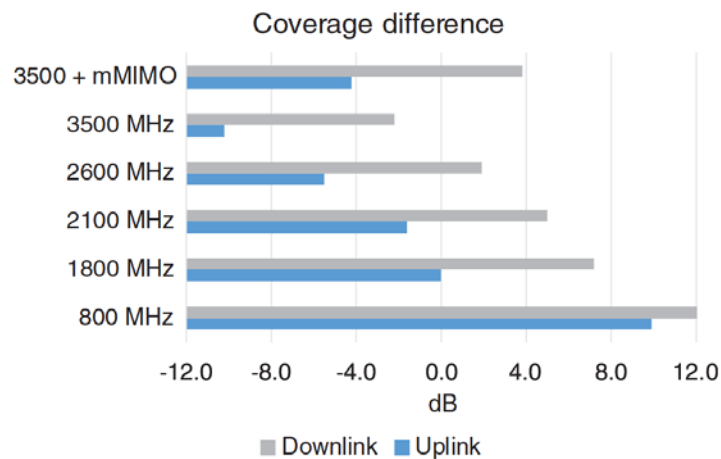


Рисунок 2.2 – Різниця в покритті порівняно з висхідною лінією 1800 МГц

На рисунку 2.3 показано випадок, коли низькошвидкісна висхідна лінія зв'язку може підвищити коефіцієнт покриття низхідної лінії зв'язку 5G на частоті 3,5 ГГц. Якщо висхідна лінія зв'язку використовує діапазон 3,5 ГГц, це, безумовно, є вузьким місцем з точки зору коефіцієнта покриття, оскільки типова потужність UE становить лише 0,2-0,4 Вт, тоді як потужність базової станції може становити 200 Вт або навіть більше. Перша фаза 5G базується на подвійному підключенні, де користувачі висхідної лінії зв'язку можуть використовувати низькочастотний LTE для покращення покриття. Друга фаза 5G також уможливорює агрегацію операторів, де вся висхідна передача, включаючи

сигналізацію, може використовувати низькочастотний діапазон, що ще більше покращує покриття висхідної лінії порівняно з подвійним зв'язком [32].

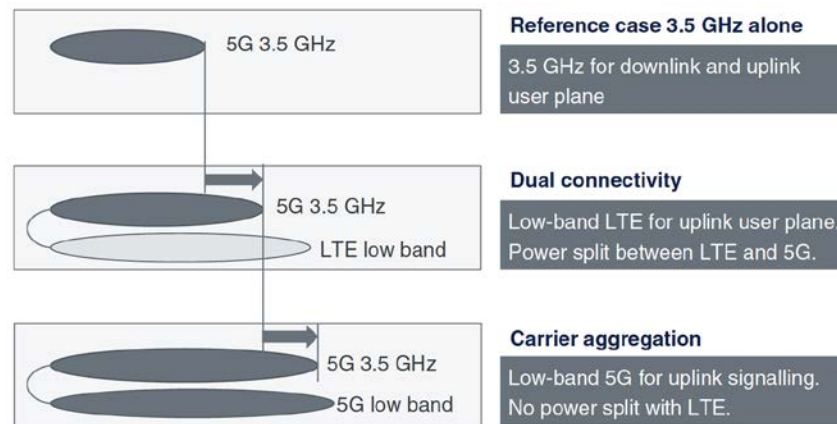


Рисунок 2.3 – Розширення покриття 5G у середньому діапазоні (3,5 ГГц) за допомогою низькочастотної (LTE/5G) висхідної лінії зв'язку

2.2 Підвищення продуктивності та ефективності мобільних мереж в контексті розвитку технології 5G

Формування променя є привабливим рішенням для підвищення продуктивності мобільної мережі.

Формування променя може забезпечити вищу спектральну ефективність, що приносить набагато більше пропускну здатності на існуючих майданчиках базових станцій. Формування променя також може покращити продуктивність каналу зв'язку і забезпечити розширену зону покриття. Формування променя було відоме в академічних дослідженнях протягом багатьох років, але не було підтримано першими специфікаціями LTE у версії 8 3GPP.

Формування променя включено до специфікацій 5G вже в першій версії 3GPP Release 15.

Переваги формування променя досягаються на практиці за допомогою масивних антен MIMO. Мета полягає в тому, щоб зробити дизайн радіостанцій

5G повністю оптимізованим для масивного формування променя МІМО. Основний принцип формування променя проілюстровано на рисунку 2.4.

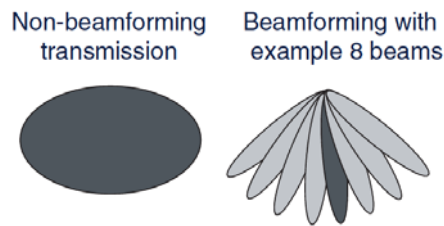


Рисунок 2.4 – Оптимізація використання радіочастотного спектру та покращення продуктивності мобільних мереж

Традиційне рішення передає дані по всій площі стільника, тоді як при формуванні променя дані надсилаються користувачам вузькими променями. Одні й ті ж ресурси можна повторно використовувати для кількох користувачів у секторі, мінімізувати перешкоди і збільшити пропускну здатність стільника.

Масивна МІМО - це розширення традиційної технології МІМО на антенні решітки з великою кількістю керованих передавачів. 3GPP визначає масивний МІМО як більше восьми передавачів. Промені можуть бути сформовані кількома різними способами, щоб забезпечити або фіксовану сітку променів, або специфічне для конкретного користувача формування променя. Якщо антена має дві гілки прийомопередавачів (TRX), вона може передавати двома паралельними потоками на один UE. Якщо антена має 4 TRX, вона може передавати чотири потоки на один UE з чотирма антенами або подвійний потік на два UE одночасно з багатокористувацьким МІМО (MU-MIMO). Якщо антена має 64 TRX, вона може паралельно передавати дані на кілька UE. Кількість TRX є важливим фактором дизайну масивних антен МІМО. Чим більше TRX використовується, тим більше променів можна згенерувати, що забезпечує більшу пропускну здатність. Але більша кількість TRX також збільшує розмір антени і робить її вартість вищою. Іншим важливим фактором при проектуванні антени є кількість

антенних елементів. Кількість елементів антени може бути більшою, ніж кількість TRX [33].

На рисунку 2.5 показано приклад антени з 192 елементами: 12 по вертикалі, 8 по горизонталі і 2 різних поляризацій. Кількість елементів антени визначає її коефіцієнт підсилення і зону покриття. Чим більше елементів антени, тим більший розмір антени і тим більший коефіцієнт підсилення антени. Відстань між елементами антени залежить від частоти: фізичний розмір антени більший на нижчих частотах.

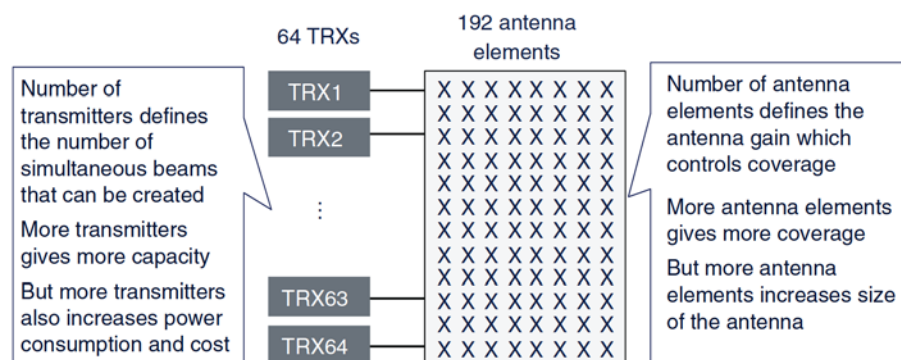


Рисунок 2.5 – Принципи масового MIMO з більшою кількістю передавачів і більшою кількістю антенних елементів

Кількість елементів антени визначає коефіцієнт підсилення та розмір антени. Розмір також сильно залежить від частоти. Розмір антени зменшується на високих частотах. Кількість TRX може бути такою ж або меншою, ніж кількість елементів антени, і визначає коефіцієнт підсилення потужності. Кількість потоків MIMO може бути такою ж або меншою, ніж кількість TRX. Кількість потоків MIMO визначає пікову швидкість передачі даних і в основному залежить від можливостей обробки базової смуги.

Коли кількість елементів антени перевищує кількість TRX, додаткові елементи зазвичай додаються у вигляді додаткових рядів. Наприклад, масивна MIMO-антена може мати 192 антенні елементи, 64 передавачі і підтримувати до 16 MIMO-потоків. У цій антені є три ряди на TRX.

Існує низка причин, чому формування променя може дати більший вигравш у 5G, ніж у LTE: Формування променя підтримується для загальних каналів 5G з розгорненням променя, див. рисунок 2.6.

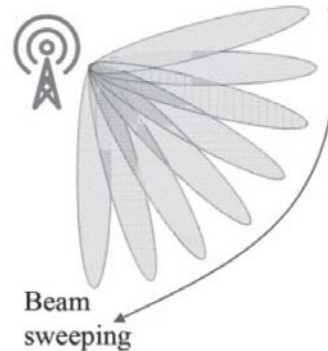


Рисунок 2.6 – Загальний канал із розгорнутим формуванням променя в мережі 5G

Розгортка променя - це операція, при якій сигнал синхронізації і канал мовлення передаються в різних часових областях променя. Спільне формування променя каналу не підтримується в LTE. Користувацькі опорні сигнали в 5G підтримують специфічне для користувача формування променя. LTE повинен використовувати специфічні для стільника опорні сигнали, які не можуть бути використані для формування променя. Відсутність обмежень на застарілі пристрої в 5G, оскільки формування променя включено в 5G з перших специфікацій. Формування променя LTE повинно базуватися на вимірюваннях еталонного звукового сигналу (SRS) висхідної лінії зв'язку, оскільки застарілі пристрої не підтримують зворотний зв'язок при формуванні променя. У 5G підтримується більше гілок передачі. 5G спочатку підтримує зворотний зв'язок для 64TX, тоді як LTE підтримує 4TX у версії 8, 8TX у версії 10, 16TX у версії 13 і 32TX у версії 14 [34].

2.3 Пропускна здатність мережі доступу

Висока пропускна здатність є основним рішенням для передачі більшого обсягу даних клієнтам за тією ж або меншою вартістю. На рисунку 2.7 показано спрощений вигляд пропускної здатності стільника 5G у порівнянні з пропускною здатністю стільника 4G. Припускається, що 5G UE на частоті 3,5 ГГц може отримати доступ до смуги пропускання 100 МГц, тоді як смуга пропускання LTE1800 (і максимальна смуга пропускання LTE з однією несучою) становить 20 МГц. Спектральна ефективність покращується в 2-5 разів. Ємність стільника буде збільшена в 10-20 разів [35].

Дуже висока щільність трафіку, до 1 Тбіт/с (1000 Гбіт/с)/км², є однією з цілей 5G. Щільність трафіку можна збільшити за рахунок використання більшого спектру, більшої кількості майданчиків і вищої спектральної ефективності.

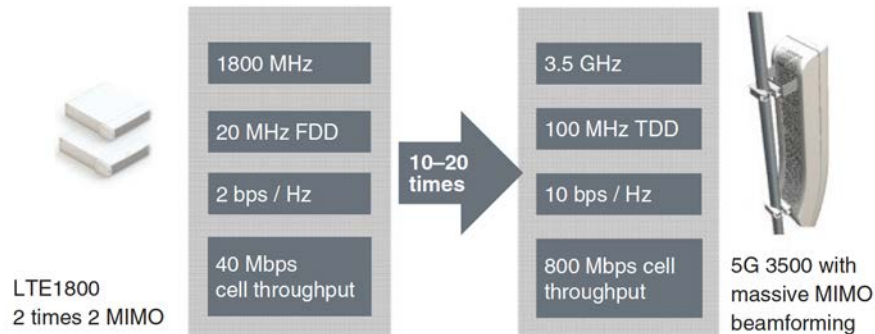


Рисунок 2.7 – Пропускна здатність 5G та 4G на одну комірку

5G об'єднує всі ці компоненти для збільшення пропускної здатності. Почнемо з оцінки найвищої щільності трафіку в поточній мережі LTE. Ми виключаємо масові заходи з цього розрахунку. Ми робимо наступні припущення для оцінки трафіку: 100 000 населення/км², частка ринку оператора 40%, використання 5-10 Гбіт/с на місяць і використання в години пік 7%. Цей простий розрахунок дає 1-2 Гбіт/с/км². Типова мережа LTE у завантаженій місцевості

використовує 50 МГц спектру і 30 базових станцій/км². Далі ми припускаємо, що спектральна ефективність LTE становить 2 біт/с/Гц/стілник. Ми також беремо до уваги, що трафік не розподіляється рівномірно між майданчиками. Ми припускаємо, що найбільш завантажені ділянки мають в 4 рази більше трафіку, ніж середня ділянка. Ці припущення дають пропускну здатність 2 Гбіт/с/км², що відповідає найвищій щільності трафіку.

Пропускна здатність може бути збільшена за рахунок повного використання існуючих частот нижче 6 ГГц для 5G. Ми припускаємо, що на одного оператора припадає до 200 МГц спектру, включаючи деяку неліцензовану смугу 5 ГГц. Ми також припускаємо, що щільність мережі може бути збільшена з 30 до 50/км², а спектральна ефективність може бути збільшена в 3 рази порівняно з LTE-Advanced. Ми також припускаємо, що розподіл трафіку стає менш рівномірним з вищою щільністю стільникового зв'язку. Результатом є пропускна здатність до 13 Гбіт/с.

Якщо щільність сайту потрібно збільшити ще більше, то радіус дії стільника зменшується до 50-100 м і має сенс використовувати ммВт. Ми припускаємо 800 МГц спектру і 150 сайтів/км² на частоті 24-39 ГГц. Таке розгортання дає більше 100 Гбіт/с/км. Спектр вище 50 ГГц дає доступ до ще більшого спектру і більшої щільності розміщення. Ми припускаємо 3000 МГц і 300/км², що відповідає діапазону стільників менше 50 м. Цей випадок розгортання дає приблизно 1 Тбіт/с/км². Див. таблицю 2.1 і рисунок 2.8 [36].

Таблиця 2.1 - Оцінювання щільності мобільності

| | LTE today | 5G at <6 GHz | 5G at 24–39 GHz | 5G at >50 GHz |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Spectrum | 50 MHz | 100 MHz | 800 MHz | 3000 MHz |
| Sites | 30/km ² | 50/km ² | 150/km ² | 300/km ² |
| Sectors per site | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Spectral efficiency | 2.0 bps/Hz | 6.0 bps/Hz | 6.0 bps/Hz | 6.0 bps/Hz |
| Traffic distribution | 4 | 6 | 15 | 15 |
| Traffic density | 1.9 Gbps/km ² | 13 Gbps/km ² | 120 Gbps/km ² | 900 Gbps/km ² |

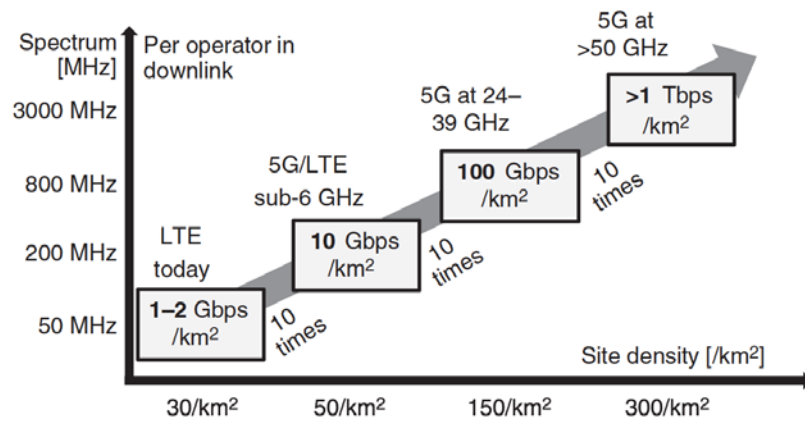


Рисунок 2.8 – Аналіз максимальної щільності передавання на квадратний кілометр

2.4 Створення високопродуктивної мережі 5G

Низька затримка (низький час проходження сигналу) є важливим фактором для підвищення продуктивності кінцевого користувача в мережах п'ятого покоління (5G). Затримка грає вирішальну роль в реальному часі обслуговування та визначає якість послуг для широкого спектру застосунків, включаючи інтерактивні додатки, віртуальну реальність, автономні автомобілі та інші. Загальною метою є створення високопродуктивної мережі 5G, яка не лише забезпечує велику пропускну здатність, але і низьку затримку для реалізації різноманітних застосунків, що вимагають миттєвого відгуку та обслуговування в реальному часі.

Нижча затримка є важливим фактором підвищення продуктивності кінцевого користувача на додаток до вищої швидкості передачі даних. Метою 5G-радіо є забезпечення часу проходження сигналу в обидва кінці менше 1 мс. Це досить складне завдання. Мережі високошвидкісного пакетного доступу (HSPA) в кращому випадку можуть забезпечити затримку в 20 мс, а сучасні мережі LTE - 10 мс. Покращення від 3G до 4G склало 2 рази, тоді як мета полягає в тому, щоб покращити затримку в 10 разів від 4G до 5G. Основним рішенням для мінімізації затримок є скорочення інтервалу часу передачі (TTI). Коротший

ТТІ скорочує час передачі, але також скорочує час буферизації і час обробки. У той же час, короткий час обробки встановлює більш високі вимоги до апаратного та програмного забезпечення приймача. Компоненти затримки показані в таблиці 2.2, а еволюція затримки проілюстрована на рисунку 2.9 [37].

Таблиця 2.2 Компоненти часу в обидві сторони

| | HSPA | LTE | 5G (3.5 GHz TDD) | 5G (low-band FDD with mini-slot) |
|-----------------------|----------------------|--------------------|------------------|----------------------------------|
| Downlink transmission | 2 ms | 1 ms | 0.5 ms | 0.14 ms |
| Uplink transmission | 2 ms | 1 ms | 0.5 ms | 0.14 ms |
| Buffering | 2 ms | 1 ms | 0.5 ms | 0.14 ms |
| Scheduling | 1.3 ms ² | 18 ms ¹ | | |
| UE processing | 8 ms | 4 ms | 0.8 ms | 0.25 ms |
| BTS processing | 3 ms | 2 ms | 0.8 ms | 0.25 ms |
| Transport + core | 2 ms (including RNC) | 1 ms | 0.1 ms | 0.1 ms (local content) |
| TDD frame impact | — | — | 1.2 ms | — |
| Total | 20 ms | 10–28 ms | 4.4 ms | 1.0 ms |

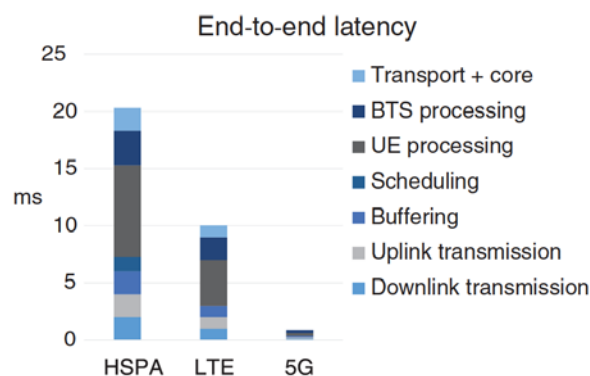


Рисунок 2.9 – Зміна значення затримки для технологій від 3G до 5G

Вимірjana система 5G використовує інтервал між піднесучими 30 кГц і кадр TDD 2,5 мс.

Майбутня мережева архітектура, ймовірно, включатиме прикордонну хмару, де контент може кешуватися для МЕС або де локальний прорив може надаватися в локальну інтрамережу або міжмережеву мережу. Кількість

локальних хмар повинна бути більшою, ніж кількість контролерів базових станцій (BSC) або контролерів радіомереж (RNC) сьогодні. Перевага надається транспорту з низькою затримкою від місця розташування базової станції до локальної хмари. Архітектура мережі показана на рисунку 2.10.

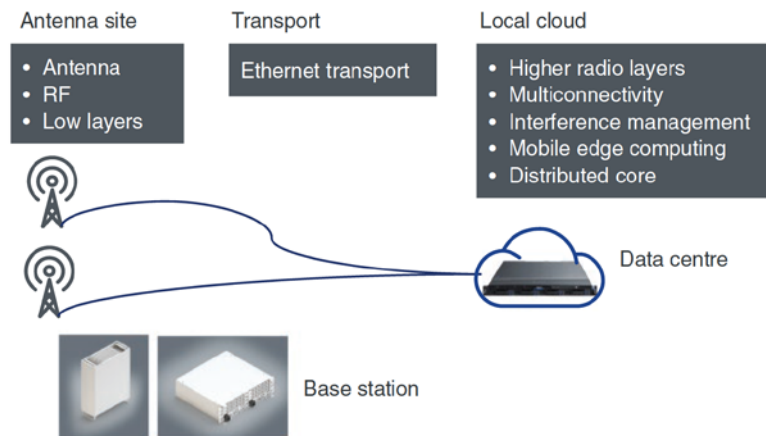


Рисунок 2.10 – Мережева архітектура з локальною хмарою

2.5 Підвищення ефективності передачі даних в мережах 5G

5G розроблений з урахуванням не лише високої пропускної здатності, але й низької затримки та оптимізації енергоспоживання. Введення нових технологій та режимів, таких як стан "RRC підключений неактивно", дозволяє створити більш ефективні та продуктивні мережі для різноманітних застосунків, включаючи ті, що вимагають миттєвого відгуку та мінімальної затримки.

Затримку 5G у підключеному стані покращують міні-слот і короткий ТТІ. Існують інші компоненти затримки, на які необхідно звернути увагу в радіоканалі 5G. Якщо LTE UE перебуває в стані очікування, виникає додаткова затримка в 100 мс, спричинена встановленням з'єднання RRC і налаштуванням розширеного носія радіодоступу (enhanced Radio Access Bearer, eRAB). Коли з'єднання RRC доступне, але ресурси висхідної лінії зв'язку не виділені, UE повинен надіслати запит на пропускну здатність на базову станцію, щоб

отримати розподіл пропускної здатності, що спричиняє затримку в 30 мс для першого пакета.

Це означає, що передача першого пакета в LTE зазвичай відбувається із затримкою 30-100 мс; менша затримка в 10-15 мс досягається лише тоді, коли ресурси висхідної лінії зв'язку вже доступні. 5G усуває ці компоненти затримки за допомогою нової структури RRC і додаткового визначення незапланованої передачі висхідної лінії зв'язку, також відомої як доступ на основі конкуренції.

Рішення без підключення в 5G відноситься до випадку, коли UE може постійно підтримувати з'єднання RRC і з'єднання з основною мережею. Енергоспоживання UE мінімізується завдяки введенню нового стану "RRC підключений неактивно". Затримка буде дуже низькою, оскільки немає необхідності створювати з'єднання RRC або eRAB. Сучасні мережі LTE зазвичай розривають з'єднання RRC після 5-10 секунд бездіяльності, щоб мінімізувати споживання енергії UE. Рішення без з'єднання проілюстровано на рисунку 2.11 [38].

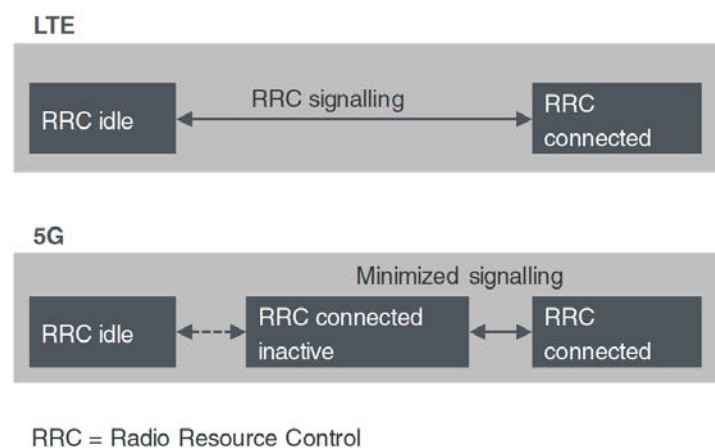


Рисунок 2.11 – Рішення 5G без підключення з підключеним RRC в неактивному стані

Доступ на основі вмісту - це передача по висхідній лінії зв'язку, коли UE автономно надсилає невеликий обсяг даних разом з преамбулою без будь-якого розподілу або надання з боку мережі. Перевагою цього підходу є мінімізація

сигналізації, що добре з точки зору затримок і енергоспоживання UE. Концепція доступу на основі конкуренції показана на рисунку 2.12.

Преамбула може використовуватися як опорний сигнал або передаватися окремим ресурсом. Преамбула може бути пов'язана з ідентифікацією UE або пов'язана з індексом ресурсу для передачі даних або шаблоном стрибкоподібної передачі. Відповідь може бути специфічною для конкретного UE або групи UE.

Одним з варіантів реалізації доступу на основі суперечок є застосування неортогонального множинного доступу (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). Основна ідея полягає в тому, щоб послабити парадигму ортогональних передач, дозволивши різним користувачам одночасно використовувати одні й ті ж фізичні ресурси в часі, частоті або просторі.

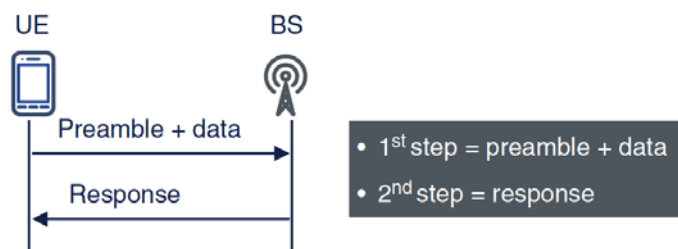


Рисунок 2.12 – Доступ на основі контенту

Концепція NOMA вивчається в 3GPP для 5G. Можна відзначити, що висхідна лінія зв'язку WCDMA по суті базується на NOMA, оскільки вона не ортогональна. У WCDMA передача по висхідній лінії є простою, коли не потрібне вирівнювання часу або точне планування, але перешкоди по висхідній лінії виявилися серйозною проблемою в WCDMA під час масових заходів з великим трафіком по висхідній лінії. Зрозуміло, що концепція NOMA вимагає ефективного усунення висхідних завад на базовій станції.

Іншим рішенням для мінімізації енергоспоживання пристрою є конвеєризація, яка дозволяє UE використовувати мікро-сплячий режим енергозбереження під час символів даних, якщо не відбувається передача даних до UE. Конвеєризація також підтримує передачу з низькою затримкою, оскільки

дані можуть безперервно декодуватися від символу до символу. LTE UE повинен отримати весь підкадр перед початком декодування. Для більших швидкостей UE необхідно додати додатковий опорний сигнал демодуляції (DMRS). див. рисунок 2.13.

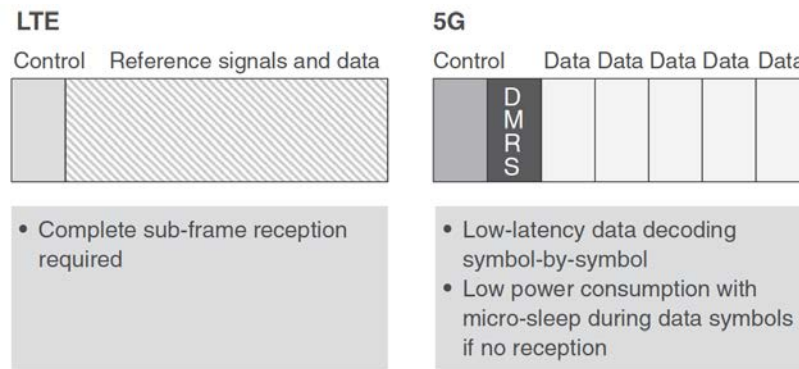


Рисунок 2.13 – Рішення для конвеєрного приймача 5G

2.6 Забезпечення оптимальної продуктивності та задоволення потреб різноманітних користувачів та застосунків

Фундаментальне переосмислення мобільної мережі 5G необхідне для підтримки дуже різноманітних і екстремальних вимог до затримок, пропускної здатності, пропускної спроможності і доступності. Архітектура мережі повинна перейти від поточної архітектури "мережі суб'єктів" до архітектури "мережі можливостей". Мережеві моделі повинні перейти від нинішньої моделі "мережі для зв'язку" до моделі "мережі для послуг". Нарізка мережі пропонує ефективний спосіб задовольнити вимоги всіх варіантів використання в загальній мережевій інфраструктурі. Концепція поділу мережі на сегменти проілюстрована на рисунку 2.14 [39].

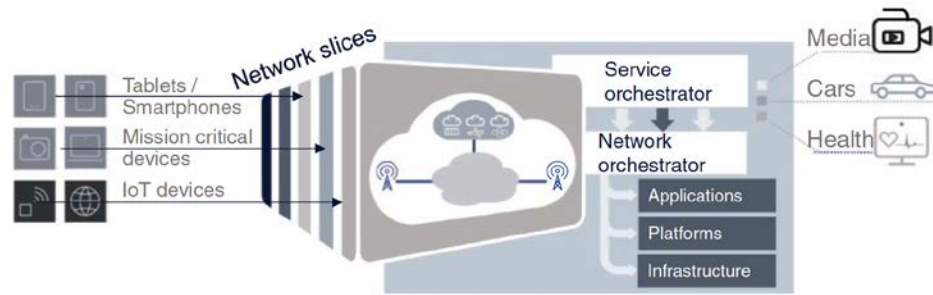


Рисунок 2.14 – Схема сегментування мережі доступу

Мережа 5G повинна мати ефективні засоби для розгалуження мережі. LTE підтримує диференціацію якості обслуговування (QoS), але в 5G нам потрібна динамічна якість обслуговування (QoE) на основі додатків. Такий підхід недосяжний в LTE, де однаковий QoS застосовується до всього трафіку в мережі. Різниця між LTE QoS і 5G QoS ілюзорно показана на рисунку 2.15, а різниця між QoS на основі базової станції і динамічним QoE - на рисунку 2.16. Рішення на основі носія підходить для послуг, що надаються оператором, де фільтри пакетів легко визначити, а сеанси додатків є довготривалими. Архітектура 5G QoE повинна виявляти і диференціювати короточасні потоки субпослуг. Сигналізація атрибутів пакетних фільтрів і пов'язаних з ними політик на рівні управління не потрібна, коли і радіо, і ядро знають про додатки і здатні приймати динамічні рішення щодо дій для досягнення цільових показників QoE.

| LTE Baseline for QoS | 5G Baseline for QoE |
|--|---|
| <p>In EPC/LTE, the QoS enforcement is performed at the eNodeB for uplink and Policy and Charging Enforcement (PCEF) for downlink. Policy decisions are taken in the core network.</p> <p>QoS differentiation is achieved by enforcing QoS targets such as the delay budget, guaranteed bit rate and relative throughput ratio among bearers.</p> <p>The radio and core network enforce QoS independently, uplink and downlink QoS are not coordinated.</p> | <p>In 5G, a framework for end-to-end QoS/QoE is built into the baseline architecture.</p> <p>Both radio and core network elements have capabilities for real-time application awareness, QoE performance awareness and intelligence for dynamic policy modifications.</p> <p>Both radio and core elements are able to track the unidirectional performance of application flows and take enforcement actions in both directions.</p> |

Рисунок 2.15 – Перехід від якості обслуговування (QoS) LTE до якості обслуговування (QoE) 5G

| Bearer-based QoS | Dynamic QoE |
|---|--|
| <p>EPC/LTE was designed to provide QoS differentiation per bearer – independently for uplink and downlink.</p> <p>During the release time frame, the use case for differentiating Internet services was not foreseen.</p> <p>The bearer model is best suited for operator-provided services, where the packet filters are easy to define and the application session is long lived.</p> | <p>In 5G, the QoS/QoE architecture shall be able to detect and differentiate very short-lived sub-service flows in order to provide a good application QoE.</p> <p>The control plane signalling of packet filter attributes and related policies is not necessary when both radio and core are application aware and both are capable of making dynamic decisions on actions to achieve QoE targets.</p> |

Рисунок 2.16 – Перехід від QoS на основі пред'явника до динамічного QoE

Основні особливості архітектури 5G QoE полягають в наступному. Когнітивні функції в мережі радіодоступу та опорній мережі: вдосконалена аналітика в режимі реального часу для виявлення аномалій/деградації, оцінки контексту. Динамічна та адаптивна робота на основі політик: високорівневі політики, що застосовуються з урахуванням контексту, такого як місцезнаходження, структура трафіку, поведінка користувачів та стан мережі. Виявлення додатків в режимі реального часу, визначення цілей QoE на основі контексту і забезпечення QoE: дії з управління і забезпечення адаптовані до специфіки сеансів додатків. Гармонізоване наскрізне забезпечення якості, включаючи транспортні та віртуальні ресурси. Планування радіоканалів на основі аналітики: розширена аналітика передається радіофункціям, що дозволяє підвищити ефективність і узгодженість роботи системи. Здатність працювати відповідно до традиційного QoS та цілей мережевого рівня. Архітектура QoS отримала подальший розвиток у порівнянні з LTE. Між ядром і радіостанцією більше немає тунелю, створеного для конкретного користувача/оператора, який би забезпечував певну якість обслуговування. Замість цього заголовок інкапсуляції в інтерфейсі NG3 (інтерфейс користувацької площини між RAN і ядром, як описано раніше) використовується для передачі маркування QoS, яке буде використовуватися в пакетах низхідної лінії зв'язку. Потім UE застосовує таку саму якість пакетів висхідної лінії, що відповідає послугі з заданою якістю, у напрямку низхідної лінії [40].

Загальна структура якості показана на рисунку 2.17 Підхід, обраний в 5G, дозволяє швидко реагувати на потреби додатків на основі інтелектуального ядра і динамічно реагувати на зміну потреб для забезпечення найкращого користувацького досвіду.

При встановленні сеансу PDU користувачеві буде надано правило QoS за замовчуванням через сигналізацію NAS. Крім того, 5G RAN забезпечується профілями QoS правил QoS від NG-ядра. Параметри QoS включають наступне:

- Максимальна швидкість потоку UL та DL. Гарантована швидкість потоку UL та DL. Рівень пріоритету.

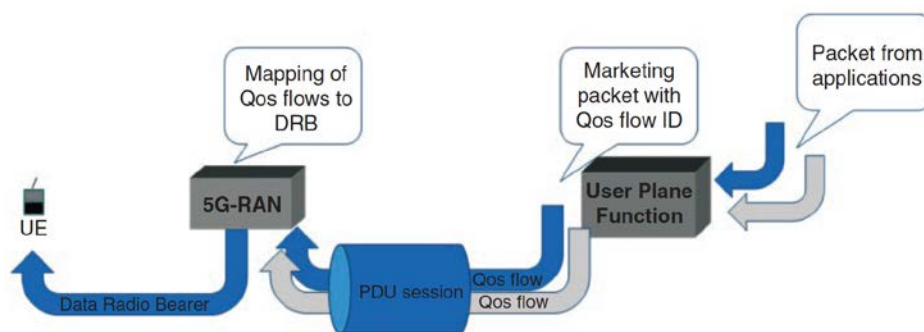


Рисунок 2.17 – Архітектура QoS в 5G

2.7 Забезпечення ефективної маршрутизації інформаційного трафіку через різні мережі

В рамках 16-ї версії 3GPP була впроваджена підтримка інтегрованого доступу і транзитного трафіку (ІДТТ). Основна ідея ІДТТ полягає у вирішенні ситуацій, коли забезпечення традиційного транзитного зв'язку ускладнене, тому розглядається можливість використання смуги пропускання для транзитного зв'язку. Це особливо стосується роботи в діапазонах міліметрового діапазону, таких як діапазон 28 ГГц, де зазвичай оператори мають у своєму розпорядженні велику кількість спектру. При роботі ІДТТ дані передаються від донорської gNB до gNB ІДТТ через радіоінтерфейс 3GPP.

Як показано на рисунку 2.18, може бути більше, ніж один стрибок. Використання багатьох стрибків, звичайно, збільшує затримку з'єднання і

зменшує пропускну здатність, доступну кінцевим користувачам, особливо в першій точці з'єднання.

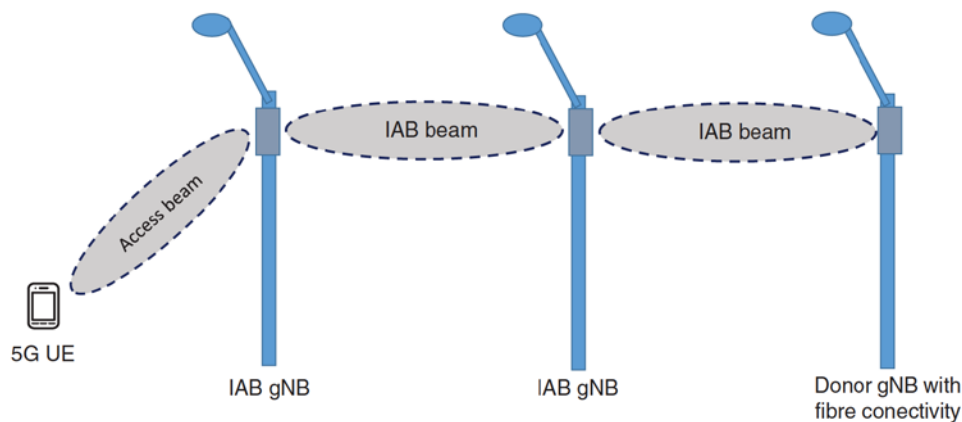


Рисунок 2.18 – Схема реалізації ІДТТ

Архітектура ІДТТ запровадила мобільне закінчення (Mobile Termination, MT) на стороні вузла ІДТТ, як показано на рисунку 2.19. MT в основному охоплює функціональність, яка не є частиною звичайного gNB, а саме такі можливості, як пошук стільника, можливість створення з'єднання, починаючи з процедури RACH до донорського gNB, а також забезпечення зворотного зв'язку про стан каналу або для операцій MIMO і формування променя [41].

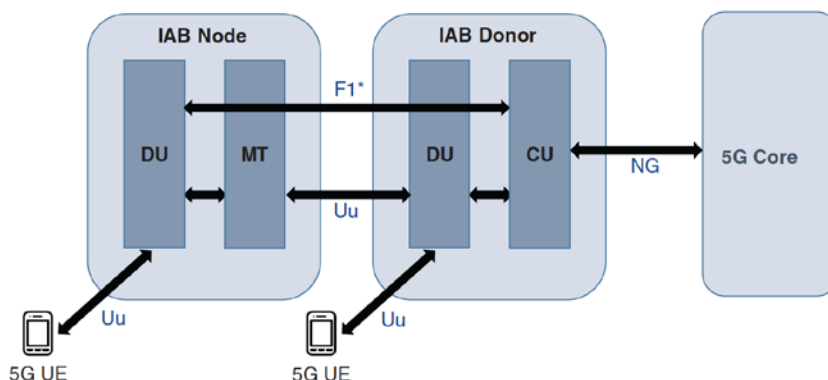


Рисунок 2.19 – Архітектура ІДТТ

Використання ІДТТ дозволяє нам уникнути необхідності прокладати волокно до кожної радіостанції, але має й інші наслідки: ● Збільшення затримки, оскільки кожен стрибок збільшує затримку з'єднання ● Додаткові потреби в координації, якщо та сама смуга в тому самому місці використовується іншим оператором для звичайного використання або ІДТТ ● Частина пропускну здатності смуги зайнята для потреб транзитного зв'язку з точки зору користувача, немає видимості того, чи є gNB звичайним gNB або з'єднанням з ІДТТ. Збільшення затримок і зниження швидкості передачі даних стають видимими, але користувач не може сказати, чи це пов'язано з іншими причинами, чи з використанням транзитного з'єднання ІДТТ. При практичному розгортанні, можливо, доведеться враховувати аспекти координації між операторами, якщо один і той самий діапазон використовується вузлами ІДТТ в одних і тих самих місцях різними операторами, щоб уникнути відомої проблеми інтерференції висхідної/низхідної лінії зв'язку TDD.

У випуску 17 ведеться робота над подальшим розвитком роботи з ІДТТ, включаючи більш детальний розгляд аспектів дуплексування, таких як одночасна робота дочірніх і батьківських каналів вузла ІДТТ або включення подвійного підключення для топологічної надмірності, а також вдосконалення для зменшення переривання обслуговування через міграцію вузлів ІДТТ і відновлення після збоїв в роботі радіоканалу (RLF).

2.8 Забезпеченні високоякісного обслуговування додатків миттєвого реагування та безперервної доступності

Досягнення надвисокої надійності та низької затримки є ключовим завданням для мереж 5G, особливо для послуг з надійністю та затримкою, таких як критично важливий зв'язок (Ultra-Reliable Low-Latency Communications - URLLC). Розглянемо аспекти, які враховуються для досягнення цих цілей. Забезпечення достатнього резервування ресурсів для гарантії обслуговування критично важливого трафіку, навіть у ситуаціях перевантаження мережі.

Розробка механізмів, що дозволяють мінімізувати втрати пакетів та забезпечують відновлення в разі втрат. Використання різних шляхів та дублювання для забезпечення доступності в умовах відмов. Запис подій та можливість відновлення стану системи в разі відмов. Використання коротших інтервалів часу передачі (TTI) для мінімізації затримок. Використання технологій, таких як масивне MIMO та формування променя для забезпечення оптимальної направленості сигналу. Використання обчислювальних ресурсів на мережевих краях для обробки даних ближче до кінцевого користувача, що допомагає зменшити затримки. Ефективне керування трафіком для мінімізації затримок в мережі. Використання швидкого передавання даних (Fast Data Transmission) для максимальної ефективності передачі.

Вказані фактори допомагають створити оптимальну інфраструктуру для послуг з надійністю та затримкою в мережах 5G, де кожен момент та мілісекунда мають велике значення, особливо в критичних відмінних відмовах і вимогах реального часу.

У версії 15 до специфікацій 5G були включені перші елементи наднадійності та низької затримки (URLLC). Це дозволяє нам надавати послуги з вищою надійністю, ніж це потрібно для мобільного ширококуткового зв'язку. Випуск 15 був спрямований на забезпечення надійності $10E-5$ (наприклад, для розважальних застосувань), тоді як випуск 16/17 був спрямований на більш надійне ($10E-6$) надання послуг для транспорту, автоматизації виробництва і підтримки вимог до управління розподілом енергії. Елементи, які вже є у версії 15, включають:

- Високонадійні таблиці набору модуляції та кодування (MCS) і відповідні визначення зворотного зв'язку інформації про якість каналу (CQI), а також роботу з міні-слотами з низькою затримкою. Крім того, реалізовано підтримку дублювання даних на рівні PDCP та логічної пріоритизації каналів.

У випуску 16 було продовжено роботу над вдосконаленням URLLC, а також над роботою промислового IoT. Ця робота була зосереджена на вдосконаленні каналів зв'язку для підвищення надійності, таких як повторення PUSCH і

вирішення проблеми пріоритизації всередині UE, а також на вдосконаленні вищих рівнів за допомогою стиснення заголовків Ethernet, а також на розширенні дублювання PDCP до чотирьох каналів. В цілому, це має уможливити використання чутливих до часу мереж (Time-Sensitive Networking, TSN), де час передачі є детермінованим, що дозволить підтримувати роботу Ethernet стандарту IEEE 802.1-типу з 5G. Це актуально для промислової автоматизації, де важливо, щоб, наприклад, роботи діяли на одному об'єкті з синхронізованим часом. Приклад TSN показано на рисунку 2.20 [42].

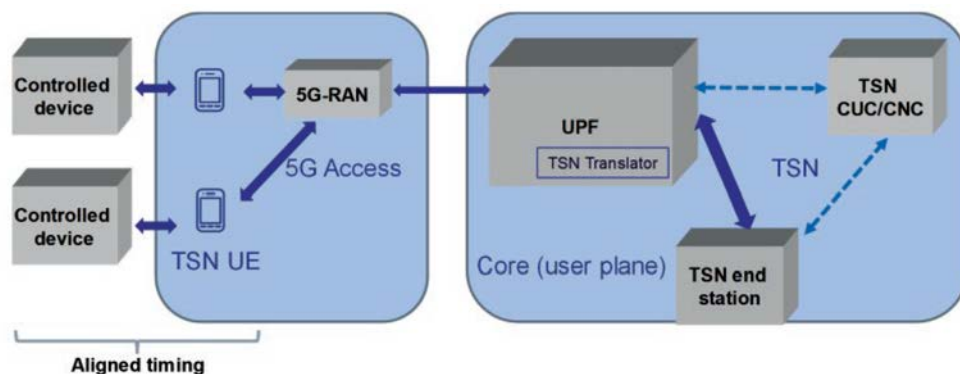


Рисунок 2.20 – Схема взаємодії швидкісних комунікацій в мережі 5G

Випуск 17 розширив можливості TSN за рахунок чутливого до часу зв'язку (Time-Sensitive Communications, TSC), що дозволяє підтримувати широкий спектр рішень для автоматизації виробництва на базі 5G з розширеною підтримкою синхронізованої в часі роботи. Ці рішення дозволяють нам забезпечити кращу синхронізацію часу, включаючи компенсацію затримки поширення, що робить 5G RAN кращою платформою для роботи різних рішень для автоматизації виробництва. Робота над випуском 17 також охоплювала поліпшення в роботі URLLC з неліцензійним спектром з режимом роботи неліцензійного діапазону з обладнанням на основі кадрів (FBE), що дозволяє використовувати ініційований користувачем час зайнятості каналу (COT) для зменшення затримок.

2.9 Відкрита RAN мережа

Однією з ключових характеристик O-RAN є розробка стандартів для інтерфейсів між різними функціональними блоками мережі RAN, такими як Radio Unit (RU), Distributed Unit (DU) та Centralized Unit (CU). Всі ці ініціативи та стандарти призначені забезпечити високу ефективність та інтероперабельність мереж RAN, що відкриває шлях для розвитку та впровадження технологій 5G.

Як зазначалося раніше, в альянсі O-RAN проводиться більше роботи над інтерфейсом фронтального зв'язку між радіостанцією і віддаленою станцією [2]. У той час як 3GPP в основному запровадив поділ між CU і DU, специфікація O-RAN запровадила подальший поділ між функціональними можливостями DU і RU. Функціональний розподіл, обраний O-RAN, є варіантом 7.2, визначеним у специфікаціях eCPRI, які обговорювалися раніше. O-RAN визначає більш детальні специфікації відкритого інтерфейсу між RU та DU, оскільки не всі аспекти інтерфейсу, необхідні для роботи з багатьма постачальниками, були охоплені в специфікаціях eCPRI. У 2022 році O-RAN розпочала подальшу роботу над розвитком функціонального розділення DU/RU для покращення продуктивності висхідної лінії зв'язку. Крім того, в рамках роботи O-RAN розглядаються ще близько 10 інших інтерфейсів.

У середовищі O-RAN для позначення з'єднання між RU і DU використовується термін fronthaul (FH), а для з'єднання F1 між DU і CU - midhaul, як показано на рисунку 2.21. У цьому випадку, функціональний розподіл між CU і DU відповідає визначенню 3GPP.

Крім 3GPP F1 (також званого 3GPP вищого рівня), розгортання на основі O-RAN або розгортання типу class-ical мають функціональність BTS на стороні радіозв'язку, як це характерно для розгортання LTE, якщо не використовуються такі підходи, як "готелі" базового діапазону. Розгортання мереж 5G було розпочато до того, як були доступні специфікації O-RAN, тому очікується, що

FN на основі O-RAN (або інші інтерфейси) будуть впроваджені на більш пізньому етапі розгортання мереж 5G.

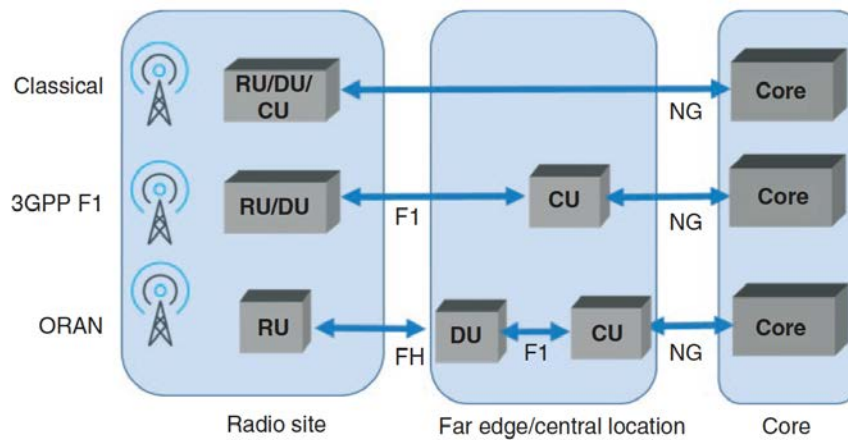


Рисунок 2.21 – Схема магістрального/середньوماгістрального доступу

Від того, яке з рішень використовується, залежать вимоги до транзитного зв'язку, зокрема, наскільки далеко наступний пристрій може бути розташований від фактичної радіостанції. Ці аспекти розглядаються в наступних розділах цієї книги.

Крім інтерфейсу RU і транзитного інтерфейсу, показаного на рисунку 2.21, O-RAN вводить інші можливі елементи, такі як RAN Intelligence Controller (RIC), який спрямований на оптимізацію продуктивності мережі. RIC, як показано на рисунку 2.22, є елементом площини управління і підключається до CU за допомогою інтерфейсу тільки площини управління. Власне користувацькі дані не проходять через RIC. Для інтерфейсу площини керування до RIC в роботі O-RAN використовується назва E2 [2]. Очікується, що в RIC будуть розміщені різні додатки (майже в реальному часі), які допоможуть роботі CU в різних сферах управління радіочастотним ресурсом. Сам RIC в подальшому буде підключений до функцій оркестрування та автоматизації мережі для роботи/автоматизації в режимі, відмінному від реального часу. Інтерфейси, засновані на специфікаціях O-RAN, доповнюють інтерфейси, визначені 3GPP [43].

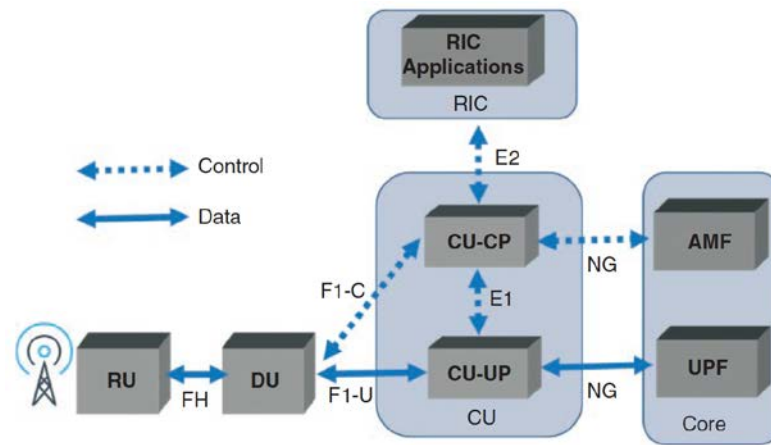


Рисунок 2.22 – Схема інтелектуального контролера в архітектурі O-RAN

2.10 Удосконалення мобільних мереж доступу до нових технологій та послуг

Розвиток 3GPP є постійним процесом, а нові випуски вносять інновації та вдосконалення для відповіді на зростаючі вимоги мобільних мереж. Стандарти 3GPP надали перший повний набір специфікацій (включаючи можливості UE) для режиму NSA в грудні 2018 року, після чого в 2019 році з'явилися автономні (SA) специфікації 5G. Після випуску версії 15 зусилля протягом решти 2019 року були зосереджені на роботі над версією 16, яка була в основному завершена наприкінці 2020 року. Зміст (на рівні функцій) також був узгоджений для Релізу 17, причому робота, розпочата в 2020 році, була завершена в червні 2022 року (з можливістю впровадження до вересня 2022 року), як показано на рисунку 2.23.

Розвиток 3GPP визначає майбутнє та розвиток мобільних та бездротових комунікацій, дозволяючи нові можливості та сервіси для користувачів та промисловості.

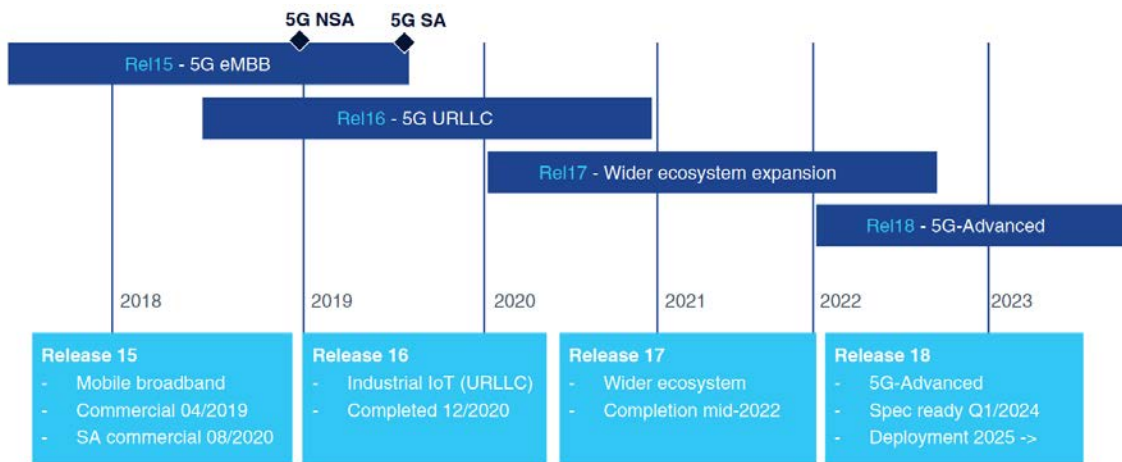


Рисунок 2.23 – Класифікація стандартів 3GPP

Ключові нові елементи 16-ї версії показані на рисунку 2.24, включаючи промисловий IoT, а також підтримку 5G для роботи в неліцензованому діапазоні (5 ГГц неліцензований діапазон), а також такі функції, як енергозбереження 5G V2X або UE, або вдосконалення MIMO. Перші версії IAB також були представлені у випуску 16. Більш детальну інформацію про різні функції випусків 15/16 можна знайти в [44].

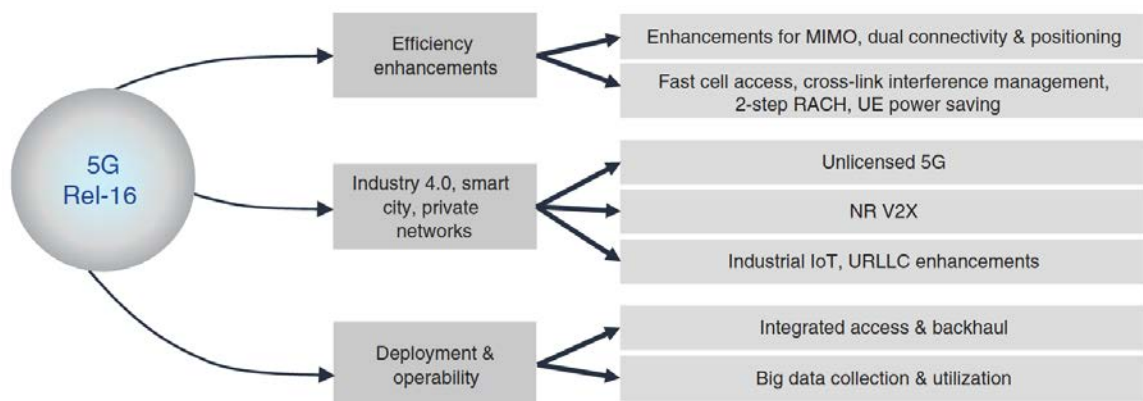


Рисунок 2.24 – Основний зміст 3GPP версії 16

Випуск 17 продовжив розширювати екосистему, одночасно покращуючи роботу мобільного широкосмугового зв'язку в багатьох сферах. Ключовими елементами випуску 17 є вдосконалена робота промислового IoT, а також

подальше вдосконалення MIMO і подальше вдосконалення позиціонування. Деякі з нових елементів включають RedCap (Reduced Capability), який розробляє нову категорію UE для додатків, які не потребують повної підтримки 5G, таких як камери спостереження, промислові датчики або модулі для домашньої автоматизації, де швидкості передачі даних 10-100 Мбіт/с буде достатньо. Також були включені вдосконалення для OBC, а також подальший розвиток зручності використання бічних каналів як для операцій громадської безпеки, так і для таких рішень, як "транспортний засіб - пішохід" (V2P). Новим сегментом є також використання NR з супутниковими мережами, використовуючи термін 3GPP Non-Terrestrial Networks (NTN), що охоплює висотні платформи (HAPS). Ключові елементи версії 17 показані на рисунку 2.25.

Інші елементи будуть представлені у версії 18 після завершення роботи над версією 17 (в середині 2022 року). У початковому графіку випуску Релізу 17 відбулася певна затримка, оскільки протягом 2020 і 2021 років заплановані засідання 3GPP повинні були проводитися в електронному вигляді через обмеження, пов'язані з Covid-19, і, таким чином, початок роботи над Релізом 17 був відкладений, з акцентом на завершення роботи над Релізом 16 в 2020 році, коли електронні засідання замінили звичайні заходи 3GPP.

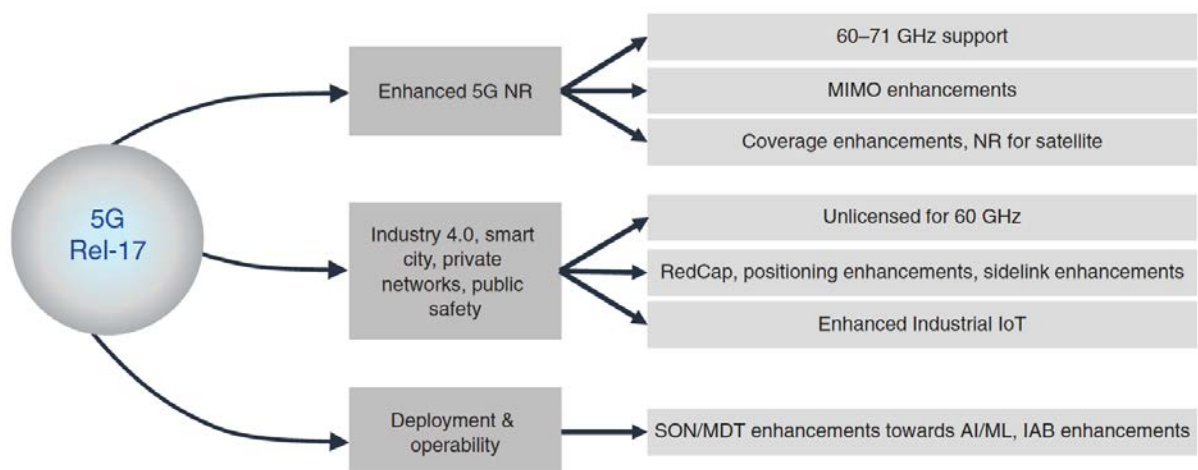


Рисунок 2.25 – Технологічні основи 3GPP версії 17

Сам зміст Релізу 17 залишився незмінним, але графік був відкладений на 9 місяців, і завершення роботи над ним заплановано на середину 2022 року. 3GPP завершила роботу над змістом релізу 18 наприкінці 2021 року. Останню інформацію про графік 3GPP можна знайти за посиланням [45].

2.11 Технологічний розвиток 5G

Випуск 18 3GPP отримав назву "5G-Advanced". Ця нова назва може бути виправдана, оскільки версія 18 знаходиться в графіку між першою версією специфікацій 5G і очікуваною першою версією специфікацій 6G. Нова назва також може бути виправдана тим, що можливості релізу 18 виходять за рамки початкового бачення 5G. Основні напрямки еволюції 3GPP показані на рис. 2.26.

Радіоприскорювачі: у версії 18 продовжується вдосконалення радіоможливостей з точки зору швидкості передачі даних, покриття і пропускної здатності. Основна увага приділяється висхідній лінії зв'язку, оскільки очікується, що майбутні послуги вимагатимуть більш високих можливостей висхідної лінії зв'язку. Автоматизація та енергозбереження: Штучний інтелект (ШІ) і машинне навчання (МН) можуть бути використані для оптимізації мережі, а пізніше навіть для параметрів повітряного інтерфейсу.

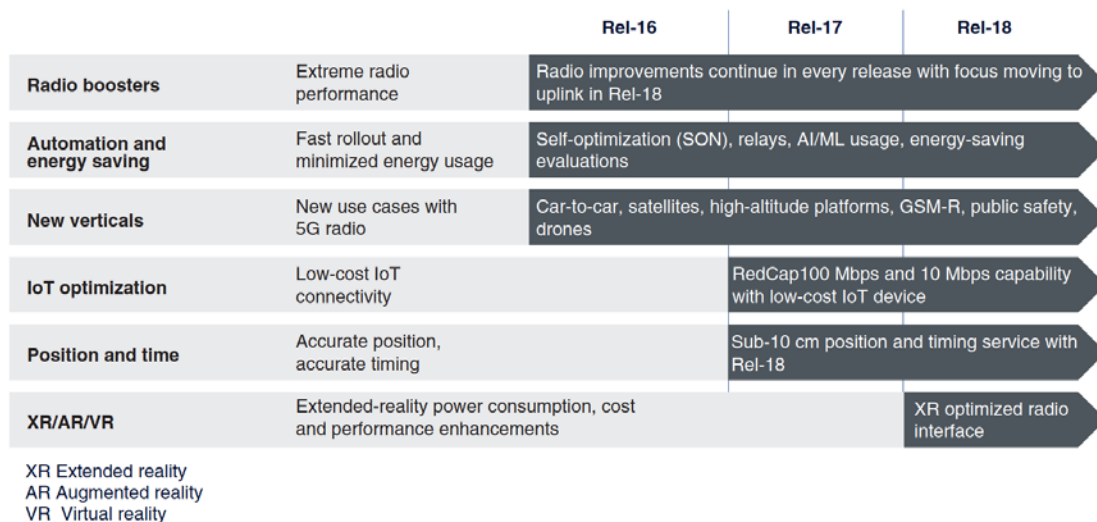


Рисунок 2.26 – Технологічний аналіз 5G-Advanced

Енергозбереження є ще однією важливою метою, яку слід враховувати в процесі еволюції функцій 3GPP. Нові вертикалі: мета полягає в оптимізації радіо 5G для нових випадків підключення, включаючи зв'язок між автомобілями, супутниками, висотними платформами, управління залізничним транспортом замість GSM-R, громадську безпеку і безпілотники. Оптимізація IoT: RedCap UE будуть оптимізовані для підключення до Інтернету речей завдяки нижчій вартості та меншому енергоспоживанню порівняно з повноцінними модемами 5G. 5G IoT забезпечить значно вищі можливості в порівнянні з рішеннями IoT на базі LTE. Точне місцезнаходження і час: мережа 5G зможе надавати користувачам інформацію про їхнє точне місцезнаходження з точністю до 10 см і точний час.

Традиційно для отримання такої інформації потрібні супутникові рішення.

Розширена реальність (XR): 5G-Advanced принесе низку покращень для зв'язку XR, включаючи економію енергії пристроїв XR, затримку, мобільність, обізнаність про додатки в радіоефірі, використання периферійних хмар і пропускну здатність [46].

Мета 3GPP - завершити випуск 18-ї версії протягом першого півріччя 2024 року, що призведе до перших комерційних розгортань, починаючи з 2025 року.

2.12 Висновки до розділу 2

Створення високопродуктивної мережі 5G включає в себе ряд ключових кроків та стратегій. Визначення оптимальних частотних діапазонів, включаючи використання високочастотних діапазонів (міліметрові хвилі), що дозволяє досягти високої пропускну здатності. Розгортання великої кількості малих стільникових базових станцій (Small Cells) для забезпечення високої густоти покриття та підтримки великої кількості підключених пристроїв.

Впровадження технології Massive MIMO для покращення ефективності використання радіоресурсів та забезпечення кращої пропускну здатності.

Використання технології Network Slicing для розділення мережі на віртуальні частини, що дозволяє оптимізувати ресурси для конкретних типів послуг.

Застосування технологій Beamforming для направленої випромінювання сигналу, що дозволяє забезпечити кращу якість покриття та підвищити продуктивність. Використання хмарних технологій та віртуалізації для створення гнучких та ефективних мереж, здатних швидко адаптуватися до змін у вимогах та навантаженні.

Впровадження алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації управління мережею, передбачення витрат ресурсів та виявлення аномалій. Врахування високих стандартів безпеки для захисту від кіберзагроз та забезпечення надійності та конфіденційності даних. Застосування Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) для застосунків, де важлива висока надійність та низька затримка. Розробка та впровадження енергоефективних технологій для зниження витрат енергії мережі. Отже, створення високопродуктивної мережі 5G вимагає інтеграції різноманітних технологій та стратегій для оптимального використання ресурсів та забезпечення задоволення різноманітних вимог користувачів та застосунків.

3 ЕФЕКТИВНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ МЕРЕЖ 5G

3.1 Вимоги до продуктивності та гнучкості мережі доступу

Транспортний потенціал в контексті мереж 5G визначає можливості та характеристики транспортного шару мережі, які дозволяють забезпечувати ефективну передачу даних та підтримувати різноманітні вимоги застосувань. Розглянемо основні аспекти транспортного потенціалу. Мережі 5G мають підтримувати дуже високі швидкості передачі даних, що дозволяє користувачам отримувати доступ до великого обсягу даних на великих швидкостях. 5G має забезпечити низьку затримку для реального часу та критично важливих застосувань. Це важливо для сценаріїв, таких як автономні автомобілі, віртуальна реальність та інші додатки, де низька затримка визначальна.

Транспортний потенціал 5G повинен забезпечувати велику пропускну здатність для підтримки розширених мереж та великого обсягу одночасних з'єднань. Мережі повинні бути масштабованими, щоб впоратися з ростом кількості підключених пристроїв та обсягом трафіку. Забезпечення гнучкості та віртуалізації транспортного шару для ефективного управління ресурсами та швидкого впровадження нових послуг. Використання нових технологій транспорту, таких як Network Slicing (розділення мережі), IPv6, технології передачі бездротового зв'язку в міліметровому діапазоні (mmWave) та інші.

Забезпечення високого рівня безпеки для захисту від атак та забезпечення конфіденційності та цілісності даних у транспортному шарі. Підтримка інновацій та вдосконалення у транспортному потенціалі для забезпечення ефективного використання ресурсів та підтримки різноманітних сценаріїв використання.

Транспортний потенціал 5G є ключовим елементом для забезпечення успішного впровадження та функціонування мереж нового покоління, які мають високі вимоги до продуктивності та гнучкості.

Новий спектр 5G в середньому і високому діапазонах і використання масивних антен MIMO (Multiple Input Multiple Output) збільшують пропускну здатність мережі і дозволяють своєчасно оновлювати пропускну здатність мережі для транспортних ліній і вузлів. Формування променя і масивне MIMO особливо розширюють піки пропускну здатності і роблять різницю між піковою і середньою пропускну здатністю для транспорту більшою в 5G, ніж в LTE.

У FR1 основною метою MIMO є підвищення спектральної ефективності, оскільки смуга пропускання обмежена. У FR2 основною метою MIMO є збільшення покриття, оскільки загасання є вищим. Найбільша пропускну здатність для передачі даних також припадає на більш високочастотні діапазони, такі як FR2, де пропускну здатність повітряного інтерфейсу є найбільшою.

Позначення $n \times m$ MIMO (наприклад, 2×2 MIMO) означає n передавальних і m приймальних антен. При наявності декількох антен передачі і прийому сигнал може використовувати кілька шляхів з різною швидкістю в повітряному інтерфейсі. Ці шляхи повітряного інтерфейсу забезпечують додаткову пропускну здатність, коли різні сигнали передаються різними шляхами, і різноманітність шляхів, коли один і той самий сигнал передається кількома шляхами.

Спрямування променя досягається шляхом використання декількох антенних елементів і зсуву фази сигналу для цих елементів з метою конструктивного прийому в цільовому приймачі. Приклад конструкції антени був показаний на рисунку 2.17 в розділі 2, з 192 антенними елементами, 64 TRX і підтримкою 16 потоків.

У багатокористувацькому MIMO 5G сектор підтримує кілька користувачів, кожен з яких використовує кілька потоків, максимізуючи пропускну здатність. Пікова пропускну здатність сектора залежить від кількості потоків на одного користувача і кількості користувачів.

Максимальна теоретична пікова пропускну здатність рідко досягається в практичних мережах, оскільки для цього потрібні ідеальні умови радіозв'язку для кількох користувачів, щоб кожен користувач отримував максимальну швидкість

передачі даних одночасно і незалежно від інших користувачів. Більш реалістично, все ще можуть існувати сектори, де є кілька користувачів, які статично розташовані (наприклад, не рухаються) досить близько до центру стільника, щоб отримати максимальну швидкість передачі даних у кількох потоках, але досить далеко один від одного, щоб не створювати сильних перешкод. Саме така ситуація спостерігається на лівій стороні рисунку 3.1, де зображено чотири абонентські пристрої, які отримують декілька потоків в умовах незначних перешкод від інших абонентських пристроїв, оскільки вони просторово розділені таким чином, що перешкоди є незначними, і всі абонентські пристрої ефективно ізольовані один від одного. Така ситуація може виникнути, якщо, наприклад, будівлі блокують сигнали інших користувачів [12].

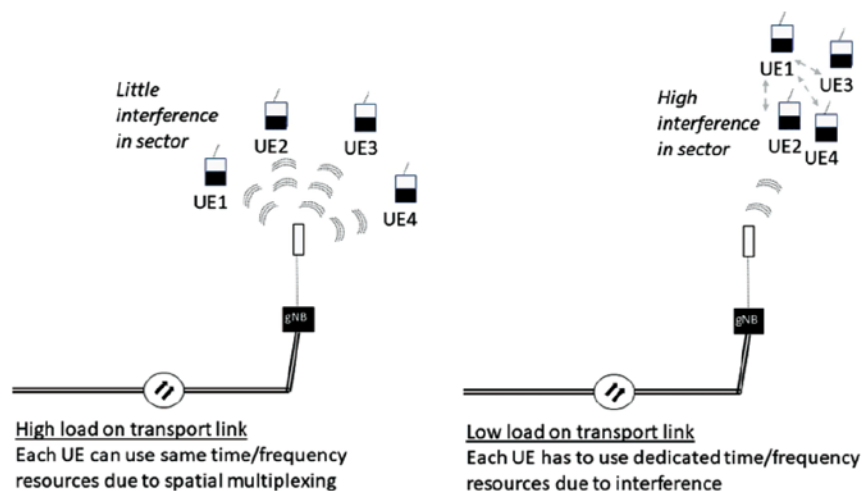


Рисунок 3.1 – Схема сегменту мережі MIMO із підвищеною пропускною здатністю

Коли кожен користувач може повторно використовувати ті самі часові та частотні ресурси, пропускна здатність транзитного каналу набагато вища.

Визначення розмірів магістральної лінії зв'язку від gNB залежить від стратегії визначення розмірів для вибору відповідної швидкості транспортної лінії між (теоретичним) піком, враховуючи масове MIMO і просторове мультиплексування, і середньою пропускною здатністю. Надання переваги

середньому значенню створює більшу ймовірність випадкових втрат пакетів на транспортних лініях, в той час як надання переваги піковому значенню призводить до більших потреб у пропускній здатності та більших транспортних витрат. На транзитному маршруті втрата пакетів для фонових мобільних широкосмугового трафіку призводить до погіршення пропускної здатності та якості обслуговування користувачів.

Після того, як цільове значення знайдено, швидкість лінії вибирається на рівні однієї з поширених лінійних швидкостей Ethernet, наприклад, 10 Гбіт/с, 25 Гбіт/с, 50 Гбіт/с або 100 Гбіт/с. Швидкість інтерфейсу може бути вищою за реальну швидкість обслуговування, якщо послуга Ethernet надається зі швидкістю, меншою за лінійну.

Формування необхідне на виході вихідного вузла (gNB), щоб уникнути відкидання пакетів поліцією вхідного вузла постачальника послуг.

Для сайтів з декількома технологіями радіодоступу, такими як 5G з LTE, 3G або 2G, лінія доступу також повинна передавати ці додаткові потоки трафіку. Зазвичай пропускна здатність цих джерел набагато менша, оскільки для сайтів LTE в основному використовуються порти 1 Гбіт/с, а для 3G і 2G потрібна ще менша пропускна здатність.

Розмірність каналу доступу відрізняється через чутливість до часу і втрат.

В системах з часовим розділом дуплексу (TDD, Time Division Duplex), відбувається періодичне переміщення між передачею (UL, Uplink) та прийманням (DL, Downlink) на одному і тому ж радіочастотному каналі. UL/DL Split вказує на часовий відсоток, який виділений для передачі та приймання. Такий розділ дозволяє використовувати один і той же радіочастотний ресурс для передачі і прийому в різний час, що може бути корисним в бездротових системах. Часовий відсоток для UL і DL може бути регульований залежно від конкретних умов мережі і вимог до передачі та прийому даних.

Наприклад, якщо встановлено TDD UL/DL Split 70/30, це означає, що 70% часу призначено для передачі (UL), а 30% - для прийому (DL). Цей режим може бути змінений в залежності від потреб мережі.

Переваги TDD включають гнучкість управління ресурсами та здатність адаптуватися до змінних умов мережі. Також, в TDD-системах може бути реалізовано спільний UL/DL канал, що дозволяє ефективно використовувати ресурси для обидвох напрямків зв'язку. Обране значення UL/DL Split зазвичай залежить від конкретних вимог мережі, обсягу UL і DL трафіку, а також можливостей та характеристик обладнання. Стандарт 5G включає в себе режими FDD і TDD. TDD використовує однакові частотні ресурси для обох напрямків, а поділ здійснюється за допомогою окремих слотів для DL і UL (наприклад, 4 низхідних і 1 висхідний). В середньому в мобільних мережах переважає низхідний трафік, хоча окремі сайти можуть відчувати високе навантаження на висхідний канал, наприклад, коли користувачі завантажують файли в хмару, тому, особливо в транзитних мережах, транспортні лінії більше завантажуються в напрямку низхідного каналу.

Пропускна здатність та параметри передачі даних у магістральному трафіку 5G можуть відрізнитися від транзитних та проміжних каналів. Розглянемо кілька ключових аспектів, що впливають на цю відмінність.

В мережах 5G використовується функціональне розділення між розподіленим блоком (DU, Distributed Unit) і радіоблоком (RU, Radio Unit). В магістральному трафіку, де пропускна здатність зазвичай визначається розгорнутим функціональним розділенням, параметри цього розділення можуть впливати на пропускну здатність магістрального каналу. Магістральний трафік часто вимагає низької затримки при проходженні трафіку через мережу. Функція планування в базовій смузї частот та використання гібридного автоматичного запиту на повторну передачу (HARQ) є ключовими для досягнення ефективної та надійної передачі даних [13].

Пропускна здатність магістрального трафіку також може залежати від конфігурації мережі, топології, архітектури мережі та особливостей розгортання. В магістральному трафіку можуть використовуватися оптимізовані параметри передачі даних для досягнення великої ефективності та відповідності конкретним вимогам магістральних зв'язків. Загалом, ефективна пропускна

здатність магістрального трафіку в мережах 5G визначається комплексом факторів, які включають розділ функцій, затримку, оптимізацію роботи транспортного інтерфейсу та розгортання мережі.

Визначення розмірів магістральних та проміжних ліній в мережах зв'язку 5G включає в себе розгляд різних факторів, таких як обсяг трафіку, вимоги до затримки, топологія мережі та конкретні вимоги конкретної мережі. Це комплексне завдання, і розміри ліній повинні бути визначені з урахуванням багатьох аспектів. У новій системі спочатку обсяг трафіку невеликий, доки не зростає кількість нових терміналів, а транспортні лінії також мало завантажені. Поступово трафік зростає, а швидша мережа - і швидші абонентські пристрої - сприяють більшому використанню. Після розгортання транспортних ліній і вузлів та встановлення послуг зв'язку, такі зміни, як збільшення пропускної здатності, вимагають додаткових зусиль, можливо, виїздів на об'єкт і навіть нових інсталяцій. Отже, необхідно мати прогноз зростання пропускної спроможності магістральних і транзитних перевезень.

Теоретично, пропускна здатність транспортного сполучення визначається за допомогою цільової структури вхідного трафіку, а потім обчислюється результуюча пропускна здатність за допомогою інструменту для визначення розмірів. Складність тут полягає в тому, що обсяг перевезень і структура послуг можуть бути недоступні в якості вхідних даних, і в цьому випадку використовуються інші методи.

Альтернативою є зіставлення пропускної спроможності транспорту з пропускною спроможністю повітряного сполучення. В крайньому випадку, транспортні лінії зв'язку створюються з урахуванням пікової пропускної здатності повітряного простору, але завжди здатні забезпечити максимальну багатокористувацьку пропускну здатність MIMO.

На практиці пропускна здатність магістральних і проміжних транспортних ліній часто розраховується відповідно до реальних потреб трафіку, з деяким запасом для зростання, щоб уникнути частих циклів модернізації. Цільове значення пропускної здатності порівнюється зі швидкістю лінії Ethernet, яка

доступна для даного об'єкта за розумною вартістю. Забезпечення пропускну здатності до теоретичного піку на кожному майданчику призводить до недовикористання транспортних зв'язків, особливо на ранній стадії, коли трафік все ще низький. Цього можна уникнути, взявши за основу проміжне значення між середнім значенням по сектору і піковим значенням по сектору. Моніторинг транспортного навантаження стає важливим, оскільки тоді можна виявити "вузькі місця" транспортного сполучення.

Визначення розміру транспортного каналу в такий спосіб вимагає детальної конфігурації сайту (радіо), оцінки накладних витрат на протокол і вибору правила визначення розміру, яке враховує пікову і середню пропускну здатність сектору. Приклади правил визначення розмірів для одного сайту показані на рисунку 3.2.

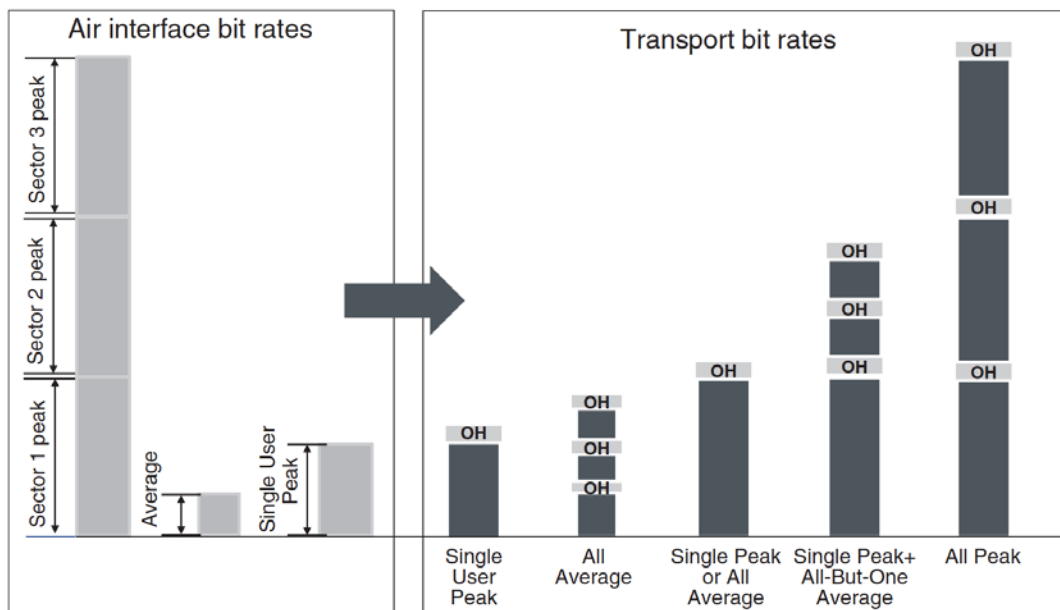


Рисунок 3.2 - Визначення оптимальних розмірів магістральних та проміжних ліній мережі 5G

Пікова швидкість для одного користувача залежить, окрім умов сектору, також від можливостей абонентського пристрою (наприклад, скільки передавальних і приймальних антен підтримується). З розвитком

користувацьких пристроїв зростає і пікова швидкість для одного користувача. Пікова швидкість для одного користувача часто використовується в маркетингу, і тоді вона слугує мінімумом, який транспортна лінія повинна підтримувати в усіх випадках.

У 5G передбачається багатокористувацька можливість МІМО з піковою швидкістю в секторі, яка досягається, коли кілька користувачів отримують пікову швидкість для одного користувача, доки не вичерпаються ресурси повітряного інтерфейсу. Вважається, що середня швидкість в секторі дорівнює певному відношенню до пікової (наприклад, 0,1, 0,3). Підтримка більш високого значення, отриманого в результаті або одного сектора з піковим навантаженням, або суми всіх секторів в середньому, часто призводить до обґрунтованого значення і використовується в наступному прикладі.

Найчастіше інтерфейси Ethernet використовуються з оптоволоконними або бездротовими середовищами, що забезпечують однакову пропускну здатність висхідної і низхідної лінії. Якщо пропускну здатність транспортного каналу однакова в обох напрямках, а обсяг трафіку повітряного інтерфейсу переважає на низхідному каналі, то низхідний канал є вузьким місцем у транспортній мережі.

Для транспортних середовищ, де пропускну здатність низхідної і висхідної лінії відрізняється, вищезазначене може бути невірним. Прикладом є PON (пасивна оптична мережа), де висхідна лінія зазвичай має меншу пропускну здатність.

Накладні витрати на протокол залежать від конкретного логічного інтерфейсу, а також від транспортної конфігурації (наприклад, чи використовується IPsec і чи є це протокол IPv6 або IPv4 на транзитному і проміжному рівнях). Оскільки користувацький рівень споживає переважну частину пропускну здатності, накладні витрати на користувацький рівень є дуже важливими. До оцінки обсягу трафіку користувацького рівня додається розподіл для інших типів трафіку, таких як рівень контролю, управління та синхронізації.

Іноді для транспортних каналів накладні витрати на протокол розраховуються тільки з урахуванням транспортного рівня; іноді вони також включають протоколи вищих рівнів (радіо).

До транспортного відносяться рівні IP, IPsec і Ethernet. Інші протоколи, залежно від логічного інтерфейсу, включають GTP-U і UDP, а потім SDAP/PDCP для внутрішнього інтерфейсу F1 5G RAN. Для визначення розмірів логічного інтерфейсу для пропускної здатності транспортної лінії слід враховувати всі накладні витрати стека протоколів, необхідні для передачі корисного навантаження користувача (UE), включаючи протоколи радіорівня 5G і протокол тунелювання.

Накладні витрати, пов'язані з заголовками протоколів, часто виражаються у відсотках від корисного навантаження, яке передається. Для невеликих користувацьких пакетів відсоток накладних витрат великий, а для великих пакетів - менший. Необхідно зробити припущення щодо співвідношення розмірів пакетів.

Якщо припустити, що низхідна лінія зв'язку є вузьким місцем, то очікується, що в сценаріях з піковим навантаженням на низхідну лінію зв'язку більшість пакетів є великими пакетами. Накладні витрати додаються як середнє значення на основі очікуваного співвідношення розмірів пакетів.

Заголовки протоколів (GTP-U/UDP/IPv6/Eth) складають близько 100 октетів. У тунельному режимі IPsec накладні витрати зростають до 180 октетів, залежно від типу використовуваних алгоритмів.

Додаткові накладні витрати з'являються у випадку, якщо потрібна фрагментація, оскільки тоді потрібні додаткові поля заголовка.

Без фрагментації для корисного навантаження в 1200 октетів накладні витрати в низхідному напрямку становлять ~8% без IPsec (IPv6) і ~15% з IPsec (IPv6). Не всі пакети є великими, навіть в умовах пікового навантаження, і фрагментація все одно може знадобитися в деяких каналах, тому можна припустити, що накладні витрати становлять 15-20% [14].

В інтерфейсі F1 додатково передаються протоколи SDAP і PDCP. Заголовки складають ~4 октети, що є незначним порівняно з накладними витратами GTP-U/UDP/IP/Eth; накладні витрати F1 і NG приблизно однакові.

Коли розраховується потреба в пропускній спроможності користувацької площини, включаючи накладні витрати, додаються потоки даних площини управління і контролю. Обсяг потоків площини управління залежить від набору послуг і припущень щодо мобільності. Аналіз для LTE наведено в [15]. Площина управління складає декілька відсотків від трафіку користувацької площини.

Обсяг трафіку в площині управління може тимчасово бути високим (наприклад, під час завантаження ПЗ). Навіть у моменти пікового навантаження трафіку має бути доступна певна пропускна здатність площини керування, щоб можна було здійснювати віддалене керування.

Синхронізація з протоколом RTP вимагає дуже малого обсягу трафіку і на практиці є незначною, але вимагає високопріоритетної обробки в мережі.

На рисунку 3.3 показано оцінку швидкості передачі даних NG і F1 на основі повітряного інтерфейсу, де показано пікові швидкості в секторі і пікові швидкості для одного користувача, а потім результати двовимірного аналізу: Альтернатива А, заснована на вищому значенні пікової швидкості в одному секторі або середньому значенні для всіх секторів, і Альтернатива В, заснована на піковій швидкості для одного користувача, яка слугує нижньою межею.

Для діапазонів FR1 і <1 ГГц передбачається трисекторна конфігурація, а для діапазонів FR2 і вище - двосекторна.

Для розгортання FR1 з пропускною здатністю 100 МГц і трисекторною конфігурацією потреба в пропускній здатності становить 2,2-4,6 Гбіт/с для транзитного або магістрального зв'язку, в залежності від обраної стратегії визначення розмірів, що призводить до того, що прийнятою швидкістю лінії є 10 Гбіт/с. У LTE найбільш поширеною була швидкість 1 Гбіт/с.

Для розгортання FR2 на прикладі двох секторів необхідна пропускна здатність становить 7-14 Гбіт/с.

| Air interface | | | | | | Transmission bit rates NG or F1 | |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|--|
| Frequency | Bandwidth | SU-MIMO streams | MU-MIMO streams | Sector peak rate | Single User peak rate | Alternative A: Air if based | Alternative B: Single user peak rate based |
| >60 GHz | 5 GHz TDD | 2 | 4 | 50 Gbps | 25 Gbps | 2 sector config. 58 Gbps | 29 Gbps |
| 24-28 GHz | 800 MHz TDD | 2 | 4 | 12 Gbps | 6 Gbps | 2 sector config. 14 Gbps | 7 Gbps |
| 3.3-4.8 GHz | 100 MHz TDD | 4 | 8 | 4 Gbps | 2 Gbps | 3 sector config. 4.6 Gbps | 2.2 Gbps |
| <1 GHz | 20 MHz FDD | 2 | 2 | 0.2 Gbps | 0.2 Gbps | 3 sector config. 0.3 Gbps | 0.23 Gbps |

Рисунок 3.3 – Оцінювання швидкості передачі даних в мережах 5G (NG) та по інтерфейсу F1

Транспортування по магістралі забезпечує передачу низькорівневих бітів даних між двома елементами радіомережі 5G, DU і RU. Частина обчислень на радіорівні виконує RU, а частину - базова смуга.

Вимоги до пропускної здатності в магістральному сегменті вищі, ніж в проміжному або транзитному, оскільки тепер дані передаються не на основі користувацьких пакетів, а являють собою частково оброблений бітовий потік L1, призначений для RU, який завершує обробку на L1. Цей потік бітів L1 займає більше пропускної здатності, ніж IP-пакет користувача, інкапсульований в GTP-U. Він також має додаткові вимоги до затримки, оскільки планування повітряного інтерфейсу відбувається в базовій смузі, яка знаходиться "позаду" фронтального каналу, а петля HARQ працює над фронтальним каналом.

Деталі функціонального розділення визначені в O-RAN [3]. Опція O-RAN 7-2 - це потік відліків IQ у частотній області. Можливі й інші альтернативи та суб-варіанти, що призводять до зміни пропускної здатності транспортної лінії. У напрямку низхідної лінії зв'язку з RU категорії А попереднє кодування здійснюється в базовій смузі, тоді як з RU категорії В попереднє кодування підтримується в RU. У напрямку висхідної лінії опція розділення 7-3 переміщує IRC (комбінування завадостійкості) до RU. Все це впливає на пропускну спроможність магістрального трафіку [16].

Загалом, пропускна здатність зменшується, коли більше функціональних можливостей вбудовується в RU. Основним недоліком додавання функціональності до RU є те, що тоді RU стає більш складним елементом мережі і, як наслідок, зменшується обсяг обчислень, які можна централізувати в готелі базового діапазону або в хмарі радіозв'язку на периферії. Вища смуга пропускання (100 МГц у FR1, 800 МГц у FR2) збільшує швидкість передачі даних у прямому каналі. Збільшення рівнів MIMO також сприяє цьому.

| FR1 100 MHz | | FR2 800 MHz |
|-------------|------------|-------------|
| 8 streams | 16 streams | 2 streams |
| 13-20 Gbps | 25-40 Gbps | 25-40 Gbps |

Рисунок 3.4 - Пропускна здатність каналу доступу для смуги пропускання FR1 100 МГц

Функції, що виконуються базовою смугою і RU у низхідній і висхідній лініях на кожену точку розділення, були описані в розділі 2.

Пропускна здатність показана на рис. 3.4 для смуги пропускання повітряного інтерфейсу 100 МГц у FR1 і смуги пропускання повітряного інтерфейсу 800 МГц у FR2.

Для РУ категорії В вимоги до пропускної здатності знижуються приблизно вдвічі, якщо припустити, що кількість рівнів дорівнює половині кількості антенних портів.

Для транспортних мереж необхідне суворе обслуговування в реальному часі, оскільки планування відбувається в базовій смузі. Це означає, що черги в магістральному каналі з великими буферами неможливі, і це також обмежує вигреш від статистичного мультиплексування на рівні мережі, якщо тільки не відомо, що сайти не відчувають пікового попиту в один і той же момент часу, що, як правило, неможливо припустити [17].

У прямому трафіку затримка пакетів за межами вікна прибуття є марною. Якщо запланований слот у повітряному інтерфейсі вже зайнятий, коли пакет прибуває з магістралі, пакет відкидається, тому перевищення граничного значення затримки призводить до втрати пакетів магістралі. Втрата пакетів викликає повторну передачу між UE і базовою смугою. Втрата пакетів, перевантаження і надмірна затримка призводять до погіршення продуктивності повітряного інтерфейсу, оскільки ресурси повітряного інтерфейсу витрачаються на компенсацію недосконалості магістралі. Це спонукає до проектування систем прямого доступу, в яких затримки і втрати можуть бути жорстко контрольовані. Відповідний профіль визначено в IEEE802.1CM [18].

Вимоги до пропускної здатності фронтального каналу складаються з потоку дискретизації користувацької площини і додаткових швидких даних управління, вбудованих в потік трафіку користувацької площини. Інші потоки призначені для управління мережею та синхронізації (у випадку синхронізації на основі пакетів).

На практиці інтерфейси Ethernet і канали Ethernet використовуються як для транзитного, так і для магістрального трафіку, причому стандартні лінійні швидкості Ethernet однакові для обох напрямків.

При наявності декількох джерел вхідного сигналу транспортні лінії не можуть бути розраховані на повну номінальну швидкість, оскільки затримка значно зростає в найнижчих за пріоритетністю чергах, коли завантаження лінії перевищує 70-80%. Враховуючи це, швидкість лінії Ethernet обирається так, щоб задовольнити поточні вимоги та прогнозоване зростання на деякий час вперед.

На рис. 3.5 показано приклади транспортних потужностей для різних швидкостей лінії Ethernet.

Для магістрального і проміжного транспорту (F1 і NG2) трисекторна конфігурація gNB FR1 100 МГц може використовувати порт Ethernet 10G. Таким чином, в той час як LTE спочатку використовував для транзиту в основному швидкість 1 Гбіт/с, в 5G порівнянна швидкість лінії становить 10 Гбіт/с.

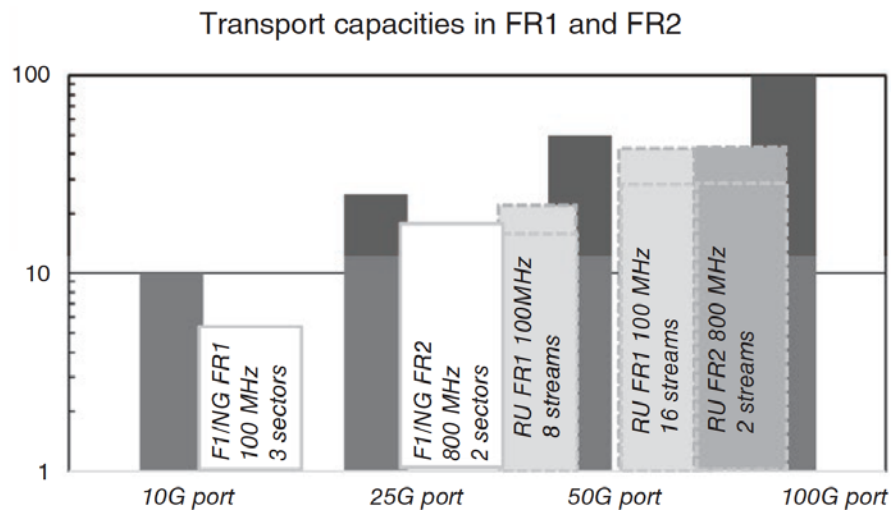


Рисунок 3.5 - Оцінка пропускної здатності для FR1 і FR2 та загальна швидкість портів Ethernet

У FR2 з двосекторною конфігурацією на 800 МГц вимоги до пропускної здатності зростають понад 10 Гбіт/с, що передбачає використання порту 25 Гбіт/с.

Для магістрального зв'язку пропускна здатність вища, і використовуються порти 25 Гбіт/с і 50 Гбіт/с.

Кілька портів Ethernet, наприклад, зі швидкістю 10 Гбіт/с, можуть бути згруповані для збільшення пропускної здатності за допомогою агрегації каналів. Агрегація каналів Ethernet [19] дозволяє зв'язати канали, що входять до групи агрегації каналів, яка потім виглядає як єдиний інтерфейс.

Ethernet відомий своєю постійною еволюцією в напрямку підвищення швидкості передачі даних. Швидкість досягається спочатку збільшенням швидкості односмугової передачі даних, а потім використанням цих смуг у кратних кількостях, наприклад, 2×, 4×, 8×.

Після 25 Гбіт/с односмугова швидкість 50 Гбіт/с стандартизована як IEEE 802.3cd з використанням модуляції PAM-4 [6]. Швидкість лінії 50 Гбіт/с є першою з модуляцією замість NRZ (Non-Return Zero). Лінії 50G можуть бути використані для 100G або 200G. Стандарт для односмугових ліній 100 Гбіт/с

підтримується IEEE 802.3ck [20], що дозволяє 200 Гбіт/с або 400 Гбіт/с. 1.6T може стати наступним кроком.

Іншою необхідною характеристикою Ethernet є його низька вартість. Як правило, порти з найвищою швидкістю спочатку є дуже дорогими, поки обсяг не зростає і ціни не знижуються, тому вибір швидкості лінії для транзитного і магістрального зв'язку на практиці залежить від того, яка швидкість є економічно обґрунтованою на момент розгортання мережі. Потім, на вищих рівнях мережі, багатократні 10 Гбіт/с з точки доступу вимагають висхідних каналів більшої пропускної здатності, наприклад, 100 Гбіт/с.

У багатьох випадках сайт доступу є спільним, і кілька базових радіотехнологічних станцій обслуговуються одним і тим же висхідним каналом зв'язку, а комутатор сайту консолідує всі потоки трафіку. Ці інші технології можуть створювати додаткові потоки трафіку, як правило, до декількох гігабіт на секунду.

Такі рішення, як PON і мікрохвильові/бездротові технології (включаючи інтегрований доступ і транзитний зв'язок [IAB]), можуть пропонувати ціни на послуги, які безпосередньо не відповідають цінам лінійних мереж Ethernet. Клієнтський пристрій, базова станція, може також взаємодіяти з пристроєм постачальника послуг через UNI, який підтримує послугу Ethernet зі швидкістю, меншою за лінійну (наприклад, лінійна швидкість Ethernet 25 Гбіт/с використовується для послуги Ethernet зі швидкістю 15 Гбіт/с). Інтерфейс виходу на стороні клієнта формується відповідно до правильної швидкості обслуговування, щоб уникнути втрати пакетів через переповнення буфера або політику на стороні провайдера.

3.2 Доступність та надійність мобільної мережі

Загальна надійність та доступність визначаються як технічними характеристиками мережі, так і оперативною ефективністю оператора мережі. Розвиток та впровадження нових технологій, таких як 5G, допомагає покращити ці характеристики, але також вимагає системного підходу до управління та підтримки мережі. 3GPP визначає доступність послуги зв'язку як "відсоткове значення часу, протягом якого наскрізна послуга зв'язку надається відповідно до узгодженого QoS, поділене на час, протягом якого система повинна надавати наскрізну послугу відповідно до специфікації в певній області" [11].

Для доступності A формула описується рівнянням (3.1):

$$A = \frac{\text{Operation time}}{(\text{Operation time} + \text{downtime})} = \frac{\text{MTBF}}{(\text{MTBF} + \text{MTTR})} \quad (3.1)$$

MTBF = середній час напрацювання на відмову і MTTR = середній час на ремонт. MTBF - це очікуване значення, яке базується на певному припущенні щодо розподілу відмов і не є гарантією того, що окрема система працюватиме без збоїв протягом усього MTBF.

Іноді п'ять дев'яток позначають як високу доступність, але це не є формальним визначенням. 3GPP визначає надійність послуги зв'язку як "здатність послуги зв'язку працювати відповідно до вимог протягом заданого інтервалу часу за заданих умов" [12].

Надійність часто розраховується за експоненціальним розподілом з інтенсивністю відмов " для певного часу місії t , рівняння (3.2). Експоненціальний розподіл не має пам'яті, що означає, що коли система знаходиться в експлуатації, очікується, що вона буде працювати правильно так само довго, як і нова система, незалежно від того, як довго вона вже працює. Це припущення справедливе, коли система пройшла фазу дитячої смертності і перебуває у фазі плато кривої

інтенсивності відмов, перш ніж інтенсивність відмов знову зросте в кінці терміну служби через зношування:

$$R = e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

Ця формула оцінює надійність компонента протягом інтервалу часу t , коли відома інтенсивність відмов λ . Інтенсивність відмов є величиною, оберненою до напрацювання на відмову (MTBF), рівняння (3.3):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (3.3)$$

Різниця між доступністю та надійністю полягає в тому, що надійність допомагає оцінити ймовірність успіху місії протягом певного часу її виконання. Доступність також охоплює те, що відбувається після збою, скільки часу потрібно для відновлення працездатності системи. Додаткову інформацію можна знайти в [13] та [14].

Зрештою, цікавим є встановлення цільового показника доступності для послуги 5G і будь-яких цілей надійності URLLC для доставки пакетів, а потім встановлення відповідних цільових показників для зворотного і прямого трафіку.

На рівні мобільної системи аналіз доступності з урахуванням основної мережі, радіомережі та мережевих елементів наведено в [15]. [15] для мереж 2G і 3G.

Принципи, викладені там, можуть бути застосовані і для мережі 5G, щоб знайти вузькі місця і критичні єдині точки відмови, в тому числі в транспортній мережі.

Визначення доступності залежить від того, коли система 5G все ще вважається робочою: чи потрібно, щоб усі gNB працювали в мережі, чи допускається, що деякі з них не працюють. Якщо частина gNB може не працювати, то і канал доступу до цієї gNB може не працювати, якщо зв'язок з

іншими gNB працює. Оскільки зони стільникового зв'язку перекриваються, UE можуть обслуговуватися іншою базовою станцією під час виходу з ладу ділянки, що вийшла з ладу. Продуктивність мережі може погіршитися, оскільки зменшиться пропускна здатність і, можливо, з'являться інші обмеження. Це, однак, підкреслює важливість наявності інших, розташованих поблизу базових станцій у разі виходу з ладу однієї з них.

На частотах FR2 (міліметрові хвилі) стільники мають невеликі розміри. Випадки використання FR2 полягають у збільшенні пропускної здатності мережі (хот-споти) або забезпеченні покриття в певних місцях, таких як вуличні каньйони. У хот-спотах, як правило, існує макрорівень (FR1 або LTE), який забезпечує обслуговування, якщо комірка FR2 не працює. У випадку з покриттям може не бути жодної іншої стільники. На FR2 допомагає те, що формування променя дозволяє спрямовувати промені, і таким чином інша комірка може досягти того ж місця.

Типові показники доступності для транспортних зв'язків "останньої милі" в даний час складають від чотирьох до п'яти дев'яток. Середній час простою на рік становитиме 52,56 хв для чотирьох дев'яток. Наскрізна доступність транзитної мережі, включаючи всі лінії і вузли на шляху проходження сигналу, обмежується лінією доступу до місця розташування стільника (лінією останньої милі), яка рідко захищається.

На вищих рівнях транспортної мережі відмовостійкість легше організувати, а також вона є більш важливою завдяки агрегації трафіку з декількох стільникових вузлів. Прикладами критично важливих сайтів є вузлові сайти на рівнях доступу та агрегації, а також будь-який готель базового діапазону або віддалені сайти. Втрата цих сайтів або висхідних посилань призводить до відключення регіону, тому відмовостійкість є критично важливою. Зазвичай потрібен цільовий мінімум доступності на рівні п'яти дев'яток.

На цих вищих рівнях мережі топологія побудована з урахуванням відмовостійкості, і доступні альтернативні шляхи. Домінуючою технологією є IP/MPLS через оптичну інфраструктуру, і, наприклад, для IP VPN, зазвичай

альтернативні шляхи підтримуються на рівні зовнішнього тунелю в мережі провайдера на основі IGP (внутрішні шлюзові протоколи). Підключення до служби IP VPN також є стійким завдяки використанню подвійного підключення, тому можна уникнути єдиної точки відмови.

Причинами транспортних збоїв є обриви кабелю та інші збої в роботі з'єднання, збої вузлів, відключення електроенергії, а також людські помилки, такі як неправильна конфігурація.

Оцінити частоту збоїв складно. Вона може базуватися на даних, зібраних з реальних мереж. Точність розрахунків доступності або надійності залежить від обґрунтованості припущень. Методологію і формули можна використовувати, скоригувавши вхідні припущення відповідно до конкретного випадку, що аналізується.

Для волоконно-оптичних ліній зв'язку частоту відмов можна оцінити за допомогою показника обриву кабелю (CC) і довжини кабелю (L), рівняння (3.4):

$$MTBF = \frac{1 \text{ year}}{L} \cdot CC \quad (3.4)$$

CC показує відстань, на яку обривається кабель за рік. Середній час напрацювання на відмову зменшується зі збільшенням довжини кабелю, оскільки при більшій відстані існує більша ймовірність обриву кабелю через будівельні роботи, копання тощо в певній точці вздовж маршруту кабелю. Див. наприклад, [14].

Доступність волоконно-оптичного кабелю довжиною 10 км розрахована з використанням КК довжиною 600 км. Ситуація показана на рисунку 3.6, де порівнюються випадок А і випадок Б; останній з дубльованою лінією зв'язку і автоматичним відновленням, порівняно з першим з однією лінією зв'язку і ручним ремонтом.

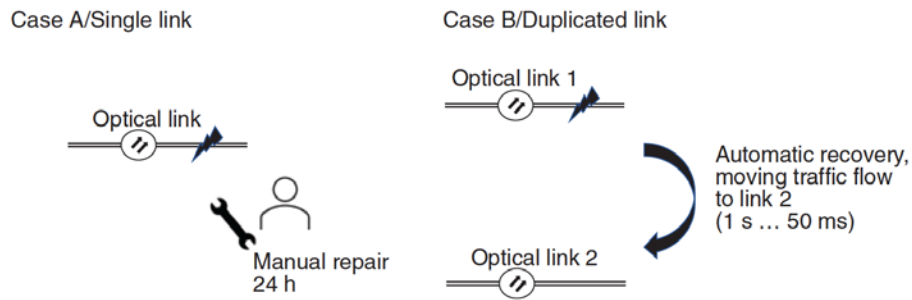


Рисунок 3.6 – Особливості налагодження ВОЛЗ

Таблиця 3.1 - Вхідні припущення та результуюча оцінка доступності

| Case | MTTR | Availability | |
|------|-------|---------------|----------------------|
| A | 24 h | 99.995433998% | four and half nines |
| B1 | 1 s | 99.999999947% | more than nine nines |
| B2 | 50 ms | 99.999999997% | more than ten nines |

У першому рядку таблиці 3.1 24-годинний час ручного ремонту дає чотири з половиною дев'ятки, що може бути достатнім вже для каналу доступу для одного gNB.

Перехід до захищеного волоконно-оптичного обладнання з відновленням через перемикання захисту або реставрацію з часом відновлення MTTR 1 с покращує доступність до дев'яти з половиною дев'яток. Перехід до відновлення за 50 мс можливий як з оптичним, так і з IP-відновленням, особливо коли локальні дії з відновлення є достатніми для відновлення трафіку, а відновлення за 50 мс підвищує оціночну доступність до більш ніж десяти дев'яток.

У прикладі показано покращення доступності в результаті переходу від одного об'єкту з ручним ремонтом до захищеного об'єкту з автоматичним відновленням.

Доступність вже дуже висока в цьому прикладі, навіть з часом відновлення в 1 секунду.

Розрахунок охоплював лише оптоволокну. Оптичні інтерфейси, приймачі та, можливо, інші вузли вносять свій внесок у недоступність. Ці компоненти також можуть бути надлишковими, щоб уникнути єдиної точки відмови.

Для того, щоб результат був прийнятним для випадку В, відмови на двох оптичних лініях повинні бути некорельованими, тобто вони не повинні залежати від одного і того ж фізичного кабелю і мати однакові ризики, а натомість повинні мати різні фізичні маршрути, щоб вихід з ладу кабелю, що несе оптичні волокна для лінії 1, не означав і не збільшував ймовірність виходу з ладу лінії 2.

Це вимагає знання кабельної та фізичної топології і відповідного планування відмовостійкості. Для вирішення цієї проблеми використовується концепція груп каналів зі спільним ризиком. Необхідність мати незалежні кабелі збільшує витрати і є особливо складною в каналах доступу "останньої милі", де взагалі може бути складно отримати оптоволоконне з'єднання. Альтернативою є використання оптоволокна, доповненого іншим носієм, наприклад, бездротовим.

Значне покращення настає тоді, коли завдяки автоматичному відновленню вдається уникнути часу на ручне відновлення. Навіть при автоматичному відновленні все одно потрібно виконувати ремонт вручну, щоб виправити оптоволоконне з'єднання, але в цей час система працює через другу оптоволоконну лінію, і потік трафіку не блокується. Додатковою перевагою цього є те, що оскільки відключення вже усунуто, немає необхідності в терміновому ремонті кабелю, що вийшов з ладу, а це може бути значною економією коштів.

Іншими перевагами скорочення часу відключення є те, що безпосередньо втрачається менше доходів і, що, можливо, ще важливіше, не погіршується якість обслуговування клієнтів.

Теоретично доступність може бути збільшена за рахунок скорочення часу відновлення, а потім майже довільного додавання паралельних, незалежних об'єктів. Обмеження пов'язані зі складністю та вартістю, оскільки мережа потребує більше зв'язків, вузлів та сайтів, а також більшої функціональності.

Важливим моментом у підвищенні доступності є визначення цільового часу відновлення після збоїв у магістральному і транзитному зв'язку, який повинен бути достатньо швидким, щоб мати якомога менший вплив на послуги 5G. Прикладами такого впливу є • втрата пакету або декількох пакетів на рівні користувача • втрата пакету або декількох пакетів на рівні управління • втрата поточного виклику/контексту • втрата всього логічного інтерфейсу Раніше обговорювався випадок втрати і повторної передачі пакетів. Втрата одного або декількох пакетів може статися під час транспортування через перевантаження або через відкидання пакетів, спричинене бітовими помилками. Це більше зниження продуктивності, ніж повна відмова. Як правило, транспортна несправність - це повна відмова каналу або вузла, і в цьому випадку всі пакети втрачаються без розбору на час перерви.

Критичним моментом є час, після якого втрачається контекст (виклик) для UE. Це відбувається через кілька секунд. При більш тривалих перервах, можливо, десятки секунд, процедури управління логічним інтерфейсом 3GPP починають намагатися відновитися після збою і перезавантажити інтерфейс. Обидва значення залежать від реалізації.

Телекомунікаційні мережі на основі Sonet/SDH встановили стандарт для часу відновлення до 50 мс на основі захисного перемикування Sonet/SDH. Цього можна досягти і в пакетних мережах, особливо коли локального рішення достатньо для пом'якшення наслідків збою (наприклад, за допомогою швидкого перенаправлення, багатошляхової маршрутизації Equal Cost Multipath [ECMP] або агрегації каналів Ethernet). В іншому випадку відновлення за допомогою протоколів маршрутизації може зайняти секунди, але може бути і субсекундним, залежно від багатьох факторів, таких як використовуваний протокол маршрутизації, метод виявлення, розмір мережі тощо. Багато залежить від часу виявлення несправності і часу, необхідного для поширення події несправності на інші вузли, а потім перерахунку і застосування нової активної топології. Якщо метою є збереження поточного контексту під час відновлення транспорту, перерви в кілька сотень мілісекунд, або навіть кілька секунд, є допустимими. Це

досить добре узгоджується з тим, що реально можна досягти за допомогою альтернативних варіантів відновлення мережі.

Новою темою для 5G є надвисока надійність і низька затримка послуг URLLC. Послуги можуть потребувати або надвисокої надійності, або низької затримки, або і того, і іншого.

Вимога надійності є дуже складною, коли вона поєднується з вимогою низької затримки, оскільки тоді залишається мало часу для коригувальних дій, таких як повторна передача або відновлення міжпортового з'єднання, коли первинна доставка пакетів не вдається. Промислові додатки можуть потребувати пакетів інструкцій (наприклад, кожні 500 мкс) і не допускають втрати більше кількох успішних пакетів, а це означає, що механізми відновлення в транспортній мережі недостатньо швидкі для виправлення збою, щоб наступні пакети або повторна передача (якщо вона підтримується) були успішними в часі.

Одним з важливих варіантів використання 5G є цей тип промислового застосування. Вони сильно відрізняються за вимогами. Цільовий показник надійності $R = 1 - 10^{-5}$ був включений в Реліз 15, а в Релізі 16/17 він був збільшений до $R = 1 - 10^{-6}$. Залежно від випадку, ці рівні надійності доставки пакетів можуть бути досягнуті безпосередньо або за допомогою дублювання пакетів по декількох шляхах.

Складність розрахунку доступності або надійності полягає в тому, щоб зробити припущення, які правильно описують ситуацію, і мати достатню кількість даних, на яких ці припущення ґрунтуються. Кожна мережа і кожен випадок, ймовірно, відрізняються, і припущення для одного випадку можуть бути невірними для іншого.

NGMN припускає, що ймовірність відмови становить від 10^{-4} до 10^{-6} для окремих каналів або вузлів, виходячи з визначеного цільового показника надійності для доставки пакету від сервера додатків (AS) до користувача [16].

Для будь-якого транспортного каналу або вузла, який знаходиться на шляху доставки пакета URLLC, цільова надійність повинна бути як мінімум такою ж, як у повітряного інтерфейсу, бажано, щоб вона була вищою, щоб транспорт не

ставив під загрозу систему. Це фактично також призводить до діапазону, включеного в NGMN.

Для того, щоб мати уявлення про вимоги до наднадійності і транспортування, можна розрахувати оцінку надійності магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку між двома об'єктами: один з них є об'єднаним об'єктом з сервером додатків і базовою смугою gnB, а інший - віддаленим об'єктом O-RU, який знаходиться на відстані 0,3 км, як показано на рис. 3.7.

У таблиці 3.2 для оцінки надійності оптоволоконна використовується показник CC, а інші компоненти, такі як прийомопередавачі або транспортні елементи, на шляху не враховуються. Час виконання місії встановлений на рівні 10 років як час роботи системи.

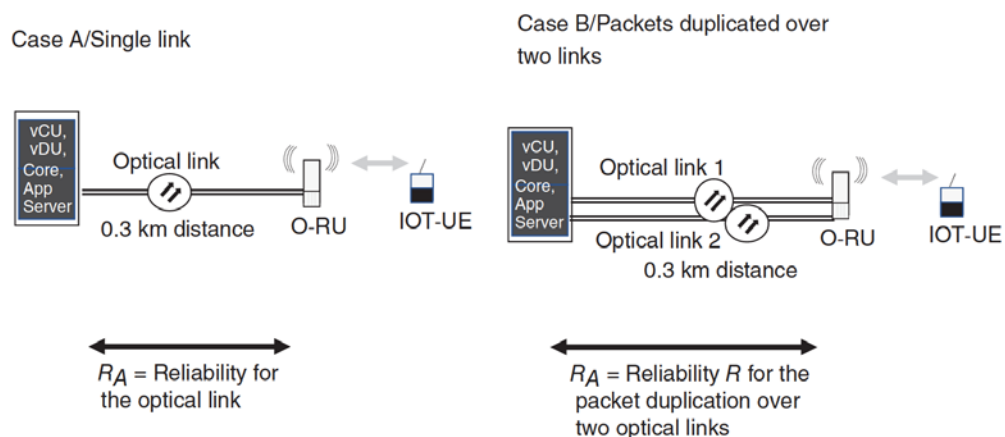


Рисунок 3.7 - Оцінювання надійності транспортних трактів мережі

Таблиця 3.2 - Вхідні дані для розрахунку надійності

| | | |
|-------------------------------|-----|-------|
| Cable cut metric (CC) = | 600 | km |
| Fibre link distance (d) = | 0.3 | km |
| Mission time t = | 10 | years |

У базовому варіанті (варіант А) використовується одна волоконно-оптична лінія зв'язку. Для того, щоб побачити можливе покращення при використанні подвійного обладнання з дублюванням пакетів, розраховується випадок В [20].

Частота відмов визначається на основі рівняння (3.5):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{d}{CC} \quad (3.5)$$

Для випадку А формула базується на рівнянні (3.6):

$$R_A = e^{-\lambda t} = e^{\left(-\frac{d}{CC}t\right)} = e^{\left(-\frac{0,3}{600} \cdot 10\right)} = 0,995012479 = 99,5\% \quad (3.6)$$

Для випадку В формула базується на рівнянні (3.9), де є дві незалежні паралельні системи з однаковою надійністю R1 і R2, тому де R1 = R2 = RA:

$$R_B = R = 1 - (1 - R1) \cdot (1 - R2) = 1 - (1 - 0,995012479)^2 = 0,999975125 = 99,998\% \quad (3.9)$$

У випадку В, пакети копіюються по обох каналах, а дублікати відкидаються на стороні одержувача. У випадку В передбачається, що канали не мають однакових ризиків. Дублювання пакетів двома незалежними шляхами значно підвищує надійність - з 99,5% до 99,998%.

При дублюванні пакетів приймаюча сторона приймає перший дійсний пакет в межах часового вікна прийому і відкидає, можливо, пізніші дублікати, які мають той самий порядковий номер. Надійність підвищується, оскільки тепер збій на одному сигнальному шляху не призводить до провалу місії. Багатопроменева передача може бути розширена до більш ніж двох шляхів для ще більшої надійності.

У той час як у випадку, показаному на рисунку 3.6, поклалися на захисне перемикання або інше відновлення, яке переміщало потік трафіку на інший канал, коли траплявся збій, на рисунку 3.7 обидва канали використовуються постійно, а пакети дублюються. Немає необхідності переміщати потік трафіку, оскільки він легко проходить двома шляхами, і програма-одержувач не відчуває

втрати пакетів під час збою, що відбувається у випадку з рисунком 3.6 на час відновлення.

Надійність волоконно-оптичної лінії зв'язку необхідно оцінювати в залежності від конкретного випадку; використання метрики CS може бути невірним припущенням. Крім того, варто зазначити, що аналіз враховував лише відмови фізичного середовища (оптоволокна), щоб імітувати підхід до повітряного інтерфейсу.

Результат показує, що багатошляховість і дублювання пакетів на двох незалежних транспортних лініях значно підвищує надійність доставки пакетів. Він також показує, що транспорт може бути критично важливим компонентом у тракті доставки пакетів URLLC і, як такий, транспорт не може бути виключений безпосередньо з оцінок надійності, оскільки результуюча надійність для транспорту - навіть у сценарії дублювання пакетів - виявилася меншою, ніж $R = 1 - 10^{-5}$.

Ретрансляція повітряного інтерфейсу зазвичай допомагає підвищити надійність повітряного інтерфейсу. У середовищі URLLC ретрансляція пов'язана з тим, що вона обов'язково займає певний час. Доцільність ретрансляції залежить від вимог до затримки і типу повітряного інтерфейсу (TDD/FDD). При TDD структура слотів означає, що підтвердження або ретрансляція повинні чекати, поки не звільниться наступний слот. Це може бути занадто довго для сервісу з низькою затримкою.

На транспорті не існує надійного сервісу, оскільки використовується UDP/IP або Ethernet. Однак, петлі ретрансляції HARQ і RLC (підтверджений режим) працюють через пряму лінію зв'язку.

Ретрансляції допомагають повітряному інтерфейсу, коли умови радіоканалу швидко змінюються, так що швидка повторна передача може бути успішною, навіть якщо первинна передача не вдалася.

Це не стосується типових збоїв у прямому транспорті. Якщо зв'язок перерваний через обрив кабелю, повторна передача протягом мілісекунд не буде успішною, якщо тільки не буде виправлено збій передачі до початку повторної

передачі. Час, доступний для відновлення передачі, є дуже коротким, оскільки навіть 50 мс - це на два десятки порядків довше.

В окремих випадках апаратні механізми захисту від локальних збоїв можуть бути достатньо швидкими, але загалом для відновлення передачі потрібно більше часу, ніж є в циклі ретрансляції HARQ. Це означає, що швидка ретрансляція через повітряний інтерфейс зазвичай не допомагає у випадку розриву зв'язку в магістральному транспорті. Потрібні інші рішення для підвищення надійності транспортування.

Для відкидання пакетів через залишкові бітові помилки в магістральному транспортному каналі або інші випадкові втрати пакетів, коли втрачається один або кілька пакетів, ретрансляція, ймовірно, буде успішною, якщо аномалія на транспорті нетривала і зникне без ремонтних дій. Проти цього явища ретрансляція з HARQ дійсно допомагає.

Для повітряного інтерфейсу з однократною ретрансляцією проста модель надійності доставки пакетів базується на рівнянні (3.10), де p - ймовірність втрати пакету в повітряному інтерфейсі при однократній передачі [26].

$$R = 1 - p^2 \quad (3.10)$$

Додавання декількох шляхів з аналогічною ретрансляцією підвищує надійність. Розширення тракту з двома незалежними трактами і однією ретрансляцією призводить до оцінки надійності на основі рівняння (3.11):

$$R = 1 - p^4 \quad (3.11)$$

Завдяки повітряному інтерфейсу різноманітність шляхів і ретрансляція в поєднанні підвищують надійність, на додаток до багатьох інших удосконалень повітряного інтерфейсу 5G для URLLC.

Частота помилок пакетів для транспортних ліній через випадкові бітові помилки дуже низька, $<10^{-7}$ або навіть $<10^{-10}$ для невеликих пакетів. Критичний

трафік також не повинен спричиняти перевантаження транспортної мережі, тому швидкість втрати пакетів через випадкові бітові помилки та перевантаження разом становить $<10^{-7}$. Іншою проблемою, пов'язаною з транспортуванням для служби URLLC, є ризик розриву зв'язку і відмов вузлів, і вона буде розглянута далі в розділі про дублювання пакетів в системі 5G.

Система 5G включає різні альтернативи багатопроменевої передачі і дублювання пакетів, деякі з яких також охоплюють транспортні ланки. На мережевому рівні технології, що підтримують послуги реплікації пакетів, також доступні в якості додаткових інструментів, де це необхідно.

На рис. 3.8 показано дублювання на рівні PDCP з подвійним підключенням, у випадку, коли CU і DU розташовані спільно, а RU знаходяться на віддалених майданчиках. Дві базові смуги (CU і DU) знаходяться на двох різних майданчиках, так само як і два RU на різних майданчиках, тому також існують два різних зовнішніх з'єднання.

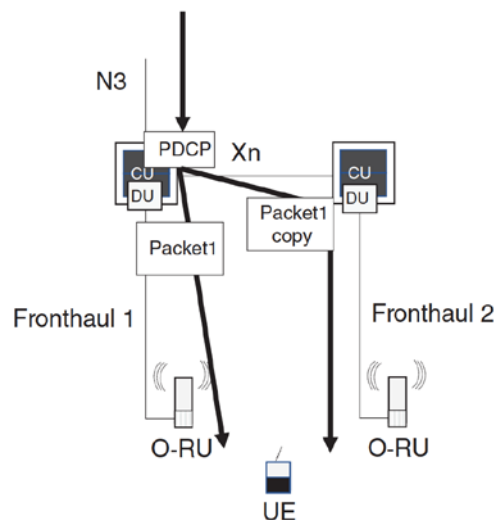


Рисунок 3.8 – Схема підвищення надійності передачі даних в мережах 5G

Пакет PDCP дублюється в CU, що з'єднує основну мережу (N3), і дублікати надсилаються за допомогою двох елементів RLC двома шляхами, один через локальний повітряний інтерфейс, а копія через Xn до іншого повітряного

інтерфейсу через інший сайт CU/DU. Див. [17] для визначення 3GPP дублювання PDSP.

Багатопроменева передача з дублюванням пакетів тепер охоплює не тільки повітряний інтерфейс, але й фронтальний канал. Одноранговий об'єкт PDSP знаходиться в UE, де дублювання усувається. Для транспортної мережі ця функція дублювання непомітна, за винятком додаткової пропускної здатності, яку споживає копія пакету.

З точки зору надійності, конфігурацію на рисунку 3.8 можна проаналізувати за допомогою блок-схеми надійності (рисунок 3.9), щоб визначити вплив багатоканальності та дублювання PDSP на надійність доставки пакетів, беручи до уваги транспортний внесок з боку Xn та зовнішніх каналів зв'язку.

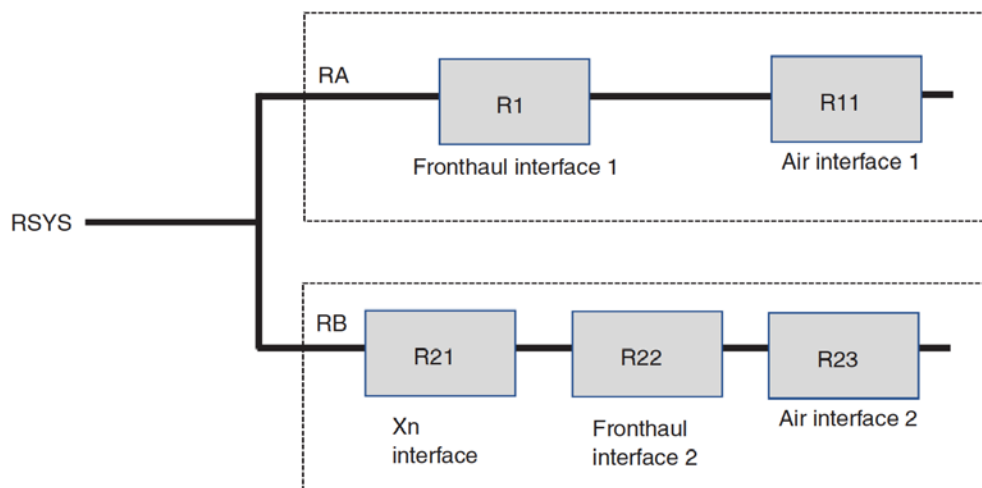


Рисунок 3.9 - Блок-схема оцінювання надійності мережі 5G

Сайти gNB знаходяться на відстані 0,3 км один від одного, а також RU знаходиться на відстані 0,3 км від базової смуги.

Тут припускається, що надійність для 0,3-кілометрової волоконно-оптичної лінії на одне десятиліття краща, ніж було припущено раніше у випадку з рис. 3.8, і тому $R1 = R21 = R22 = 0,9995$. Припускається, що коефіцієнт втрат пакетів на повітряному інтерфейсі становить 10^{-5} , і метою є розрахунок оцінки надійності доставки пакетів по системі.

Система складається з двох підсистем, з надійністю RA та RB , у паралельній конфігурації. Для всієї системи оцінка надійності базується на рівнянні (3.12) [29]:

$$\begin{aligned} R_{SYS} &= 1 - ((1 - RA) \cdot (1 - RB)) = 1 - ((1 - R1 \cdot R11) \cdot (1 - R21 \cdot R22 \cdot R23)) = \\ &= 1 - ((1 - 0,9995 \cdot 0,99999) \cdot (1 - 0,9995 \cdot 0,9995 \cdot 0,99999)) = \\ &= 0,999999485 = 99,99995\% \end{aligned} \quad (3.12)$$

Система в цілому досягає дуже високої надійності понад $1 - 10^{-6}$ завдяки дублюванню пакетів по двох шляхах, навіть при найнижчій надійності компонента, транспортного в даному випадку, що становить лише 0,9995.

Для того, щоб транспортні зв'язки не мали впливу, цільовий показник для транспорту, включаючи всі зв'язки і транспортні вузли, повинен бути приблизно на десять років кращим, ніж показник повітряного міжфазного зв'язку, або 0,999999 у нашому прикладі. Транспортна система може мати таку підвищену надійність як єдиний об'єкт, або, якщо це неможливо, то за допомогою окремої служби дублювання пакетів на транспортному рівні по розрізних шляхах. Проте дублювання PDCP на рівні 5G RAN значно підвищує надійність, оскільки різноманітність шляхів охоплює як повітряний інтерфейс, так і прямий шлях. Дублювання PDCP може включати до чотирьох шляхів, як визначено в 3GPP, і чотири шляхи ще більше підвищують надійність.

Дублювання PDCP з багатоканальним зв'язком також може бути розгорнуте в архітектурі, де немає прямого з'єднання, але gNB інтегрований як класична базова станція. Це вилучає з блок-схеми надійності прямий зв'язок і внесок, який він вносить. Оскільки кожен компонент в ланцюжку вносить певну ймовірність збою, зменшення кількості компонентів на шляху доставки пакетів підвищує надійність.

Для випадку, коли UPF розташований віддалено від gNB, надійність інтерфейсу N3 є важливою. Прикладом розгортання є ситуація, коли UPF і сервер

додатків розташовані в центрі, а gNB віддалені в районі кампусу, щоб забезпечити покриття для служби URLLC.

Як показано на рисунку 3.10. один сеанс PDU може використовувати два тунелі GTP-U, які прокладаються в транспортній мережі різними шляхами, як це передбачено специфікацією 3GPP [18].

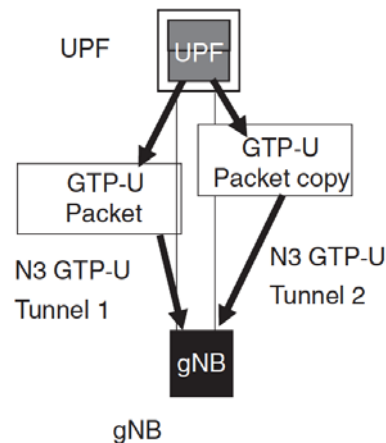


Рисунок 3.10 - Резервування тунелів N3 із структурою GTP-U в мережі 5G

Кожен тунель використовує окрему IP-кінцеву точку, і мережевий рівень тримає маршрути на різних шляхах, щоб уникнути поділу долі, для того, щоб реалізувати вигреш у надійності. Пакет дублюється UPF, і дублікати усуваються на основі послідовного номера GTP-U в gNB. Дублювання GTP-U знову створює дві паралельні системи і пов'язане з цим підвищення надійності.

Доступність і надійність необхідно аналізувати, починаючи з вимог до послуг, а потім розбиваючи ці наскрізні вимоги на окремі компоненти, де транспорт є єдиним, аналогічно до процесу для вимог до затримки e2e, відповідного бюджету затримки і розподілу бюджету затримки між компонентами, що вносять свій внесок.

На доступність і надійність впливають тип розгортання 5G і функціональність системи (наприклад, дублювання PDCP, дублювання GTP-U, подвійне підключення і ретрансляція повітряного інтерфейсу). Основна

складність полягає в тому, щоб знайти правильні вхідні припущення для оцінки доступності або надійності транспортних компонентів.

Для транспорту доступність повинна бути націлена на мінімум п'ять дев'яток, а бажано вище, залежно від вимог до доступності послуг 5G. Доступність особливо важлива для хмарних сайтів і вузлових сайтів та їх стійкого підключення до мережі, а також для каналів або вузлів, що передають трафік з декількох стільникових сайтів. Резервні шляхи і вузли з короткими автоматичними службами відновлення підвищують доступність.

Для забезпечення надійності транспортні канали зазвичай працюють з досить низьким рівнем залишкових бітових помилок ($<10^{-12}$) у добре спроектованих каналах. Втрати пакетів через перевантаження мають бути виключені для служб URLLC, щоб втрати пакетів через перевантаження також були $<10^{-7}$.

Іншими джерелами ненадійності транспортування є збої в лінії зв'язку і відмови вузлів, які можуть сильно вплинути на доставку пакетів. Повітряний інтерфейс 5G має оптимізацію для послуги URLLC, спрямовану на дуже високу надійність, і не обов'язково тривіально відповідати цьому на транспортному рівні, принаймні, при оцінці з вхідними припущеннями від широкосмугових ліній зв'язку.

Для послуг URLLC реплікація пакетів на розрізнених шляхах також є корисним інструментом для пом'якшення цих транспортних збоїв - або на рівні системи 5G, як у випадку з PDCP або GTP-U, або окремо на мережевих рівнях. Надійність транспортування у випадку послуг URLLC має бути щонайменше на рівні надійності повітряного інтерфейсу, бажано вищою, щоб не ставити під загрозу систему. Додаткові послуги дублювання пакетів на транспортних лініях можуть знадобитися, якщо наскрізний цільовий показник не буде досягнутий.

3.3 Висновки до розділу 3

Доступність та надійність мобільної мережі є критичними аспектами для забезпечення задоволення потреб користувачів та ефективного функціонування різноманітних застосунків. Забезпечення широкого та однорідного покриття мережі в різних географічних областях. Це включає в себе як забезпечення сигналу в місцях з великою густотою користувачів, так і розширення покриття в рідкі населені області. Встановлення достатньої кількості базових станцій, зокрема малих стільникових станцій, для забезпечення гармонійного розподілу навантаження та покращення якості обслуговування. Використання технологій розподіленого доступу, таких як Massive MIMO та Beamforming, для поліпшення якості сигналу та забезпечення кращого покриття великих областей.

Розробка ефективних алгоритмів управління рухом користувачів для перенаправлення їх між базовими станціями та частотними ресурсами для оптимального використання мережі. Впровадження резервних механізмів та технологій, таких як резервне живлення та автоматичне відновлення з'єднань, для забезпечення неперервної роботи мережі у випадку відмов чи непередбачуваних ситуацій.

Забезпечення високого рівня безпеки мережі та розробка механізмів для виявлення та відновлення після помилок для забезпечення стійкості та безпеки мережі. Ефективне управління трафіком для розподілу ресурсів в залежності від змінного навантаження та вимог користувачів.

Постійний аналіз та моніторинг стану мережі для виявлення проблем та вчасного реагування на них. Використання послуг Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) для додатків з критичними вимогами до надійності та затримки. Дотримання стандартів та забезпечення сумісності між різними компонентами мережі для ефективного функціонування та розвитку. Загальна мета - забезпечити швидкий, стабільний та доступний зв'язок для всіх користувачів у різних умовах та сценаріях використання.

4 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МЕРЕЖАХ 5G

4.1 Коригування помилок часового вирівнювання в мережах TDD

З впровадженням системи 5G тема синхронізації повинна бути ретельно розглянута, як і в системі LTE. Загалом, передача 5G RAN вимагає синхронізації, щоб відповідати наступним двом бюджетам помилок на інтерфейсі Over The Air (OTA): ● помилка частоти ● помилка синхронізації в часі. Високорівневий аналіз помилки частоти і помилки синхронізації в часі (для різних функцій) наведено в наступних підрозділах.

Точність частоти є важливим фактором, який дозволяє UE безперервно відстежувати опорні тактові сигнали базової станції (BS) під час передачі низхідної лінії зв'язку BS. Допустима похибка частоти пов'язана з можливістю відстеження PLL UE (компоненти PLL та VCXO) та передачею опорного тактового сигналу BS (саме часовий інтервал між передачею PSS та SSS). Примітка: PSS = первинний сигнал синхронізації, SSS = вторинний сигнал синхронізації на основі визначення стандарту 3GPP NR TS 38.211 [20].

На основі стандарту 3GPP NR TS 38.104 [21], похибка частоти системи 5G, наведена в таблиці 4.1, застосовується на інтерфейсі OTA. Вона базується на класі BS і не залежить від різних особливостей. Вона також застосовується до діапазону FR1 (діапазон спектра <6 ГГц) і FR2 (діапазон спектра сантиметрових і міліметрових хвиль).

Таблиця 4.1 - Цільова частотна похибка системи 5G

| BS class | Accuracy |
|-----------------|----------------|
| Wide-area BS | ± 0.05 ppm |
| Medium-range BS | ± 0.1 ppm |
| Local-area BS | ± 0.1 ppm |

Загалом, при фіксованій специфікації точності ppm (наприклад, $\pm 0,05$ ppm), це є більш складним завданням для діапазону FR2 через вищу несучу частоту. При несучій частоті 28 ГГц $\pm 0,05$ проміле відповідає похибці частоти $\pm 1,4$ кГц. Не вимагаючи кращої, але більш дорогої можливості відстеження UE PLL, стандарт 3GPP NR TS 38.211 дозволяє передавати PSS/SSS з більш високою конфігурацією SCS (120 кГц або навіть 240 кГц).

Це ефективно допомагає UE PLL-відстеженню переносити частотну похибку 1,4 кГц з хорошим запасом.

Зверніть увагу, що стандарт 3GPP NR вирішив вибрати однакову специфікацію $\pm 0,05$ ppm для класу широкосмугових БС між стандартами 5G і LTE. Це ідеально підходить для міграції з LTE на 5G.

Для класів БС середнього радіусу дії і БС локальної зони допускається більш висока частотна похибка через меншу мобільність кінцевих користувачів у відповідних сценаріях розгортання.

Система 5G може базуватися на технології FDD або TDD, подібно до системи LTE. Використання технології FDD або TDD залежить від доступних спектрів на різних світових ринках. Для цілей 5G розширення спектру в сантиметровому і міліметровому діапазонах частот має тенденцію до розширення сценаріїв розгортання технології TDD.

У технології TDD низхідна передача (до UE) і висхідна передача (від UE) використовують одну і ту ж частоту в спектрі. Тому існує ключова концепція комутації TDD, яка дозволяє таке спільне використання. На високому рівні стандарт 3GPP виділяє комутаційний інтервал між низхідною і висхідною передачею для полегшення перемикавання. Під час комутаційного інтервалу БС і ЗС можуть вмикати/вимикати передачу і прийом на основі узгодженої майбутньої події TDD (передача або прийом для БС і ЗС). Крім того, якщо в географічній зоні є сусідні базові станції, всі базові станції повинні перемикатися разом, щоб уникнути інтерференції TDD. Узгодження часу між усіма базовими станціями стає важливою вимогою для роботи технології TDD.

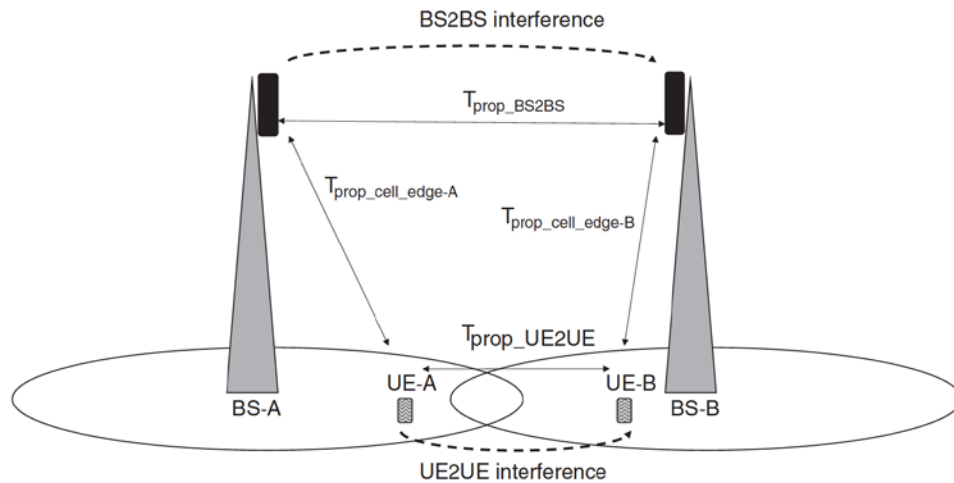


Рисунок 4.1 – Схема ефективного керування інтерференцією в системах TDD та забезпечення оптимальної продуктивності мережі

Існують різні типи завад TDD, які необхідно враховувати. Як показано на рисунку 4.1, під час кожної події перемикання (або перемикання DL на UL, або UL на DL) між будь-якими сусідніми станціями можуть виникати • інтерференція між БС і БС • інтерференція між UE і UE Помилка вирівнювання часу синхронізації 5G, час перемикання передачі БС і UE, радіус комірки (або ISD між станціями) - це все фактори, які впливають на TDD-завади. Для кожної конфігурації рознесення піднесучих (SCS) 5G можна визначити досягнутий радіус стільника, щоб уникнути будь-якого типу TDD-завад, виходячи з цих факторів [45].

Для визначення сусідніх ділянок на рисунку 4.2 в аналізі використовується шестигранна модель 3GPP для визначення стільників. Визначено відповідний радіус комірки (R_s), міжсайтова відстань (ISD) і поширення по краю комірки ($T_{prop_cell_edge}$).

На основі концепції TDD, яка передбачає передачу DL і UL на одній частоті, завжди існує комутаційний проміжок (TGUARD). Комутаційний проміжок далі розбивається на область перемикання DL-UL і область перемикання UL-DL співвідношенням $T_{GUARD} = T_{DL_UL} + T_{Aoffset}$. T_{GUARD} і $T_{Aoffset}$ є параметрами конфігурації системи для всіх BS і UE.

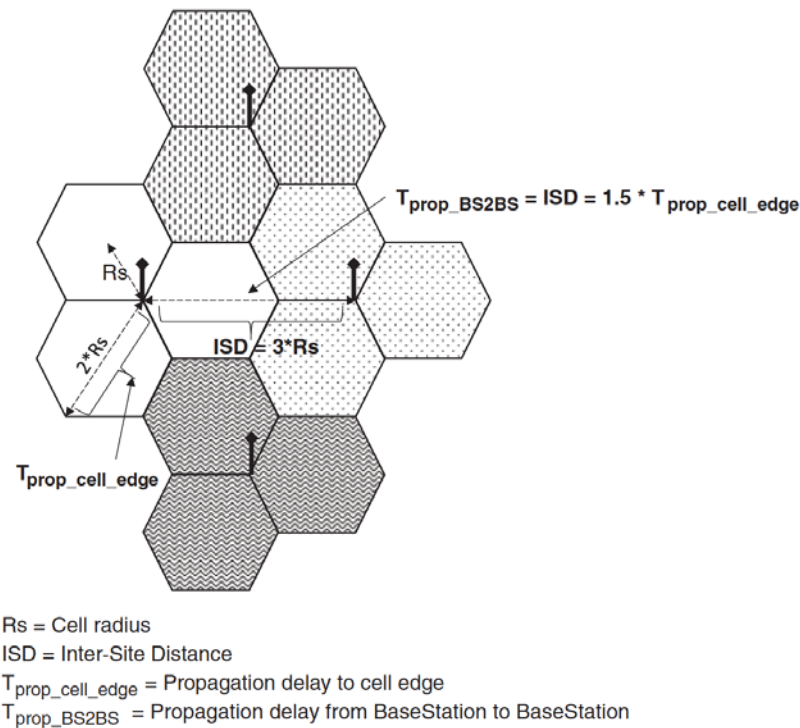


Рисунок 4.2 - Оптимальна модель мереж мобільного зв'язку з точки зору використання ресурсів та забезпечення покриття

На основі розриву в цих регіонах комутації можна виділити чотири типи TDD-завад, які необхідно проаналізувати. (1) Завади BS2BS при комутації DL-UL (BS2BS-DL2UL), див. рис. 4.3. Вважаємо, що синхронізація BS-B відстає (тобто пізніше) від синхронізації BS-A, тоді пізня передача DL BS-B (агресор) може перешкоджати початку прийому UL BS-A (жертва).

Для того, щоб уникнути перекриття BS-B кінця передачі DL (точка X) з початком передачі BS-A UL (точка Y), ми маємо обмеження в рівнянні (4.1) [36]:

$$\left(T_{GUARD} - T_{A_{offset}} \right) > T_{sync} + T_{BSon \rightarrow off} + T_{prop_BS2BS} \quad (4.1)$$

(2) Втручання BS2BS при перемиканні UL-DL (BS2BS-UL2DL), див. рис. 4.4. Вважайте, що синхронізація BS-A випереджає (тобто раніше) синхронізацію BS-B, тоді рання передача DL BS-A (агресор) може заважати BS-B (жертва) в кінці прийому UL.

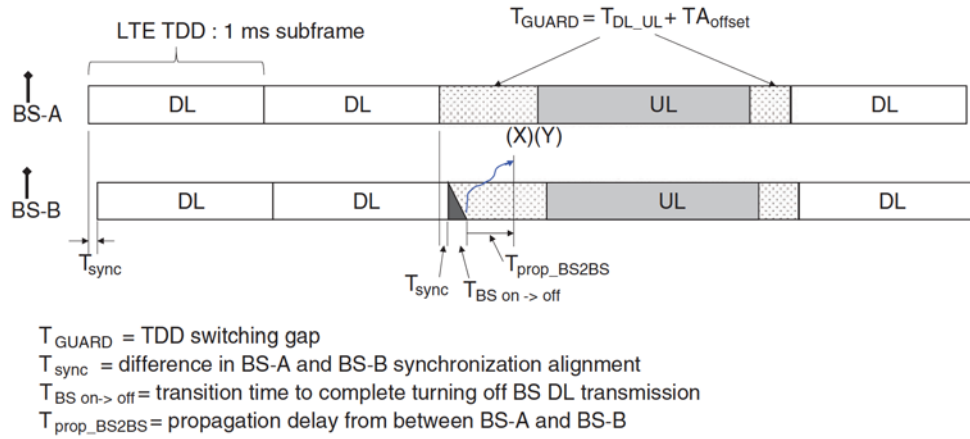


Рисунок 4.3 - Інтерференція між базовими станціями (BS2BS) у напрямку від низькорівневого каналу зв'язку до високорівневого (DL2UL)

Для того, щоб уникнути перекриття початку передачі BS-A DL (точка X) з закінченням передачі BS-B UL (точка Y), ми маємо обмеження в рівнянні (4.2) [40]:

$$T_{A_offset} > T_{sync} + T_{BS\ off\ \rightarrow\ on} - T_{prop_BS2BS} \tag{4.2}$$

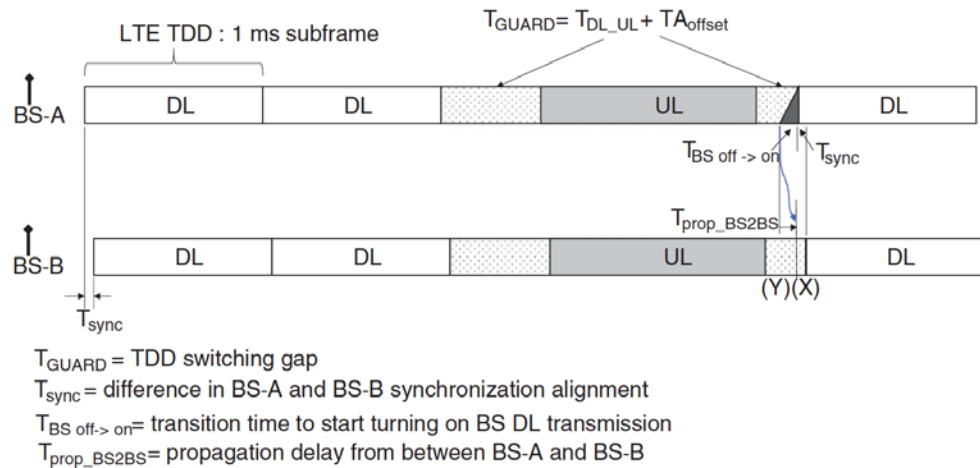


Рисунок 4.4 - Інтерференція між базовими станціями (BS2BS) у напрямку від високорівневого каналу зв'язку до низькорівневого (UL2DL)

(3) Перешкоди UE2UE при перемиканні DL-UL (UE2UE-DL2UL), див. рисунок 4.5. UE-A слідує за синхронізацією BS-A, а UE-B слідує за синхронізацією BS-B. Врахуйте, що синхронізація BS-A випереджає (тобто раніше) синхронізацію BS-B, тоді рання передача UL UE-A (агресор) може заважати UE-B (жертва) в кінці прийому DL [46].

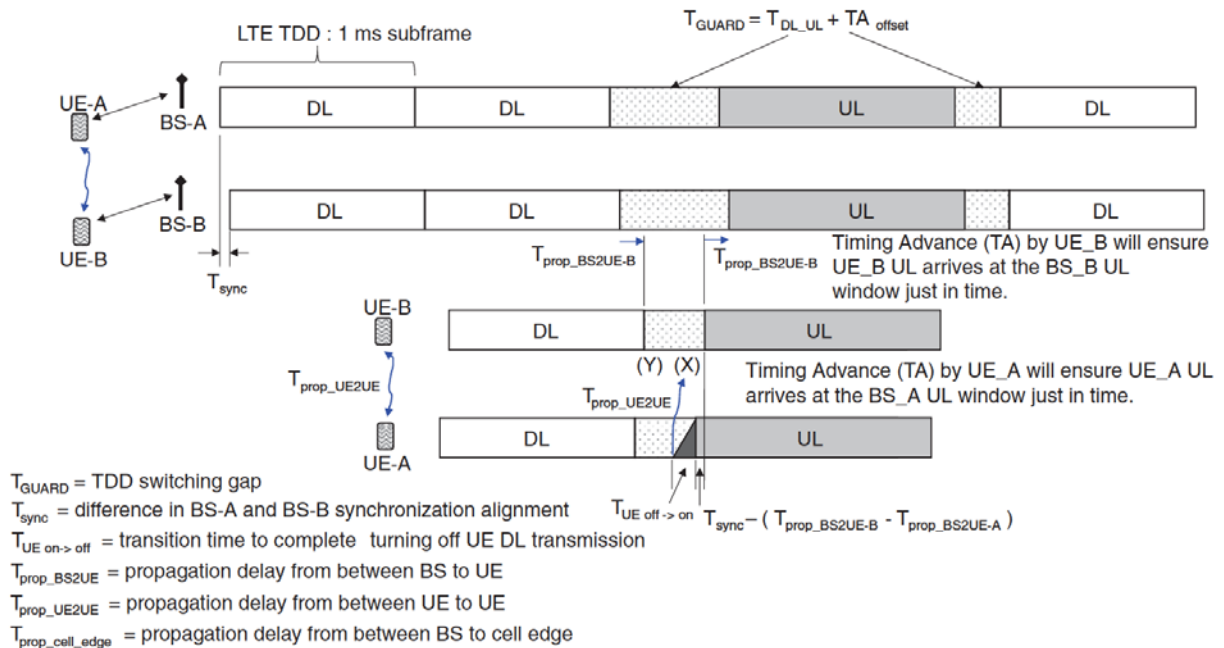


Рисунок 4.5 - Інтерференція між користувачами (UE2UE) в напрямку від downlink до uplink (DL2UL)

Щоб уникнути перекриття початку передачі UL UE-A (точка X) з закінченням прийому DL UE-B (точка Y), ми маємо обмеження в рівнянні (4.3):

$$\begin{aligned}
 (T_{GUARD} - TA_{offset}) &> T_{sync} - (T_{prop_BS2UE-B} - T_{prop_BS2UE-A}) + T_{UE \text{ off} \rightarrow \text{on}} + \\
 + 2 * T_{prop_BS2UE-B} - T_{prop_UE2UE} (T_{GUARD} - TA_{offset}) &> T_{sync} + \\
 + (T_{prop_BS2UE-A} + T_{prop_BS2UE-B}) + T_{UE \text{ off} \rightarrow \text{on}} - T_{prop_UE2UE} &
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Найгірший критерій має місце, коли • Обидві комірки мають однаковий розмір = $T_{prop_cell_edge}$ • UE на краю комірки: $T_{prop_BS2UE-A} =$

$T_{prop_BS2UE-B} = \alpha_{NLOS} \cdot T_{prop_cell_edge}$, де $\alpha_{NLOS} > 1$ як фактор відсутності прямої видимості) • UE-A та UE-B розташовані разом: $T_{prop_UE2UE} = 0$
Обмеження представлено у вигляді рівняння (4.4) [46]:

$$\left(T_{GUARD} - TA_{offset} \right) > T_{sync} + \alpha_{NLOS} \cdot 2 \cdot T_{prop_cell_edge} + T_{UEoff \rightarrow on} \quad (4.4)$$

(4) Інтерференція UE2UE при комутації UL-DL (UE2UE-UL2DL), див. рис. 4.6. UE-A слідує за синхронізацією BS-A, а UE-B слідує за синхронізацією BS-B. Якщо вважати, що синхронізація BS-B відстає (тобто пізніше) від синхронізації BS-A, то пізня передача UL UE-B (агресор) може перешкоджати початку прийому DL UE-A (жертва).

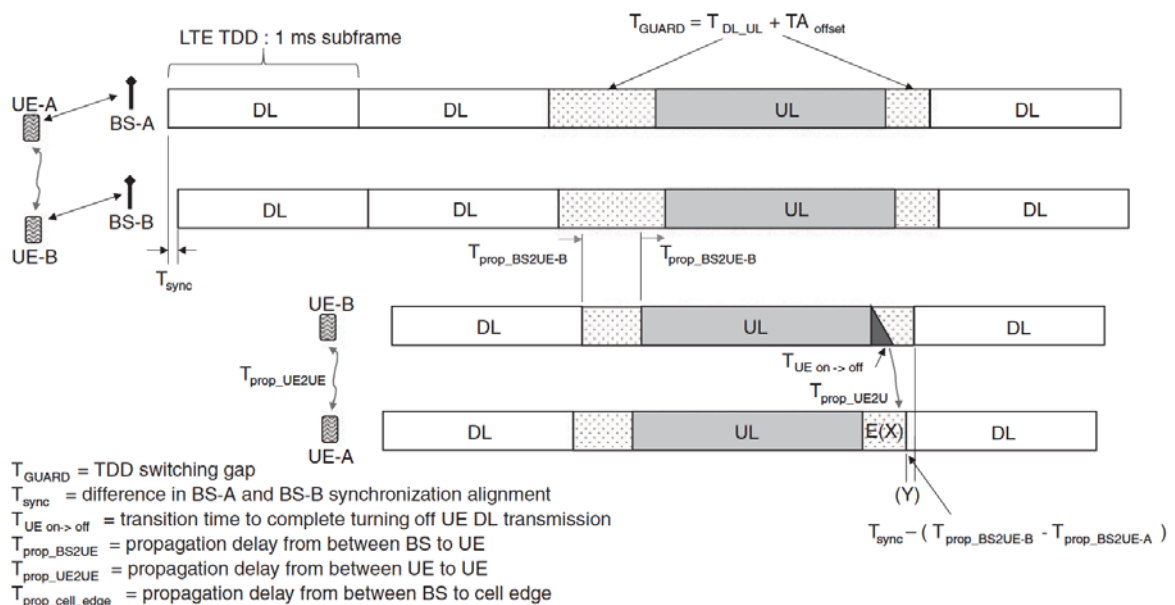


Рисунок 4.6 - Інтерференція UE2UE-UL2DL

Для того, щоб уникнути перекриття UE-B кінця передачі UL (точка X) з початком прийому DL UE-A (точка Y), ми маємо обмеження в рівнянні (4.5):

$$TA_{offset} > T_{sync} - \left(T_{prop_BS2UE-B} - T_{prop_BS2UE-A} \right) + T_{UEon \rightarrow off} + T_{prop_UE2UE} \quad (4.5)$$

Найгірший критерій трапляється, коли • Обидві комірки мають однаковий розмір комірки = $T_{prop_cell_edge}$

• Обидва UE на краю комірки: $T_{prop_BS2UE-A} = T_{prop_BS2UE-B} = T_{prop_cell_edge}$

Обмеження представлено у формулі (4.6):

$$T_{A_{offset}} > T_{sync} + T_{UEon \rightarrow off} + T_{prop_UE2UE} \quad (4.6)$$

Щоб допомогти побачити вплив усіх факторів у наведених вище рівняннях обмежень, у документі 3GPP R4-1703013 [21] запропоновано деякі спрощення для об'єднання взаємозв'язків.

У першому спрощенні ми розглядаємо спільно розташовані UEs тільки як найгірший випадок, так що $T_{prop_UE2UE} = 0$.

В результаті цього спрощення, щоб задовольнити обидва рівняння (4.1) і (4.2), ми можемо підставити рівняння (4.2) з $T_{prop_BS2BS} = 0$ в рівняння (4.1), щоб сформувавши рівняння (4.7) [48]:

$$T_{GUARD} > 2 \cdot T_{sync} + \left[T_{prop_BS2BS} + T_{BSon \rightarrow off} \right] + \left[T_{BSoff \rightarrow on} \right] \quad (4.7)$$

Аналогічно, щоб задовольнити обидва рівняння (4.4) і (4.6), ми можемо підставити рівняння (4.6) в рівняння (4.4), щоб отримати рівняння (4.8):

$$T_{GUARD} > 2 \cdot T_{sync} + \left[\alpha_{NLOS} \cdot 2 \cdot T_{prop_cell_edge} + T_{UEoff \rightarrow on} \right] + \left[T_{UEon \rightarrow off} \right] \quad (4.8)$$

Нарешті, щоб задовольнити обидва рівняння (4.7) і (4.8), ми можемо перегрупувати їх, щоб сформувавши рівняння (4.9):

$$T_{GUARD} \geq 2 \cdot T_{sync} + \max \left[T_{BSon \rightarrow off} + T_{prop_BS2BS}, \right. \\ \left. \left(T_{UEoff \rightarrow on} + \alpha_{NLOS} \cdot 2 \cdot T_{prop_cell_edge} \right) \right] + \max \left[\left(T_{BSoff \rightarrow on} \right), \left(T_{UEon \rightarrow off} \right) \right] \quad (4.9)$$

Таблиця 4.2 - Зведені рівняння обмежень для різних типів завад

| Interference type | Constraint equation | Worst-case condition |
|---|--|---|
| eNB-eNB interference (DL-UL switching) BS2BS-DL2UL | Equation (4.12) $(T_{GUARD} - T_{A_offset}) > T_{sync}$ $+ T_{BS\ on \rightarrow\ off} + T_{prop_BS2BS}$ | $T_{prop_BS2BS} = ISD = 3 \cdot R_s$ |
| eNB-eNB interference (UL-DL switching) BS2BS-UL2DL | Equation (4.13) $T_{A_offset} > T_{sync} + T_{BS\ off \rightarrow\ on}$ $- T_{prop_BS2BS}$ | Worst case is co-located BS so that $T_{prop_BS2BS} = ISD = 0$ |
| UE-UE interference (DL-UL switching) UE2UE-DL2UL | Equation (4.15) $(T_{GUARD} - T_{A_offset}) >$ $T_{sync} + \alpha_{NLOS} \cdot 2 \cdot$ $T_{prop_cell_edge} + T_{UE\ off \rightarrow\ on}$ | Worst case is when <ul style="list-style-type: none"> • co-located UE ($T_{prop_UE2UE} = 0$) • same cell radius (both cells have the same $T_{prop_cell_edge} = 2 \cdot R_s$) |
| UE-UE interference (UL-DL switching) UE2UE-UL2DL | Equation (4.17) $T_{A_offset} > T_{sync} + T_{UE\ on \rightarrow\ off}$ $+ T_{prop_UE2UE}$ | Although the worst case is when both UEs are close to their own BS with larger ISD, this interference is weak due to limited UE transmission power. The worst case is actually co-located BS with UEs close to their own BS, this means $T_{prop_UE2UE} = 0$ |

З рівняння (4.9) ми розглядаємо тільки $\alpha_{NLOS} = 1$ (що означає, що в моделі поширення від BS до UE відбувається в межах прямої видимості). Таке спрощення є оптимістичним, але має бути прийнятним для цього базового аналізу.

Крім того, ми також припускаємо, що $T_{prop_BS2BS} = T_{ISD} = 1,5 \cdot T_{prop_cell_edge}$ (тобто $< 2 \cdot T_{prop_cell_edge}$) в рівнянні (4.9). Таке спрощення означає, що після проходження першої сусідньої соти немає значної інтерференції BS-BS. Це загалом прийнятно, навіть якщо це не обов'язково вірно для деяких розгортань.

В результаті цього спрощення ми отримуємо остаточне рівняння (4.10), яке може чітко показати компроміс. Коли останнє рівняння задовольняється, воно також гарантовано задовольняє рівняння (4.1) - (4.6) [49]:

$$T_{GUARD} \geq 2 \cdot T_{sync} + 2 \cdot T_{prop_cell_edge} + \max \left[\left(T_{BSon \rightarrow off} \right), \left(T_{UEoff \rightarrow on} \right) \right] + \max \left[\left(T_{BSoff \rightarrow on} \right), \left(T_{UEon \rightarrow off} \right) \right] \quad (4.10)$$

Комутаційний інтервал (T_{GUARD}) може бути налаштований на тривалість 1 або більше символів. Щоб мінімізувати накладні витрати системи, комутаційний інтервал повинен бути якомога меншим (ідеальним є інтервал в 1 символ). Щоб уникнути будь-якого типу завад TDD, досягнутий бюджет ISD (який становить $1,5 \cdot T_{prop_cell_edge}$) буде обмежений інтервалом комутації та обраним бюджетом помилки вирівнювання часу синхронізації і бюджетом комутації BS/UE. Коли розгортання вимагає більшого покриття стільника (тобто більшого радіусу стільника і ISD), одним з компромісів буде збільшення часу розриву між перемиканнями, що призводить до збільшення системних накладних витрат. 3GPP ретельно оцінив бюджет кожного фактору на основі компромісів між вартістю і технологією [48].

На основі поточної узгодженої специфікації 3GPP NR у версії 15 (TS 38.104) визначені наступні характеристики, які визначають вимоги до TAE синхронізації 5G, а також вимоги до часу перемикання BS/UE: ● $T_{sync} = 3$ мкс, що призводить до $\pm 1,5$ мкс TAE для кожної БС ● $T_{BS_switch} = 10$ мкс (увімкнення або вимкнення) для діапазону FR1, 5 мкс для діапазону FR2 ● $T_{UE_switch} = 10$ мкс (увімкнення або вимкнення) для діапазону FR1, 5 мкс для діапазону FR2 Варто зазначити, що узгоджена специфікація T_{sync} не є жорсткішою, ніж специфікація LTE-TDD. Ця стратегія дозволяє повторно використовувати багато існуючих рішень для синхронізації, що може бути дуже важливим для сценаріїв міграції з LTE на 5G. Специфікація часу перемикання є жорсткішою, ніж специфікація LTE-TDD, але не надто жорсткою, оскільки вона базується на досяжній і прийнятній за вартістю технології. Використовуючи ці специфікації, досягнутий радіус стільника (або ISD між майданчиками) може бути визначений на основі обраної конфігурації 5G SCS.

У таблиці 4.3 наведено кілька прикладів конфігурацій SCS і досягнутого радіусу стільника на основі цих значень коефіцієнта внеску, узгоджених 3GPP. Ключовим спостереженням є досяжний радіус стільника в діапазоні FR1 (кілька кілометрів) в порівнянні з діапазоном FR2 (200 м). Для діапазону FR1 це прийнятний результат, оскільки для нього важливіше забезпечити повне покриття, подібне до покриття системи LTE, особливо з міграційних міркувань. Що стосується діапазону FR2, то це новіший спектр, який не використовується системою LTE, тому питання міграції є менш актуальним. Натомість, менший радіус стільника як компроміс, що забезпечує вищу пропускну здатність і меншу затримку при використанні більш високої конфігурації SCS, як правило, є прийнятним. Таким чином, радіус стільника в 200 м також є прийнятним, особливо для цільового застосування діапазону FR2 в містах і/або точках доступу до Інтернету. Максимальна відстань до краю стільника (cell edge) залежить від декількох факторів, таких як частотний діапазон (Frequency Range), рівень потужності передавача (Transmit Power Level), тип антени (Antenna Type), згасання сигналу (Path Loss), конфігурація мережі та інші. Визначення максимальної відстані вимагає врахування всіх цих факторів [49].

Таблиця 4.3 - Максимальна теоретична відстань до краю стільника для різних значень коефіцієнта внеску SCS та 3GPP

| Band as defined by 3GPP NR spec | FR1 range | | FR2 range | |
|--|-----------|--------|-----------|---------|
| | 15 kHz | 30 kHz | 60 kHz | 120 kHz |
| SCS configuration | 15 kHz | 30 kHz | 60 kHz | 120 kHz |
| T_{sync} (μs) | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Symbol duration (μs) | 71.4 | 35.7 | 17.9 | 8.9 |
| T_{GUARD} (#symbols) | 1 | 1 | 1 | 2 |
| $T_{\text{BS_switch}}$ or $T_{\text{UE_switch}}$ (μs) | 10.0 | 10.0 | 5.0 | 5.0 |
| $T_{\text{prop_cell_edge}}$ (μs) | 22.7 | 4.9 | 0.9 | 0.9 |
| Maximum theoretical distance cell edge (m) | 6813.0 | 1456.5 | 278.3 | 278.3 |
| ($T_{\text{prop_cell_edge}}$) | | | | |

На закінчення, поточний стандарт 3GPP NR вимагає, щоб максимальна похибка синхронізації 5G не перевищувала 3 мкс між будь-якими двома точками.

Це означає, що стандартна вимога до ТАЕ не повинна перевищувати $\pm 1,5$ мкс на кожную точку. З огляду на те, що технологія TDD буде широко розгорнута в системі 5G на багатьох світових ринках, ця вимога повинна розглядатися як обов'язкова вимога для будь-якої цілі синхронізації системи 5G. Пізніше будуть представлені різні рішення для синхронізації 5G, щоб задовольнити цю обов'язкову вимогу.

4.2 Часове коригування у системах MIMO

На основі визначення 3GPP NR (TS 38.104), точність MIMO становить: ТАЕ = макс. 65 нс між будь-якими двома шляхами, що формують передачу MIMO. Ця специфікація застосовується в діапазонах FR1 (спектр нижніх частот <6 ГГц) і FR2 (спектр сантиметрових і міліметрових хвиль). Крім того, ця специфікація визначається в певній точці відліку інтерфейсу на основі конфігурації радіо/антени (або антенної решітки). Відповідно до TS 38.104, ми маємо наступне. BS Тип 1-C: Діапазон FR1, специфікаційна контрольна точка - роз'єм антени BS • BS типу 1-H: діапазон FR1, специфікаційна контрольна точка - роз'єм межі прийомопередавача (ТАВ) антенної решітки • BS типу 1-O: Діапазон FR1, контрольна точка - інтерфейс ОТА антенної решітки • BS Type 2-O: діапазон FR2, контрольна точка - ОТА антенної решітки. Ця специфікація 65 нс стосується будь-якого типу БС (1-C, 1-H, 1-O або 2-O) [22].

Це важливе визначення, оскільки точне часове вирівнювання між антенами є критичним для ефективної роботи систем MIMO, де використовуються різні антенні елементи для одночасного передавання та прийому сигналів.

4.3 Висновки до розділу 4

Часове вирівнювання (time alignment) грає важливу роль у мережах TDD (Time Division Duplex), де використовується один часовий ресурс для передачі та прийому даних. Виникнення помилок у часовому вирівнюванні може призвести

до перекриття сигналів при передачі та прийомі, що в свою чергу може призвести до погіршення якості зв'язку.

В мережах TDD можуть бути використані спеціальні сигнали, які дозволяють точно вирівнювати часові моменти для передачі та прийому. Це може включати в себе сигнали для синхронізації та визначення часу. Мережі можуть використовувати технології бездротової синхронізації для автоматичного вирівнювання часових моментів в базових станціях. Це може включати використання сигналів GPS або інших зовнішніх джерел синхронізації.

Введення алгоритмів коригування в програмне забезпечення обладнання базових станцій для постійного моніторингу та коригування часового вирівнювання. Застосування засобів вимірювання та моніторингу для виявлення помилок у часовому вирівнюванні та автоматичного виправлення їх. Регулярні оновлення програмного забезпечення та надання сервісної підтримки для забезпечення ефективності та стабільності часового вирівнювання. Використання механізмів коригування у реальному часі для негайного вирівнювання часу, якщо виявлено помилки або зміни у мережі. Запропоновані методи можуть використовуватися окремо або в комбінації для забезпечення точного та стабільного часового вирівнювання в мережах TDD.

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 «Мережа доступу 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 «Мережа доступу 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 (ПШБ, 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 | 0 | 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 | 42 | 52 | 48 |
| 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 | | 47,3 | | |

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 (ПБ, 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 | 0 | 64 | 0 |
| Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини | 58 | 0 | 58 |
| 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 | 60,0 | | |

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 [50]:

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

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 47,3, k_{\text{теор}} = 60,0$ балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 47,3 + 0,4 \cdot 60,00 = 52,40 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ 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 «Мережа доступу 5G», даний рівень становить 52,40 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 «Мережа доступу 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 [50]:

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

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, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 17650,00 \cdot 22 / 22 = 17650,00 \text{ грн.}$$

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 | 17650,00 | 802,27 | 22 | 17650,00 |
| Ст. науковий співробітник | 16500,00 | 750,00 | 20 | 15000,00 |
| Науковий співробітник | 15000,00 | 681,82 | 7 | 4772,73 |
| Інженер-дослідник телекомунікаційних систем | 14100,00 | 640,91 | 20 | 12818,18 |
| Технік 1-ї категорії | 7800,00 | 354,55 | 18 | 6381,82 |
| Всього | | | | 56622,73 |

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Мережа доступу 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:

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

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

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [50];

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 $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_I = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 56,53 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 56,53 \cdot 6,00 = 339,19 \text{ грн.}$$

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 |
|--|------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Встановлення допоміжного обладнання | 6,00 | 2 | 1,10 | 56,53 | 339,19 |
| Інсталяція програмного забезпечення | 5,60 | 4 | 1,50 | 77,09 | 431,69 |
| Встановлення модулів | 12,00 | 5 | 1,70 | 87,37 | 1048,40 |
| Монтаж імітаторів мереж | 12,00 | 4 | 1,50 | 77,09 | 925,06 |
| Формування бази даних результатів вимірювань | 16,00 | 3 | 1,35 | 69,38 | 1110,07 |
| Підготовка приміщення | 4,00 | 2 | 1,10 | 56,53 | 226,13 |
| Всього | | | | | 4080,53 |

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$З_{\text{дод}} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{доd}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доd}} = (56622,73 + 4080,53) \cdot 10 / 100\% = 6070,33 \text{ грн.}$$

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:

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

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

$$Z_n = (56622,73 + 4080,53 + 6070,33) \cdot 22 / 100\% = 14690,19 \text{ грн.}$$

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 «Мережа доступу 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:

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

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.

$$M_1 = 2,0 \cdot 185,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 388,50 \text{ грн.}$$

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 |
|---|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Папір канцелярський офісний ECONOMIC (A4-500) | 185,00 | 2,0 | 0 | 0 | 388,50 |
| Папір для заміток ECONOMIC (A5)-60 | 125,00 | 3,0 | 0 | 0 | 393,75 |
| Начиння канцелярське DATUM FX | 210,00 | 3,0 | 0 | 0 | 661,50 |
| Органайзер офісний DATUM Office | 195,00 | 3,0 | 0 | 0 | 614,25 |
| Картридж для принтера HP-210A | 1460,00 | 1,0 | 0 | 0 | 1533,00 |

Продовження таблиці 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 |
|---|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Диск оптичний VEKO-10 (CD-R) | 27,00 | 5,0 | 0 | 0 | 141,75 |
| Диск оптичний VEKO-W (CD-RW) | 35,00 | 2,0 | 0 | 0 | 73,50 |
| FLASH-пам'ять Kingstar (32 ГБ) Class 10 | 139,00 | 1,0 | 0 | 0 | 145,95 |
| FLASH-пам'ять Kingstar (64 ГБ) Class 10 A | 199,00 | 1,0 | 0 | 0 | 208,95 |
| Всього | | | | | 4161,15 |

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Мережа доступу 5G», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

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

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

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

$K_6 = 1 \cdot 2999,00 \cdot 1,05 = 3148,95$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

| Найменування комплектуючих | Кількість, шт. | Ціна за штуку, грн | Сума, грн |
|------------------------------------|----------------|--------------------|-----------|
| Контроллер Controller HD16qj | 1 | 2999,00 | 3148,95 |
| Маршрутизатор XA165G-Hn3D | 1 | 2969,00 | 3117,45 |
| Імітатор магістральної мережі FIEN | 1 | 5200,00 | 5460,00 |
| Всього | | | 11726,40 |

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:

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

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

$C_{\text{пр.і}}$ – 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.

$$B_{\text{спец}} = 12599,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 13228,95 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спекустаткування по кожному виду

| Найменування устаткування | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|--|---------------|----------------------|---------------|
| Термінал (імітатор навантаження - передавач сигналу мережі 5G) | 1 | 12599,00 | 13228,95 |
| Термінал (імітатор приймача сигналу 5G мережі) | 1 | 10299,00 | 10813,95 |
| Всього | | | 24042,90 |

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:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

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

$C_{\text{прог.і}}$ – 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.

$$B_{\text{прог}} = 6599,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 6928,95 \text{ грн.}$$

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 |
|--|---------------|----------------------|---------------|
| Windows | 1 | 6599,00 | 6928,95 |
| Microsoft Office | 1 | 5430,00 | 5701,50 |
| Пакет обробки даних | 1 | 17450,00 | 18322,50 |
| Програмне забезпечення підтримки мереж | 1 | 14730,00 | 15466,50 |
| Всього | | | 46419,45 |

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:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

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;

$T_г$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (15640,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 868,89 \text{ грн.}$$

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 |
|--|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Персональний комп'ютер | 15640,00 | 3 | 2 | 868,89 |
| Програмний центр обробки та виводу даних | 28999,00 | 3 | 2 | 1611,06 |
| Місце оператора | 6899,00 | 5 | 2 | 229,97 |
| Оргтехніка | 7500,00 | 5 | 2 | 250,00 |
| Пакет MATLAB SIMULINK | 7580,00 | 3 | 2 | 421,11 |
| Генератор сигналу цифровий | 6800,00 | 5 | 2 | 226,67 |
| Дослідницька лабораторія | 299000,00 | 25 | 2 | 1993,33 |
| Всього | | | | 5601,02 |

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

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

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

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

$$B_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 384,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

| Найменування обладнання | Встановлена потужність, кВт | Тривалість роботи, год | Сума, грн |
|--|-----------------------------|------------------------|-----------|
| Персональний комп'ютер | 0,32 | 160,0 | 384,00 |
| Програмний центр обробки та виводу даних | 0,25 | 160,0 | 300,00 |
| Генератор сигналу цифровий | 0,11 | 50,0 | 41,25 |
| Пристрої виводу інформації | 0,32 | 3,2 | 7,68 |
| Місце оператора спеціалізоване | 0,05 | 160,0 | 60,00 |
| Офісна оргтехніка | 0,45 | 3,5 | 11,81 |
| Термінал (імітатор навантаження - передавач сигналу мережі 5G) | 0,09 | 100,0 | 67,50 |
| Термінал (імітатор приймача сигналу 5G мережі) | 0,08 | 100,0 | 60,00 |
| Маршрутизатор XA165G-Hn3D | 0,02 | 100,0 | 15,00 |
| Допоміжне мережеве обладнання | 0,12 | 100,0 | 90,00 |
| Всього | | | 1037,24 |

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Мережа доступу 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:

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

де H_{ce} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{ce} = 20\%$.

$$B_{ce} = (56622,73 + 4080,53) \cdot 20 / 100\% = 12140,65 \text{ грн.}$$

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» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (56622,73 + 4080,53) \cdot 30 / 100\% = 18210,98 \text{ грн.}$$

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:

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

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

$$I_{\epsilon} = (56622,73 + 4080,53) \cdot 50 / 100\% = 30351,63 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) 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 (загальновиробничі) 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 (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (56622,73 + 4080,53) \cdot 100 / 100\% = 60703,26 \text{ грн.}$$

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

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_в + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_в + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 56622,73 + 4080,53 + 6070,33 + 14690,19 + 4161,15 + 11726,40 + 24042,90 + 46419,45 + 5601,02 + 1037,24 + 12140,65 + 18210,98 + 30351,63 + 60703,26 = 295858,45 \text{ грн.}$$

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 $\eta=0,95$.

$$ZB = 295858,45 / 0,95 = 311429,94 \text{ грн.}$$

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 «Мережа доступу 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. Прийmemo $I = 4$;

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 $n = 3$;

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 $B = 311429,94$ 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 [50].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 4 / 311,4 \cdot 0,08 = 29,59.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Мережа доступу 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 «Мережа доступу 5G» складають 311429,94 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мережа доступу 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

Відповідно до Закону України “Про охорону праці” управління охороною праці на державному рівні здійснює створена при Кабінеті Міністрів Національна Рада з питань безпеки життєдіяльності, що розробляє і проводить заходи зі створення цілісної системи державного управління охороною життя людей на виробництві і профілактики побутового травматизму, організовує й забезпечує контроль за виконанням законодавчих актів, координує діяльність центральних і місцевих органів виконавчої влади у сфері охорони життя людей. Очолює Національну Раду з питань безпеки життєдіяльності перший віцепрем'єр-міністр України. Рішення Національної Ради та її бюро, прийняті в межах їхньої компетенції, обов'язкові для центральних і місцевих органів державної виконавчої влади, підприємств, організацій та громадян.

На працівника під час дослідження мережі доступу 5G могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- пряма і відбита блискіть;
- підвищення яскравість;
- недостатня освітленість робочої зони;

2. Психофізіологічні:

- статичне перевантаження;
- розумове перевантаження;
- емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Велике значення має характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця проектувальника за ПК були дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;
- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Площа приміщення на одне робоче місце користувача повинна становити 6 м², а об'єм не менше ніж 20 м³.

Головними елементами робочого місця проектувальника за ПК є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташовано в зоні легкої досяжності робочого простору.

Максимальна зона досяжності рук – це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх у плечовому суглобі.

Оптимальна зона – частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччя при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При роботі в положенні сидячи рекомендуються такі параметри робочого простору:

- ширина не менше 700 мм;
- глибина не менше 400 мм;
- висота робочої поверхні столу над статтю 700-750 мм.

Оптимальними розмірами столу є:

- висота 710 мм;
- довжина столу 1300 мм;
- ширина столу 650 мм.

Під робочою поверхнею повинно бути передбачено простір для ніг:

- висота не менше 600 мм;
- ширина не менше 500 мм;
- глибина не менше 400 мм.

Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін - на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше 90° (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано зашторити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

Приміщення, де здійснювалося дослідження мережі доступу 5G за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки [53].

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки встановлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В, передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.

– Розподільні шафи, пускові пристрої й клемні коробки закритого типу (розміщаються в спеціальних кожухах) - для забезпечення недоступності неізолюваних струмопровідних частин.

Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Основним нормативним документом, що регламентує параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [54]. Цей документ встановлює оптимальні і допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, допустиму температуру внутрішніх поверхонь приміщення (стіни, стеля, підлога) і зовнішніх поверхонь технологічного обладнання, а також допустиму інтенсивність теплового випромінювання нагрітих поверхонь у приміщенні та відкритих джерел тепла (нагрітий метал, скло, відкритий вогонь тощо) для робочої зони — визначеного простору, в якому знаходяться робочі місця постійного або непостійного (тимчасового) перебування працівників

Робота дослідника за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139 Дж/с) [55]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії 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 забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується централізована парова система опалення.
2. Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування.
3. Систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Залежно від ступеня токсичності, фізико-хімічних властивостей, шляхів проникнення в організм, санітарні норми встановлюють гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони виробничих приміщень, перевищення яких неприпустиме.

В приміщенні, де здійснюється дослідження мережі доступу 5G можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. 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 | |
| Пил нетоксичний | 0,5 | 0,15 | 4 |
| Озон | 0,16 | 0,03 | 1 |

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

6.2.3 Виробниче освітлення

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль і для попередження виробничого травматизму. Багато негасних випадків на виробництві стається через погане освітлення. Втрати від цього становлять досить значні суми, а, головне, людина може загинути або стати інвалідом. Раціональне освітлення повинно відповідати таким умовам: бути достатнім (відповідним нормі); рівномірним; не утворювати тіней на робочій поверхні; не засліплювати працюючого; напрямок світлового потоку повинен відповідати зручному виконанню роботи. Це сприяє підтримці високого рівня працездатності, зберігає здоров'я людини та зменшує травматизм.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [56]) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 6.3:

Таблиця 6.3 - 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, Лк | | КПО, e_n , % | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|----------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | | | | | | Штучне освітлення | | Природне освітлення | | Сумісне освітлення | |
| | | | | | | Комбіноване | Загальне | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове |
| Дуже високої точності | V0,15 - до 0,3 | II | | великий | світлий | 1000 | 300 | 7 | 2,5 | 4,2 | 1,5 |

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) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

6.2.4 Виробничий шум

Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину. Фізична сутність звуку – це механічні коливання пружного середовища (повітря, рідини). Під час звукових коливань утворюються області зниженого і підвищеного тиску, що діють на слуховий аналізатор (мембрану вуха).

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [57]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

| 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 |

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Працюючи за комп'ютером, користувач підпадає під вплив високочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Як показують результати вимірювання електромагнітного випромінювання, інтенсивність опромінення ЕМП від комп'ютера підсилюється, коли одночасно оператор ще й розмовляє по мобільному телефону.

Люди, які працюють в ЕМП, що перевищує допустимі норми, швидко втомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в ділянці серця. Вони стають дратівливими, у них збільшується пітливість та порушується нічний сон. Відтак, захист від ЕМВ не лише покращить самопочуття працівників, але і допоможе створити більш сприятливі умови для праці.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

| Найменування параметра | Допустимі значення |
|---|--------------------|
| Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора | 10В / м |
| Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора | 0,3 А / м |
| Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: | 20кВ / м |
| для дорослих користувачів | |
| для дітей дошкільних установ і що вчать середніх спеціальних і вищих навчальних закладів | 15кВ / м |

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Визначення параметрів захисту в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій

6.3.1 Дія радіації на живі організми

Кінцевим результатом початкової дії іонізуючих випромінювань є порушення структури тканини і клітин. Після припинення процесу опромінення живого організму біохімічні зміни не припиняються тому, що утворені іони і радикали продовжують свою активну дію ще деякий період часу. Виникає період вторинної дії променів.

Особливості біологічної дії іонізуючих випромінювань такі:

- біологічний ефект залежить від поглинутої дози випромінювання. Ця залежність прямо пропорційна – із зростанням дози посилюється ефект;

- ефект опромінення пов'язаний із розподілом дози за часом, тобто із місткістю поглинання енергії. Ступінь променевого ураження залежить від розділу сумарної дози на окремі фракції. Якщо число фракцій зростає;

- ураження живого організму зменшується тому, що в ньому між окремими порціями ураження розпочинається відновлення деяких функцій [58].

6.3.2 Визначення часу закінчення дезактивації місцевості, зараженої внаслідок аварії на АЕС

Вихідні дані: Рівень радіації, виміряний через $t = 1,2$ годин після зараження, складає $P_t = 5,0$ р/год. Для виконання робіт потрібно $t_p = 5,0$ год, допустима доза опромінення $D_{\text{доп}} = 9$ р.

Визначимо рівень радіації через 1 год після аварії за формулою

$$P_1 = P_t t^{0,5} \quad [\text{р/год}], \quad (6.1)$$

де P_t – рівень радіації, виміряний через t год після аварії, р/год.

Знаходимо час початку дезактивації місцевості за допомогою такої формули

$$D_M = \frac{2P_1(\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{\text{осл}}} \quad [\text{р}], \quad (6.2)$$

де t_n, t_k – час початку та кінця опромінення, год;

$K_{\text{осл}}$ – коефіцієнт ослаблення радіації ($K_{\text{осл}} = 1$ для відкритої місцевості).

Час початку опромінення визначимо за формулою:

$$t_n = t_k - t_p \quad [\text{год}]. \quad (6.3)$$

Прирівнявши можливу дозу опромінення до допустимої отримаємо:

$$\sqrt{t_k} - \sqrt{t_k - t_p} = \frac{D_{\text{доп}} K_{\text{осл}}}{2P_1} = a \text{ [год]}. \quad (6.4)$$

Піднесемо до квадрату обидві частини рівняння (6.4)

$$t_k - 2\sqrt{t_k} \sqrt{t_k - t_p} + t_k - t_p = a^2, \quad (6.5)$$

або

$$2\sqrt{t_k} \sqrt{t_k - t_p} = 2t_k - (t_p + a^2)^2. \quad (6.6)$$

Знову піднесемо до квадрату обидві частини рівняння (6.6)

$$4t_k^2 - 4t_k t_p = 4t_k^2 - 4t_k(t_p + a^2) + (t_p + a^2)^2, \quad (6.7)$$

звідки

$$t_k = \frac{(t_p + a^2)^2}{4a^2} \text{ [год]}. \quad (6.8)$$

Після підстановки відомих значень у формули (6.1, 6.4, 6.8), отримаємо:

$$P_1 = 5,0 \cdot 1,2^{0,5} = 5,48 \text{ (р/год)};$$

$$a = \frac{9 \cdot 1}{2 \cdot 5,48} = 0,82 \text{ (год)};$$

$$t_k = \frac{(5,0+0,82^2)^2}{4 \cdot 0,82^2} = 11,96 \text{ (год)}.$$

6.4 Висновки до розділу 6

Досліджено параметри захисту в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій. Визначено час закінчення дезактивації місцевості, зараженої внаслідок аварії на АЕС – 11,96 год.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень у магістерській роботі було отримано такі основні результати дослідження сучасних тенденцій у розвитку телекомунікаційних мереж, зокрема в контексті мобільних транспортних систем і 5G. Зазначена тенденція до зростання цінності рівня доступу вказує на важливість і розширення зв'язку для різних орендарів. Це особливо актуально для сучасних міських інфраструктур, таких як "розумні міста".

Враховання потреб у координації між доменами та використання програмно-визначених мережних принципів свідчать про важливість ефективного управління та експлуатації мереж, особливо магістральних і транзитних.

Зростаючий рівень відкритості мереж і використання відкритих стандартів допомагає спрощувати управління і координацію, особливо в умовах багатьох постачальників і міждоменої взаємодії. Використання моделей відкритих мереж сприяє ефективності і спрощенню середовища з багатьма постачальниками. Це дозволяє покращити мережеві послуги та зменшити складність управління.

Тенденція до конвергенції, зокрема перехід від CPRI/OBSAI на Ethernet і IP, свідчить про сталу еволюцію мережевих технологій у напрямку спрощення та уніфікації. Використання програмованих та віртуалізованих мережевих принципів, таких як SDN та NFV відіграє ключову роль у забезпеченні гнучкості та швидкості впровадження. Результати досліджень вказують на поступовий розвиток та адаптацію мереж для відповіді на різноманітні вимоги високотехнологічного світу.

Дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G враховує кілька ключових аспектів, що стосуються складності структури та динамічного розвитку технологій.

Здійснено аналіз функціональних параметрів мережі 5G, таких як пропускна здатність, затримка, енергоефективність, ідентифікація та вирішення конфліктів, керування ресурсами, інтеграція послуг.

Виконано визначення ефективності мережі 5G в різних умовах, таких як густина користувачів, обсяг передачі даних та відстань між пристроями та базовими станціями.

Розглянуто методи оптимізації та вдосконалення мережі 5G, включаючи удосконалення алгоритмів управління ресурсами, розробку нових технік маршрутизації, використання технологій машинного навчання тощо.

Здійснено удосконалення методів гнучкого впровадження та експлуатації мережі 5G для забезпечення адаптації до швидко змінюючогося середовища та інновацій, включаючи можливість розширення та модифікації.

Виконано дослідження технічних засобів та протоколів для забезпечення синхронізації в мережах 5G. Включення моніторингу та систем корекції для підтримання оптимальної синхронізації.

Вказані аспекти дослідження допомагають зрозуміти, як мобільні мережі 5G працюють в різних умовах та як можна постійно вдосконалювати їхню ефективність та надійність.

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. Optical Internetworking Forum (OIF). Implementation agreement 400ZR [Online]. https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-01.0_reduced2.pdf, 2020.
2. Filer M. The coherent 400 Gb/s revolution. Lightreading optical networking digital symposium; 2020 May 28.
3. 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>
4. 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.
5. Zhang D, Liu D, Wu X, Nettet D. Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization. *IEEE/OSA J Opt Commun Netw* 2020;12(10):D99-108.
6. Houtsma V, Mahadevan A, Kaneda N, van Veen D. Transceiver technologies for passive optical networks: past, present, and future [Invited Tutorial]. *IEEE/OSA J Opt Commun Netw* 2021;13 (1):A44-55.
7. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 32–39. [doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)
8. 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

9. 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
10. Torres-Ferrera P, Wang H, Ferrero V, Valvo M, Gaudino R. Optimization of band-limited DSP-aided 25 and 50 Gb/s PON using 10G-class DML and APD. *J Light Technol* 2020;38:608-18.
11. 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.
12. Effenberger FJ, Zeng H, Shen A, Liu X. Burst-mode error distribution and mitigation in DSP-assisted high-speed PONs. *J Light Technol* 2020;38:754-60.
13. Teixeira A, Lavery D, Ciaramella E, Schmalen L, Iiyama N, Ferreira RM, et al. DSP enabled optical detection techniques for PON. *J Light Technol* 2020;38:684-95.
14. Васильківський, М., Стальченко, О., & Якубівська, Н. 2023 Jun 18. Коригування продуктивності систем МІМО з використанням ШІ. НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних електронних систем. [Онлайновий ресурс]
15. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А. і Ксьондз, Н. 2023. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО. 52 (Вер 2023), 128-139. DOI:https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-16.
16. Filer M. The coherent 400 Gb/s revolution. *Lightreading optical networking digital symposium*; May 28, 2020.
17. Rashidinejad A, Nguyen A, Olson M, Hand S, Welch D. Real-time demonstration of 2.4Tbps (200Gbps/) bidirectional coherent DWDM-PON enabled by coherent nyquist subcarriers. In: *Optical fiber communication conference (OFC) 2020*, paper W2A.30; 2020.
18. Welch DF. Disruption cycles for optical networks: how point to multi-point coherent optics can transform the cost and complexity of the optical network. In: *European conference on optical communications 2020*, Invited Talk Tu1C-1; 2020.

19. 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.

20. Sun H, et al. 800G over 1000 km enabled by real-time DSP ASIC employing probabilistic shaping and digital sub-carrier multiplexing. In: 2020 22nd International conference on transparent optical networks (ICTON), Paper Tu.C5.3, Bari, Italy; 2020.

21. Zhou X, Urata R, Liu H. Beyond 1 Tb/s intra-data center interconnect technology: IM-DD OR coherent? J Light Technol 2020;38(2):475-84 15.

22. Nagarajan R. and Lyubomirsky I. Low-complexity DSP for inter-data center optical fiber commu-nications. In: 2020 European conference on optical communications (ECOC), Tutorial paper SC04; 2020.

23. Fludger C. Performance orientated DSP design for flexible coherent transmission. In: Optical fiber communication conference (OFC) 2020, Tutorial paper Th3E.1; 2020.

24. Васильківський, М., Стальченко, О., & Якубівська, Н. 2023 Jun 18. Адаптивні мобільні системи на основі масивного МІМО. НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних електронних систем. [Онлайнний ресурс]

25. Rump Session on When will co-packaged optics replace pluggable modules in the datacenter? In: Organized by Chris Cole and Dan Kuchta, Optical fiber communication conference (OFC) 2020; 2020 March 10.

26. Васильківський, М., Стальченко, О., & Якубівська, Н. 2023 Jun 18. Інтелектуальна оптимізація мобільних мереж МІМО. НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних електронних систем. [Онлайнний ресурс]

27. Zhu Y, Zhang F, Zhang L, Ruan X, Li Y, Chen Z. Towards single lane 200G optical interconnects with silicon photonic modulator. J Light Technol 2020;38:67-74.

28. Jacques M, Xing Z, Samani A, El-Fiky E, Li X, Xiang M, et al. 240 Gbit/s silicon photonic Mach-Zehnder modulator enabled by two 2.3-Vpp drivers. J Light Technol 2020;38:2877-85.

29. Pang X, Ozolins O, Lin R, Zhang L, Udalcovs A, Xue L, et al. 200 Gbps/lane IM/DD technologies for short reach optical interconnects. *J Light Technol* 2020;38:492-503.
30. Zhang H, Li M, Zhang Y, Zhang D, Liao Q, He J, et al. 800 Gbit/s transmission over 1 km single-mode fiber using a four-channel silicon photonic transmitter. *Photonics Res* 2020;8(11):1776-82.
31. QSFP-DD MSA Whitepaper on Optimizing QSFP-DD Systems to Achieve at Least 25 Watt Thermal Port Performance. January 2021. Available from: <http://www.qsfp-dd.com/wp-content/uploads/2021/01/2021-QSFP-DD-MSA-Thermal-Whitepaper-Final.pdf>.
32. Buchali F, et al. 1.52 Tb/s single carrier transmission supported by a 128 GSa/s SiGe DAC. In: *Optical fiber communication conference (OFC)*, Th4C.2, 2020.
33. Pittalà F, et al. 220 GBaud signal generation enabled by a two-channel 256 GSa/s arbitrary wave-form generator and advanced DSP. In: *European conference on optical communications (ECOC)*, Brussels, Belgium, PDP1.4; 2020.
34. Nagarajan R, Lyubomirsky I. Low-complexity DSP for inter-data center optical fiber communications. In: *2020 European conference on optical communications (ECOC)*, tutorial paper SC04; 2020.
35. Hirbawi Y, Zhu Q, Caia J-M. Continuation & results of FEC proposals evaluation for ITU G.709.3 200⁺400G 450km black link. In: *Contribution to the ITU G.709.3*, CD11-M10; 2019 May.
36. Roesse J, et al. Proposal to specify OFEC for FlexO-LR 450 km application. In: *Contribution to the ITU study group 15*, Q11, SG15-C1345R1; 2019 July.
37. Loussouarn Y, Pincemin E. Probabilistic-shaping DP-16QAM CFP-DCO transceiver for 200G upgrade of legacy metro/regional WDM infrastructure. In *Optical fiber communication conference (OFC)*, paper M2D.2; 2020.
38. Castrillón A, Xu H, Morero D, Taddei A, Asinari M, Fan SH, et al. First real-time demonstration of probabilistic shaping 400G transmission enabling high-performance pluggable module applications. In: *2020 IEEE photonics conference (IPC)*, Vancouver, BC, Canada, paper MG1.3; 2020 September.

39. Grubb S, Mertz P, Kumpera A, Dardis L, Rahn J, O'Connor J, et al. Real-time 16QAM transatlantic record spectral efficiency of 6.21 b/s/Hz enabling 26.2 Tbps capacity. In: Optical fiber communication conference (OFC), paper M2E.6; 2019.
40. Turukhin A, Paskov M, Mazurczyk MV, Patterson WW, Batshon HG, Sinkin OV, et al. Demonstration of potential 130.8 Tb/s capacity in power-efficient SDM transmission over 12,700 km using hybrid microassembly based amplifier platform. In Optical fiber communication conference (OFC), paper M2I.4; 2019.
41. Bolshtyansky MA, Sinkin OV, Paskov M, Hu Y, Cantono M, Jovanovski L, et al. Single-mode fiber SDM submarine systems. *J Light Technol* 2020;38(6):1296-304.
42. Schaefer NFJ, Schedelbeck G, Strobel R, Hoof WV, Lefevre Y. G.HSP: LDPC code proposal. In: ITU-T Q2 conference call; November 19, 2019.
43. Bai L. Optical service unit (OSU)-based next generation optical transport network (NG OTN) technology and verification. In: MATEC web of conferences 336, paper 04014; 2021.
44. Nagarajan R, Lyubomirsky I. Low-complexity DSP for inter-data center optical fiber communications. In: 2020 European conference on optical communications (ECOC), tutorial paper SC04; 2020.
45. Hirbawi Y, Zhu Q, Caia J-M. Continuation & results of FEC proposals evaluation for ITU G.709.3 200-400G 450km black link. In: Contribution to the ITU G.709.3, CD11-M10; 2019 May.
46. Roesse J, et al. Proposal to specify OFEC for FlexO-LR 450 km application. In: Contribution to the ITU study group 15, Q11, SG15-C1345R1; 2019 July.
47. Loussouarn Y, Pincemin E. Probabilistic-shaping DP-16QAM CFP-DCO transceiver for 200G upgrade of legacy metro/regional WDM infrastructure. In: Optical fiber communication conference (OFC), paper M2D.2; 2020.
48. Wellbrock G. Fiber sensing in existing telecom fiber networks, Optical Fiber Communication Conference (OFC), Tutorial paper Tu6F.1; 2021.

49. Ip E, et al., Distributed fiber sensor network using telecom cables as sensing media: technology advancements and applications, Optical Fiber Communication Conference (OFC), Invited paper Tu6F.2; 2021.

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

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

52. 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_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php.

53. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

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

55. 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>

56. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

57. 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>

58. Методичні вказівки до самостійної та індивідуальної роботи з дисципліни "Цивільний захист та охорона праці в галузі. Частина 1. Цивільний захист" / Уклад. О. В. Поліщук, О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 32 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

МЕРЕЖА ДОСТУПУ 5G

назва магістерської кваліфікаційної роботи

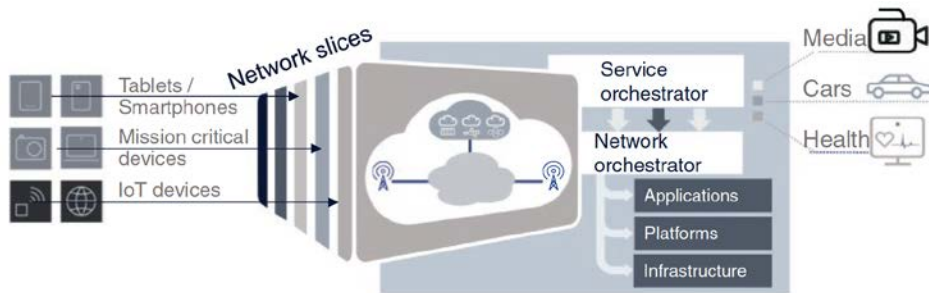


Рисунок 1 – Схема сегментування мережі доступу

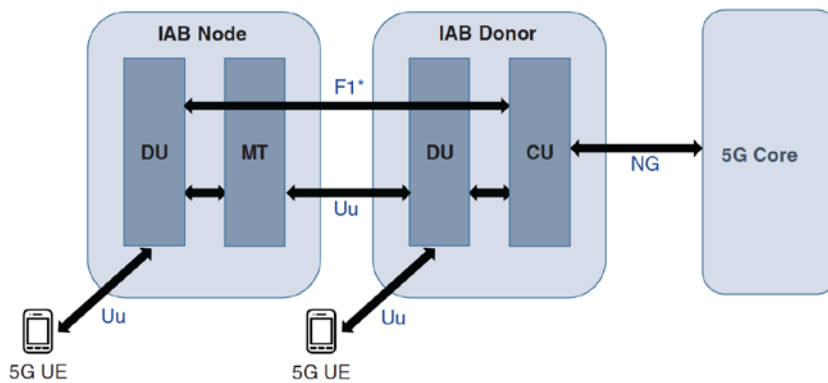


Рисунок 2 – Архітектура ІДТТ

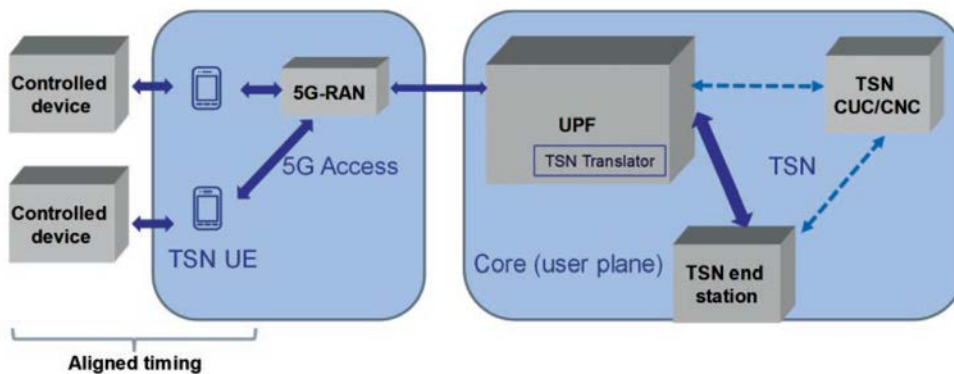


Рисунок 3 – Схема взаємодії швидкісних комунікацій в мережі 5G

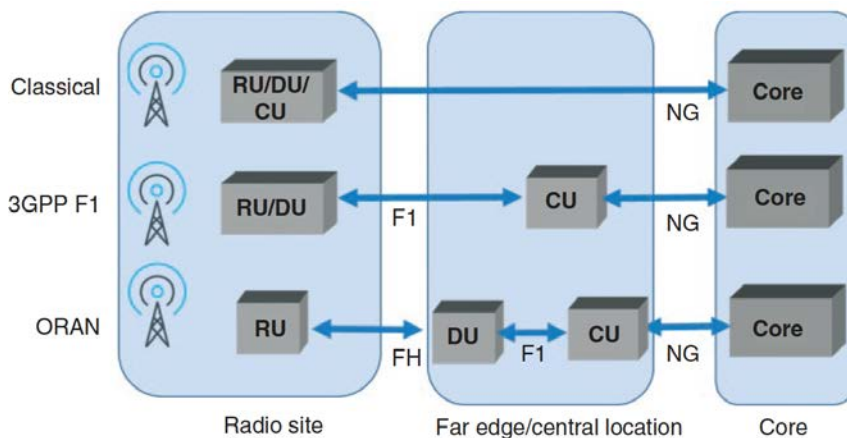


Рисунок 4 – Схема магістрального/середньомагістрального доступу

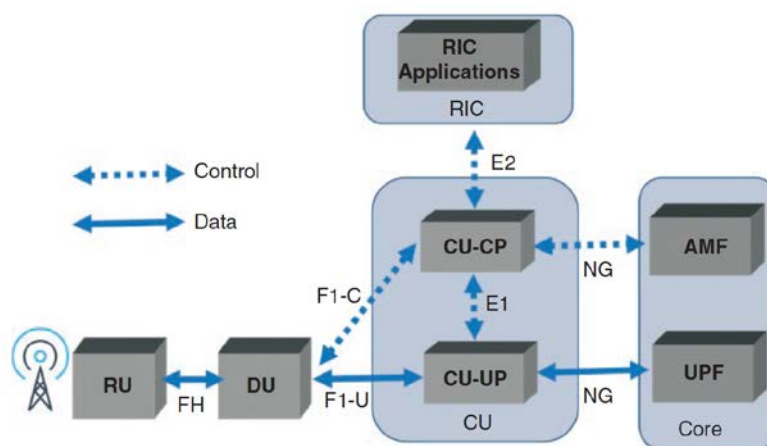


Рисунок 5 – Схема інтелектуального контролера в архітектурі O-RAN

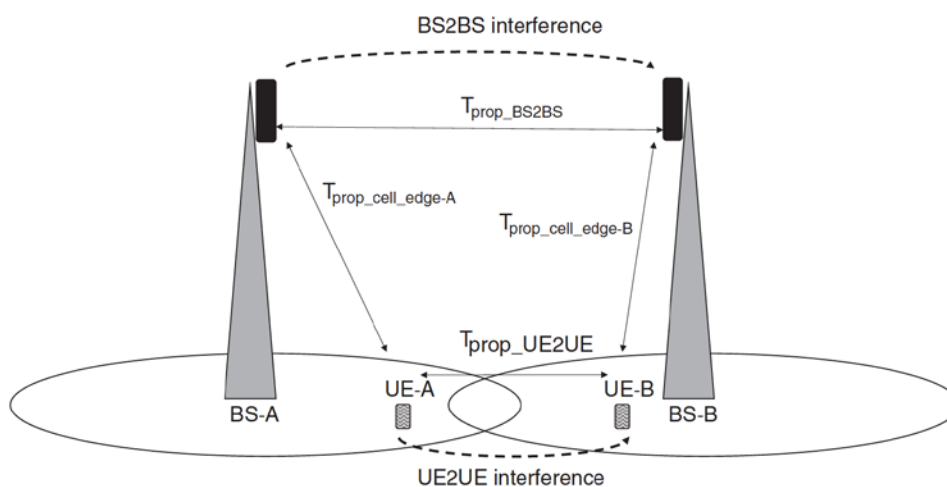
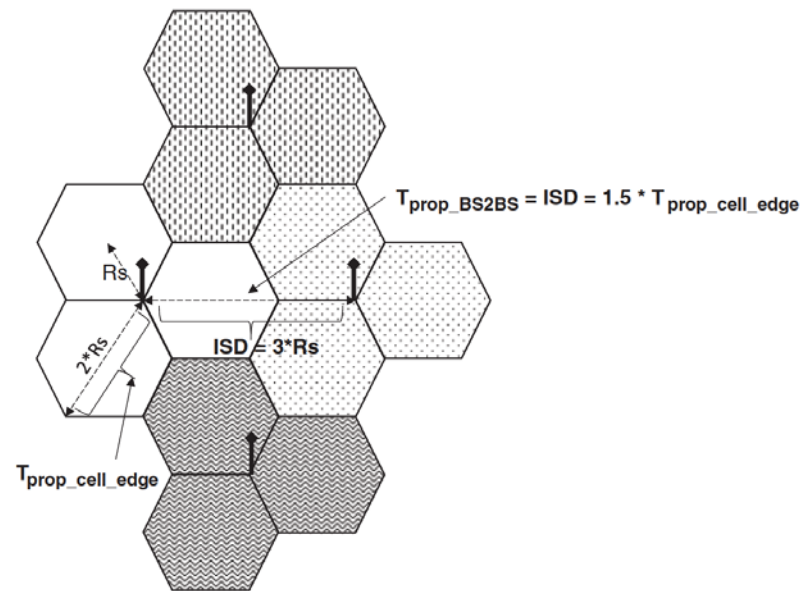


Рисунок 6 – Схема ефективного керування інтерференцією в системах TDD та забезпечення оптимальної продуктивності мережі



R_s = Cell radius

ISD = Inter-Site Distance

$T_{prop_cell_edge}$ = Propagation delay to cell edge

T_{prop_BS2BS} = Propagation delay from BaseStation to BaseStation

Рисунок 7 - Оптимальна модель мереж мобільного зв'язку з точки зору використання ресурсів та забезпечення покриття

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Мережа доступу 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 99,08 % Схожість 0,92 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

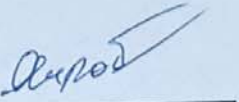
1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.


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  Васильківський М.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

Автор роботи  Червоній А.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Васильківський М.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)