

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій»

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

Валь А.В. Валь А.В.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ
Михалевський Д.В.
« 8 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Семенов А. О.
« 12 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.
д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 12 » 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**

Валь Андрію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій
керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, докт. техн. наук, професор
(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

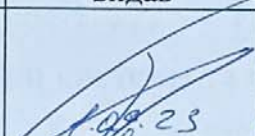
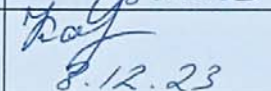
3. Вихідні дані до роботи пропускна здатність ONU-AP – 6900 Мбіт/с; пропускна здатність хмарних ресурсів – 10 Гбіт/с; пропускна здатність туманних ресурсів – 10 Гбіт/с; кількість ONU у мережі FC-FiWi – 32; кількість безпроводних STA – 100; затримка поширення між периферійним пристроєм/STA і ONU-AP - 0.000333 мс; затримка поширення між ONU-AP і OLT - 0.05 мс; затримка у волокні між OLT і звичайною хмарою - 50 мс; затримка у волокні між ONU-AP і сервером FC - 0.01 мс; тривалість переключення захисту між двома послідовними слотами – 1 мкс; тривалість циклу опитування PON – 1 мс; середній час відгуку туманного сервера - 68,7 мс.

4. Зміст текстової частини: безшовна гібридна бездротова архітектура GPON у складі мережі 5G; програмно визначена мережа та віртуалізація мережевих функцій для конвергентних метро-мереж доступу; підвищення ефективності мережі 5G із волоконно-оптичним доступом та туманними обчисленнями; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
архітектура мережі оптико-бездротового доступу з використанням RoF в блоках радіодоступу; схема пристрою радіодоступу; гібридна архітектура RAU для розширення GPON; архітектура LR-PON, що забезпечує масову консолідацію вузлів; конвергентна архітектура сегменту мережі доступу/метро з підтримкою

5G та міжмережевим зв'язком між ONU; мережева архітектура туманних обчислень розширених мереж FiWi.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	 7.09.23	 8.12.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 7.09.23	 8.12.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 7.09.23	 8.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

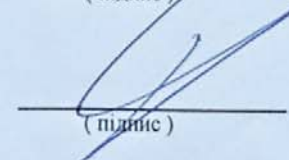
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 5G	17.09.2023р.	
3.	Безшовна гібридна бездротова архітектура GPON у складі мережі 5G	06.10.2023р.	
4.	Програмно визначена мережа та віртуалізація мережевих функцій для конвергентних метро-мереж доступу	27.10.2023р.	
5.	Підвищення ефективності мережі 5G із волоконно-оптичним доступом та туманними обчисленнями	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)

Валь А.В.

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Валь А.В. Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 120 – стор., 46 – рис., 15 – табл., 52 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення загальної продуктивності та функціональності мережі 5G, використовуючи оптичні технології як ключовий елемент її інфраструктури.

Визначено ключові тенденції та технології розвитку телекомунікаційної інфраструктури для підвищення пропускної здатності та доступу до Інтернету. Обрано методи поєднання оптичних мереж і бездротових технологій для надання широкого спектру послуг та задоволення потреб користувачів.

Оптимізовано використання SDN та NFV для метро-мереж доступу, що дозволяє операторам забезпечити гнучкість, ефективність та швидкість реакції на зміни в телекомунікаційному середовищі. Обрано методи поєднання волоконно-оптичного доступу та туманних обчислень у мережах 5G, що сприяє покращенню швидкості, ефективності та безпеки комунікацій, що є критичним для успішного розвитку та впровадження мережі п'ятого покоління.

Ключові слова: мережа радіодоступу; безшовна гібридна бездротова архітектура; пасивна оптична мережа; ключовий показник ефективності; периферійні обчислення з множинним доступом.

ABSTRACT

UDC 621.391

Val A.V. Research of the 5G network based on optical technologies - Master's qualification work in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, educational programme - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU, 2023. 120 p., 46 figures, 15 tables, 52 bibliography - in Ukrainian.

The aim of the qualification work is to improve the overall performance and functionality of the 5G network using optical technologies as a key element of its infrastructure.

The key trends and technologies for the development of telecommunications infrastructure to increase bandwidth and access to the Internet are identified. The methods of combining optical networks and wireless technologies to provide a wide range of services and meet user needs are selected.

Optimised use of SDN and NFV for metro access networks, which allows operators to ensure flexibility, efficiency and responsiveness to changes in the telecommunications environment. The methods of combining fibre-optic access and fog computing in 5G networks are selected, which helps to improve the speed, efficiency and security of communications, which is critical for the successful development and implementation of the fifth generation network.

Keywords: radio access network; seamless hybrid wireless architecture; passive optical network; key performance indicator; edge computing with multiple access.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	12
1 БЕЗШОВНА ГІБРИДНА БЕЗДРОТОВА АРХІТЕКТУРА GPON У СКЛАДІ МЕРЕЖІ 5G	17
1.1 Пасивна оптична мережа.....	18
1.2 Прозоре бездротове розширення оптичних ліній зв'язку	19
1.3 Ключові фотонні та електронні технології.....	22
1.4 Інтегровані пристрої радіодоступу.....	32
1.5 Висновки до розділу 1	34
2 ПРОГРАМНО ВИЗНАЧЕНА МЕРЕЖА ТА ВІРТУАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ КОНВЕРГЕНТНИХ МЕТРО-МЕРЕЖ ДОСТУПУ	36
2.1 Вимоги 5G, що визначають конвергенцію мереж та віртуалізацію	37
2.2 Конвергенція мережі доступу та метро-мережі	42
2.3 Функціональна конвергенція та віртуалізація CO	51
2.4 Висновки до розділу 2	63
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ 5G ІЗ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНИМ ДОСТУПОМ ТА ТУМАННИМИ ОБЧИСЛЕННЯМИ.....	64
3.1 Мережі широкосмугового доступу	64
3.2 Вдосконалення мережі FiWi за допомогою туманних обчислень	74
3.3 Інтегрований доступ і транзитний зв'язок	76
3.4 Реалізація та валідація	81
3.5 Висновки до розділу 3	85
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	88
4.1 Оцінювання наукового ефекту.....	88
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	91
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	92
4.2.2 Відрахування на соціальні заходи	95

	8
4.2.3 Сировина та матеріали.....	95
4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	97
4.2.5 Спецстаткування для наукових (експериментальних) робіт	98
4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	99
4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	100
4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	101
4.2.9 Службові відрядження.....	102
4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	103
4.2.11 Інші витрати.....	103
4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	103
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	105
4.4 Висновок до розділу 4.....	106
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	107
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	107
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	110
5.2.1 Мікроклімат	110
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	111
5.2.3 Виробниче освітлення.....	112
5.2.4 Виробничий шум.....	113
5.2.5 Виробничі випромінювання.....	114
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	115
5.3.1 Дія повені на виробничі приміщення.....	115
5.3.2 Оцінка стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії повені	116
5.3.3 Розробка превентивних заходів по підвищенню стійкості роботи в умовах дії НС	117
5.4 Висновки до розділу 5	118

	9
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120
ДОДАТКИ.....	126
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	127
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	132

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CAPEX - Капітальні витрати;
CoMP - Координована багатоточкова передача;
CORD - Центр обробки даних;
CPX - Когерентний фотонний змішувач;
CU – Центральний блок;
CWDM - Мультиплексування з грубим поділом по довжині хвилі;
DU - Розподілений блок;
GPON - Гігабітна пасивна оптична мережа;
KPI - Ключовий показник ефективності;
LDPC - Код з перевіркою парності низької щільності;
LO – Локальний генератор;
MEC - Периферійні обчислення з множинним доступом;
MIMO - Множинний вхід і множинний вихід;
NGMN - Мобільна мережа наступного покоління;
НДР - Науково-дослідна робота;
NFV - Віртуалізація мережевих функцій;
O/E - Оптико-електричний перетворювач;
ODTN - Відкрита і роз'єднана транспортна мережа;
OLT - Термінал оптичної лінії;
ONU - Оптичний мережевий блок;
OPEX - Операційні витрати;
PCEP - Протокол елементів обчислення шляху;
PON - Пасивна оптична мережа;
RAN - Мережа радіодоступу;
RoF - Радіо по волокну;
RU - Віддалений блок;
SBD - Бар'єрний діод Шотткі;
SDN - Програмно визначена мережа;

UPF - Функція користувацької площини;

URLLC - Наднадійний зв'язок з низькою затримкою;

VoD - Відео на вимогу;

IPTV - Інтернет-протокол телебачення;

НФВ - Безшовна гібридна бездротова архітектура;

FiWi - Мережа широкопasmового бездротового доступу.

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток телекомунікацій та впровадження технологій 5G передбачає необхідність підвищення ефективності використання спектру каналу, використання методів множинного входу і множинного виходу (MIMO), форматів модуляції, передових схем каналного кодування та інших технічних аспектів, які вказують на складність оптимізації та розвитку мереж бездротового зв'язку. Також, зазначені концепції, такі як когнітивне радіо, координована багатоточкова передача (CoMP) та використання міліметрових хвиль, свідчать про розгляд нових підходів для поліпшення продуктивності системи та використання резервів спектру. Останнім часом спостерігається значне зростання трафіку стільникового бездротового зв'язку. Сплеск трафіку можна пояснити надзвичайним поширенням інтелектуальних мобільних пристроїв, а також постійним розгортанням додатків і послуг, що вимагають великої пропускної здатності. Щоб задовольнити потреби мережі, мережі радіодоступу (RAN) зазнали революційних змін від одного покоління мереж до іншого. Бездротові мережі п'ятого покоління (5G) розглядаються як життєздатні рішення для задоволення зростаючих потреб мережі, пропонуючи наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC). Існують різні аспекти системи, які необхідно враховувати, щоб зробити майбутній бездротовий зв'язок можливим. Одним з таких аспектів є ефективність використання спектру каналу зв'язку (SE), в якому пропускна здатність радіочастотних (РЧ) передач "точка-точка" використовується завдяки впровадженню методів множинного входу і множинного виходу (MIMO), форматів модуляції високого рівня і передових схем каналного кодування, таких як Turbo і коди з перевіркою парності низької щільності (LDPC). Тим не менш, ефективність системи SE можна ще більше покращити, використовуючи такі схеми, як когнітивне радіо, щоб динамічно використовувати недовикористаний або "білий простір" спектру [1-4].

Крім того, координована багатоточкова передача (CoMP) може бути використана для координації сусідніх стільників, щоб вони могли спільно передавати сигнали користувачам на межі стільника.

Реалізація може значно покращити SE системи за рахунок зменшення міжстільникових завад і підвищення швидкості передачі даних для периферійних користувачів. Крім того, окрім обмеженого, жорстко регульованого і перевантаженого радіочастотного діапазону в низькочастотному спектрі, існують величезні і невикористані спектри в більш високих радіочастотних діапазонах, таких як діапазон міліметрових хвиль (мм-хвиль) [5, 6]. Крім того, що ці діапазони здатні підтримувати багатогігабітну бездротову передачу, використання складних і трудомістких методів модуляції і кодування не є необхідним [7]. Крім того, для підвищення продуктивності системи, в основному з точки зору пропускної здатності, також розглядалися концепції малих стільників. Концепція базується на зменшенні розміру комірки з метою повторного використання обмежених спектральних ресурсів між комірками.

Проте, окрім управління міжстільниковими завадами, що є дійсно складним завданням при впровадженні малих стільників, капітальні витрати (CAPEX) та операційні витрати (OPEX) також вимагають значних витрат [8, 9].

Аналіз останніх досліджень. У поточному десятилітті було розроблено велику кількість комунікаційних послуг і додатків, і можна стверджувати, що попит на пропускну здатність для послуг передачі даних постійно зростає. Це пов'язано з тим, що такі послуги, як передача голосу через інтернет-протокол (VoIP), відео на вимогу (VoD), інтернет-протокол телебачення (IPTV) і прямі веб-додатки, що вимагають високошвидкісного доступу до інтернету, широко використовуються [10, 11]. Зростаюча потреба в передачі даних робить широкосмуговий доступ до Інтернету необхідним не лише для мешканців мегаполісів, але й для людей, що живуть у сільській місцевості. Забезпечення широкосмугового інтернету для всіх користувачів, тобто і для тих, хто живе в сільській місцевості, вимагає розробки нових технологій доступу до інтернету.

Безшовна гібридна бездротова архітектура (HFW) являє собою альтернативну технологію доступу, яка є особливо вигідною для клієнтів, що проживають у сільській місцевості та малонаселених регіонах. HFW-системи поєднують у собі швидкість, подібну до оптоволоконної мережі, і гнучкість бездротової мережі.

Це відкриває операторам можливість розгортати бездротовий широкосмуговий доступ до Інтернету майже ситуативно, без необхідності попереднього розгортання нової волоконно-оптичної інфраструктури. Це не лише дозволяє уникнути затримок, пов'язаних з розгортанням мережі, але й надає операторам альтернативні економічні бізнес-моделі [12].

Тому системи HFW представляють особливий інтерес для підключення нових комерційних клієнтів, наприклад, тих, хто працює в нових сферах бізнесу, або приватних клієнтів, які проживають у сільській місцевості або недостатньо розвинених районах, де оптична інфраструктура або недоступна, або економічно нежиттєздатна. Що стосується оптичної інфраструктури, технологія гігабітної пасивної оптичної мережі (GPON) сьогодні широко використовується в Європі та в усьому світі. GPON адаптує мультиплексування з грубим поділом по довжині хвилі (CWDM) для двонаправленого зв'язку і топології "точка-багато точок". Сьогодні багато ключових операторів у всьому світі використовують технологію GPON у своїй волоконно-оптичній інфраструктурі. Зазвичай GPON забезпечує зв'язком кінцевих споживачів, як домашніх, так і комерційних, як домашніх, так і комерційних. В даний час це провідна технологія для пасивних оптичних мереж (PON). GPON забезпечує коефіцієнт розділення до 1:64 на одному волокні, на відміну від стандартних мідних дротів [13].

Очевидно, що оператори по всьому світу зацікавлені в тому, щоб запропонувати недороге рішення для підключення нових міських районів, новозбудованих підприємств або багатоквартирних будинків до існуючої інфраструктури GPON.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення загальної продуктивності та функціональності мережі 5G, використовуючи оптичні технології як ключовий елемент її інфраструктури.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідження ключових тенденцій та технологій у розвитку телекомунікаційної інфраструктури для задоволення зростаючих потреб у пропускній здатності та доступі до Інтернету;

- дослідження методів комбінування переваг оптичних мереж і бездротових технологій для надання широкого спектру послуг та задоволення різноманітних потреб користувачів;

- дослідження особливостей використання SDN та NFV для метро-мереж доступу, що дозволяє операторам забезпечити гнучкість, ефективність та швидкість реакції на зміни в телекомунікаційному середовищі;

- дослідження методів поєднання волоконно-оптичного доступу та туманних обчислень у мережах 5G, що сприяє покращенню швидкості, ефективності та безпеки комунікацій, що є критичним для успішного розвитку та впровадження мережі п'ятого покоління.

З урахуванням викладеного тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною.

Об'єктом дослідження є оптична інфраструктура яка використовуються для підтримки та оптимізації мережі 5G.

Предметом дослідження є методи застосування оптичних технологій для оптимізації та покращення функцій мережі 5G.

Методи досліджень базуються на використанні: методи моделювання взаємодії оптичної інфраструктури з елементами мережі 5G для оцінки та покращення ефективності; методи оцінювання впливу оптичних технологій на якість обслуговування, пропускну здатність та надійність послуг, що надаються мережею 5G.

Новизна одержаних результатів:

- визначено ключові тенденції та технології розвитку телекомунікаційної інфраструктури для підвищення пропускної здатності та доступу до Інтернету;
- обрано методи поєднання оптичних мереж і бездротових технологій для надання широкого спектру послуг та задоволення потреб користувачів;
- оптимізовано використання SDN та NFV для метро-мереж доступу, що дозволяє операторам забезпечити гнучкість, ефективність та швидкість реакції на зміни в телекомунікаційному середовищі;
- обрано методи поєднання волоконно-оптичного доступу та туманних обчислень у мережах 5G, що сприяє покращенню швидкості, ефективності та безпеки комунікацій, що є критичним для успішного розвитку та впровадження мережі п'ятого покоління.

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 БЕЗШОВНА ГІБРИДНА БЕЗДРОТОВА АРХІТЕКТУРА GPON У СКЛАДІ МЕРЕЖІ 5G

Безшовна гібридна бездротова архітектура GPON у складі мережі 5G вказує на комбінацію двох ключових технологій у сфері телекомунікацій: GPON (гігабітна пасивна оптична мережа) та мережа п'ятого покоління (5G). Розглянемо деякі основні аспекти цієї архітектури.

GPON є технологією пасивної оптичної мережі, яка дозволяє високошвидкісний доступ до Інтернету за допомогою оптоволоконного з'єднання. Вона широко використовується для забезпечення інтернет-підключення для домогосподарств і бізнесу. Мережа п'ятого покоління (5G) є новим стандартом мобільних комунікацій, який визначає нові рівні швидкості передачі даних, низької затримки та з'єднання багатьох пристроїв (IoT). Безшовна архітектура вказує на те, що обидві технології, GPON та мережа 5G, інтегруються так, щоб забезпечити безперервний і ефективний обмін даними без втрати зв'язку при переміщенні користувача від одного вузла до іншого. Гібридна архітектура вказує на те, що в мережі використовуються елементи обох технологій - GPON і 5G, і ці елементи співпрацюють для оптимізації продуктивності та забезпечення надійного зв'язку.

Основна ідея полягає в тому, що GPON може використовуватися для підключення до мережі стаціонарних об'єктів (домогосподарства, офіси), тоді як мережа 5G може надавати бездротовий доступ для мобільних пристроїв, забезпечуючи гнучкість та мобільність в користуванні. Такий підхід може бути особливо ефективним у регіонах з різним ступенем густини населення та різноманітністю потреб у швидкісному інтернеті.

1.1 Пасивна оптична мережа

Технологія PON стала ключовим гравцем у високошвидкісних оптичних мережах, і вона постійно розвивається для задоволення зростаючих вимог користувачів і пристосування до нових технологічних викликів завдяки підвищенню пропускної здатності та ефективності оптичного волокна і обладнання в мережах зв'язку, в яких використовується оптичне волокно, оскільки воно здатне задовольнити такі вимоги користувачів, як швидкість і пропускна здатність. Перевагами оптичного волокна є менший рівень шуму і менша схильність до електромагнітних перешкод, ніж у мідного дроту. Однак існують і обмеження на доступ до оптоволоконної мережі, такі як висока вартість і площа для прокладання мережі з підключеними споживчими і бізнес-додатками.

За останнє десятиліття PON стали найпривабливішою технологічною альтернативою для мережевих провайдерів, і сьогодні розгорнуто кілька поколінь стандартів PON для високошвидкісного двонаправленого зв'язку [1].

Загалом, PON можна розділити на дві основні категорії: GPON і пасивні оптичні мережі на базі Ethernet (EPON). Еволюція стандарту GPON проклала шлях для поколінь GPON, що підтримують постійно зростаючу пропускну здатність для низхідного і висхідного трафіку. По суті, стандарт PON складається з терміналу оптичної лінії (OLT) та оптичного мережевого блоку (ONU). Зв'язок від OLT до ONU називається низхідним зв'язком, і, відповідно, інший напрямок зв'язку від ONU до OLT називається висхідним зв'язком. GPON підтримує двонаправлений зв'язок, але використовує різну довжину хвилі для низхідного і висхідного трафіку, тобто застосовується CWDM [2, 3].

Стандарт EPON об'єднує недорогу технологію Ethernet і недорогу архітектуру волоконно-оптичної мережі, орієнтовану на мережеві технології наступного покоління. Першим стандартом EPON, затвердженим IEEE у 2002 році, був IEEE 802.3ah, що забезпечує швидкість передачі даних 1,25 Гбіт/с-1 для низхідного та висхідного зв'язку [2].

1.2 Прозоре бездротове розширення оптичних ліній зв'язку

Радіо по волокну (RoF) - це метод передачі інформації по оптичному волокну шляхом модуляції світла аналоговим радіочастотним сигналом, наприклад, для передачі сигналу бездротового зв'язку від OLT до віддаленої антени [3]. На рисунку 1.1 показано системний підхід до архітектури оптичного бездротового доступу. Виходячи з цієї концепції, технологія RoF є привабливим варіантом для архітектури бездротового доступу до мережі, що розвивається, оскільки дозволяє знизити витрати на інфраструктуру і складність антен, а також генерувати високі мікрохвильові несучі частоти оптичним способом.

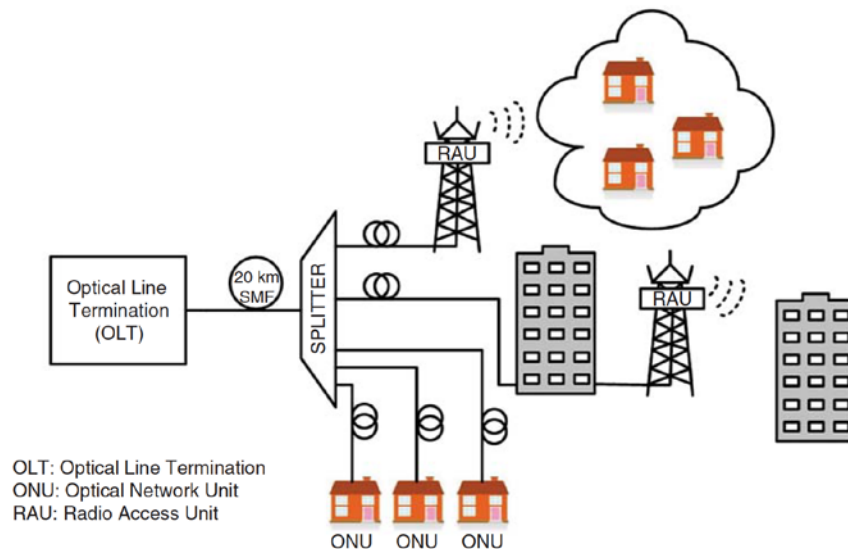


Рисунок 1.1 - Архітектура мережі оптико-бездротового доступу з використанням RoF в блоках радіодоступу

На рисунку 1.2 показана загальна архітектура двонаправленого бездротового зв'язку, в якому обидві віддалені антени з'єднані між собою оптоволоконном за допомогою технології RoF [4].

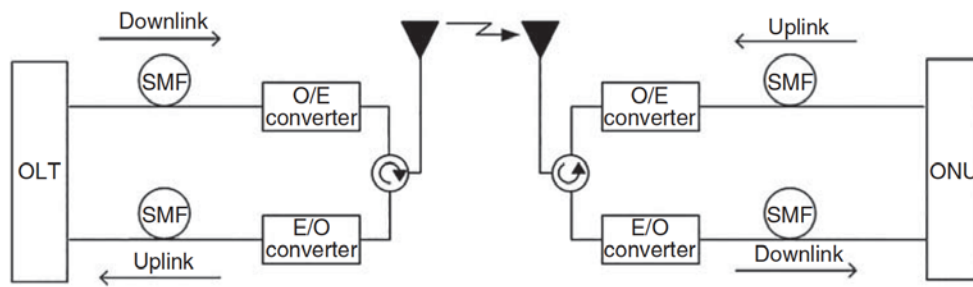


Рисунок 1.2 - Схема двонаправленого бездротового зв'язку технології RoF

Така архітектура може слугувати бездротовим мостом, наприклад, для мережі GPON. Якщо припустити, що OLT знаходиться зліва, то для подальшого зв'язку сигнал даних подається на оптико-електричний (O/E) перетворювач для генерування радіочастотного сигналу, який передається бездротовим способом. Вихідним сигналом OLT завжди є оптичний сигнал базової смуги, тобто оптико-електричний перетворювач повинен не тільки фотодетектувати оптичний сигнал базової смуги, але й перетворити електричний сигнал базової смуги на потрібну радіочастотну несучу частоту. На приймальній антені радіочастотний сигнал повинен бути спочатку перетворений в основний діапазон, а потім ремодульований на стандартизовану оптичну несучу, щоб він міг бути правильно прийнятий стандартним ONU.

Існують різні варіанти реалізації O/E перетворювача. Сигнал низхідної лінії зв'язку базової смуги від OLT може бути перетворений безпосередньо і прозоро (без повторної модуляції) в радіочастотний сигнал низхідної лінії зв'язку за допомогою оптичних засобів. У цьому випадку оптичний сигнал базової смуги мультиплексується з іншим оптичним сигналом cw від лазера з локальним осцилятором (LO), перш ніж він буде когерентно виявлений за допомогою фотозмішувача. У цьому підході CRoF різниця в довжині хвилі між сигналом базової смуги OLT і лазером LO задає бажану несучу частоту радіочастот [5]. На рисунку 1.3 показано підхід до повнодуплексної системи для бездротового моста в мережі GPON з використанням CRoF.

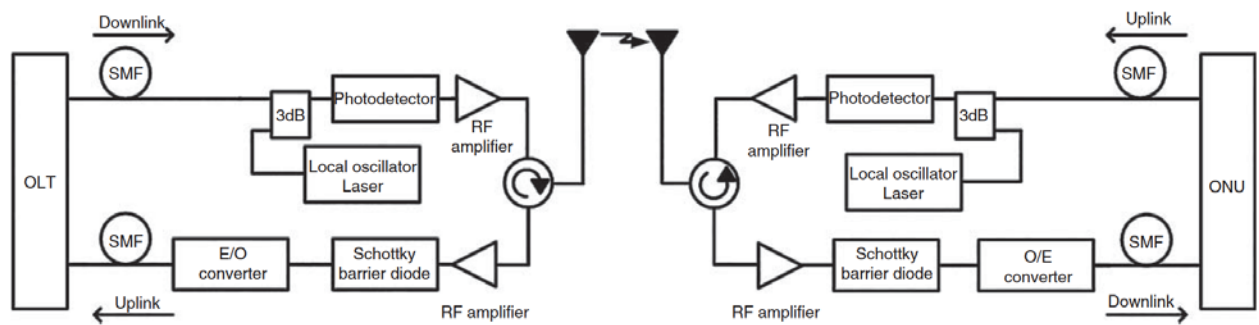


Рисунок 1.3 - Повнодуплексний підхід CRoF

Залежно від реалізації, необхідний LO лазер може бути розташований або близько до антени, або віддалено на OLT. Для прийому сигналу за допомогою стандартного ONU, отриманий бездротовий сигнал спочатку перетворюється в базовий діапазон за допомогою бар'єрного діода Шоттки (SBD), а потім прозора ремодулюється на оптичну носійну лінію. Ремодуляція може здійснюватися за допомогою лазера з прямою або зовнішньою модуляцією. Підхід CRoF має невід'ємну перевагу щодо хроматичної дисперсії порівняно з аналоговою передачею RoF (ARoF), оскільки в CRoF використовується передача в смузі частот над волокном (BBoF) [6].

Крім того, підхід CRoF дозволяє використовувати LO лазер, який не корелює з OLT лазером. Особливо для майбутніх PON, що використовують мультиплексування з поділом по довжині хвилі для збільшення пропускної здатності, такі когерентні WDM-PON системи були б дуже корисними, оскільки вони дозволяють гнучко перерозподіляти оптичні та бездротові канали. У наступних розділах ми опишемо деякі з ключових компонентів, необхідних для побудови пристроїв радіодоступу CRoF (RAU) для розширення зони покриття мережі GPON.

1.3 Ключові фотонні та електронні технології

Конструкція когерентного фотонного змішувача (CPX) для радіочастотних застосувань показана на рисунку 1.4. Він складається з багатомодового інтерференційного (ММІ) з'єднувача 2×2 і двох хвилеводних інтегрованих фотоприймачів у збалансованій конфігурації разом з мережею зміщення і двома узгоджувальними резисторами 100Ω . До вхідних хвилеводів ММІ додаються два точкових перетворювача розміру (SSC), що спрощує процес з'єднання волокна/чипа шляхом узгодження режиму стандартного одномодового волокна (SMF-28) з режимом вхідного сигналу SSC [7]. Для досягнення хорошої збалансованої продуктивності між усіма цими функціональними елементами, всі вони монолітно інтегровані в одну матрицю InP.

Швидкозв'язані фотодіоди з активною площею $4 \times 15 \text{ мкм}^2$ були вирощені методом MOVPE на шарі напівізолюючого хвилеводного шару і зміщені за допомогою вбудованої схеми зміщення.

Виготовлений чіп CPX має розміри $3 \times 0,6 \text{ мм}^2$. Крок вхідного хвилеводу і крок копланарного ВЧ-виходу становить 250 мкм . Хвилеводи між ММІ і кожним з фотодіодів (PD1 і PD2) мають однакову довжину, а фотодіоди електрично з'єднані в антипаралельній конфігурації, що призводить до віднімання на кристалі перетворених струмів О/Е.

$$P_{RF,out} \propto (I_{PD1} - I_{PD2})^2 = \alpha P_{opt,signal} * P_{opt,LO} \quad (1.1)$$

Якщо на CPX подається лише один з оптичних вхідних сигналів, або сигнал, або LO, обидва фотодіоди бачать один і той самий оптичний сигнал, синфазний або з різницею фаз 180° , і в разі хорошої симетрії, тобто високого коефіцієнта відхилення синфазного сигналу, віднімається струм, що дорівнює нулю, що призводить до зникнення вихідного радіочастотного сигналу, незалежно від вхідного сигналу.

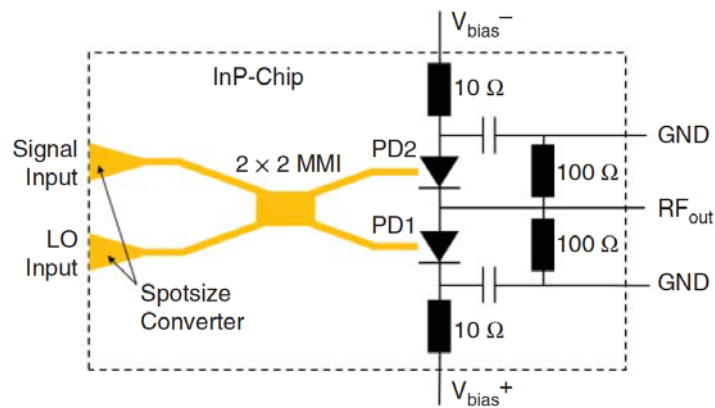


Рисунок 1.4 - Схематичне зображення інтегрованого CPX

З іншого боку, якщо оптична потужність LO залишається постійною, можна безпосередньо побачити, що електрична вихідна потужність ВЧ лінійно залежить від потужності оптичного сигналу.

Потім мікросхему було змонтовано в стандартному золотому корпусі з коаксіальним V-подібним роз'ємом і волокном/мікросхемою, з'єднаним з двома SMF-28. Обидва ФД показали чутливість $0,3 \text{ A Вт}^{-1}$ з рівнем звукового тиску лише 0,5 дБ на довжині хвилі 1,55 мкм. Електричний вихідний сигнал забезпечується коротким копланарним хвилеводом (КХВ), який з'єднаний кількома короткими сполучними проводами з наступним КХВ з низькими втратами на кварцовій підкладці, що веде до вихідного роз'єму.

На відміну від комерційних фотодіодів, CPX складається з 3 дБ з'єднувача і збалансованого фотодіода міліметрового діапазону. Завдяки збалансованому підходу, повна когерентна потужність оптичного сигналу використовується для перетворення оптичного сигналу в радіочастотний, а великі постійні струми, зумовлені оптичним LO, віднімаються на мікросхемі. Це на відміну від одиночних ФД, де вже половина оптичної потужності просто втрачається через необхідний оптичний 3 дБ з'єднувач. Таким чином, ефективність перетворення або чутливість можна покращити щонайменше на 3 дБ порівняно з комерційними фотодіодами, якщо припустити, що в іншому продуктивність окремих фотодіодних чіпів однакова [8].

Залежність вихідної радіочастотної потужності від оптичної вхідної потужності, виміряної в гетеродинній установці, де один сигнал подається на сигнал, а інший - на волоконно-оптичний вхід, показано на рисунку 1.5. Максимальна вихідна потужність дещо падає з майже 0 дБм на 70 ГГц до -6 дБм на 90 ГГц, що пов'язано зі спадом відгуку фотодіода S21.

На другому етапі мікросхему було упаковано разом з комерційним підсилювачем середньої потужності (підсилювачі НМС-AUH320, 71-86 ГГц, GaAs HEMT, Analog Devices, характеристики: коефіцієнт підсилення = 16 дБ на 74 ГГц, P1dB = +15 дБм) і переходом CPW-WR12 у новий герметичний корпус, придатний для прямого підключення до прямокутного хвилеводу.

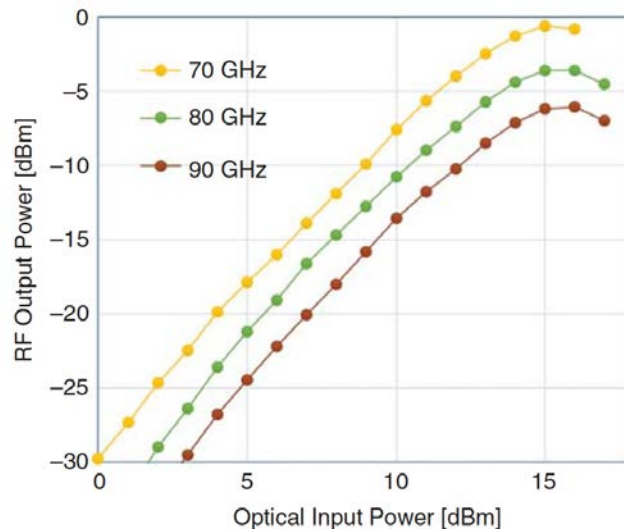


Рисунок 1.5 - Вихідна потужність радіосигналу в порівнянні з оптичною вхідною потужністю

Завдяки смуговому пропусканню антени і хвилеводу WR12 вихідна потужність радіочастот максимальна на частоті близько 78 ГГц з чітким перепадом до нижнього і верхнього країв смуги пропускання на частотах 60 ГГц і 90 ГГц (див. рис. 1.6). Аналогічну поведінку можна спостерігати для залежності вихідної радіочастотної потужності від вхідної оптичної потужності, як показано на рисунку 1.7. Насичена вихідна потужність радіосигналу в центрі смуги на

частоті 77,5 ГГц становить трохи менше 15 дБм, а на частотах 73 ГГц і 83 ГГц все ще близько 10 дБм, відповідно.

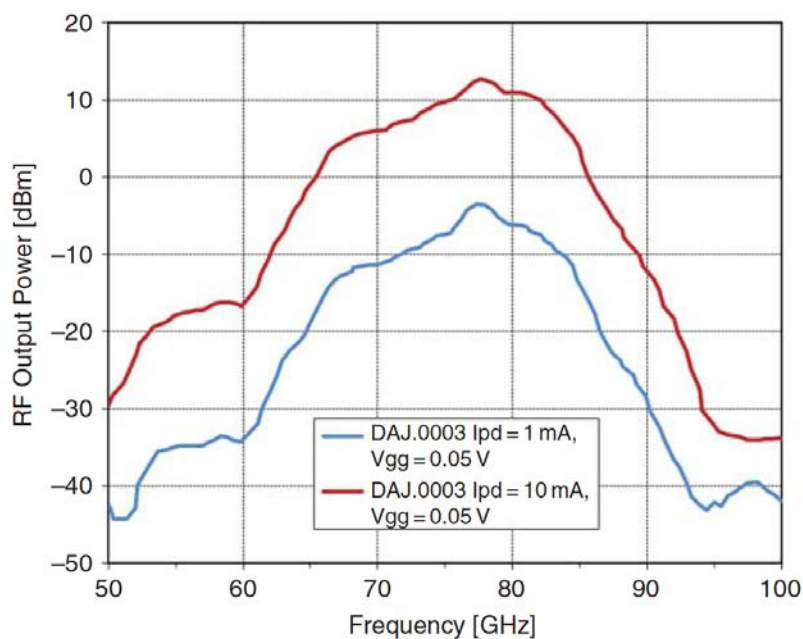


Рисунок 1.6 - Залежність вихідної радіочастотної потужності від частоти при 1 і 10 мА

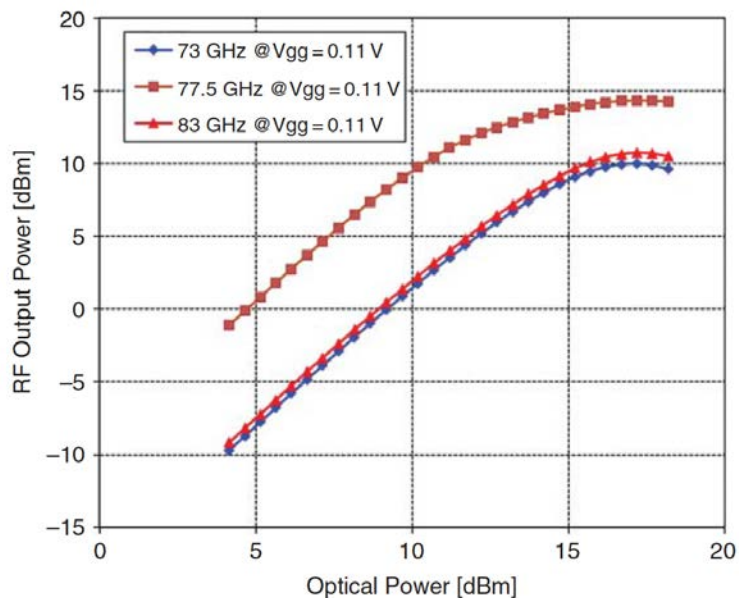


Рисунок 1.7 - Вихідна потужність радіосигналу в порівнянні з вхідною оптичною потужністю на 73, 77,5 і 83 ГГц.

Односмугова модуляція (SSB) відкидає половину звичайного двосмугового спектра (DSB) і тому є спектрально ефективною і стійкою до дисперсії. Бічна смуга, що залишилася, являє собою зсув спектра основної смуги вгору, і її зручно відновлювати за допомогою гетеродинної або гомодинної суміші з LO лазером. Розроблені тут GaAs SSB-модулі використовують I-Q (синфазно-квадратурну) конфігурацію - подвійну паралельну комбінацію двох інтегрованих інтерферометрів Маха-Цендера (MZ). З двома ідентичними, але фазованими на 90° радіочастотними входами, модуляція SSB є результатом змішування двох наборів спектрів DSB з придушенням несучої (рис. 1.8).

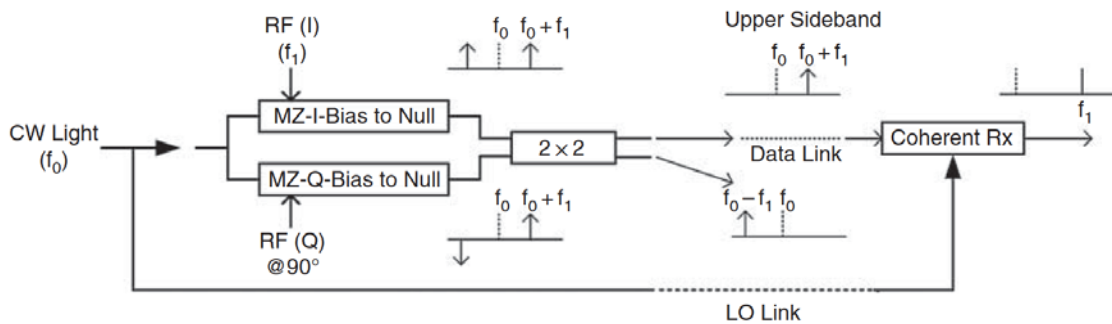


Рисунок 1.8 - Схема GaAs SSB модулятора

MZ модулятори біжучої хвилі і рекомбінатор 2×2 монолітно інтегровані в епітаксійні шари GaAs/AlGaAs, вирощені методом МВЕ на 6-дюймовій підкладці SI GaAs, з використанням технології, що базується на промислових стандартних ливарних процесах, загальних для монолітних мікрохвильових інтегральних схем (ММІС) і виготовлення псевдоморфних транзисторів з високою рухливістю електронів (p-HEMT).

Акцент на E-діапазоні (70-80 ГГц) цієї програми поставив унікальні виклики перед технологією модуляторів, яка раніше була продемонстрована лише для діапазону до 40 ГГц.

Розрахункові моделі показали, що найнижча напруга керування в E-діапазоні може бути досягнута за рахунок зменшення активної довжини, щоб зменшити вплив радіочастотних втрат. Надаючи пріоритет узгодженню

ВЧ/оптичної швидкості в Е-діпазоні, можна пожертвувати стабільністю відгуку на низьких частотах заради кращої продуктивності там, де це найбільше потрібно. Структури електродів біжучої хвилі за своєю природою є дисперсійними, тому для досягнення цього потрібні відмінні радіочастотні моделі і контроль електричних властивостей.

У мікросхемах SSB вперше була використана компактна складена конфігурація, в якій короткий прямий радіочастотний вивід з одного кінця мікросхеми вирівняний з напрямком поширення біжучої хвилі. Це поєднується зі складеним оптичним трактом, де всі оптичні входи/виходи (I/O) здійснюються через протилежний кінець мікросхеми [9]. Переваги полягають у спрощенні вводу та втратах радіочастотного сигналу (немає 90-градусних вигинів) і в управлінні оптичним волокном. Ця конфігурація стала можливою завдяки значним інвестиціям у розробку оптичного волокна з низькими втратами 90 ° кутових вигинів та інших елементів з керованою хвилею.

Хоча SSB-модулі цього типу досягали корисного відгуку до 70 ГГц, бажане розширення в Е-діпазон виявилось недосяжним. Аналіз показав, що вплив радіочастотних втрат (як на мікросхемі, так і за її межами) спочатку був недооцінений.

Однак, основна складність досягнення точного узгодження швидкостей на таких високих частотах виявилася критичною, причому найкращий відгук спостерігався у варіантах, призначених для застосування DP-IQM на частоті 50 ГГц [10]. На основі цього досвіду, а також завдяки вдосконаленим моделям, новий укорочений одинарний модулятор MZ (також розроблений для діапазону 50+ ГГц) показав покращений відгук на частотах до 70 ГГц [13]. Це пов'язано з удосконаленням корпусу і радіочастотного інтерфейсу, а також новим дизайном мікросхеми; однак вимірювання за допомогою радіочастотних зондів показують, що на частотах вище 50 ГГц все ще спостерігаються значні втрати радіочастотного сигналу через корпус.

Впровадження бездротової системи розширення GPON вимагає глибокої інтеграції активних компонентів. Необхідна лінійка радіочастотних

підсилювачів включає підсилювачі потужності, малошумні підсилювачі та підсилювачі зі змінним коефіцієнтом підсилення, а також схеми керування ними, які повинні бути виготовлені за технологічним процесом, що забезпечує їх інтеграцію на одному кристалі, щоб відповідати встановленим вимогам щодо вартості. Лінійка підсилювачів працює на частотах міліметрового діапазону 70/80 ГГц. Низька вартість у поєднанні з високою частотою роботи призвели до вибору кремній-германієвого (SiGe) процесу від IBM як цільового процесу для реалізації компонента підсилювача.

Процес SiGe 8HP - це BiCMOS-процес, заснований на 130 нм КМОП-технології.

Процес оптимізовано для високопродуктивних радіочастотних застосувань, включаючи мікрохвильові та міліметрові бездротові додатки, зв'язок останньої милі, щільні міські мережі та сучасний оптичний транспорт (від 40 Гбіт/с до 100 Гбіт/с). Тому цей процес є особливо перспективним завдяки своїй здатності інтегрувати багато інтеграційних фотонних модулів ширококутового радіодоступу для компонентів мереж оптичного доступу наступного покоління на одному кристалі. Основною альтернативою процесу SiGe є використання технологій III-V, таких як арсенід галію-лію (GaAs), але вони дорожчі у виробництві і не володіють потенціалом інтеграції, який пропонує процес SiGe. SiGe-процес підтримує біполярні транзистори з гетеропереходом SiGe (HBT), які мають кращу лінійність і вищі пробивні та робочі напруги, ніж варіанти на основі КМОП, отже, SiGe-процес може підтримувати більш потужні підсилювачі потужності і кращі LNA. Технологічний процес SiGe 8HP був розроблений компанією IBM і доступний з 2005 року. З того часу технологія вдосконалилася, стабілізувалася і стала доступною для широкомасштабного комерційного виробництва.

Підсилювач, на який орієнтована система, в першу чергу є потужним підсилювачем, але також може слугувати блоком підсилення загального призначення. Технічні характеристики підсилювача наведено нижче.

- Форм-фактор: використано скріплений форм-фактор, що дозволяє уникнути складної розробки корпусу. - Тип входів/виходів односторонньої конфігурації виключає розробку складних балансних і небалансних схем на друкованій платі. - Робоча смуга (71-76 ГГц), що використовується для звуження робочої смуги, забезпечує кращу оптимізацію. Підсилювач високої потужності (НРА) можна легко налаштувати на смугу 81-86 ГГц. - Температурний діапазон (від -40 до 85 °C) має розширений промисловий температурний діапазон. - Коефіцієнт підсилення (40 dBi) - це максимальний коефіцієнт підсилення, який вважається безпечним для використання на одному кристалі без ризику осциляції. - Широкий діапазон регулювання підсилення дозволить одному підсилювачу стати рішенням для широкого спектру вимог до підсилення. - Вихідна потужність насичення, PSAT (15 дБм), встановлюється пробивною напругою технологічного процесу 8HP. - P1dB (12 дБм) встановлюється якомога ближче до PSAT, щоб забезпечити максимальну лінійну вихідну потужність.

Підсилювач складається з трьох каскадів підсилення, як показано на блок-схемі на рисунку 1.9.

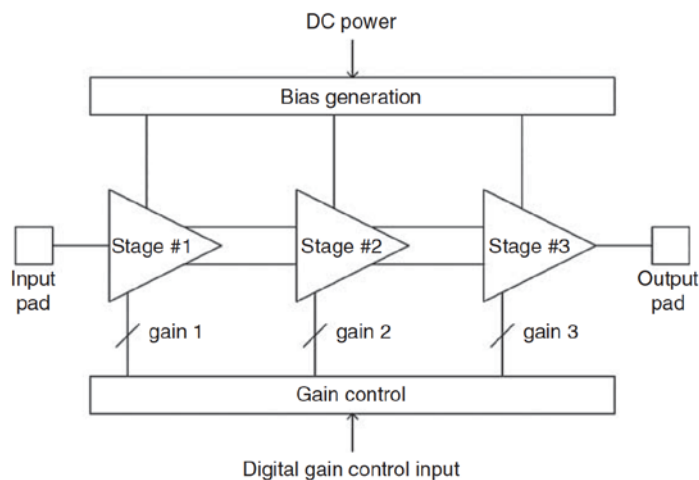


Рисунок 1.9 - Структурна схема підсилювача високої потужності

Підсилювачі потужності (ПП) на основі SiGe-технології, орієнтовані на частоти міліметрового діапазону, за своєю концепцією подібні до ПП, що

працюють у нижчих частотних діапазонах. Проблеми пов'язані з особливостями процесу виробництва SiGe. Підсилювачі потужності потребують високої робочої напруги вихідних транзисторів для того, щоб перекачувати значну потужність в навантаження, але в SiGe процесі НВТ транзистора V_{CE0} становить близько 2 В, в той час як V_{CS0} - близько 6 В.

Продуктивність приладу сильно залежить від стабільності струму зміщення в процесі та температурного розкиду, тому для стабілізації струму зміщення зазвичай потрібне динамічне керування зміщенням. Підсилювачі потужності також можуть бути схильні до несприятливих режимів КСВН, якщо вони не підібрані належним чином. Такі умови можуть погіршити або навіть зруйнувати вихідний каскад, якщо його не захистити. На додаток до цих проблем, досягнення високого коефіцієнта підсилення ускладнюється тим, що робоча частота підсилювача потужності близька до частоти відсічення транзисторів, з яких він складається, що становить близько 200 ГГц.

Конструкція, застосована в системі, складається з трьох послідовних каскадів, з'єднаних між собою всередині за допомогою послідовних сигналів, але з'єднаних ззовні мікросхеми за допомогою одностороннього інтерфейсу. Вихід і вхід розраховані на роботу з навантаженням 50 Ом, хоча потрібне деяке додаткове узгодження, щоб врахувати той факт, що для з'єднання матриці з друкованою платою повинні використовуватися сполучні дроти, а характеристики цих дротів залежать від їх розмірів і від точного методу, за допомогою якого матриця монтується на друковану плату.

Напруга живлення становить 2,5 В для всіх каскадів, крім останнього каскаду, який може мати вищу напругу живлення в діапазоні від 2,5 В до приблизно 3,5 В. Остаточний вибір вихідної напруги для останнього каскаду визначає точну вихідну потужність і лінійність підсилювача і повинен бути визначений на основі тестування матриці. Бажаний вихідний коефіцієнт стиснення було розраховано на номінальну напругу живлення 3 В. За цієї умови очікуваний сумарний постійний струм становить близько 350 мА без сигналу і може стати дещо вищим, коли підсилювач навантажено і доведено до насичення.

Процедура проектування базового підсилювача потужності була орієнтована на макетування в тому сенсі, що початкові схеми було перенесено на макет. Після цього макет робився таким чином, щоб вилучити проектні паразити, і як проект, так і наступний макет удосконалювалися з метою зменшення паразитів і врахування їхньої наявності. Цей процес повторювався ітеративно, поки не було досягнуто бажаної продуктивності. Коли це було можливо, схему, пов'язану з диференціальними каскадами підсилення, було відтворено в макеті, щоб забезпечити оптимальну диференціальну продуктивність каскаду підсилення.

Схема зміщення підсилювача потужності була однією з тих, на яких було зосереджено увагу, оскільки стабільне і постійне зміщення є ключовим фактором для забезпечення високої надійності і стабільної роботи матриці при змінах технологічного процесу і температури.

Для кожного каскаду підсилювача потужності було передбачено привід джерела опорної напруги на матриці та стабілізовані локальні джерела струму. Більш точне регулювання зсуву також доступне через цифровий інтерфейс керування і дозволяє точно налаштувати пристрій після його встановлення в систему таргетування. Той самий цифровий інтерфейс управління також використовується для управління іншими локальними джерелами струму, які визначають струм через кожен транзистор підсилювача і, таким чином, дозволяють управляти коефіцієнтом підсилення на кожному каскаді.

Деякі результати вимірювань підсилювача показано на рисунках 1.10 і 1.11.

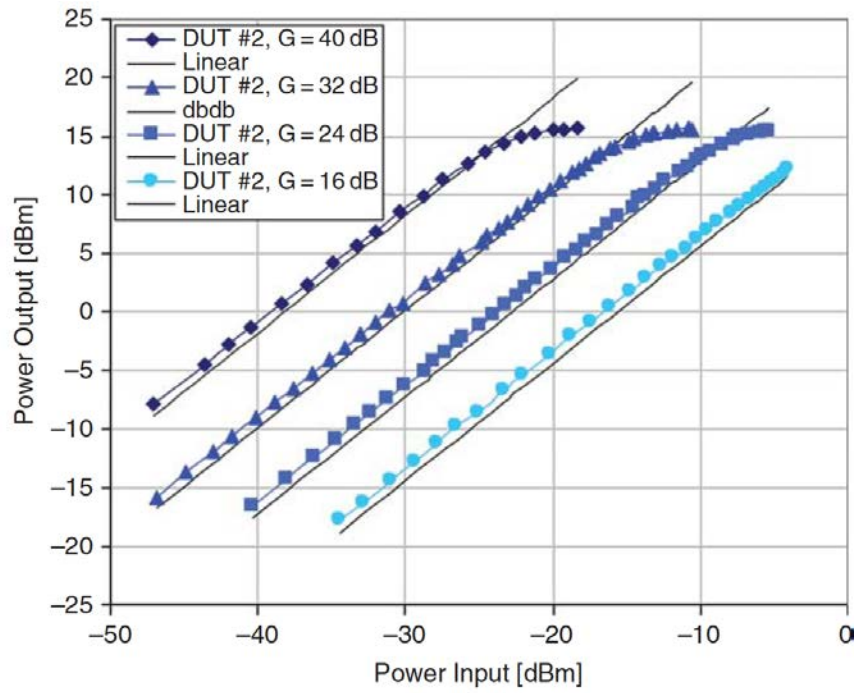


Рисунок 1.10 - Коефіцієнт підсилення і стиснення

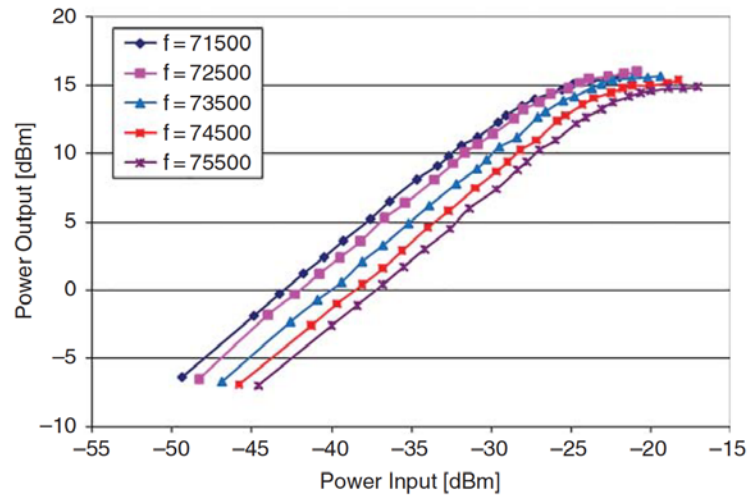


Рисунок 1.11 - Підсилення і компресія на різних частотах

1.4 Інтегровані пристрої радіодоступу

Розглянемо RAU для прозорого моста між мережею GPON і бездротовим з'єднанням "точка-точка" в діапазоні E (71-76 ГГц). На рисунку 1.12 показано Інтегровані пристрої радіодоступу архітектуру RAU, що використовує оптичний

односмуговий модулятор, описаний вище, для висхідного зв'язку з OLT. Для низхідної передачі використовується когерентне гетеродинне детектування в поєднанні з частотно-маневреним низькошвидкісним лазером, який слугує фотонним ЛО. Сигнал низхідної оптичної смуги пропускання (BBoF), що передається з OLT, прозора перетворюється на потрібну радіочастотну несучу частоту за допомогою CPX. Радіочастотний сигнал посилюється, а потім передається бездротовим способом до RAU, розташованого на місці ONU. Зауважте, що архітектура RAU на місці ONU аналогічна тій, що показана на рисунку 1.12. Таким чином, після бездротової передачі, отриманий радіосигнал перетворюється в оптичний за допомогою SSB, перш ніж він буде відправлений на ONU.

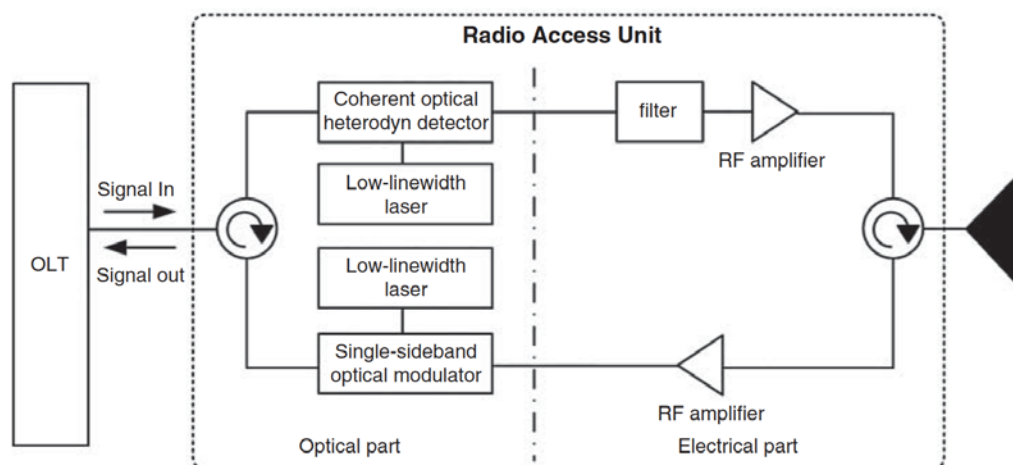


Рисунок 1.12 - Схема пристрою радіодоступу

На рисунку 1.13 показана дещо інша концепція RAU, яка особливо підходить для бездротового розширення в мережі GPON. Для низхідної передачі запропонований RAU також використовує підхід CRoF. Зауважте, що LO лазер не має фазового зчеплення з OLT Tx лазером. Це забезпечує низьку складність і, отже, низьку вартість, але це також призводить до нестабільності радіочастотних сигналів. Отже, ми пропонуємо використовувати огиначаючий детектор як бездротовий приймач замість гетеродинного приймача. У той час як архітектура

RAU, показана на рисунку 1.13, є більш гнучкою і в принципі може бути реалізована в більш досконалій когерентній мережі WDM-PON (NG-PON2), RAU, представлений на рисунку 1.12, забезпечує переваги щодо енергоспоживання і вартості. Він дозволяє використовувати недорогі стандартні лазерні діоди GPON замість радіочастотних односмугових модуляторів. Крім того, відпадає потреба в потужному радіочастотному підсилювачі, необхідному для роботи SSB-MZM, що позитивно позначається на загальному енергоспоживанні RAU.

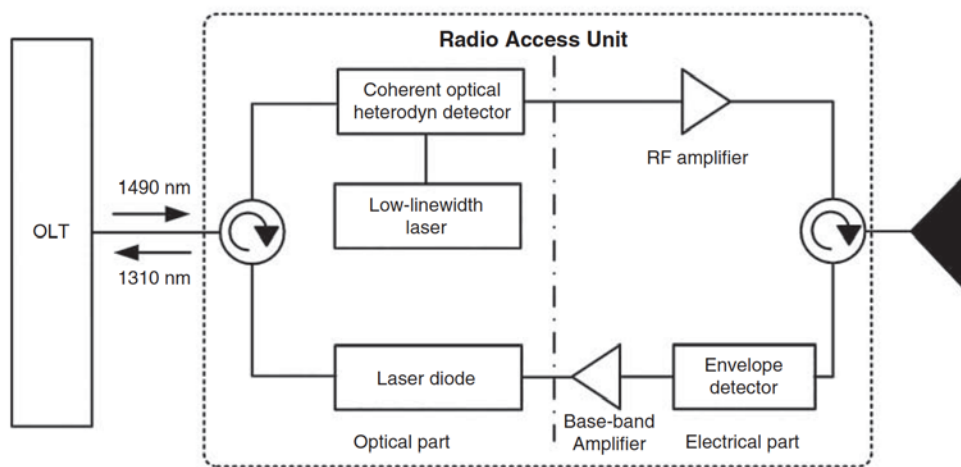


Рисунок 1.13 - Гібридна архітектура RAU для розширення GPON

1.5 Висновки до розділу 1

Досліджено систему CRoF, яка забезпечує розширення стандартних мереж GPON зі швидкістю низхідної і висхідної ліній передачі 2,5 Гбіт/с і 1,25 Гбіт/с відповідно. Таким чином, попередньо представлена архітектура CRoF представляє фізичний рівень конвергентної волоконно-оптичної мережі, що в кінцевому підсумку призведе до створення інтегрованих мереж HFW.

Досліджено особливості застосування фотонних та електронних компонентів, що необхідні для безперешкодного перетворення оптичних сигналів базового діапазону в радіосигнали E-діапазону (71-76 ГГц) і навпаки.

До них відносяться СРХ для перетворення оптичного діапазону в радіочастотний, односмугові МЗМ модулятори для перетворення радіочастотного діапазону в оптичний та НРА Е-діапазону. Для пристрою СРХ максимальна вихідна потужність дещо знижується з 0 дБм на 70 ГГц до -6 дБм на 90 ГГц. Для односмугових МЗМ модуляторів можна досягти частотної характеристики до 70 ГГц. Для НРА робочим діапазоном є діапазон Е (71-76 ГГц), який може бути налаштований на діапазон 81-86 ГГц. Максимальний коефіцієнт підсилення НРА становить 40 дВі, що вважається безпечним для використання на одному кристалі без ризику осциляції з P_{sat} (15 dBm) і P_{1dB} (12 dBm).

Розглянуті компоненти можуть використовуватись при подальшій розробці RAU для безшовного перетворення фотонного випромінювання в радіочастотне і навпаки. Отримано передачу даних GPON зі швидкістю 2,5 Гбіт/с-1 по низхідній лінії зв'язку через бездротовий міст 71-76 ГГц довжиною 455 м з низькою втратою кадрів - близько 1 пакета в секунду.

2 ПРОГРАМНО ВИЗНАЧЕНА МЕРЕЖА ТА ВІРТУАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ КОНВЕРГЕНТНИХ МЕТРО-МЕРЕЖ ДОСТУПУ

Програмно визначена мережа (SDN) та віртуалізація мережевих функцій (NFV) є ключовими технологіями в галузі телекомунікацій, особливо для конвергентних метро-мереж доступу. Використання SDN і NFV в конвергентних метро-мережах дозволяє операторам забезпечувати більшу гнучкість, масштабованість та швидкість відгуку в мережах доступу, що об'єднують різні сервіси та технології.

Отже, розробка мережі, здатної підтримувати послуги 5G, вимагатиме зусиль, що виходять далеко за рамки розробки мережі радіодоступу наступного покоління з високою пропускнуою здатністю. Оскільки багато майбутніх послуг вимагатимуть гарантованої наскрізної доставки, процес архітектурного проектування повинен буде поширитися від мережі мобільного доступу до мережі фіксованого доступу і міської мережі, забезпечуючи скоординовану роботу мережі. Сильна конвергенція мережевих технологій і доменів також необхідна для того, щоб забезпечити економічно життєздатні рішення для масового збільшення пропускнуої здатності і поліпшення інших показників роботи мережі (наприклад, затримки, доступності і т.д.). Це буде досягнуто шляхом розробки економічно ефективних архітектур, які замінять масове нарощування пропускнуої здатності на автоматичний і інтелектуальний гнучкий розподіл ресурсів.

У розділі розглянуто, як нові вимоги 5G формують процес архітектурного проектування через конвергенцію площин передачі даних і управління в мережах доступу та метрополітену. Перший підрозділ містить короткий вступ до техніко-економічних викликів, пов'язаних з ключовими показниками ефективності (KPI) 5G - значним збільшенням пропускнуої здатності, кількості пристроїв, надійності мережі та зменшенням затримок в мережі. Другий підрозділ заглиблюється в тему конвергенції мереж фіксованого доступу та метрополітену. Тут ми спочатку описуємо, як виникла ця тенденція, через

фізичний процес консолідації центрального офісу (ЦО), який використовував велику дальність передачі технології мереж волоконно-оптичного доступу для подолання розриву між мережами доступу і основними мережами. Початкові архітектурні рішення, такі як пасивні оптичні мережі з великим радіусом дії (LR-PON), досягали дальності оптичного доступу понад 100 км, що дозволяло консолідацію ЦО на два порядки. Далі ми описуємо, як очікування нових послуг з обмеженою затримкою, таких як хмарний RAN та інші, під наднадійною парасолькою зв'язку з низькою затримкою, віддалили принципи побудови мережі від початкових цілей LR-PON - масової консолідації СО - і натомість призвели до більш розподіленого підходу з декількома засобами обробки даних, розподіленими по периметру мережі. З точки зору фізичного рівня, ми обговорюємо рішення, які використовують комутацію довжин хвиль в оптичній мережі доступу для динамічного надання пропускну здатності (тобто з використанням статистичного мультиплексування) мобільним базовим станціям 5G з різних обчислювальних центрів. Це доповнюється подальшим розвитком віртуалізації мережевих функцій, що дозволяє функціональну конвергенцію численних і різноманітних мережевих доменів. Нарешті, підрозділ 4 дає уявлення про віртуалізацію ЦО, досліджуючи деякі з основних програмних фреймворків, що розробляються в усьому світі.

2.1 Вимоги 5G, що визначають конвергенцію мереж та віртуалізацію

5G - це наступне покоління мереж, яке протягом останніх кількох років визначало майбутні вимоги до мереж. Міжнародні форуми мобільного зв'язку (IMT) і мобільних мереж наступного покоління (NGMN) випустили в 2015 році рекомендацію [5] і білу книгу [6], відповідно, в яких узагальнили основні вимоги і можливі сфери застосування 5G. Типові очікувані значення затримок становлять близько 10 мс, а для послуг з наднизькою затримкою очікується 1 мс або менше. Що стосується пропускну здатності, то очікується, що користувацький досвід становитиме від 100 до 300 Мбіт/с⁻¹ на відкритому повітрі

в густонаселених районах і 1 Гбіт/с^{-1} в приміщенні, тоді як пікова пропускна здатність стільникового зв'язку очікується на рівні 20 Гбіт/с^{-1} . Якщо ми порівняємо ці показники з показниками 4G, то побачимо прогнозоване 20-кратне збільшення пропускної здатності стільникового зв'язку і зменшення затримок від 5 до 50 разів (наприклад, для додатків з наднизькою затримкою). У міру того, як робота над технологією та архітектурою 5G прогресувала, ці цілі були додатково досліджені і контекстуалізовані. Аналіз можливих показників затримок був нещодавно опублікований в офіційному документі NGMN щодо функціональної декомпозиції 5G RAN [7], в якому показано досяжну наскрізну затримку для різних архітектур, залежно від розташування різних функцій в мережі. Результати представлені на рисунку 2.1 [8].

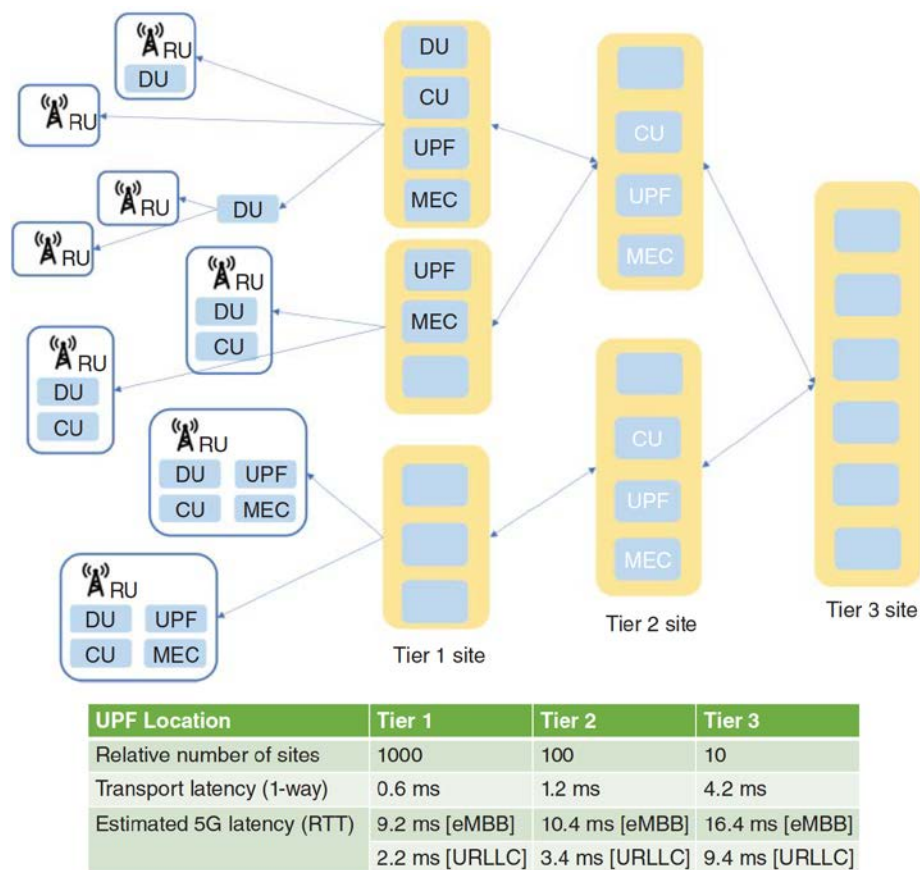


Рисунок 2.1 - Аналіз рівнів для послуг 5G та пов'язані з ними затримки

На рисунку показано можливе розташування різних віртуальних функцій у варіанті використання декомпозиції RAN. Розподілений блок (DU), який здійснює управління MAC-адресою і радіоканалом, а в деяких випадках і частину операцій фізичного рівня (high-PHY), може бути розміщений разом з віддаленим блоком (RU), який включає в себе антену, радіостанцію і всю або частину (low-PHY) обробки фізичного рівня, або він може бути частково централізований на сайті агрегації, що обслуговує більше одного RU, або ж розміщений на вузлі першого рівня, що потенційно обслуговує більшу кількість RU. Більше варіантів доступно для центрального блоку (CU), який виконує протокол конвергенції пакетних даних і операції управління радіоресурсом і може бути розташований спільно з DU і RU, або централізовано у вузлі 1-го або 2-го рівня, обслуговуючи таким чином ще кілька RU. Нарешті, функції користувачької площини (UPF) і периферійні обчислення з множинним доступом (MEC) можуть бути розміщені або спільно з RU, або на вузлах 1-го і 2-го рівнів.

Ми бачимо, що в міру того, як ми переміщуємо сервіси і мережеві функції від периферії (рівень 1) вглиб мережі до ядра (рівень 3), кількість вузлів зменшується (ці цифри слід розглядати лише у відносному вираженні, наприклад, кількість вузлів рівня 3 в 10 разів менша, ніж вузлів рівня 2). Таким чином, запуск екземпляру сервісу в глибині мережі може заощадити ресурси обробки даних: наприклад, якщо він розміщений на вузлі 3-го рівня, його не потрібно реплікувати на 100 вузлів 1-го рівня, які охоплює цей вузол. Однак, як видно на рисунку, транспортна затримка збільшується, оскільки сервіс повинен досягти ядра мережі, що призводить до компромісу між кількістю необхідних комп'ютерних ресурсів і досяжною наскрізною затримкою. Цікаво також відзначити, що послуги з наднизькою затримкою не можуть бути досягнуті за межами рівня 1, а це означає, що вони обов'язково будуть локалізованими функціями, тобто з кінцевими точками, з'єднаними між собою лише локально.

Одним з питань, яке часто згадується щодо мереж 5G, які, як очікується, забезпечать безпрецедентний стрибок у продуктивності мережі, є їхня

прибутковість, тобто здатність генерувати достатній дохід для покриття своїх витрат, а також приносити прибуток зацікавленим сторонам. На рисунку 2.2 показано потенційне збільшення пропускної здатності мережі, яке може відбутися в майбутньому (за тієї ж вартості), якщо темпи зростання залишаться такими ж, як і за останні 20 років. Криві побудовані на основі даних з [9], які показують, що з 1999 по 2012 рік середньорічне збільшення пропускної спроможності (за однакових витрат) становило близько 36%. Синя (нижня) крива показує прогнози за умови збереження доходу на рівні сьогоднішнього, тоді як помаранчева (верхня) крива - це прогноз, який передбачає (надто оптимістичне) чотирикратне збільшення доходу мережі.

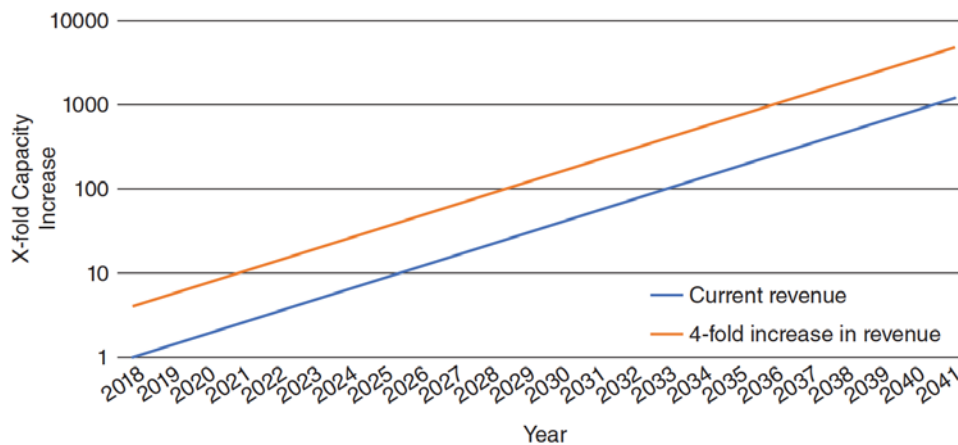


Рисунок 2.2 - Прогнозоване збільшення пропускної здатності мережі з часом

Слід зазначити, що причиною зниження вартості біта з часом, як показано на кривих, є постійні інвестиції та інновації в мережеві технології в усьому світі. Хоча ми сподіваємось, що такі інновації продовжуватимуться, мало ймовірно, що темпи зростання прискоряться в найближчій та середньостроковій перспективі (хоча ми не можемо зробити остаточного висновку, сповільнення темпів зростання продуктивності процесорів можна вважати сильним індикатором).

Екстраполяція, наведена на рисунку, показує, що, наприклад, якщо доходи залишатимуться на тому ж рівні, збільшення потужностей у 100 разів не буде досягнуто ще 15 років, приблизно до 2033 року. Як наслідок, якщо ми очікуємо

досягти такої потужності раніше, то або витрати повинні знижуватися далі (що мало ймовірно, як зазначалося вище), або дохід повинен зростати (як показано помаранчевою кривою на рисунку). Віртуалізація мережевих функцій (і мереж) (NFV) - це одна з технологій, яку більшість постачальників і операторів зараз використовують для розвитку мереж наступного покоління, до 5G і далі. Однією з її обіцянок є саме зниження витрат завдяки посиленню конкуренції між постачальниками і можливості автоматизації функцій управління мережею. Це доповнюється можливістю полегшити створення нових послуг на вимогу і підвищити наскрізну продуктивність мережі. Однак, хоча NFV, безумовно, допоможе знизити витрати і підвищити продуктивність, можна стверджувати, що таке зниження витрат може бути вже враховане в кривій на рисунку 3.2 (наприклад, щоб компенсувати той факт, що темпи зростання продуктивності процесорів сповільнилися).

Замість того, щоб продовжувати песимістичні пророцтва щодо майбутнього 5G, цей аналіз має на меті підкреслити, що зниження вартості пропускної здатності не може само по собі забезпечити необхідні фінансові засоби для підтримки очікуваного зростання 5G, і потрібні нові бізнес-моделі, що генерують нові потоки доходів. Зростання доходів, пов'язане з GPD, занадто мале (в середньому на кілька відсоткових пунктів у розвинених країнах світу), щоб мати ефект, і в останні роки оператори не змогли монетизувати збільшення пропускної здатності мережі. Наприклад, більшість мобільних операторів після спроб продавати 4G-зв'язок за вищою ціною, врешті-решт, були змушені повернутися до його безкоштовної модернізації. Аналогічно, операторам фіксованого широкопasmового зв'язку важко продавати більш високі швидкості там, де можна легко отримати швидкість близько 100 Мбіт/с^{-1} . Однією з головних причин є те, що сьогодні вигода від збільшення швидкості вище таких значень є обмеженою, особливо тому, що це не гарантує безперебійної роботи будь-яких додатків, особливо тих, що вимагають двосторонньої взаємодії в реальному часі, які потребують низької та стабільної затримки.

Таким чином, необхідно забезпечити нові потоки доходів на додаток до застарілого ринку мобільного та фіксованого широкосмугового зв'язку, залучаючи до мережі нові види послуг. Архітектури 5G, об'єднуючи мобільні і фіксовані мережі та обчислювальні домени (наприклад, периферійні хмари і хмарні СО), можуть забезпечити нові рівні продуктивності, які можуть залучити такі нові послуги. Наприклад, наскрізна оркестрація ресурсів, що здійснюється автоматизованою площиною управління, може забезпечити якість обслуговування (QoS) з обмеженою затримкою і високою доступністю, а також більш динамічний і детальний контроль QoS (наприклад, на рівні потоку додатків). Це, в свою чергу, може уможливити використання таких додатків, як AR і VR, потенційно навіть для критично важливих сервісів, а також забезпечити підтримку автономного водіння тощо.

Мета, однак, полягає не в тому, щоб замінити нинішній найкращий інтернет на широку наскрізну гарантію QoS, яка стала б значною мірою неефективною, особливо з огляду на те, що більшість сучасних додатків пристосувалися до прийнятної роботи без спеціального QoS. Натомість бачення полягає у збільшенні доходів за рахунок побудови мережі, яка, на додаток до майбутніх широкосмугових послуг (потоків мовлення з високою роздільною здатністю для віртуальної реальності, багатопотокове мовлення тощо), зможе також підтримувати нові дороговартісні додатки, які не можуть працювати в сьогоденних мережах.

2.2 Конвергенція мережі доступу та метро-мережі

Однією з головних особливостей мережевої конвергенції є забезпечення спільного використання ресурсів (як інфраструктури, так і людського досвіду) на різних рівнях, наприклад, на рівні даних, на рівні контролю та на рівні управління. Наприклад, за останні два десятиліття мережева конвергенція сприяла зниженню вартості володіння мережею шляхом перенесення голосових послуг з синхронних систем передачі TDM (тобто Sonet і SDH) на мережі з

комутацією пакетів, що використовуються для передачі інтернет-даних, завдяки впровадженню технології передачі голосу через IP (VoIP) [10]. Це також створило можливість для операторів пропонувати пакетні послуги, такі як голос, Інтернет, телебачення та мобільний зв'язок, що дає змогу отримати вигоди від економії на масштабах.

Зовсім недавно масове розгортання технології оптоволоконного доступу надало нову можливість для конвергенції мереж: знявши обмеження на відстань і пропускну здатність, що накладалися застарілою технологією мідного доступу, оптоволоконний доступ дозволив об'єднати кілька операторів мережі [11]. Збільшення відстані доступу більш ніж на порядок спричинило пошук нових архітектурних рішень для всієї мережі, оскільки більша відстань доступу означає, що для обслуговування тієї ж кількості кінцевих користувачів можна використовувати меншу кількість ЦО. Крім того, в той час як кількість користувачів, що обслуговуються кожним ЦО, стає більшою, використання технологій спільного доступу, таких як пасивні оптичні мережі, дозволяє мультиплексувати кількість портів на стороні мережі між кількома користувачами (зазвичай від 32 до 64), таким чином зменшуючи навантаження на обладнання, пов'язане з більшою базою користувачів в об'єднаних ЦО. Якщо врахувати, що доступ, як правило, є найдорожчою частиною мережі (тобто в перерахунку на одного користувача) через меншу можливість спільного використання інфраструктури (наприклад, у порівнянні з метро доступом і ядром), то можна зрозуміти, що інтуїтивно саме технологія доступу може визначати решту архітектури мережі. Наприклад, вибір архітектури для більшості сучасних мереж був продиктований обмеженням на передачу даних по міді в зоні доступу (тобто в середньому близько 1 милі), що визначало максимальну відстань між кінцевими користувачами та центральними офісами (що, в свою чергу, визначало загальну кількість операторських станцій та їх взаємозв'язок). Аналогічно, сьогодення технологія доступу буде формуватися під впливом (прибуткових) послуг і додатків, які будуть працювати в

майбутньому, і відповідно визначатиме шляхи розвитку метро мережі та основної мережі.

Оскільки оптична технологія передачі може покривати відстані в декілька тисяч кілометрів без електронної регенерації, виникає питання, яку відстань повинен покривати оптичний доступ? Архітектура LR-PON була запропонована в [12] для того, щоб дати відповідь на це складне питання, розглядаючи мережу з наскрізної перспективи [13]. Оскільки, як зазначалося вище, вибір технології оптичного доступу визначає архітектуру решти мережі, LR-PON оптимізує відстань доступу, мінімізуючи витрати в мережах доступу, метро та опорних мережах. Типова архітектура LR-PON показана на рисунку 2.3 Оскільки при зменшенні відстані доступу кількість необхідних СО пропорційно зменшується, архітектура LR-PON пропонує збільшувати відстань доступу до тих пір, поки кількість центральних вузлів не стане достатньо малою, щоб дозволити повну сітку хвильових з'єднань між ними. Наприклад, для типової європейської країни було визначено, що максимальна відстань доступу порядку 100 км дозволить зменшити кількість ЦО до 100 або менше. У той час як розширення зони дії PON до 100 км і вище вимагало розміщення оптичного підсилювача в оптичній розподільчій мережі (ODN) перед розгалужувачем потужності першого ступеня (зазвичай вважалося, що три ступені забезпечують розгалуження на 512 напрямків), LR-PON дозволило обійти транспортну мережу метро, привівши волокно доступу безпосередньо в основні вузли СО (так звані вузли метро доступу). У поєднанні з плоскою архітектурою ядра (наприклад, ядро, з'єднане повною сіткою хвильових каналів) це дозволило зменшити кількість оптичних-електричних-оптичних (ОЕО) інтерфейсів, оскільки кожна кінцева точка може бути з'єднана з будь-якою іншою, пройшовши лише два ОЕО-перетворення, у вихідному і кінцевому вузлах.

Дослідження можливості переходу від нинішніх мереж з ієрархічним ядром до мереж з плоским ядром показали [14], що плавний перехід дійсно можливий, і визначили точку перетину, в якій економічні переваги плоского ядра починають

переважати над ієрархічним ядром до середньої стійкої пропускної здатності кінцевого користувача в 5 Мбіт/с⁻¹.

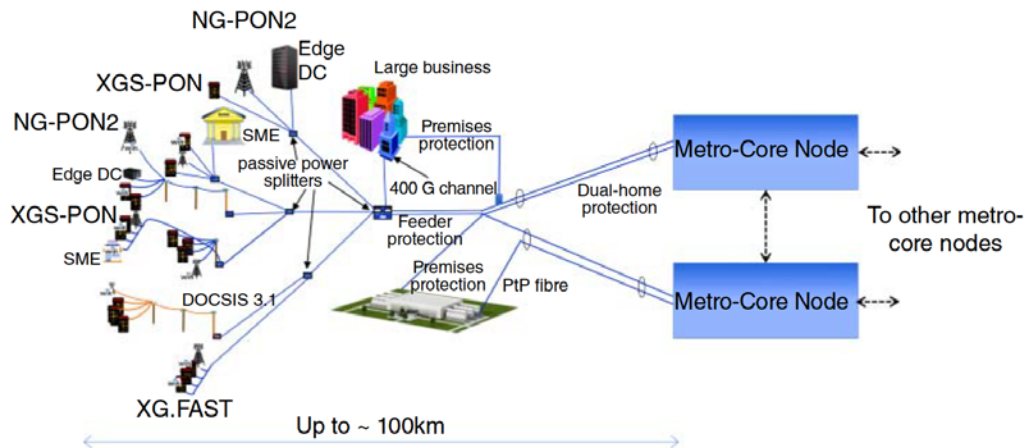


Рисунок 2.3 - Архітектура LR-PON, що забезпечує масову консолідацію вузлів

Ці результати виявилися корисними, оскільки нещодавно великі національні мережі, наприклад, ВТ, прийняли повністю сітчасту, плоску мережеву структуру в своїй основі [14].

Одним з важливих питань, яке піднімає LR-PON, є питання захисту. Мережі доступу, що обслуговують житлових користувачів, як правило, незахищені (PON зазвичай підпадають під цей опис), а угоди про рівень обслуговування, як правило, мають слабкі угоди про доступність. Однак LR-PON замінює не тільки мережу доступу, але й мережу передачі метро, яка зазвичай є захищеною. Таким чином, LR-PON вимагають певного рівня захисту, принаймні вище першого ступеня розділення, над фідерною частиною ODN. Роботи, проведені на цю тему, охоплюють від вивчення економічно ефективних методів передачі навантаження для мінімізації захисного обладнання в мережі [15-17] до методів на основі SDN для прискорення захисту PON [18], навіть у великомасштабних мережах передачі, з використанням площини управління SDN для організації доступу та захисту ядра [19].

В цілому, хоча архітектура LR-PON продемонструвала деякі цікаві потенційні екологічні переваги, мінімізуючи використання електроніки в мережі, вона намагається задовольнити вимоги до низьких затримок майбутніх

мереж 5G через велику протяжність транспортного волокна, що може призвести до затримок поширення в обох напрямках, які перевищують 1 мс.

У подальшому розглянемо нові архітектури, які поєднують конвергенцію доступу/метрії зі здатністю відповідати суворим вимогам 5G до затримок.

Мережі 5G значно змінили ключові показники ефективності порівняно з мережами попереднього покоління.

Якщо до цього часу затримки, з якими стикалися мережеві додатки, оцінювалися в перспективі часу реакції людини, наприклад, в порядку декількох десятків мілісекунд для більшості додатків, то використання мережі для зв'язку декількох віртуальних мережевих функцій (VNF) або додатків типу "машина-машина" (наприклад, пов'язаних з автономним водінням та іншими критично важливими послугами) вимагає підтримки набагато менших затримок.

Крім того, очікується, що мережі 5G підтримуватимуть нові додатки для кінцевих користувачів, які включають розширені сенсорні функції, такі як тактильний зворотний зв'язок і доповнена/віртуальна реальність, які вимагають максимальної наскрізної затримки на рівні додатків нижче 15 мс [20].

Cloud-RAN, тобто дезагрегація апаратного та програмного забезпечення в мобільних базових станціях, що дозволяє централізувати їхні функції цифрової обробки, розглядається як один з основних архітектурних рішень для зниження загальної вартості володіння мережею. Це особливо важливо для розгортання мереж 5G, спрямованих на високу щільність стільникового зв'язку, потенційно 100-кратну порівняно з нинішнім розгортанням у міських районах, що вважається основним механізмом збільшення пропускної здатності мобільних мереж (як це було протягом останніх 50 років розвитку мобільних мереж - тенденція, відома як закон Купера про спектральну ефективність). Початковий підхід до C-RAN полягав у тому, що антенний блок розміщувався в одному місці, а вся обробка базової смуги - в іншому, причому зразки I/Q передавалися між ними через певний стандартний інтерфейс (як правило, [21]). Сьогодні ця концепція еволюціонувала, щоб забезпечити кілька інших варіантів розділення стеку мобільних протоколів [22]. Різні варіанти розбиття мають різні

співвідношення між складністю віддаленого радіопристрою, вимогами до затримки, вимогами до пропускної здатності прямого каналу зв'язку та різною здатністю виконувати розширені функції обробки на фізичному рівні, такі як MIMO та інші скоординовані операції між базовими станціями.

Деякі з цих конфігурацій передбачають використання більш ніж двох точок обробки вздовж функціонального ланцюжка, причому одна з них (інтерфейс F2) з'єднує антенний блок з точкою обробки розподіленого блоку (DU) першого рівня, а друга (інтерфейс F1) з'єднує DU з централізованим блоком (CU), де обробляється решта стеку протоколів. Навіть в рамках цієї двоканальної конфігурації є кілька варіантів, залежно від того, як функції стека протоколів розподілені між DU і CU.

Для підтримки цих нових вимог в економічно ефективний спосіб потрібні нові архітектури оптичних з'єднань, тобто технології, які сприяють спільному використанню ресурсів і статистичному мультиплексуванню пропускної здатності. Серед робіт, що проводяться в цій галузі, ми представляємо тут два цікавих напрямки, обидва показані на рис. 2.4.

1. Модернізація традиційних конфігурацій пасивних оптичних мереж (PON) з механізмами для міжоптичного зв'язку між мережевими блоками (ONU), які оминають закінчення оптичної лінії (OLT) [23]. Таким чином, коли PON використовується для зв'язку віддалених RU, вони можуть обмінюватися інформацією безпосередньо, без ретрансляції повідомлень через OLT або інші централізовані пристрої, таким чином мінімізуючи затримку передачі. Це корисно для реалізації деяких функцій координованого багатоточкового зв'язку (CoMP), які вимагають обміну інформацією з низькою затримкою між базовими станціями, у випадках, коли RAN не є повністю централізованою [24] (тобто, коли функції CoMP потребують обробки на розподілених RUs). Конфігурація зв'язку між ONU показана на лівій стороні рисунку 2.4 і працює шляхом з'єднання сусідніх ONU через локальну широкомовну мережу, накладену поверх PON, з використанням каналів з декількома довжинами хвиль. Безколізійне

з'єднання може використовуватися між $N + 1$ сусідами з використанням N каналів довжини хвилі.

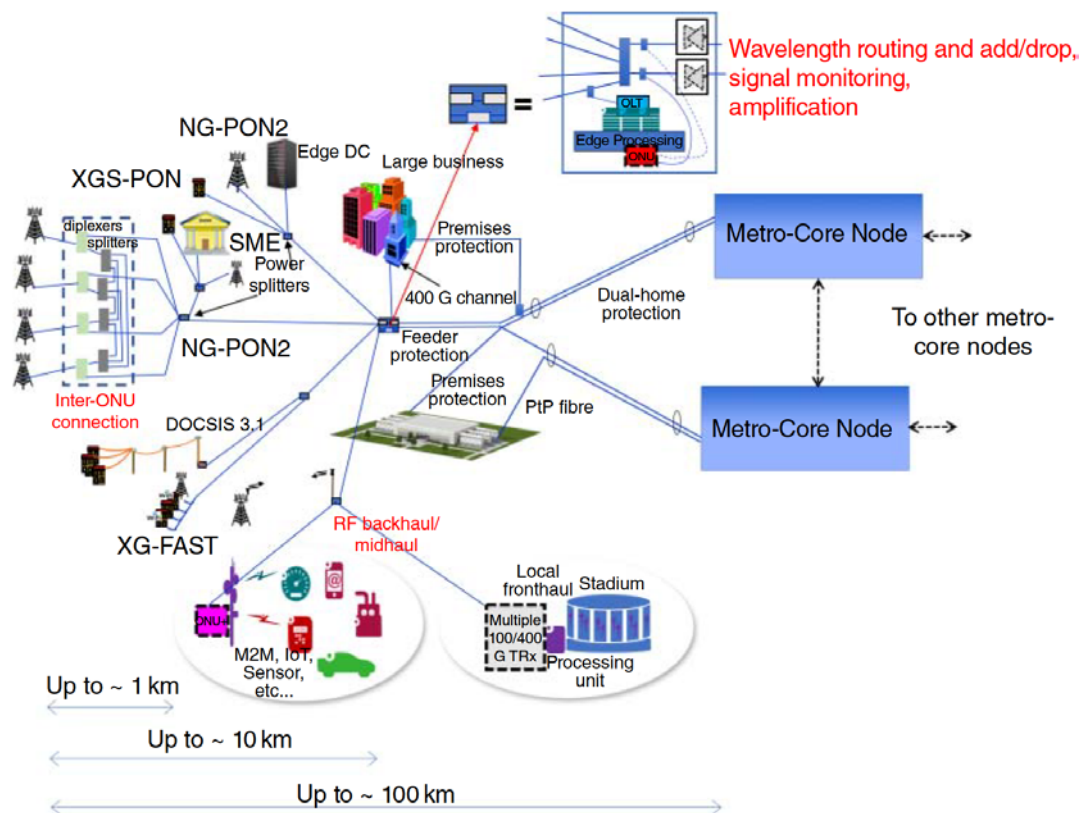


Рисунок 2.4 - Конвергентна архітектура сегменту мережі доступу/метро з підтримкою 5G та міжмережовим зв'язком між ONU

2. Спільне розміщення периферійного процесорного обладнання з розділеними етапами PON [24], що забезпечує можливість локального завершення послуг, що вимагають низької затримки, дозволяючи при цьому агрегувати інші послуги в більш централізовані частини мережі.

Це важливо, оскільки розташування послуг та рівень їх агрегації відіграє основну роль у визначенні вартості володіння мережею. Як показано на рисунку 2.1, існує взаємозв'язок між можливістю агрегації та розміщення функцій у вузлі (від рівня 1 до рівня 3) і мінімально досяжною затримкою. Функція, розташована на межі (рівень 1), забезпечить, наприклад, найнижчу затримку; однак вона забезпечить лише локальний зв'язок (тобто в межах невеликої зони покриття

рівня 1), і їй потрібно буде реплікувати на кожному іншому рівні 1, де потрібна ця конкретна послуга для запуску. Функція, реалізована у вузлі рівня 3, хоча і матиме більшу затримку, але покриватиме значно більшу територію (наприклад, 100 вузлів рівня 1, згідно з прикладом на рисунку). Ця конфігурація показана у верхній частині рисунка 2.4, де вузол-розгалужувач включає один (або більше) OLT, який може локально термінувати канал довжини хвилі для виконання периферійної обробки (наприклад, потенційно як для NFV, так і для функціональності на рівні додатків).

Хоча ми вже описали C-RAN як основну рушійну силу інновацій в оптичному доступі/метро, слід зазначити, що це лише верхівка айсберга.

C-RAN дійсно можна вважати окремим випадком набагато ширшої концепції віртуалізації мережі, яка з реархітектурою CO як центру обробки даних (CORD) [25] була розширена для включення більшої кількості функціональних можливостей CO. CORD, який ілюструє концепцію віртуального або хмарного ЦОД (більш детально описаний в наступному підрозділі), віртуалізує більшість функцій ЦОД, відкриваючи можливість безпрецедентної гнучкості в динамічних моделях розподілу послуг і власності. NFV дійсно відкриває можливість динамічної генерації нових послуг шляхом створення нових екземплярів програмного забезпечення, право власності на які може бути передано певному оператору віртуальної мережі в багатокористувацькому середовищі [26]. "М'яка варіація" і розподіл мережевих функцій також відіграють важливу роль у забезпеченні мережевої конвергенції, що є важливим аспектом мереж 5G, дозволяючи оркестратору вищого рівня об'єднувати (або "ланцюжком") спільні ресурси в декількох доменах для створення наскрізного сервісу від кінцевих користувачів до центрів обробки даних. Це важливо, оскільки, як згадувалося раніше, після впровадження наскрізного забезпечення якості в мережі можуть з'явитися нові потоки доходів. З огляду на те, що більшість кінцевих користувачів будуть підключатися до мережі бездротовим способом, наприклад, за допомогою щільної мережі 5G RAN, забезпечення наскрізної якості послуг вимагатиме координації

щонайменше наступних трьох областей: бездротової межі, обчислювальних засобів і фіксованої оптичної мережі, що з'єднує ці дві області.

Крім того, для того, щоб задовольнити вимоги нових додатків, що приносять дохід і потребують меншої затримки, деякі мережеві функції і додатки необхідно буде перенести на периферію (наприклад, на рівень 1, показаний на рисунку 2.1]. Ця тенденція отримала назву периферійних обчислень з мультидоступом [26] (раніше відомих як мобільні периферійні обчислення), метою яких є об'єднання обчислювальних потужностей, розподілених по місту, в єдину екосистему, щоб ресурси могли динамічно призначатися для задоволення вимог додатків до затримок, пропускної здатності, зберігання та обробки даних.

Ця гнучкість у створенні послуг і розподілі ресурсів повинна, однак, поєднуватися з гнучкістю у розподілі фізичної пропускної здатності. В той час як підходи віртуалізації мережі можуть призначати виділені фрагменти вже наданих ресурсів і забезпечувати ізоляцію між ними, фізична пропускна здатність може бути збільшена лише за рахунок роботи на фізичному рівні, наприклад, для зменшення перевантаженості мережі або створення нових шляхів з низькою затримкою. Типовим прикладом використання є перенаправлення пропускної здатності оптичної мережі на мобільні стільники, оскільки їх використання змінюється протягом дня. Якщо цього можна досягти динамічно (наприклад, за час від кількох десятків до сотень мілісекунд), то архітектура може стати високоефективною у зменшенні надмірного виділення ресурсів, оскільки і оптичний транспорт, і обчислювальні ресурси можуть бути статистично мультиплексовані між кількома базовими станціями мобільного зв'язку.

Це вимагає розробки гнучкої оптичної мережі доступу/метро та дезагрегації оптичної мережі. Відкриваючи рівень управління оптичними системами, це уможливить їх інтеграцію з мобільним і обчислювальним доменами, дозволяючи мережевому оркестру контролювати весь наскрізний шлях від мобільного користувача до хмари. Хоча ретельне дослідження дезагрегації оптичного рівня виходить за рамки нашого дослідження, ми хотіли б зазначити, що в даний час

на цю тему ведеться багато дискусій. З одного боку, дезагрегація оптичного рівня відкриває доступ до джерел постачання компонентів оптичного рівня, тим самим збільшуючи економію коштів і масштабованість [27], а також дозволяє інтегрувати його в конвергентну архітектуру, описану вище. З іншого боку, він вимагає більшого запасу міцності через більшу невизначеність впливу фізичних перешкод на передачу каналу, хоча це може бути компенсовано збільшенням активності моніторингу фізичного рівня. З цієї причини дехто вважає, що оптична дезагрегація більше підходить для мереж доступу та метро, де оптичні поля слабкіші [28].

Паралельно ведеться цікава робота з використання машинного навчання в оптичних мережах [29], наприклад, для кращого прогнозування якості передачі, використовуючи дані, що стають доступними завдяки посиленому моніторингу оптичного каналу. Це, наприклад, може допомогти зменшити розрив у продуктивності між відкритими (тобто дезагредованими) і закритими системами.

Після надання вимог до віртуалізації мереж і демонстрації деяких архітектурних рішень, в подальшому буде надана детальна інформація про деякі з основних фреймворків NFV і SDN, що розробляються.

2.3 Функціональна конвергенція та віртуалізація CO

Операторські центри телекомунікаційних операторів традиційно були центрами критичної інфраструктури, розташованими на периферії операторської мережі. Фізично та функціонально ЦО були обмежені через брак місця та домінування існуючих операторів та постачальників відповідно. З появою парадигм SDN і NFV міста стали ареною для інновацій (і подібні тенденції спостерігаються на головних станціях кабельних операторів). Цей підрозділ заглиблюється в деталі деяких останніх технологічних інновацій у сферах NFV і SDN, намагаючись внести певну ясність щодо багатьох різних функціональних елементів і структур, які з'явилися нещодавно. Мережевий стек з відкритим вихідним кодом Фонду Linux, показаний на рисунку 2.5 [30], надає повне

уявлення про те, де такі компоненти працюють у мережевому стеку, а також дає рекомендації щодо того, як їх можна об'єднати, щоб забезпечити хмарну ЦО повністю віртуалізованою інфраструктурою, контролем та керуванням.

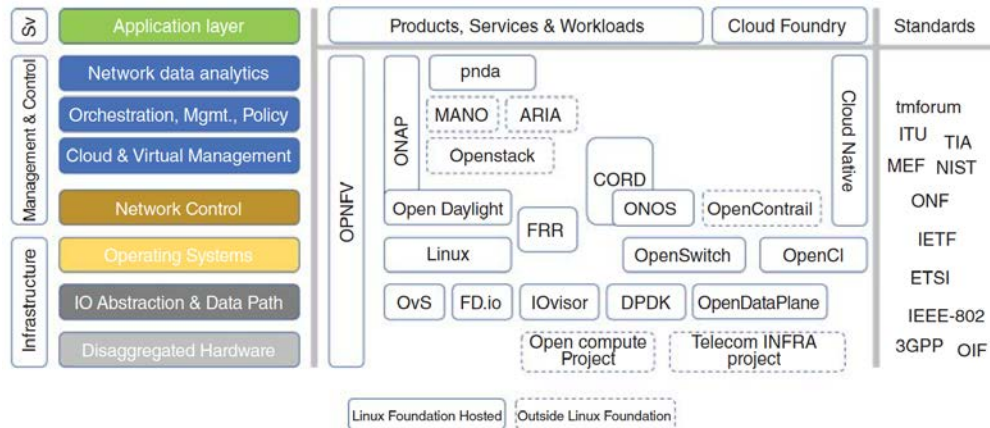


Рисунок 2.5 - Класифікація фреймворків розробки, пов'язаних з NFV

Ми почнемо з опису технологічних інновацій на нижньому рівні мережі, наприклад, дезагрегованої апаратної частини, показаної на рисунку 2.5. Мета полягає в тому, щоб надати огляд того, як віртуалізація змінює апаратний рівень за допомогою короткого опису основних проектів в цій області.

Застарілі оптичні транспортні системи (наприклад, OTN) є складними вертикально інтегрованими рішеннями, які змушують операторів розгортати мережі одного постачальника для забезпечення сумісності та керуваності. Апаратне забезпечення транспондерів для щільного мультиплексування з поділом по довжині хвилі (DWDM) включає в себе DSP ASIC і складні оптоелектронні компоненти.

Ці компоненти є зрілою технологією, а останні досягнення в основному стосуються інтеграції функцій для зменшення потужності, розміру і вартості. Програмне забезпечення, що працює в транспондері, традиційно йде в комплекті з апаратним забезпеченням, а інновації відбуваються лише на системному рівні. Крім того, вищі рівні мережі (наприклад, рівень пакетної або електронної комутації) використовують транспортну систему як "чорний ящик". Концепція

пакетної оптичної конвергенції спрямована на вирішення цієї проблеми і має на меті надати операторам можливість регулювати і знаходити пропускну здатність в різних областях обладнання різних виробників, динамічно реконфігурувати мережі і реагувати на збої або запити на трафік за короткий час (наприклад, за лічені секунди). Конвергенція пакетної оптики може значною мірою виграти від дезагрегації компонентів системи передачі (оптичних транспондерів і оптичних лінійних систем) і надання відкритого програмного забезпечення для управління збіркою компонентів різних постачальників. Відокремлення транспондерів від системи оптичних ліній дозволяє швидше впроваджувати інновації в транспондери, звільняє операторів мереж від необхідності змішувати і поєднувати технології від різних постачальників, здійснювати більший контроль над своєю інфраструктурою і зменшує ймовірність прив'язки до певного постачальника.

Проект Telecom Infra Project (TIP) [31] Open Packet DWDM використовує комбіновану пакетну технологію і технологію DWDM для метро мереж і волоконно-оптичних транспортних мереж далекого радіусу дії. Це дозволяє чітко розділити програмне та апаратне забезпечення. TIP розробив пакетний транспондер і відкриту транспортну систему з відкритими оптичними специфікаціями, що дозволяє будь-якій зацікавленій стороні надавати системи, компоненти або програмне забезпечення.

Паралельно проект ONF [32] "Відкрита і роз'єднана транспортна мережа" (ODTN) використовує мережу на основі намірів і конвергентні топологічні графіки для програмного визначення пропускну здатності і доступності шляхів.

ODTN використовує Transport-API (TAPI) як північний інтерфейс для міждоменої оркестрації і OpenConfig - [33] як південний інтерфейс між контролером ONOS і оптичним каналом. Плагіни виступають посередниками між OpenConfig і Openflow, а також взаємодіють через застарілі протоколи комутаторів, такі як TL1 і протокол елементів обчислення шляху (PCEP). ODTN автоматично виявляє дезагреговані компоненти і контролює всю транспортну мережу. TAPI інтегрує управління і моніторинг оптичної транспортної мережі з

додатками більш високого рівня, такими як наскрізні послуги динамічної пропускної здатності в багатодоменній мережі оператора і підтримка мережевого розгалуження для забезпечення зв'язку для послуг 5G з високою пропускною здатністю або наднизькою затримкою. Проект ODTN ґрунтується на роботі групи TTP з відкритого оптичного і пакетного транспорту над інструментами і API для мережевого планування. Система відкритих ліній TTP включає програмні моделі даних Янга для кожного компонента системи і відкритий програмний інтерфейс [34] до програмного забезпечення площини управління. Це дозволяє декільком додаткам працювати на відкритому програмному рівні, уможливаючи програмні інновації в алгоритмах управління системою DWDM і системах управління мережею. Проект ODTN також використовує специфікації [12] Multi-Source Agreement (MSA) для забезпечення інтеоперабельності оптичних систем, зокрема, реконфігурованих оптичних мультиплексорів з додаванням/відкиданням (ROADM), транспондерів і задіяної оптики. Програмний стек ODTN працює з обладнанням, сумісним з TTP, таким як оптичний комутатор і транспортна платформа Voyager. У майбутньому проект ODTN може прийняти деякі моделі даних OpenROADM Yang для забезпечення інтеоперабельності між площинами даних окремих доменів управління.

Площини даних CO можна згрупувати на ті, що обробляються спеціальним апаратним забезпеченням (наприклад, на основі ASIC), і ті, що обробляються процесорами загального призначення (тобто ЦП). Традиційно, існує компроміс між стабільністю, що забезпечується першими, та гнучкістю, що забезпечується другими. Що стосується виділених апаратних площин даних, проект OpenDataPlane (ODP) [13] визначає програмно-апаратні інтерфейси (API) для мережевих SoC (систем на мікросхемах) з метою побудови мережевих площин даних. Додатки ODP, як правило, є апаратно-агностичними, портативними і можуть використовувати базові технології апаратних прискорювачів. Абстракція площини даних OpenFlow (OF-DPA) [14] - це апаратний рівень абстракції між OpenFlow-сумісними контролерами та високопродуктивними

комутаторами Broadcom StrataXGS і StrataDNX. Подібно до OpenNSL (бібліотека мережевих комутаторів), OF-DPA потребує агента Indigo Openflow для посередництва з контролерами Northbound Openflow. OF-DPA випускається у вигляді комплекту розробки програмного забезпечення (SDK) Broadcom Silicon і включає в себе бібліотеки, API та абстрактну функціональність комутатора, яка підтримує мости, маршрутизацію, тунельні шлюзи центрів обробки даних, периферію провайдера MPLS, маршрутизацію комутатора міток і пакетні потоки QoS.

P4 (Programming Protocol-Independent Packet Processors) [15] - це поведінкова мова опису для вираження того, як пакети обробляються площиною даних програмованого елемента переадресації, такого як апаратний або програмний комутатор, мережева інтерфейсна карта або маршрутизатор. P4 визначає, як площина даних розпізнає, аналізує і зіставляє заголовки блоків даних протоколу і які подальші дії повинні бути виконані. Окрім існуючих протоколів, P4 може реалізовувати нові протоколи і функції, які сприяють кращому контролю і наочності мережі. Було створено низку цілей компілятора P4, включаючи XDP (eXpress Data Path), Netcope VHDL FPGA, Xilinx PX FPGA, P4GPU (Cuda), P4FPGA (Verilog), Netronome SmartNIC, а також Open-DataPlane. T4P4S [16] - це компілятор P4, який генерує додатки, що абстрагують інтерфейс до Data Plane Development Kit (DPDK), Freescale NPU та OpenWRT [17] без шкоди для продуктивності обробки пакетів.

Деякі виробники обладнання, такі як Juniper, прийняли P4 як мову, що описує взаємодію між площиною управління та площиною даних своїх маршрутизаторів та комутаторів. Stratum - це кремнієво-незалежна операційна система для комутаторів, яка дозволяє керувати комутатором з локальної або віддаленої мережевої ОС (NOS) за допомогою P4, P4Runtime і OpenConfig. Мета проекту Stratum - уникнути прив'язки постачальників до застарілих архітектур площини даних, які залежать від пропрієтарних кремнієвих інтерфейсів і закритих програмних API. DPDK [18] - це набір бібліотек користувацького простору, які підвищують продуктивність обробки пакетів в обхід ядра Linux,

мінімізуючи час, необхідний для обробки пакетів, за рахунок використання прямого доступу до пам'яті, драйверів Poll Mode, величезних сторінок та оптимізованого кешу. FD.io (Fast Data input/output) - [19] використовує DPDK для мережевого рівня вводу-виводу (отримання пакетів до/від (v)мережевих карт та потоків/ядер). FD.io, заснований на проекті Cisco Vector Packet Processing (VPP), фокусується на забезпеченні розгортання мереж з відкритим вихідним кодом з найвищою пропускнуою здатністю, найнижчою затримкою та найефективнішими сервісами вводу-виводу.

Компоненти FD.io зазвичай використовуються разом з іншими проектами, такими як Open-Daylight, OpenNFV та OpenStack. Проект IO Visor фокусується на динамічному розширенні можливостей площини даних в ядрі під час виконання. IO Visor має на меті створити репозиторій модулів вводу-виводу, які можна переносити між різними можливими площинами даних, такими як eBPF [20] в ядрі Linux та фреймворками на кшталт FD.io.

Нарешті, існує цілий ряд інструментів і методів, спрямованих на об'єднання підходів, за допомогою яких площина даних реалізується в апаратному або програмному забезпеченні, що працює на центральному процесорі. Наприклад, OpenFastPath [21] - це варіант ODP, який використовує DPDK для прискорення маршрутизації та переадресації, тунелювання та завершення протоколів через ядро Linux. PISCES [22] - програмний комутатор, створений на основі Open vSwitch (OVS) та апаратного комутатора гіпервізора, поведінка якого налаштовується за допомогою P4. PISCES не має жорсткої прив'язки до конкретних протоколів, що дозволяє легко додавати нові функції. Крім того, широкосмуговий доступ з підтримкою SDN (SEBA) є полегшеним варіантом R-CORD, який оптимізовано для швидкого проходження трафіку до магістралі без необхідності обробки VNF на сервері. SEBA підтримує ряд технологій віртуалізованого доступу на межі мережі оператора, включаючи PON, G.Fast і, зрештою, DOCSIS. SEBA підтримує як домашній доступ, так і бездротовий транзит.

ONF Trellis - це комутаційна неблокуюча архітектура L2/L3 для центрів обробки даних, що використовує комутаційне обладнання "білої скриньки" і програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом. На відміну від традиційних мережевих підходів, сама структура не використовує протокол управління (наприклад, BGP, OSPF або RSTP). Замість цього весь інтелект передається в додатки, що працюють на кластерному контролері ONOS. Таким чином, можна спростити комутатори мережі, оптимізувати всю мережу, використовуючи цілісне уявлення про всю активність, а також розгорнути нові функції і можливості без модернізації комутаторів.

Більшість центрів обробки даних використовують велику кількість недорогих серверів загального призначення від різних постачальників. Проект відкритих обчислень (Open Compute Project, OCP) [23] - це проект, створений компанією Facebook для розробки та створення власного програмного забезпечення, серверів та інших компонентів центрів обробки даних з метою вирішення різноманітних проблем інфраструктури. Спільнота, сформована навколо OCP, співпрацює з іншими проектами програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, щоб успішно розробити енергоефективні сервери, економайзер з повітряним охолодженням і випарну систему охолодження для підтримки своїх серверів, а також проекти серверних стійок і батарейних шаф, інтегровану схему розподілу живлення постійного/змінного струму і агностичний перемикач операційної системи (Open Network Install Environment - ONIE).

За останнє десятиліття з'явилася і розвинулася велика кількість площин управління Openflow і, загалом, SDN, починаючи від базових автономних контролерів (таких як Floodlight [24], POX і RYU), які керують лише групами комутаторів, і закінчуючи повноцінними архітектурами, які керують цілими центрами обробки даних і телекомунікаційними мережами та глобальними мережами. Нас в першу чергу цікавить остання категорія, яка включає OpenContrail [25], OpenDayLight [26] та ONOS [27].

OpenContrail - це тактичний фреймворк SDN, який був прийнятий компанією Juniper в якості фреймворку для управління своїм SDN-сумісним обладнанням. Архітектурно вона складається з чотирьох підсистем. vRouters обробляють нарізку мережі, управління трафіком і накладні мережі на основі MPLS або VXLAN. Підсистема конфігурації маніпулює високорівневою моделлю даних сервісу у форму, придатну для використання пристроями. Компонент Controller керує і контролює стан мережі. Нарешті, аналітична підсистема збирає та узагальнює дані про продуктивність системи. OpenContrail використовує IF-MAP (інтерфейс для точок доступу до мета-даних), протокол відкритого стандарту IT Orchestration, для визначення моделі.

З часом IF-MAP буде замінено на формат конфігурації на основі YANG.

OpenDayLight (ODL) - це архітектурна основа SDN з відкритим вихідним кодом, заснована на розширюваному мережевому контролері Cisco (XNC). Варіант ODL для постачальників послуг має рендери для конфігурації IETF NetConf, BGP і PCER. Запити топології з метою виявлення, відстеження хостів та управління інвентаризацією виконуються через REST API. Моделі SDN визначаються за допомогою MD-SAL (Model-Driven Service Abstraction Layer) на основі YANG, де додатки визначаються як модель даних, а API, необхідні для доступу до них, можуть бути автоматично згенеровані в рамках процесу інтеграції.

ONOS - це мережева операційна система, розроблена спеціально для постачальників послуг, що керується і підтримується ONF, яка також підтримує стандарти OpenFlow. ONOS є спеціальним проектом ONF, ресурси на розробку і підтримку якого виділяються такими постачальниками послуг, як AT&T і NTT. Метою проекту ONOS є надання платформи SDN з продуктивністю і доступністю операторського класу, і вже окреслено ряд варіантів використання для демонстрації операторських можливостей системи.

Це, наприклад, сценарій використання SDN IP Peering, сценарій використання мережевої функції як послуги (NFVaaS) і сценарій використання, що демонструє відмовостійкість з використанням IETF Segment Routing (Spring

Project). Варіант використання NFVaaS демонструє віртуальне рішення OLT (vOLT) для GPON. ONOS не покладається виключно на Openflow як на технологію площини управління SDN, як показано в прикладі використання Segment Routing. Варіант використання PCE розглядає проблему надмірного розширення поточних пакетних оптичних ядер, щоб впоратися як з перебоями в мережі, так і з піковими сплесками. Додаток ONOS PCE використовується для конфігурації, оркестрування та моніторингу пакетного оптичного ядра для досягнення набагато вищого рівня використання без шкоди для надмірності.

Основним компонентом функції хмарного та віртуального управління є проєкт CORD. Його мета - перетворити периферію мережі оператора на гнучку платформу надання послуг. Платформа CORD використовує парадигми SDN, NFV і хмарних технологій для дезагрегації застарілих мережевих платформ і конвергенції послуг шляхом надання гнучких центрів обробки даних на межі мережі. Це дозволяє оператору забезпечити оптимальний досвід для кінцевих користувачів і стимулювати створення інноваційних послуг наступного покоління. Технології, що використовуються в мережі доступу CORD, варіюються від GPON, [28] до XGPON і DOCSIS. CORD поставляється в декількох різних варіантах, що відповідають різним сегментам ринку: M-CORD - для мобільного зв'язку, E-CORD - для корпоративного зв'язку, а R-CORD - для надання широкосмугових послуг населенню. R-CORD реалізує повне рішення GPON для домашніх користувачів як сукупність віртуальних машин і контейнерів, що працюють в інфраструктурі центрів обробки даних загального призначення. У той час як традиційний OLT - це спеціальна функціональність, побудована на монолітному обладнанні, доступному від обмеженого набору постачальників, в R-CORD OLT дезагрегований, тобто тільки фізичний і MAC-рівні OLT створюються на спеціальному обладнанні (так званій OLT-MAC), а всі інші функції працюють на програмному забезпеченні, розподіленому по всій хмарі CORD. VOLT (віртуальний OLT) працює на товарних серверах з контролем доступу до медіа (MAC) GPON, GPON OMCI [29], 802.1ad-сумісним

мостом VLAN і ethernet MAC-функціями. Кожен фізичний порт на білому ящику OLT закінчується або 32, або 64 ONU.

Функція VOLTNA [30] (віртуальна апаратна абстракція OLT) обертає OLT-MAC як керований ресурс Openflow. На південній стороні VOLTNA взаємодіє з апаратними пристроями PON, використовуючи специфічні для постачальника протоколи та розширення протоколів через адаптери. Існує два програмних продукти, які працюють разом для реалізації функціональності VOLT. Перший - це агент vOLT, який працює в контейнері або віртуальній машині і забезпечує зв'язок між ONOS і обладнанням. Агент надає північний інтерфейс Openflow, який дозволяє ONOS керувати ним і відображає повідомлення Openflow на власні API апаратного пристрою. Агент vOLT складається з рівня абстракції Indigo Hardware, демона Netconfd [31], власних API для фізичного рівня PON та стеку інтерфейсів управління та контролю ONU (OMCI). Агент абстрагується від всієї системи PON як від одного комутатора до контролера. Агент здатний розуміти обмежену підмножину повідомлень Openflow від контролера і конфігурувати обладнання відповідним чином. Друга частина програмного забезпечення - це набір функцій ONOS, який полегшує підключення та автентифікацію абонентів, а також створює і керує VLAN для підключення споживчих пристроїв до центральної комутаційної мережі на основі індивідуального підходу до кожного абонента і керує іншими функціями площини управління OLT. Тут vOLT імітує функції традиційного OLT, такі як 802.1X [32], IGMP Snooping [33] та VLAN bridging. Трафік абонента ідентифікується двома тегами VLAN в центральній області. Внутрішній тег (C-тег) ідентифікує конкретного абонента в межах PON. Зовнішня мітка (S-мітка) ідентифікує PON. Разом ці дві мітки можуть однозначно ідентифікувати абонента на всіх OLT-пристроях в системі. ONOS вказує OLT, які VLAN використовувати, за допомогою повідомлень OpenFlow.

Віртуалізоване обладнання абонентського відділу R-CORD, відоме як віртуальний абонентський шлюз, запускає ці функції абонента в контейнері Linux на апаратному забезпеченні, розташованому в ЦО. До них відносяться такі

функції, як DHCP і NAT, а також додаткові послуги, такі як брандмауер і батьківський контроль. Дійсно, R-CORD підтримує базове підключення до Інтернету, а також набір додаткових функцій, таких як призупинення та відновлення послуг, батьківський контроль, вимірювання пропускнуої здатності, брандмауер і діагностика доступу.

Оркестрування - це координація ресурсів у різних сферах, дисциплінах та часових рамках з метою надання та підтримки наскрізної послуги. З цією метою оркестратори володіють знаннями загальної топології і пропускнуої здатності, а також механізмами досягнення конкретних цілей обслуговування в різних вертикальних і горизонтальних доменах, наприклад, оптичних, бездротових і обчислювальних. MANO [33] є одним з таких проектів Європейського інституту телекомунікаційних стандартів (ETSI) для управління та оркестрування програмно-визначених мереж і віртуалізації мережевих функцій.

MANO займається підтримкою багатосайтового розгортання, впровадженням NFV, пакуванням віртуальних мережевих функцій, модернізацією та інсталяцією на контролері SDN, створенням середовищ розробки та моделюванням послуг.

Інший оркестратор, ECOMP [4], розширює ETSI MANO і вводить концепцію контролера ресурсів і компонент політики, а також концепцію метаданих для управління життєвим циклом віртуального середовища, забезпечуючи гнучкість і еластичність мережі. ECOMP визначає головний оркестратор послуг, який відповідає за автоматизацію наскрізних екземплярів послуг. Оркестрування автоматизує процеси конфігурації, правила програмування та оперативне управління на основі політик. З цією метою ECOMP підтримує відкриті хмарні стандарти, такі як OpenStack і OPNFV, а також використовує Netconf, моделі конфігурації та управління Yang і Restful API.

Нарешті, робота мережі на основі додатків (ABNO) [5] - це фреймворк IETF SDN, який не обмежується лише використанням Openflow як протоколу зв'язку з компонентами площини даних. Натомість ABNO може взаємодіяти з

багатодоменими мережами MPLS і GMPLS, використовуючи PCE як керуючий агент і PCEP як протокол управління. ABNO також має менеджер політики, клієнт I2RS (інтерфейс до системи маршрутизації), менеджер топології віртуальної мережі (VNTM) для багаторівневої координації і сервер оптимізації трафіку на рівні додатків. Зв'язок у південному напрямку з такими компонентами, як Openflow, забезпечується за допомогою менеджера забезпечення. Сталість забезпечується базою даних LSP-DB і TED. Як приклад, ABNO було використано [6] для демонстрації багатодоменної та багатосарової конфігурації комерційного обладнання (такого як ADVA, вузли Juniper та канали OTN 400 Гбіт/с) та перевірки розширень PCEP для підтримки віддаленого налаштування GMPLS LSP.

Окрім компонентів, що працюють на певному рівні мережевого стеку Linux Foundation Network, на рисунку 2.5 ми бачимо, що існує низка компонентів, які охоплюють декілька функціональних рівнів. ECOMP та Open-O Orchestration були об'єднані в проект оркестратора з відкритим вихідним кодом під назвою Open Network Automation Platform (ONAP) [7]. ONAP забезпечує уніфіковану архітектуру та пропонує програмне забезпечення для автоматизації VNF та мережевих можливостей, що дозволяє постачальникам програмного забезпечення, мереж та хмарних сервісів швидко створювати та ефективно оркеструвати нові послуги на основі політик. ONAP в першу чергу спрямований на забезпечення платформи автоматизації та оркестрування з відкритим вихідним кодом для постачальників послуг, зокрема телекомунікаційних компаній, для запуску SDN та інших функцій віртуальних мереж.

По-друге, OPNFV [8] встановлює еталонну платформу NFV для полегшення розробки та еволюції компонентів NFV різних постачальників. OPNFV займається тестуванням продуктивності та варіантів використання на основі поточних специфікацій стандартів і напрацювань спільнот з відкритим вихідним кодом для конкретних варіантів використання NFV.

Мета OPNFV - прискорити розробку нових продуктів і послуг NFV, забезпечуючи тим самим досягнення основних цілей продуктивності та

інтероперабельності. Робота OPNFV зосереджена на інтерфейсах NFV (NFVI) та менеджері віртуалізованої інфраструктури NFV і спирається на компоненти інших проєктів з відкритим кодом, таких як OpenDaylight, ONOS, OpenStack, Ceph Storage, KVM, OpenvSwitch, DPDK та Linux.

2.4 Висновки до розділу 2

У даному розділі ми розглянули поточну роботу над конвергенцією мереж, зосередившись, в першу чергу, на метро мережі, але також підкресливши важливість інтеграції з мобільними і хмарними граничними екосистемами. Після опису вимог 5G, що лежать в основі прагнення до конвергенції та віртуалізації метро мережі, ми спочатку надали опис конвергенції на рівні фізичної мережевої архітектури (показавши еволюцію концепцій консолідації вузлів), а потім надали детальну інформацію про основні програмні фреймворки, які в даний час реалізують конвергентні мережеві рішення.

3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ 5G ІЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМ ДОСТУПОМ ТА ТУМАННИМИ ОБЧИСЛЕННЯМИ

3.1 Мережі широкосмугового доступу

Пасивні оптичні мережі (PON) вважаються привабливим рішенням для дротового доступу завдяки своїй високій пропускній здатності, надійності, низькій вартості, збільшеному охопленню і відносній простоті розгортання, що впливає з їх повністю пасивної мережевої інфраструктури і топології "точка-багато точок" [9]. Мережі волоконно-оптичного доступу на основі PON є життєво важливими для надання швидких і надшвидких широкосмугових послуг [10]. Оскільки майбутні технології мереж доступу повинні будуть підтримувати дуже високу пропускну здатність, щоб впоратися з величезним зростанням попиту на трафік, технологія оптичного волокна де-факто є перспективною технологією для широкосмугового доступу.

Технологія PON є найкращим вибором серед різних технологій дротового доступу для надання послуг triple-play (тобто передачі даних, відео та голосу) для підтримки додатків і послуг, що вимагають все більшої пропускної здатності (наприклад, телебачення високої чіткості (HD), ультра-HDTV 8K, високоякісні відеоконференції, 3D-дисплеї, голографічні зображення, доповнена і віртуальна реальність, імерсивна реальність для дистанційного навчання в телемедицині), завдяки своїй надійності, високій пропускній здатності і низькій вартості.

За останні кілька років різні варіанти технології PON (наприклад, гігабітний PON (G-PON), ефірний PON (EPON)) були розроблені стандартними організаціями ITU-T та IEEE для полегшення доступу до широкосмугового зв'язку. Серія стандартів ITU-T/FSAN (Мережа доступу з повним спектром послуг) G.989 визначила NG-PON2 [11] як найсучаснішу технологію PON. Ця архітектура ґрунтується на підході мультиплексування з часовим і хвильовим розділенням (TWDM), який координує мультиплексує чотири довжини хвиль (опціонально - вісім) в одному волокні, причому кожна довжина хвилі забезпечує

швидкість передачі 10 Гбіт/с у низхідному напрямку і 2,5 Гбіт/с у висхідному напрямку, таким чином досягаючи загальної пропускної здатності 40 Гбіт/с у низхідному напрямку і 10 Гбіт/с у висхідному напрямку. TWDM PON все ще вважається складним (наприклад, координація довжин хвиль разом з часовими інтервалами додає складності алгоритмам динамічного розподілу смуги пропускання NG-PON2) і є дорогим для широкого розгортання в даний час [12]. З іншого боку, подібно до підходу TWDM, робоча група IEEE 802.3 сформувала робочу групу P802.3ca [13] в листопаді 2015 року для розробки завдань для наступного покоління EPON (NG-EPON), метою якого є підтримка оптичних мережевих блоків (ONU) з однією, двома або чотирма довжинами хвиль, забезпечення пропускної здатності системи 25/50/100 Гбіт/с-1, а також співіснування з IEEE 802.3av 10G-EPON. Стандарт IEEE 802.3ca випущений в 2018 році.

З огляду на останні тенденції в системах зв'язку на базі Ethernet, таких як Common Public Radio Interface (CPRI)¹ через Ethernet [14] в хмарній мережі радіодоступу [15], CPRI через Ethernet для TDM-PON [16], транспорт на базі Ethernet для мобільного фронтального зв'язку (IEEE P1914. 1), а також технології пасивної оптичної локальної мережі (POL)² для корпоративних мереж [17], розглядається найбільш популярна і широко розгорнута на сьогоднішній день система PON, тобто TDM EPON (IEEE 802.3ah EPON/IEEE 802.3av 10G-EPON) серед багатьох варіацій технологій PON, наприклад, WDM-PON, TWDM-PON [18]. EPON базується на стандарті ethernet, який є простим, легким в управлінні, з можливістю зростання пропускної здатності за рахунок корпоративного підключення, а також забезпечує економію на масштабах топології.

Хоча в останні роки стандарти ITU-T та IEEE для PON докладали всіх зусиль для досягнення вищої пропускної здатності PON, ці системи вже є зрілими [19]. Наприклад, BT продемонструвала високошвидкісні терабітні оптичні технології та успішні випробування оптичного суперканалу зі швидкістю 3 Тбіт/с [20]. Це дозволяє операторам плавно масштабувати основні оптичні мережі передачі, щоб задовольнити очікувані зростаючі потреби

додатків з високою пропускну здатністю в мережах 5G і не тільки. Однак, замість того, щоб просто постійно розширювати пропускну здатність NG-PON, фокус досліджень мереж широкосмугового доступу повинен зміститися в бік підвищення ефективності та підтримки нових послуг і додатків (наприклад, хмарних обчислень і туманних обчислень, мобільних транзитних і магістральних перевезень, віртуалізації). Наприклад, у світлі нових тенденцій віртуалізації мережевих функцій (NFV) і програмно-визначених мереж, Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) представила концепцію архітектури системи гнучкого доступу (FASA) [21]. FASA має на меті забезпечити більшу гнучкість обладнання оптичного доступу за рахунок використання NFV - віртуального оптичного лінійного терміналу (OLT) для PON наступного покоління з поєднанням модульних функцій (програмні компоненти, такі як управління довжиною хвилі, управління смугою пропускання, багатоадресна передача, OAM (експлуатація, адміністрування та обслуговування)) замість того, щоб покладатися на будівництво обладнання для конкретної мети.

Як правило, розгортання оптичного волокна повсюдно може бути неможливим через географічні обмеження або коли мобільність є необхідною. З іншого боку, існуючі технології бездротового доступу (наприклад, бездротовий зв'язок (WiFi), 4G Long Term Evolution (LTE) і LTE-Advanced (LTE-A)) можуть забезпечити мобільність користувачів, але вимагають надійної високопродуктивної магістралі, щоб задовольнити вимоги до пропускну здатності нових додатків, таких як 3D-дисплеї, HDTV і високоякісні відеоконференції. Крім того, голографічні зображення, технології віртуальної і доповненої реальності, телемедицина, дистанційне навчання та інші високошвидкісні додатки будуть продовжувати збільшувати попит на високошвидкісний дротовий зв'язок. Ця тенденція також відповідає закону пропускну здатності Едхольма [22], який стверджує, що об'єднана (або конвергентна) оптична дротова і бездротова мережа необхідна для надання кінцевим користувачам як фіксованих, так і мобільних послуг. У світлі цього, конвергенція оптоволоконних і бездротових мереж, також відома як мережі

широкосмугового бездротового доступу (FiWi) [23], широко розглядається як важливе рішення для усунення вищезгаданих недоліків і задоволення постійно зростаючого попиту на пропускну здатність, про що йтиметься далі.

Мережу доступу називають "останньою милею" телекомунікаційних мереж, яка з'єднує центральний офіс з кінцевими користувачами. Технології доступу можна розділити на дві групи: провідні, наприклад, цифрова абонентська лінія (xDSL), як ITU G.9701 G.Fast, FTTx (x: будівля/будинок/вузол) і бездротові, наприклад, WiFi (IEEE 802.11b/g/n/ac), WiMax (IEEE 802.16e), 4G LTE/LTE-A. Інтегрована мережа широкосмугового доступу FiWi поєднує в собі як дротові, так і бездротові технології доступу. Більш конкретно, FiWi - це архітектура, яка поєднує в собі особливості бездротової мережі (тобто повсюдність, гнучкість і економію коштів) з оптоволоконною мережею (тобто надійність, міцність і висока пропускну здатність). Крім того, мережі FiWi підтримують нові додатки і надають широкосмугові послуги не лише фіксованим абонентам, але й мобільним користувачам, що сприяє розвитку інновацій, збільшенню доходів і підвищенню якості нашого повсякденного життя [24].

Більшість мереж FiWi на основі радіо- та оптоволокна (R&F) складаються з каскадного TDM IEEE 802.3ah EPON в оптичному магістральному сегменті та WLAN-сітки IEEE 802.11 a/b/g/n/s у передньому сегменті бездротової мережі. Окрім NG-PON, наприклад, IEEE 802.3av 10G-EPON або WDM-PON, оптичні технології, такі як перенастроювані лазери, відіграють життєво важливу роль у розробці гнучкої та економічно ефективною оптичної магістралі для мереж FiWi [25]. Крім зовнішнього інтерфейсу WiFi, мережі FiWi можуть складатися з стільникового інтерфейсу, такого як 4G LTE/LTE-A. Важливо відзначити, що згідно з Artilo (провідний постачальник WiFi операторського класу), WiFi і LTE краще вважати взаємодоповнюючими технологіями, ніж конкуруючими. У той же час, серед користувачів і постачальників послуг спостерігається сильна тенденція "WiFi першим" [26]. З іншого боку, технології оптичного доступу постійно мають значно вищу пропускну здатність, ніж сучасні передові технології бездротового і стільникового доступу (див. рис. 3.1 і [27]), зокрема,

технології наступного покоління WiFi і стільникового мобільного зв'язку, що забезпечують майбутнє бачення 5G. Крім того, важливо зазначити, що бездротова локальна мережа є сильним кандидатом на недороге високошвидкісне мобільне завантаження даних, оскільки вона незмінно здатна забезпечити швидкість передачі даних у 100 разів вищу, ніж стільникові мережі (див. рис. 3.1 та [28]). Крім того, варто згадати, що IEEE 802.11ax-2019, наступна високопродуктивна поправка до стандарту WLAN, спрямована на чотирикратне збільшення пропускної здатності порівняно зі стандартом IEEE 802.11ac-2013 [29]. У світлі цих тенденцій і фактів ми розглядаємо інтерфейс WiFi в мережах доступу FiWi, щоб задовольнити вимоги до низької затримки і високої пропускної здатності мобільних мереж 5G.

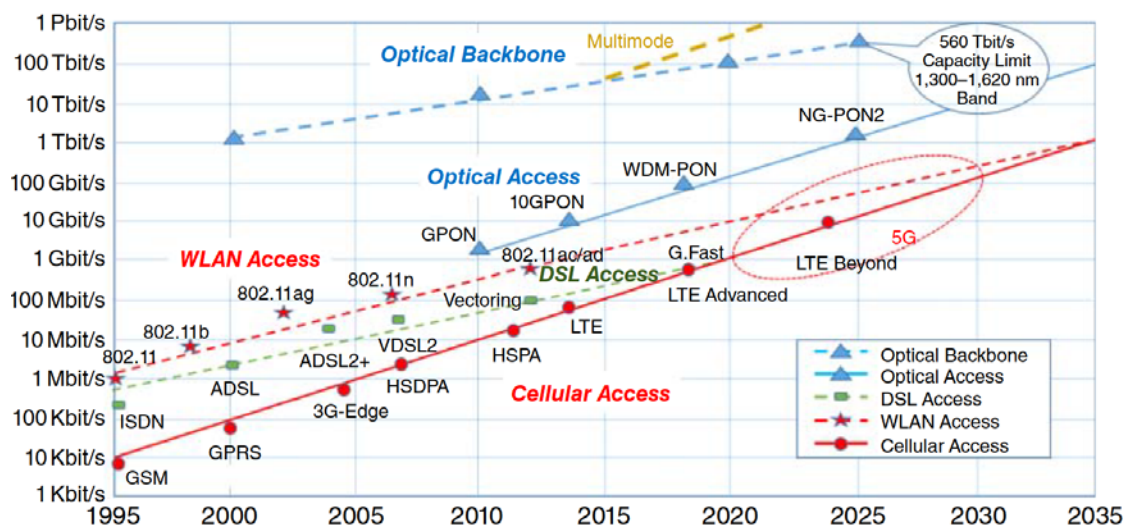


Рисунок 3.1 - Розвиток дротових і бездротових технологій

Туманні обчислення - це нова обчислювальна парадигма, яка є високо віртуалізованою платформою. Туманні обчислення розширюють централізовані хмарні обчислення (наприклад, Amazon EC2) до межі мереж, тим самим дозволяючи додаткам і сервісам працювати на мільярдах підключених пристроїв і датчиків, зокрема, в контексті Інтернету речей (IoT) [30]. Туманні обчислення можуть містити кешований стан з хмари і використовують принцип "зберігати і пересилати" (store-and-forward).

Інфраструктури туманних обчислень відрізняються від централізованих хмар тим, що вони є децентралізованими утвореннями. Вузли туманних обчислень розгортаються на периферії інтернету, вони знаходяться на відстані одного або декількох бездротових стрибків від відповідних периферійних пристроїв (наприклад, мобільних телефонів, датчиків, виконавчих механізмів) і періодично синхронізуються з хмарами, забезпечуючи таким чином підтримку широкого спектру додатків. Наприклад, чутливих до обчислень і затримок додатків, таких як доповнена і віртуальна реальність. Уніфікована хмарно-туманна архітектура може використовувати як централізовані, так і розподілені хмарні ресурси та сервіси. Деякі з переваг туманних обчислень включають скорочення транзитного трафіку, підвищення надійності мережі за рахунок розподілу контенту між периферійними і централізованими центрами обробки даних, скорочення витрат за рахунок декомпозиції і дезагрегації мережевих функцій доступу, оптимізації інфраструктури центральних офісів і надання інноваційних послуг на периферії мереж.

Існує кілька промислових застосувань для туманних обчислень. Серед інших, IOx - це реалізація туманних обчислень від Cisco. Це прикладна платформа (операційна система маршрутизатора) для туманних обчислень, яка поєднує в собі виконання додатків IoT в тумані, безпечне з'єднання з провідною в галузі мережевою операційною системою (IOS) і надійну інтеграцію з датчиками IoT і хмарию [7]. Таким чином, туманні обчислення наближають можливості хмарних обчислень (наприклад, обчислення, зберігання, кешування) до периферійних пристроїв/речей. Загалом, будь-які периферійні пристрої, які мають можливості обчислень, кешування та зберігання даних, а також підключення до мережі, можна розглядати як туманні вузли. Наприклад, промислові контролери, комутатори, маршрутизатори та камери відеоспостереження. Туманні вузли найкраще реалізувати, покладаючись на мережі R&F і розгортаючи їх на межі мереж FiWi, при цьому інтегрована точка доступу (AP) ONU або точка порталу mesh-мережі (MPP) ONU слугують межею мереж FiWi, щоб забезпечити високу пропускну здатність і низьку затримку.

Обчислювальне завантаження - це метод, за допомогою якого ефективність виконання розподіленої системи підвищується шляхом перенесення обчислювальних завдань з менш продуктивної системи на більш продуктивну. Ці можливості можуть мати форму обчислювальної потужності, пам'яті, навантаження на систему та часу автономної роботи [8]. Це також відомо як сурогатні обчислення або кібер-форвардинг [9]. Обчислювальне завантаження також схоже на концепцію SETI@home [10], де обчислювальні завдання надсилаються сурогатам для виконання обчислень. Однак зауважте, що SETI@home - це великомасштабні обчислення з використанням загальнодоступних ресурсів, тоді як обчислювальне завантаження - це, як правило, дрібномасштабні обчислення.

Рішення про завантаження зазвичай приймаються на основі багатьох параметрів, включаючи пропускну здатність, швидкість сервера, пам'ять, навантаження на сервер і обсяг даних, якими обмінюються мобільні клієнти і сервери. Для отримання рішень можна застосувати кілька методів, наприклад, розбиття програм на розділи та прогнозування параметричних змін у поведінці програми та середовища виконання. Завантаження може виконуватися на різних рівнях деталізації.

Рішення щодо перевантаження залежать від багатьох факторів, таких як: навіщо перевантажувати (наприклад, для підвищення енергоефективності), як прийняти рішення про перевантаження (тобто статичне чи динамічне), які мобільні системи використовують перевантаження (наприклад, мобільні телефони, носимі пристрої, роботи), типи додатків та інфраструктура для перевантаження (наприклад, хмарні обчислення) [11]. Існують наступні чотири основні етапи, пов'язані з перевантаженням обчислень: - Моделювання програми. У сучасній літературі можна знайти три типи моделей додатків, а саме: виклик процедури, виклик сервісу та потік даних. Серед них широко використовується виклик процедур. У моделі виклику процедур додаток можна описати за допомогою набору функцій, де кожна функція в свою чергу викликає інші функції. Дослідження, наприклад, MAUI [12], CloneCloud [13] та ThinkAir

[14] використовують цей підхід. Додаток складається з набору сервісів у випадку виклику сервісу. В обох підходах для представлення додатку можна використовувати граф або дерево, де вузол представляє процедуру/сервіс, а ребро - зв'язок між викликами/сервісами. Профілювання пристрою та мережі передбачає збір інформації про пристрій та мережу (наприклад, процесор, стан пам'яті, пропускна здатність мережі). Ця інформація використовується для розробки моделі витрат для програми. Наприклад, MAUI [15] профілює енергоспоживання кожної частини програми. Об'єднання статичного аналізу та динамічного профілювання було використано в CloneCloud для автоматичного розділення додатків з точною деталізацією [16], тоді як [17] не профілює додаток, пристрій та мережу незалежно один від одного. Натомість, він профілює їх під час виконання та передачі даних. Математичний оптимізатор використовується для оптимізації мети (наприклад, загальний час виконання, споживання енергії) для даної програми та моделі витрат. Модель витрат включає час виконання, пропускну здатність обробки даних, споживання енергії або будь-яку їх комбінацію. Наприклад, MAUI [18] оптимізує енергоспоживання пристроїв, CloneCloud [19] і ThinkAir [20] оптимізують час виконання або енергоспоживання залежно від вибору програміста, тоді як [21] оптимізує тривалість роботи додатків для потокової передачі даних. Реалізація застосовує відповідний підхід для визначення того, які завдання додатку виконуються віддалено на хмарній інфраструктурі.

Широко використовуються три підходи, а саме: клієнт-сервер, міграція віртуальних машин та мобільні агенти. На відміну від традиційної архітектури клієнт-сервер, клієнтські додатки можуть бути розділені на різні рівні деталізації (наприклад, клас, метод, завдання, потік).

Більш конкретно, мобільний клієнт звертається до сервера з проханням виконати певний метод із заданими аргументами, а сервер повертає результат виконання методу, використовуючи протоколи віддаленого виклику процедур або віддаленого виклику методів. Цікавими прикладами клієнт-серверних систем завантаження обчислень є Spectra [22]. У підході міграції віртуальних

машин клієнти готують образ своїх пристроїв і передають його серверам для виконання. Підхід міграції VM використовується в Slingshot [23], CloneCloud [24], ThinkAir [25], cloudlet [26], розширеному cloudlet FiWi [27] та розширеному мобільними периферійними обчисленнями FiWi [28]. У підході мобільних агентів обчислення переносяться з мобільних пристроїв на сервери, при цьому мобільні агенти є автономними програмами, які контролюють своє переміщення від машини до машини [29].

За останні роки мобільний трафік даних різко зріс, в основному за рахунок відеосервісів. Окрім вищезгаданих тенденцій використання мобільних даних, ще одна тенденція пов'язана з новими можливостями для бізнесу. За даними ОЕСР, цифрова економіка породила низку нових бізнес-моделей, включаючи послуги онлайн-платежів, електронну комерцію, хмарні обчислення, магазини додатків, високочастотну торгівлю, інтернет-рекламу та мережеві платформи для участі [30]. Оскільки ці нові бізнес-моделі підтримують вертикальні ринки в значно більших масштабах, вони вимагають нових мережевих можливостей і кращої продуктивності мережі. З огляду на ці тенденції та нові бізнес-моделі, що розвиваються, сучасні технології 4G можуть обмежити зростання мобільних послуг.

Щоб впоратися з вищезазначеними тенденціями та викликами, мобільні мережі 5G відіграватимуть важливу роль. Суворі вимоги додатків 5G, такі як надвисока надійність і наднизька затримка, зумовляють потребу в надзвичайно локалізованих послугах на периферії мереж [30]. З огляду на зростаючий інтерес до інтеграції дротових/бездротових мереж і децентралізованих мереж (наприклад, M2M/D2D-комунікацій, малих стільникових мереж) в 5G, мережі FiWi представляють сприятливу архітектуру, яка обслуговує як традиційні хмарні обчислення, так і нові децентралізовані туманні обчислення. Однак інтеграція туманних обчислень в мережі FiWi (далі - FC-FiWi) не є тривіальною і створює кілька архітектурних проблем і проблем управління ресурсами. Традиційні хмарні обчислення мають великі потужності для зберігання та обробки даних. Однак, з іншого боку, вони мають великі затримки та проблеми

з обробкою даних у реальному часі [31]. І навпаки, туманні обчислення мають меншу затримку, але з іншого боку, вони мають обмежені обчислювальні можливості та можливості зберігання порівняно з централізованою хмарою. Таким чином, хмарні та туманні обчислення співіснують, підтримуючи різноманітні сервіси та додатки, такі як критично важливі та толерантні до затримок в мережах 5G.

Існує два типи співіснування в мережах FC-FiWi, а саме: співіснування хмари/FiWi та співіснування туману і технології FiWi (наприклад, технологія triple-play). Забезпечення суворих вимог до якості обслуговування для кожної технології без негативного впливу одна на одну та підтримка різних послуг і додатків в епоху 5G в такій мережі не є тривіальним завданням, що призводить до диверсифікації характеристик і вимог до зв'язку [32]. Крім того, забезпечення надвисокої надійності (99,999 відсотка доступності) на межі мережі FiWi є однією з життєво важливих проблем в мережах FC-FiWi, що створює складність у розробці високооптимізованих протоколів [33]. Наприклад, обриви оптоволокна можуть статися в сегменті оптичного магістрального зв'язку, а несправності можуть виникнути в туманній обчислювальній інфраструктурі. Крім того, можуть статися обриви зв'язку до/від точок доступу. Як наслідок, впроваджена мережа може зазнати широкомасштабних перебоїв у наданні послуг.

У зв'язку з цим ми зосередимося на ключових атрибутах 5G - високій надійності з істотно поліпшеним зв'язком і дуже низькою затримкою - і дослідимо, як і в якій мірі їх можна отримати в мережах FC-FiWi. Метою цього підрозділу є проектування архітектури та розробка нової уніфікованої (одне рішення для обох сегментів мережі для спрощення управління інтегрованою архітектурою) схеми управління ресурсами, а також дослідження досяжного приросту продуктивності. Слід зазначити, що в більшості попередніх досліджень в мережах FiWi використовувався протокол множинного доступу з розділенням каналів і уникненням колізій як протокол керування випадковим доступом до середовища (наприклад, [34]). Однак, щоб задовольнити вимоги мереж FC-FiWi

до реального часу, низької затримки та низького енергоспоживання, нам потрібен детермінований механізм доступу. Тому ми розробляємо протоколи доступу на основі множинного доступу з часовим розділенням каналів (TDMA). Більш конкретно, з точки зору управління ресурсами, ми розробляємо уніфіковану та децентралізовану схему управління ресурсами на основі дворівневого TDMA, де туманний трафік планується поза часовим інтервалом основного трафіку FiWi, щоб підтримувати співіснування як хмарного, так і FiWi трафіку. З точки зору моделювання, представлено ретельний аналіз живучості та продуктивності наскрізної затримки.

3.2 Вдосконалення мережі FiWi за допомогою туманних обчислень

Архітектура мереж FC-FiWi показана на рисунку 3.2, де оптична магістраль складається з широко використовуваного EPON стандарту IEEE 802.3ah. Протяжність мережі між віддаленими оптичними мережевими пристроями (ONU) і OLT може досягати 100 км. Ширококутні та хмарні сервіси надаються кінцевим користувачам через оптичну магістраль. OLT з'єднується з різними типами ONU за топологією "дерево-гілка". Деякі ONU розміщуються в офісах та/або житлових приміщеннях абонентів для надання послуг FTTx (наприклад, FTTx до офісу/будинку) дротовим абонентам.

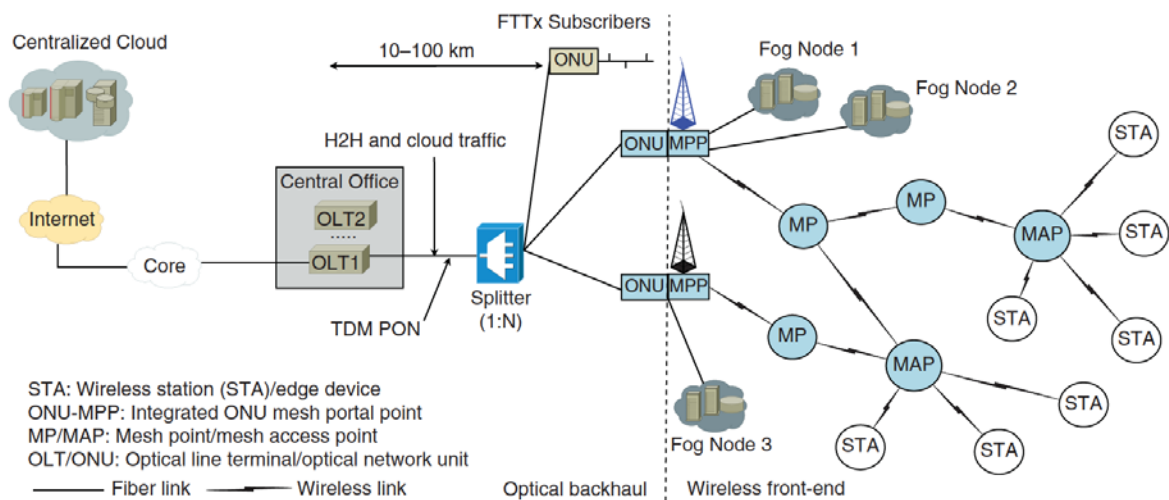


Рисунок 3.2 - Мережева архітектура туманних обчислень розширених мереж FiWi

Крім того, деякі ONU оснащені бездротовим MPP для взаємодії з бездротовою mesh-мережею. Зауважте, що точки доступу (MP) - це ретрансляційні вузли, які пересилають пакети на інші вузли MP, і, залежно від параметрів конфігурації, MP підтримують кілька бездротових mesh-сервісів. Один або кілька серверів туману можуть бути підключені до ONU-MPP через оптоволоконні лінії зв'язку для надання хмарних послуг поблизу абонентів. Зазначена мережа FC-FiWi забезпечує повноцінну інфраструктуру зв'язку.

Роботу запропонованої схеми показано на рисунку 3.3. Система побудована на двох рівнях TDMA з опитуванням.

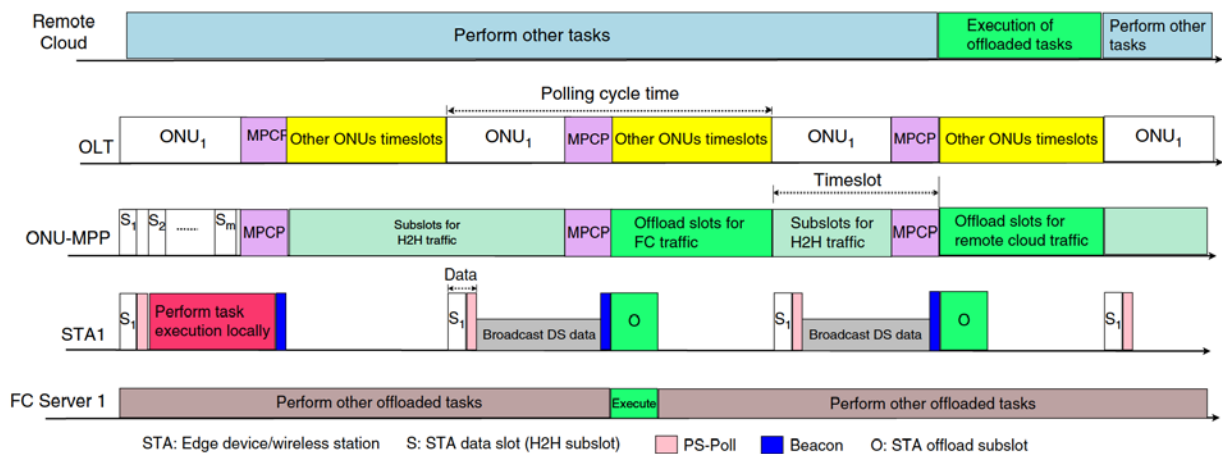


Рисунок 3.3 - Дворівнева схема керування ресурсами на основі TDMA для мереж FC-FiWi

Перший рівень TDMA призначений для оптичної магістралі, де OLT розподіляє смугу пропускання і планує висхідний таймслот для кожного ONU-AP/MPP, одночасно транслуючи нисхідні кадри на всі ONU-AP/MPP [4]. Кожен ONU-AP/MPP відкидає отримані кадри, які не призначені для нього. У TDMA другого рівня ONU-AP розподіляє смугу пропускання в підслотах і планує передачі як FiWi, так і хмарного трафіку (туман і централізована хмара) всіх периферійних пристроїв, призначених для нього. Протягом призначеного йому таймслота ONU-AP/MPP надсилає висхідні кадри даних (наприклад, туман/хмарне завантаження/кадр даних FiWi) до OLT, а ONU-AP/MPP отримує

низхідні кадри даних (наприклад, результат обчислень, низхідний трафік даних FiWi) від OLT і негайно транслює їх на відповідні периферійні пристрої.

Трафік хмарних і туманних даних планується за межами часового інтервалу ONU-AP в межах циклу опитування PON. Це дозволяє співіснувати туманному, хмарному і FiWi трафіку без погіршення продуктивності мережі FiWi. Отримавши PS-Poll від граничного пристрою, ONU-AP вирішує, куди (туман або хмара) завантажити обчислювальну задачу на основі заданої угоди про рівень обслуговування або вимог QoS. У сценарії хмарного завантаження це включає запит на обчислювальне завантаження в повідомленні REPORT, що надсилається до OLT в кінці його таймслоту [5]. Початок і тривалість підслотів обчислювального навантаження передаються за допомогою Beacon-повідомлення, яке транслюється на периферійні пристрої. Отримавши завдання з навантаженням від ONU-AP, OLT відправляє його в звичайну хмару. Подібно до сценарію завантаження хмари, передача туманного трафіку планується за межами часового інтервалу ONU-AP протягом часу циклу опитування PON, щоб дозволити співіснування FiWi і туманного трафіку. У цьому сценарії ONU-AP визначає підслоти для туману, не повідомляючи OLT.

Підслоти передачі для STA/граничних пристроїв виділяються ONU-AP за допомогою повідомлень Beacon і PS-Poll. ONU-AP транслює Beacon на свої STA, що містить карту підслотів FiWi висхідної лінії зв'язку, за допомогою якої кожна STA надсилає PS-Poll в кінці свого підслоту FiWi. STA надсилає завантажений трафік і отримує результати обчислень з сервера туману або хмари.

3.3 Інтегрований доступ і транзитний зв'язок

Здатність мережі надавати безперервні послуги у випадку відмов зв'язку або вузлів відома як живучість [6]. Мережеві елементи розглянутих нами мереж FC-FiWi є надійними, оскільки вони є пасивними (без живлення). Однак зауважте, що через обриви зв'язку мережі FC-FiWi можуть страждати від обривів зв'язку. Зрештою, мережа стає ненадійною, і один або кілька ONU та їхні відповідні

підписники можуть від'єднатися від OLT. Крім того, сервер туманних обчислень може вийти з ладу через збій живлення або аварію сервера. Забезпечення високонадійних сервісів туманних обчислень є дуже важливим, особливо для додатків, критичних до затримок. На відміну від існуючих досліджень, ми розглядаємо різні типи схем резервування магістральних каналів зв'язку та схем захисту туманних серверів.

Зауважте, що Рекомендація ITU-T G.983.1 не охоплює прямий зв'язок між ONU для підвищення надійності PON. По-перше, для попарного з'єднання сусідніх ONU розгортаються з'єднувальні волокна (IF) (див. ONUN-1 і ONUN на рис. 3.4) [7].

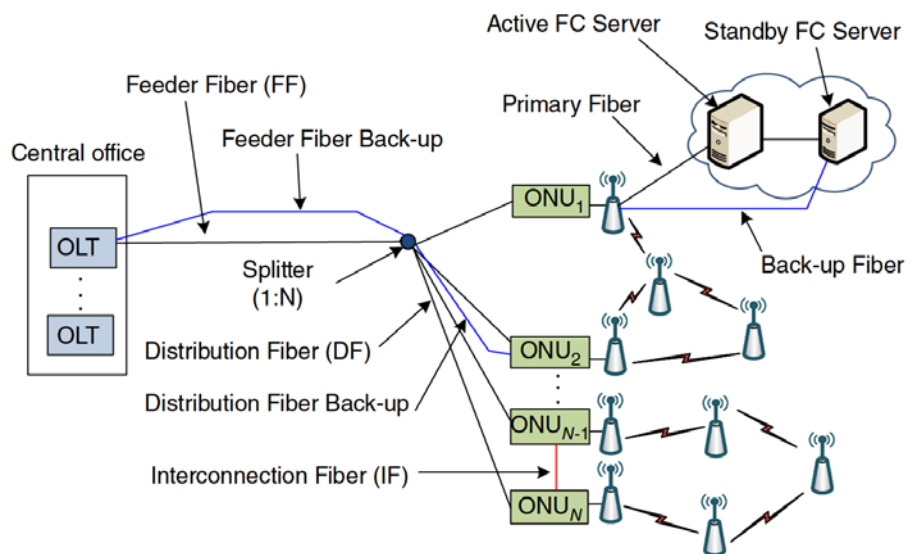


Рисунок 3.4 - Схема захисту оптичних магістралей, туманних обчислень і бездротових мереж.

Кожна пара ONU може взаємно захистити себе, використовуючи відповідний ПЧ у випадку розриву розподільчого волокна будь-якого з ONU, за рахунок додаткового оптичного комутатора на ONU, модернізованому ПЧ. Слід зазначити, що ПЧ є перспективним підходом для отримання високої доступності з'єднання між ONU і OLT при низькій щільності населення в економічно ефективний спосіб [8]. По-друге, ми розгортаємо надлишкові резервні

оптоволоконні канали між кожною парою вузлів кожної лінії зв'язку, як показано на рис. 3.4. По-третє, наша схема захисту туманних обчислень (FC) включає резервний сервер FC і резервне оптоволоконне з'єднання між ONU-MPP і сервером FC, як показано на рисунку 3.4). Нижче представлений аналіз схем забезпечення живучості FC, резервного оптоволоконного з'єднання і бездротової комірчастої мережі. (1) Збої під час передачі пакетів і виконання завдань, обриви зв'язку між ONU_k і сервером FC та відмова сервера FC розглядаються в нашому аналізі живучості FC [9]. Нехай STA = {1, 2 ... Nst}, ONU = {1, 2 ... Non}, FC = {1, 2 ... Nfc} та OLT = {1, 2 ... Nol} - множини STA, ONU, OLT відповідно, де останній елемент кожної множини вказує на її кількість елементів. Нехай $P_{f(ij)}$ - ймовірність відмови з'єднання між i та j , де $i, j \in (STA \cup ONU \cup OLT \cup FC)$. Ймовірність відмови FiWi між ONU та сервером FC розраховується наступним чином [40]:

$$P_{f(ij)}^{ONU_n} = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{C(ij)}) (1 - P'_{C(ij)}) \quad (3.1)$$

де $P_{C(ij)}$ і $P'_{C(ij)}$ позначають ймовірність обриву основного та резервного волокон $C(ij)$ між сервером ONUS і FC відповідно. Надійність сервера FC описана в [11]:

$$\mathfrak{R}^{FC} = \prod \left[\exp \left\{ -F_{tx}^{FC} \cdot \left(\frac{P^{tx}}{C_{FC}} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -F_{ofl}^{FC} \cdot \left(\frac{C'_{fc}}{S_{fc}} \right) \right\} \right] \cdot \prod (1 - P_f^a) (1 - P_f^s) \quad (3.2)$$

де F_{tx}^{FC} , F_{ofl}^{FC} , P_f^a і P_f^s представляють частоту відмов передачі, частоту відмов пакетів без навантаження, ймовірність відмов активного сервера FC та ймовірність відмов резервного сервера FC, відповідно. Імовірність підключення FiWi ONU_k до надійної служби FC розраховується за рівняннями (3.1) і (3.2).

$$P_{C(ij)}^{ONU_k} = \prod_{n=1}^N (1 - P_{f(ij)}^{ONU_n}) \cdot \mathfrak{R}^{FC} \quad (3.3)$$

(2) Сегмент зворотного зв'язку. Імовірність відмови FiWi між ONU та OLT (3,3) використання розглянутих схем резервування оптоволоконна розраховується наступним чином [42]:

$$P_{f(ij)}^{ONU_n} = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{C(is)}) (1 - P'_{C(is)}) \cdot (1 - P_{C(sj)}) (1 - P'_{C(sj)}) \quad (3.4)$$

де $P_{C(is)}, P'_{C(is)}, P_{C(sj)}$ і $P'_{C(sj)}$ представляють імовірність перерізу розподільчого волокна, резервного розподілу, фідера та резервного фідера, відповідно, де s представляє розгалужувач у PON.

(3) Сегмент інтерфейсу FC-FiWi. Розміщений ONU-MPPS використовує бездротову сітчасту мережу для бездротової маршрутизації трафіку від ONU до іншого ONU. Потім він оптично пересилає трафік до OLT. Нехай $P_f^{Path_i^u(y,x)}$ буде ймовірністю того, що i -й бездротовий шлях $Path_i^{w(y,x)}$ між ONU_x та ONU_y виходить з ладу. Тоді нехай NW_i MPs мають бездротове з'єднання з MPP_y , і MPP_x знаходиться по шляху, а $MP_{izk} \in MP$, який знаходиться на відстані k бездротових стрибків. Загалом, для заданої ймовірності відмови ONU, MPP, MP, MAP і FC ймовірність підключення FiWi STA в мережах FC-FiWi розраховується наступним чином [13]:

$$P_{C(ij)}^{STA_k} = (1 - P_f^{MAP_q}) (1 - P_f^{MP_1}) \dots (1 - P_f^{MP_l}) (1 - P_f^{MP_y}) \left(1 - \prod_{\forall |x \leftrightarrow y} \left[1 - \left(1 - \prod_{i=1}^{N_{WP(y,x)}} P_f^{Path_i^u(y,x)} \right) (1 - P_f^{ONU_x}) \right] \right) \cdot \left(\prod_{n=1}^N (1 - P_{C(ij)}) (1 - P'_{C(ij)}) \right) \cdot \left(\prod_{n=1}^N (1 - P_{f(ij)}^{ONU_n}) \cdot \mathfrak{R}^{FC} \right) \quad (3.5)$$

де STA_k з'єднаний з MAP , який послідовно з'єднаний з MPP_y , через ряд проміжних MP_s , тобто MP_1, \dots, MP_1 , тоді як значення в останньому члені підставляються з рівнянь (3.1) і (3.2).

Обчислювальне завантаження слід виконувати, якщо час виконання завдання на периферійному пристрої локально довший, ніж час відгуку при завантаженні цього завдання на туманний сервер.

Ми визначаємо цю різницю в часі відгуку як виграш у навантаженні [14]. Ефективність часу відгуку визначається як відношення приросту навантаження до часу відгуку завдання, яке локально виконується на периферійних пристроях [15]. Далі, нехай затримка пакету позначає час очікування пакету в буфері даних. Середня затримка пакету від периферійного пристрою до OLT (тобто наскрізна) є сумою затримки поширення та середньої наскрізної затримки пакету FiWi трафіку. Продуктивність запропонованої схеми досліджено на прикладі системи опитування з чергами M/G/1 [16].

Зокрема, ми припускаємо, що MP/MAP обслуговують пакети в порядку черги, а кожен MP/MAP в бездротовій mesh-мережі моделюється як черга M/M/1. Таким чином, загальні середні наскрізні затримки пакетів для FC, централізованої хмари та FiWi наведені в [17]:

$$D_{FC} = \begin{cases} \frac{T_c}{2N}(3N+1+p^{FC}) & \text{for single-hop} \\ \left[\frac{T_c}{2N}(3N+1+p^{FC}) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{\mu C_i} + \frac{1}{2\mu C_i} + \frac{P_i}{\mu C_i - \lambda_i} \right], & \text{for multi-hop} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$D_{cloud} = \begin{cases} \frac{T_c}{2N}(3N+1+p^{cloud}) + T_{prop3}, & \text{for single-hop} \\ \frac{T_c}{2N}(3N+1+p^{cloud}) + T_{prop3} + \\ \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{\mu C_i} + \frac{1}{2\mu C_i} + \frac{P_i}{\mu C_i - \lambda_i} \right], & \text{for multi-hop} \end{cases} \quad (3.7)$$

Таблиця 3.1 - Параметри системи та значення за замовчуванням

Параметри	Опис	Значення
C, C_{cloud}, C_{FC}	ONU-AP. Cloud, пропускна здатність туману	6900 Мбіт ⁻¹ , 10 Гб ⁻¹ , 10 Гб ⁻¹
N	Кількість ONUS у мережі FC-FiWi	32,64
M	Кількість бездротових STAs	8-100
$T_{prop1}, T_{prop2}, T_{prop3}, T_{prop4}$	Затримка поширення по повітрю між периферійним пристроєм/STA і ONU-AP. Затримка поширення між ONU-AP і OLT. Затримка волокна між OLT і звичайною хмарою. Затримка волокна між ONU-AP і сервером FC	0.000333 мс, 0.05 мс, 50 мс, 0.01 мс
T_g, T_c	Час захисту між двома послідовними слотами, час циклу опитування PON	1 μ s, мс
$T_{pon}^{ms}, T_{wl}^{ms}, P_f^{MPP}, P_f^{MP}, P_f^{MAP}$	Передача MPCP і STA Повідомлення PS-Poll Імовірність відмови MPP, MP MAP	0.512 μ s, 0.12 μ s 10 ⁻⁷

$$D_{fiwi} = \begin{cases} \frac{\lambda \bar{X}^2}{2(1-p^{fiwi})} + \frac{(3N-p^{fiwi})\bar{V}}{2(1-p^{fiwi})} + \frac{\sigma_v^2}{2\bar{V}} + \bar{X} + 2T_{prop2} + \frac{(P^{tx} + P^{rx})}{r_d} + 2T_{prop1}, & \text{for single-hop} \\ \frac{\lambda \bar{X}^2}{2(1-p^{fiwi})} + \frac{(3N-p^{fiwi})\bar{V}}{2(1-p^{fiwi})} + \frac{\sigma_v^2}{2\bar{V}} + \bar{X} + 2T_{prop2} + \frac{(P^{tx} + P^{rx})}{r_d} + 2T_{prop1} + \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{\mu C_i} + \frac{1}{2\mu C_i} + \frac{p_i}{\mu C_i - \lambda_i} \right], & \text{for multi-hop} \end{cases} \quad (3.8)$$

де r_d - максимальна пропускна здатність, яку може забезпечити бездротовий канал зв'язку, визначена за допомогою добре відомої пропускної здатності Шенона.

3.4 Реалізація та валідація

Ефективність запропонованої нами схеми оцінюється за допомогою чисельних результатів і демонстрації підтвердження концепції. Загальний підхід до концептуальної перевірки показано на рисунку 3.5. Ми провели демонстрацію підтвердження концепції для перевірки та вимірювання продуктивності нашої схеми з точки зору різних метрик продуктивності.

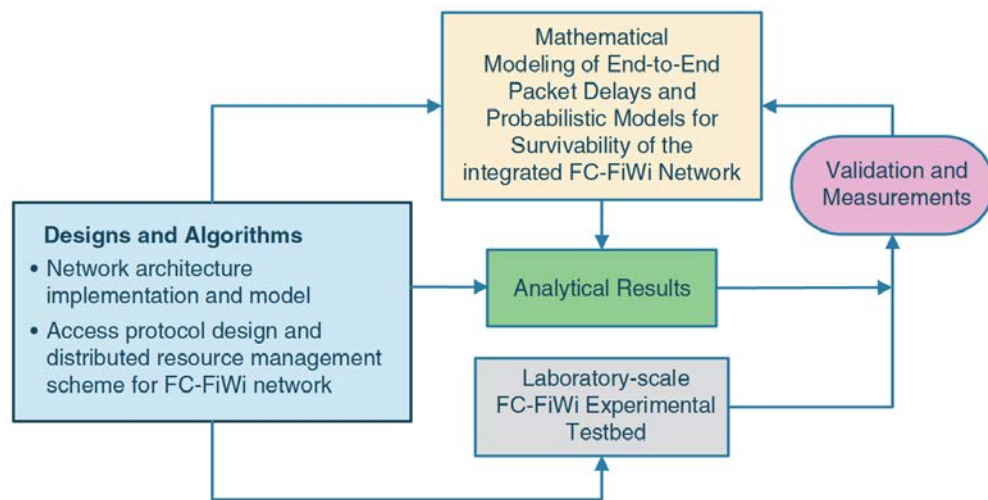


Рисунок 3.5 - Концептуальний підхід до перевірки: моделювання, чисельне моделювання

Ми розглядаємо мережу FC-FiWi, яка складається з інтегрованого ONU-AP, пов'язаного з одним периферійним пристроєм (ноутбук Dell Inspiron 3521). Для розробки інфраструктури туманних обчислень на межі мережі FC-FiWi розгортається хмарна платформа з відкритим вихідним кодом OpenStack++, в якій розгортається VM, що працює на туманному сервері з чотирма ядрами віртуальних процесорів з тактовою частотою 3,6 ГГц. Для екземпляра VM виділяється диск об'ємом 50 ГБ і 10 ГБ оперативної пам'яті. Для емуляції централізованої хмари було використано хмару Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) як публічного хмарного провайдера.

У розділі представлено отримані нами результати для різних мережевих конфігурацій. WLAN з дуже високою пропускнуою здатністю IEEE 802.11ac працює зі швидкістю 6900 Мбіт/с⁻¹. Ми змінювали коефіцієнт трафіку FiWi від 0,3 до 0,9. Навантаження на трафік при інтегрованому ONU-AP/MPP не є значним, а максимальний трафік не перевищує 1,20 байт кадру PS-Poll.

Навантаження даних обчислювальної задачі розбивається на пакети, а додаток - на дрібнозернисті задачі, подібно до [18]. Вважається, що обчислювальна потужність централізованої хмари в 1000 разів вища, ніж у туману.

Для ілюстрації розглядається додаток для розпізнавання облич, хоча слід зазначити, що запропонована схема може бути застосована до будь-якого додатку. Решта параметрів наведені в таблиці 3.1.

Нагадаємо, що живучість є однією з найважливіших проблем, які необхідно вирішувати в мережах FC-FiWi. Рисунок 3.6 ілюструє позитивний вплив наших схем забезпечення живучості, де ONU бездротово з'єднується з сусідніми ONU через бездротові комірчасті шляхи з трьома переходами в схемі бездротового захисту.

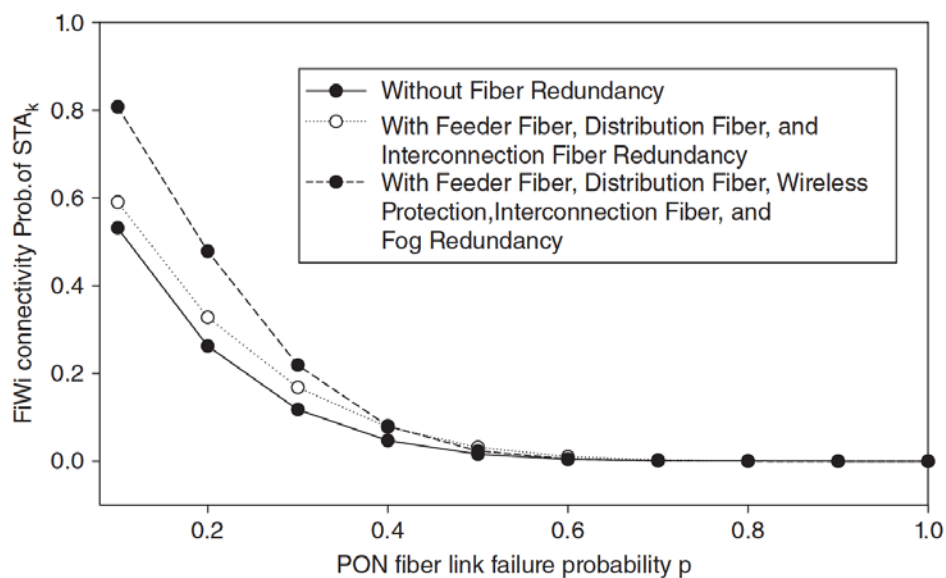


Рисунок 3.6 - Ймовірність з'єднання FiWi периферійного пристрою в порівнянні з ймовірністю відмови оптичної магістралі

З отриманого результату на рис. 3.6 видно, що спільне використання схем резервування оптоволокна, розподільчого оптоволокна, з'єднувального оптоволокна, захисту бездротового зв'язку і туману значно покращує з'єднання FiWi для різних ймовірностей відмови оптоволоконного каналу PON порівняно зі сценарієм без резервування оптоволокна. Наприклад, ймовірність підключення FiWi для STA на рівні 0,81 досягається для типового сценарію з ймовірністю відмови волоконно-оптичної лінії PON на рівні 0,1. Очевидно, це

показує, що запропонована нами схема здатна забезпечити високонадійні широкосмугові та туманні обчислювальні послуги.

Затримка залежить від трафікового навантаження, і при збільшенні трафікового навантаження FiWi обидві затримки D_{FC} D_{cloud} зростають. Подібна тенденція спостерігається і в сценарії затримки пакетів FiWi. Ми помічаємо, що $D_{cloud} > D_{FC}$, як показано на рисунку 3.7.

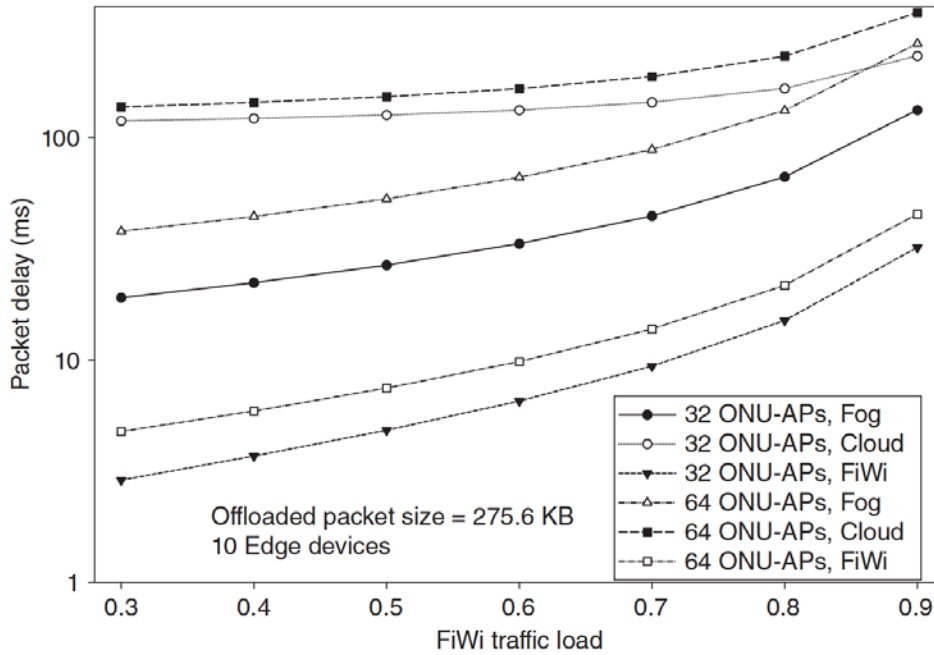


Рисунок 3.7 - Ефективність затримки

Наприклад, у сценарії з 32 ONU-AP/MPP, D_{FC} і D_{cloud} нижче 133,5 мс і 233,50 мс, відповідно, для всіх навантажень трафіку FiWi. Згідно з рівняннями 3.6, 3.7 і 3.8, на затримку, а не тільки на функцію часу циклу опитування PON, також значно впливає затримка розповсюдження і сукупне трафікове навантаження на ONU-AP/MPP. Наприклад, для заданого порогового значення затримки поширення туману в 44,5 мс (як приклад) верхня межа допустимого сукупного навантаження на трафік FiWi для 32 точок доступу ONU-AP/MPP не повинна перевищувати 0,7. Вирішення питання про те, куди завантажувати обчислювальні завдання, є ще однією важливою проблемою в мережах FC-FiWi, для якої рисунок 3.7 надає цінну інформацію. Для типового випадку з 32 ONU-

AP/MPP, при навантаженні трафіку FiWi менше або дорівнює 0,5, туман відчуває затримку менше 26,74 мс, порівняно з 126,7 мс у випадку хмари. Це означає, що багато чутливих до затримок додатків можна завантажувати на FC-FiWi, а не на централізовану хмару.

Рисунок 3.8 підтверджує відповідність між отриманими експериментальними та аналітичними результатами.

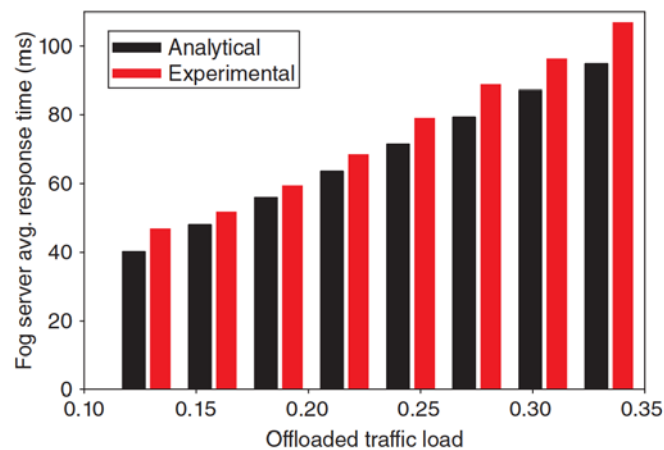


Рисунок 3.8 - Результати впливу трафікового навантаження на середній час відгуку туманного сервера

Зокрема, на рис. 3.8 показано, що середній час відгуку туману є дещо вищим за відповідні аналітичні значення при максимальному навантаженні трафіку FiWi 0,95 і тривалості циклу опитування 5 мс. Наприклад, середній час відгуку туманного сервера 68,7 мс був отриманий при завантаженості трафіку 0,22, порівняно з відповідним аналітичним значенням 63,6 мс.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі досліджено мережі FC-FiWi на основі інтеграції EPON, WLAN та туманних обчислень для створення багатоцільових активів. Для ефективної роботи інтегрованої мережі ми розробили дворівневу уніфіковану схему

управління ресурсами на основі TDMA для одночасного планування трафіку FiWi, туманних і хмарних обчислень.

Хоча запропонована мережа є стійкою до переривання зв'язку, центральна OLT є єдиною точкою відмови. Для оцінки живучості як для FiWi, так і для туманних обчислювальних сегментів були запропоновані та оцінені різні схеми захисту. Ми розробили аналітичну базу для дослідження продуктивності затримки пакетів як для FiWi, так і для хмарних обчислень.

Отримані результати показують ефективність впровадження туманних обчислень у мережах FiWi. Зокрема, запропонована схема забезпечує низьку наскрізну затримку навантаження та високу надійність на межі мережі FC-FiWi без негативного впливу на мережеву продуктивність широкосмугового трафіку FiWi. Отримані результати показують, що для типового сценарію з 32 ONU-AP/MPP і навантаженням на тракт FiWi 0,6 затримка пакетів в тумані і хмарі становить 33,41 мс і 133,41 мс, відповідно, без погіршення продуктивності мережі для тракту FiWi.

З огляду на зростаючий прогрес і інтерес до мереж 5G, мережі доступу FiWi мають великий потенціал для появи різноманітних нових додатків і створення нових захоплюючих можливостей. Отже, отримані результати відкривають можливості для подальших удосконалень. Деякі з потенційних напрямків майбутніх досліджень, які можуть ґрунтуватися на виконаній роботі наведені нижче: - FC-FiWi через мережі блокчейн. Блокчейн - це розподілений і прозорий публічний реєстр, в якому записуються всі дані про транзакції, що дозволяє всім учасникам, які не довіряють один одному, взаємодіяти один з одним без стороннього посередника. Технологія блокчейн складається з криптографії, математики, алгоритмів та економічних моделей, об'єднуючи однорангові мережі з використанням алгоритму розподіленого консенсусу. Серед багатьох платформ технології блокчейн біткоїн є однією з найпопулярніших децентралізованих криптовалют, заснованих на технології блокчейн. В основі технології блокчейн лежать механізми децентралізованого консенсусу (тобто всі вузли блокчейну погоджуються з одним і тим же станом системи), які були

вивчені та застосовані в галузі розподілених обчислень. Однак публічна мережа блокчейн стикається з проблемами масштабування, особливо з точки зору пропускної здатності мережі, розміру та вимог до зберігання даних, а також демонструє довгий хвіст розподілу затримки поширення інформації, від якого значною мірою залежить безпека блокчейну. Однак довші затримки збільшують можливість кібератак. У своєму нинішньому вигляді блокчейн не придатний для обробки важких обчислень. Для вирішення цих проблем цікавою темою були б мережі FC-FiWi.

- Гомогенні та гетерогенні машини. Поточна реалізація алгоритмів, моделей і конфігурації хостів передбачає однорідність всіх машин в тумані і віддаленій хмарі. Однак попередні дослідження показали, що хмарне середовище здебільшого є гетерогенним середовищем, в якому машини однієї категорії мають різні можливості. Аналогічно, туман може бути розгорнутий з використанням декількох серверів з певною гетерогенністю. У подальшій роботі запропоновані моделі та результати можуть бути розширені за рахунок врахування машин з різнорідними можливостями. - Швидко рухомі та квазістаціонарні користувачі. Запропоновані моделі та алгоритми не враховують мобільність. Очевидно, що завантаження обчислень у туман є складним завданням через переривчасті зв'язки між туманом і мобільними користувачами.

Цікавим розширенням запропонованих рішень було б включення широкого спектру реалістичних сценаріїв мобільності з прогнозами зв'язку. Більш конкретно, привабливою темою для подальшої роботи може стати вплив швидких і квазістаціонарних користувачів на продуктивність мереж FC-FiWi.

4 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 «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» 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.

4.1 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 «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» 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. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – 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	48	50	52
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		50,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	63	60	62
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	61,7		

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 [43]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 50,0, k_{\text{теор}} = 61,7$ балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 50,0 + 0,4 \cdot 61,67 = 54,67 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – 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 «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій», даний рівень становить 54,67 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

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

4.2.1 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 [43]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

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

$$Z_o = 16120,00 \cdot 32 / 21 = 24563,81 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – 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 науково-дослідної роботи	16120,00	767,62	32	24563,81
Ст. науковий співробітник	15890,00	756,67	32	24213,33
Консультант (фахівець служби підтримки функціонування 5G мереж)	16000,00	761,90	8	6095,24
Провідний фахівець	9500,00	452,38	21	9500,00
Всього				64372,38

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

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

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

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

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

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) [43];

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, табл. 4.5.

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

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

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

$$Z_{pl} = 59,22 \cdot 6,00 = 355,34 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Налаштування робочого місця дослідника	6,00	2	1,10	59,22	355,34
Інсталяція програмного забезпечення моделювання та розробки	5,90	4	1,50	80,76	476,48
Компіляція моделі мережі 5G на основі оптичних технологій	8,00	5	1,70	91,53	732,21
Тренування моделі	4,00	4	1,50	80,76	323,04
Проведення цифрового експерименту	6,00	3	1,35	72,68	436,10
Формування бази даних результатів	15,20	3	1,35	72,68	1104,78
Всього					3427,95

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

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

$$Z_{\text{дод}} = (64372,38 + 3427,95) \cdot 12 / 100\% = 8136,04 \text{ грн.}$$

4.2.2 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:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (64372,38 + 3427,95 + 8136,04) \cdot 22 / 100\% = 16706,00 \text{ грн.}$$

4.2.3 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 «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій».

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:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

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.

$$M_1 = 10,0 \cdot 14,50 \cdot 1,06 - 0 \cdot 0 = 153,70 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – 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 креслярський (А3)	14,50	10,0	0	0	153,70
Папір креслярський (А1)	30,00	8,0	0	0	254,40

продовження таблиці 4.6 – 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 (A4) 500-80	184,00	2,0	0	0	390,08
Папір для заміток (A5) 500-70	116,00	2,0	0	0	245,92
Органайзер офісний	177,00	4,0	0	0	750,48
Начиння канцелярське	169,00	4,0	0	0	716,56
Картридж для принтера (HP-2002)	1056,00	1,0	0	0	1119,36
Картридж для плотера (HP-2106)	400,00	2,0	0	0	848,00
Диск оптичний (CD-RW)	32,00	3,0	0	0	101,76
Диск оптичний (CD-R)	26,00	3,0	0	0	82,68
USB-пам'ять (16 ГБ)	126,00	2,0	0	0	267,12
Всього					4930,06

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

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

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

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

$$K_6 = 1 \cdot 1568,00 \cdot 1,06 = 1662,08 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Спеціалізовані радіоінтерфейси	1	1568,00	1662,08
Блок живлення універсальний	1	3650,00	3869,00
Всього			5531,08

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 4360,00 \cdot 1 \cdot 1,06 = 4621,60 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.8:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спекустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Обладнання радіопередавача	1	4360,00	4621,60
Обладнання радіоприймача	1	3120,00	3307,20
Серверне обладнання 5G мережі	1	27899,00	29572,94
Всього			37501,74

4.2.6 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.

$$B_{\text{прог}} = 7800,00 \cdot 1 \cdot 1,06 = 8268,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.9:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	7800,00	8268,00
Пакет Microwave Office	1	7150,00	7579,00
Компютерні моделі радіомережі	1	5210,00	5522,60
Компютерні моделі оптичної мережі	1	5890,00	6243,40
Всього			27613,00

4.2.7 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:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

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.

$$A_{обл} = (37999,00 \cdot 2) / (4 \cdot 12) = 1583,29 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс системи проектування	37999,00	4	2	1583,29
Персональний комп'ютер дослідника мереж	22369,00	4	2	932,04
Спеціалізоване робоче місце дослідника	8900,00	5	2	296,67
Пристрої виводу інформації	6500,00	4	2	270,83
Програмне забезпечення MICROSOFT WINDOWS 11	5869,00	4	2	244,54
Програмне забезпечення MICROSOFT OFFISE 2021 Pro	5120,00	4	2	213,33
Оргтехніка	8900,00	5	2	296,67
Приміщення лабораторії досліджень	410000,00	25	2	2733,33
Всього				6570,71

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot \Pi_e \cdot K_{vni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

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, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 576,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс системи проектування	0,32	240,0	576,00
Персональний комп'ютер дослідника мереж	0,25	240,0	450,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника	0,08	240,0	144,00
Пристрої виводу інформації	0,20	5,0	7,50
Обладнання радіопередавача	0,10	50,0	37,50
Обладнання радіоприймача	0,07	50,0	26,25
Серверне обладнання 5G мережі	0,11	50,0	41,25
Оргтехніка	0,50	2,1	7,88
Всього			1290,38

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» 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» відсутні.

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

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

4.2.11 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:

$$I_{\text{в}} = (Z_{\text{о}} + Z_{\text{р}}) \cdot \frac{H_{\text{ів}}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де $H_{\text{ів}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{ів}} = 55\%$.

$$I_{\text{в}} = (64372,38 + 3427,95) \cdot 55 / 100\% = 37290,18 \text{ грн.}$$

4.2.12 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:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

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

$$B_{нзв} = (64372,38 + 3427,95) \cdot 100 / 100\% = 67800,33 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

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

$$B_{заг} = 64372,38 + 3427,95 + 8136,04 + 16706,00 + 4930,06 + 5531,08 + 37501,74 + 27613,00 + 6570,71 + 1290,38 + 0,00 + 0,00 + 37290,18 + 67800,33 = 281169,84 \text{ грн.}$$

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

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

$$3B = 281169,84 / 0,95 = 295968,25 \text{ грн.}$$

4.3 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 «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» 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:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

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

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n=0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n=1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n=2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n=3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Приймемо $n=3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

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 $B = 295968,25$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [43].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 296,0 \cdot 0,17 = 10,38.$$

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

4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» складають 295968,25 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій» 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.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Під час дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій виникає ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

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 блискість;
- підвищення яскравість;
- недостатня освітленість робочої зони;

2. Психофізіологічні:

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

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Під робочим місцем дослідника мережі 5G на основі оптичних технологій маєтись на увазі зона його трудової діяльності, оснащення необхідними засобами праці.

Загальною вимогою раціональної організації робочих місць є створення працівникам максимальної зручності для здійснення їх діяльності, вивільнення від нераціональних переміщень та рухів, зниження на цій основі витрат праці на виконувану роботу. Економія часу і сил працівника - головні критерії раціональності організації робочих місць.

Робоче місце і взаємне розташування усіх її елементів має відповідати антропометричним, фізичним і неординарним психологічним вимогам [2]. Важливе значення має також характеру роботи. Зокрема, з організацією робочого місця проектувальника мають бути дотримані такі основні умови:

- оптимальне розміщення устаткування, що до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи, і переміщення;
- необхідне природне, і штучне висвітлення до виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму, який не перевищує допустимого значення;
- достатня вентиляція робочого місця;

Головними елементами робочого місця дослідника мережі 5G на основі оптичних технологій є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до вимог [45].

Необхідно передбачити при проектуванні можливість різного розміщення документів: збоку від ПК, між монітором і клавіатурою і т.п. Крім того, у випадках, коли ПК має низьку якість зображення, наприклад, помітні миготіння, відстань від очей до екрана роблять більшою (близько 700 мм), ніж відстань від ока до документа (300...450 мм). В загальному випадку, при високій якості зображення на ПК відстань від очей користувача до екрана, документа і клавіатури може бути рівним.

Велике значення надається характеристикам робочого крісла [46]. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні дослідника його поза повинна бути фізіологічно правильно обгрунтованою, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що впливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидячи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

- допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечити вільне переміщення корпусу і кінцівок тіла один щодо одного;

- допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (в межах від 400 до 550 мм);

- мати злегка увігнуту поверхню, мати невеликий нахил, тому поверхню сидіння рекомендується робити м'якою, передній край закругленим, а кут нахилу спинки робочого крісла - регульованим.

Приміщення, де здійснювалася дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповнене, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами і малим числом заземлених приладів) [47].

На робочому місці з усього обладнання металевим є лише корпус системного блоку комп'ютера, в якого крім робочої ізоляції передбачений елемент для заземлення та провід з заземлюючий жилою для приєднання до джерела живлення.

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.

Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

У випадку виникнення аварійної ситуації працівник зобов'язаний:

- у всіх випадках виявлення пошкодження проводів електричного живлення, несправності заземлення та інших пошкодженнях електрообладнання, виникненні запаху гарі, диму - негайно вимкнути електричне живлення і

повідомити про аварійну ситуацію свого безпосереднього керівника й чергового електрика;

- при попаданні людини під електричну напругу негайно звільнити її від дії струму шляхом вимкнення електричного живлення, до прибуття лікаря надати потерпілому долікарську медичну допомогу;

- при будь-яких випадках порушень роботи технічного обладнання або програмного забезпечення негайно викликати представника технічної служби з питань експлуатації обчислювальної техніки;

- у випадку виникнення різі в очах, різкого погіршення зору, виникнення головного болю, больових відчуттів у пальцях та кистях рук, посилення серцебиття - негайно припинити роботу з використанням ПК, повідомити про те, що сталося, свого безпосереднього керівника й звернутися до медичної установи;

- при загорянні обладнання негайно відключити його від електромережі;

- про загорання повідомити свого безпосереднього керівника, оперативного чергового, пожежну службу; ужити заходів щодо ліквідації вогню за допомогою вуглекислотного або порошкового вогнегасника.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Робота, яка виконується дослідником мережі 5G на основі оптичних технологій, згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [48]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 5.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [49]).

Таблиця 5.1 – 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 система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

Вимірювання параметрів мікроклімату проводиться на робочому місці і в робочій зоні на початку, в середині та в кінці робочої зміни. Вимірювання здійснюються не менше 2-х разів на рік (теплий та холодний періоди року) у порядку поточного санітарного нагляду, а також при прийманні до експлуатації нового технологічного устаткування, внесенні технічних змін в конструкцію діючого устаткування, організації нових робочих місць тощо.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Для визначення небезпечності досліджується вплив цих речовин на організм людини і встановлюють безпечні для людини концентрації та дози, які можуть потрапити різними шляхами в організм людини.

Для створення здорових і безпечних умов праці потрібно мати гігієнічне нормування шкідливих речовин, надійні способи визначення їх концентрацій у повітрі і сучасне технічне та організаційне забезпечення їх знешкодження.

В приміщенні, де здійснюється дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій 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 5.2.

Таблиця 5.2 – 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	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Для 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).

5.2.3 Виробниче освітлення

Серед чинників зовнішнього середовища, що впливають на організм людини в процесі праці, світло посідає одне з перших місць. Адже відомо, що майже 90 % усієї інформації про довкілля людина одержує через органи зору. Підчас здійснення будь-якої трудової діяльності втомлюваність очей, в основному, залежить від напруженості процесів, що супроводжують зорове сприйняття. До таких процесів належать адаптація, акомодация та конвергенція.

Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. У разі поганого освітлення людина швидко втомлюється, працює менш

продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 5.4 (відповідно ДБН В.2.5-28-2018 [50]):

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнювання 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	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

5.2.4 Виробничий шум

Для робочих місць в приміщеннях із ПК характерна наявність механічних шумів (виникають внаслідок коливання деталей машин та їхнім взаємним переміщенням), аеродинамічних шумів (виникають в пружних конструкціях у газі або рідині) та шумів електричних машин.

Деякі ПК є потенційними джерелами цілого ряду звукових коливань як чутого, так і ультразвукового діапазону. Найчастіше рівні акустичного випромінювання, що виходить від ПК, охоплюють діапазон частот від 6,3 до 40 кГц.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [51]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – 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.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Під час дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій існує ризик виникнення підвищеного рівня електромагнітного поля. Несприятливу дію на організм людини мають електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, джерелами яких є телевізійні і радіомовні станції, пристрої стільникового радіозв'язку, апарати високочастотного нагрівання і навіть побутова апаратура.

Електромагнітні поля чинять термічний і морфологічний вплив на організм людини, викликаючи в ньому функціональні зміни.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 - 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	15кВ / м
для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання (MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03), а також дотримувати регламентовані режими праці і відпочинку.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

5.3.1 Дія повені на виробничі приміщення

Повінь – це тимчасове заповнення частини суші водою в результаті інтенсивного танення снігів, сильних злив, забруднення русел рік під час льодоходу, утворення приливної хвилі, зсувів і обвалів гірських порід, раптового прориву дамб та гребель.

Критерієм стійкості виробничих приміщень в умовах дії повені є фактична швидкість потоку затоплення та глибина затоплення, в залежності від яких можна визначити ступінь руйнування споруд [52].

Уражаюча дія хвилі затоплення визначається її швидкістю і висотою.

Наприклад, цегельні житлові будинки одержують:

- слабкі руйнування при $V_{\phi} = 1,5$ м/с, $h_3 = 2,5$ м;
- середні руйнування при $V_{\phi} = 2,5$ м/с, $h_3 = 4$ м;
- сильні руйнування при $V_{\phi} = 3$ м/с, $h_3 = 6$ м.

5.3.2 Оцінка стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії повені

Вихідні дані: $V_{3B} = 0,6$ м/с, $h_{3B} = 1,4$ м, $h = 4$ м, $h_M = 1$ м, $\alpha = 27^\circ$.

Визначаємо максимальну швидкість потоку при повені

$$V_{\max} = V_{3B} \sqrt[3]{\left(\frac{h_{3B} + h}{h_{3B}}\right)^2} \quad [\text{м/с}]; \quad (5.1)$$

$$V_{\max} = 0,6 \sqrt[3]{\left(\frac{1,4+4}{1,4}\right)^2} = 1,4757 \text{ (м/с)}.$$

Знаходимо ширину затопленої території

$$L = \frac{h}{\sin \alpha} \quad [\text{м}]; \quad (5.2)$$

$$L = \frac{4}{\sin 27^\circ} = 9,014 \text{ (м)}$$

Визначимо глибину затоплення

$$h_{3am} = h - h_M \quad [\text{м}]. \quad (5.3)$$

$$h_{3am} = 4 - 1 = 3 \text{ (м)}.$$

Знайдемо фактичну швидкість потоку затоплення

$$V_3 = V_{max} f \text{ [м/с];} \quad (5.4)$$

$$V_3 = 1,4757 \cdot 1,1 = 1,6233 \text{ (м/с),}$$

де $f = 0,3 \dots 1,3 = 1,1$ – параметр, що враховує зміщення об'єкта від русла річки.

Оскільки $V_3 = 1,6233$ м/с і $h_{зам} = 3$ м, то виробниче приміщення отримає слабкі руйнування від повені.

5.3.3 Розробка превентивних заходів по підвищенню стійкості роботи в умовах дії НС

Основний напрям боротьби з повенями в зменшенні максимальних витрат води в річці завдяки перерозподілу стоку в часі (насадження лісозахисних смуг, оранка ґрунту поперек схилу, збереження узбережних смуг рослинності, терасування схилів тощо). Для середніх та великих річок досить дійовим засобом є регулювання паводкового стоку за допомогою водосховищ. Окрім того, для захисту від повеней широко застосовується давно відомий спосіб – влаштування дамб. Для ліквідації небезпеки утворення заторів проводиться розчищення та заглиблення окремих ділянок русла ріки, а також руйнування криги вибухами за 10-15 днів до початку льодоходу.

Сигнал про очікувану повінь передається з деяким випередженням для того, щоб населення покинуло своєчасно загрозливий район і вийшло за межу осередку повені.

Люди, матеріальні цінності, складські приміщення, техніка та інше зостануться не ураженими тільки в тому випадку, коли будуть знаходитись вище максимально можливого рівня підйому води, очікуваного на даній території. В

інших випадках прийдеться ризикувати і приймати міри по евакуації людей, тварин, техніки, майна тощо.

5.4 Висновки до розділу 5

Було досліджено стійкість роботи в умовах впливу загрозливих чинників НС. Із дослідження впливу повені на стійкість роботи виробничого приміщення можна сказати, що виробниче приміщення отримає слабкі руйнування від повені. Тому розроблено превентивні заходи по підвищенню безпеки роботи в умовах дії НС.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі було отримано такі основні результати:

- визначено ключові тенденції та технології розвитку телекомунікаційної інфраструктури для підвищення пропускної здатності та доступу до Інтернету;
- обрано методи поєднання оптичних мереж і бездротових технологій для надання широкого спектру послуг та задоволення потреб користувачів;
- оптимізовано використання SDN та NFV для метро-мереж доступу, що дозволяє операторам забезпечити гнучкість, ефективність та швидкість реакції на зміни в телекомунікаційному середовищі;
- обрано методи поєднання волоконно-оптичного доступу та туманних обчислень у мережах 5G, що сприяє покращенню швидкості, ефективності та безпеки комунікацій, що є критичним для успішного розвитку та впровадження мережі п'ятого покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бешлей М.І. Підвищення ефективності роботи гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями / Бешлей М.І., Селюченко М.О., Гуськов П.О., Масюк А.Р. // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаціотелекомунікаційні технології»: матеріали науково-технічної конференції (17-20 листопада 2015 р. м.Київ), Т.2 – К: ДУТ. – 2015. – С. 49–50.

2. Бешлей М.І. Розробка і дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі / Климаш М.М., Масюк А.Р. // X Міжнародна науковотехнічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016. - К.: НТТУ «КПІ». – С. 70-72.

3. Климаш М.М. Модель адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах / М.М. Климаш, М.І. Бешлей, А.Р. Масюк // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: збірник матеріалів конференції (22-25 квітня 2015р., м. Київ, Україна), 2015 - К.: НТТУ «КПІ». – С.40-42.

4. Селюченко М.О. Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти - операторській мережі // Селюченко М.О., Бешлей Г.В., Масюк А.Р., Бешлей М.І. // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015. – P. 125-128.

5. Климаш М.М. Аналіз властивостей вихідного потоку в системі розподілу інформації із самоподібним вхідним трафіком і обслуговуванням за порядком черги / Климаш М.М., Бугиль Б.А, Масюк А.Р. // Науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій": Програма. К.: НТУУ "КПІ", 2011. - С. 37-38.

6. Кожуров, Д. В. Модель обміну керуючою інформацією в сервісноорієнтованій Cloud-мережі / Д.В. Кожуров, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі

телекомунікацій-2013 (СПТЕЛ-2013), 30 жовт.- 2 листоп. 2013 р. — Львів, 2013. — С. 105-108.

7. Бешлей М.І. Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR / Климаш М.М., Масюк А.Р., Бешлей Г.В., Бешлей М.І. // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (3-5 листопада 2016 р. м. Чернівці), 2016. - С. 35-36.

8. Климаш М.М. Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A [Електронний ресурс] /М.М. Климаш, М.І. Бешлей, О.А. Лаврів, Б.М. Стрихалюк, Г.В. Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 1 (13). – С. 3 - 19.

9. M. P. Belanger, M. O'Sullivan, and P. Littlewood. Margin requirement of disaggregating the dwdm transport system and its consequence on application economics. In 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), pages 1–3, March 2018.

10. M. S. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis, and K. Doppler. Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality. *IEEE Network*, 32(2):78–84, 2018.

11. A. Elrasad, N. Afraz, and M. Ruffini. Virtual dynamic bandwidth allocation enabling true pon multi-tenancy. In 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), pages 1–3, March 2017.

12. M. Ersue. Ecomp: the engine behind our software-centric network. Technical report, AT&T's, 2016.

13. GitHub. Floodlight sdn openflow controller, July. 2018. URL <https://github.com/floodlight/floodlight>. Accessed on July. 2018.

14. S. Miano, M. Bertrone, F. Risso, M. Tumolo, and M.V. Bernal. Creating complex network service with ebpf: Experience and lessons learned. In 2018 IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), 2018.

15. Open ROADM MSA. ROADM Network Model and Device Model. Open ROADM Multi-Source Agreement, <http://www.openroadm.org/home.html>, 2016.

16. F. Paolucci, A. Sgambelluri, F. Cugini, and P. Castoldi. Network telemetry streaming services in sdn-based disaggregated optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 36(15):3142–3149, 2018.
17. C. Raack, R. Wessälly, D. Payne, and M. Ruffini. Hierarchical versus flat optical metro/core networks: A systematic cost and migration study. In *2016 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pages 1–6, May 2016.
18. M. Ruffini. Access-metro convergence in next generation broadband networks. In *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–61, March 2016.
19. M. Ruffini. Multidimensional convergence in future 5g networks. *Journal of Lightwave Technology*, 35:535–549, 2017.
20. M. Ruffini and D.C. Kilper. From central office cloudification to optical network disaggregation. In *2018 IEEE Photonics Society Summer Topicals*, July 2018.
21. E. Walter. Ofc 2018: At&t’s pon& edge compute vision. In *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, pages 1–21, March 2018.
22. B. P. Rimal and I. Lumb. The rise of cloud computing in the era of emerging networked society. In *Cloud Computing: Principles, Systems and Applications*, pages 3–25. Springer, 2017.
23. B. P. Rimal and M. Maier. Workflow scheduling in multi-tenant cloud computing environments. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 28(1): 290–304, 2017.
24. B. P. Rimal, D. P. Van, and M. Maier. Mobile edge computing empowered fiber-wireless access networks in the 5G Era. *IEEE Communications Magazine*, 55(2):192–200, 2017a.
25. B. P. Rimal, D. Pham Van, and M. Maier. Mobile-edge computing versus centralized cloud computing over a converged fiwi access network. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(3):498–513, 2017b.

26. B. P. Rimal, D. Pham Van, and M. Maier. Cloudlet enhanced fiber-wireless access networks for mobile-edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(6):3601–3618, 2017c.
27. E. J. Oughton and Z. Frias. The cost, coverage and rollout implications of 5g infrastructure in britain. *Telecommunications Policy*, 2017.
28. F. Yaghoubi, M. Mahloo, L. Wosinska, P. Monti, F. S. Farias, and J. C. W. A. Costa. A techno-economic framework for 5G transport networks. *IEEE Wireless Communications*, 25: 56–63, 2018.
29. M. Alizadeh, S. Amin, and D. Rönnow. Measurement and Analysis of Frequency-Domain Volterra Kernels of Nonlinear Dynamic 3×3 MIMO Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(7):1893–1905, July 2017.
30. S. Amin, P. Händel, and D. Rönnow. Digital Predistortion of Single and Concurrent Dual-Band Radio Frequency GaN Amplifiers With Strong Nonlinear Memory Effects. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(7):2453–2464, July 2017a.
31. Shoaib Amin, Per N. Landin, Peter Händel, and Daniel Rönnow. 2D Extended envelope memory polynomial model for concurrent dual-band RF transmitters. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(8):1619—1627, 2017b.
32. S. Andersson, L. Sundström, and S. Mattisson. Design considerations for 5g mm-wave receivers. In *2017 Fifth International Workshop on Cloud Technologies and Energy Efficiency in Mobile Communication Networks (CLEEN)*, pages 1–5, 2017.
33. Emil Björnson, Liesbet Van der Perre, Stefano Buzzi, and Erik G. Larsson. Massive MIMO in sub-6 ghz and mmwave: Physical, practical, and use-case differences. *CoRR*, abs/1803.11023, 2018. URL <http://arxiv.org/abs/1803.11023>.
34. A. Chung, M. B. Rejeb, Y. Beltagy, A. M. Darwish, H. A. Hung, and S. Boumaiza. Iq imbalance compensation and digital predistortion for millimeter-wave transmitters using reduced sampling rate observations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pages 1–10, Apr 2018.

35. Z. A. Khan, E. Zenteno, P. Händel, and M. Isaksson. Digital Predistortion for Joint Mitigation of I/Q Imbalance and MIMO Power Amplifier Distortion. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(1):322–333, Jan 2017.
36. A. Kiayani, M. Z. Waheed, L. Anttila, M. Abdelaziz, D. Korpi, V. Syrjäälä, M. Kosunen, K. Stadius, J. Ryynänen, and M. Valkama. Adaptive nonlinear rf cancellation for improved isolation in simultaneous transmit-receive systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(5):2299–2312, 2018.
37. N. Kolomvakis, M. Coldrey, T. Eriksson, and M. Viberg. Massive mimo systems with iq imbalance: Channel estimation and sum rate limits. *IEEE Transactions on Communications*, 65(6):2382–2396, 2017.
38. X. Li, X. Yang, L. Li, J. Jin, N. Zhao, and C. Zhang. Performance analysis of distributed mimo with zf receivers over semi-correlated mathcalK fading channels. *IEEE Access*, 5:9291–9303, 2017.
39. A. F. Molisch, V. V. Ratnam, S. Han, Z. Li, S. L. H. Nguyen, L. Li, and K. Haneda. Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):134–141, Sep 2017.
40. V. Ratnam, A. Molisch, O. Y. Bursalioglu, and H. C. Papadopoulos. Hybrid Beamforming with Selection for Multi-user Massive MIMO Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, pages 1–1, 2018.
41. Resonant Inc. Rf innovation and the transition to 5g wireless technology. White paper, Resonant Inc., 2018.
42. Moray Rumney. Making 5g work: Capacity growth and rf aspects, 2018. URL <https://event.on24.com/wcc/r/1655226/1965C3FC225758E6FD54E97E6B32480E>.
43. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
44. 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

45. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

46. 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_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php.

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

48. 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>

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

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

51. 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>

52. 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
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕЖІ 5G НА ОСНОВІ ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
назва магістерської кваліфікаційної роботи

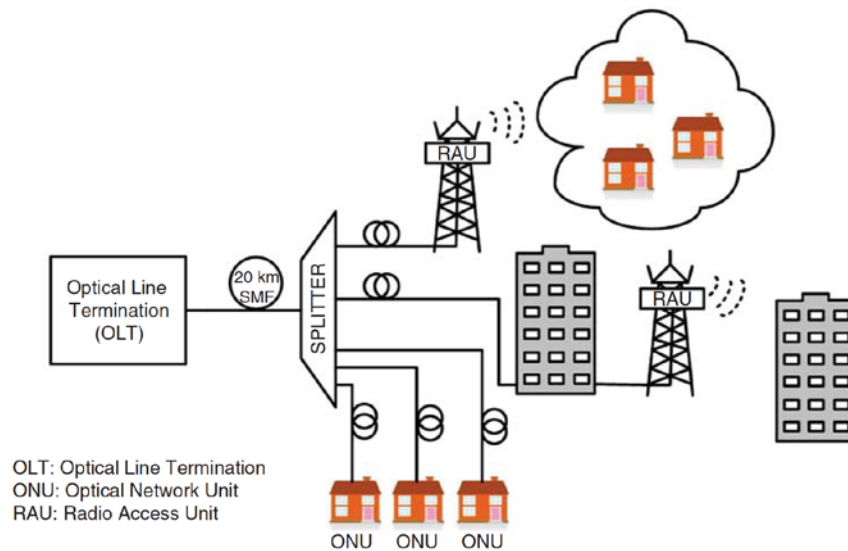


Рисунок 1 - Архітектура мережі оптико-бездротового доступу з використанням RoF в блоках радіодоступу

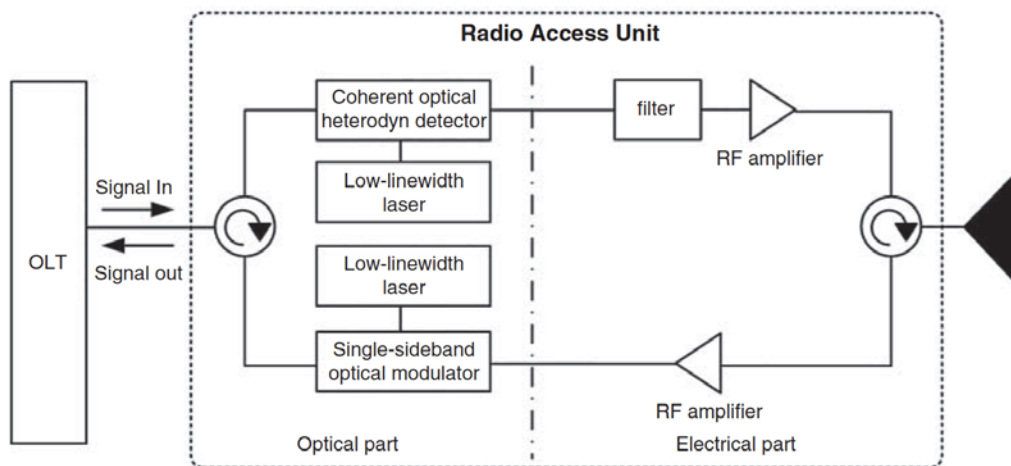


Рисунок 2 - Схема пристрою радіодоступу

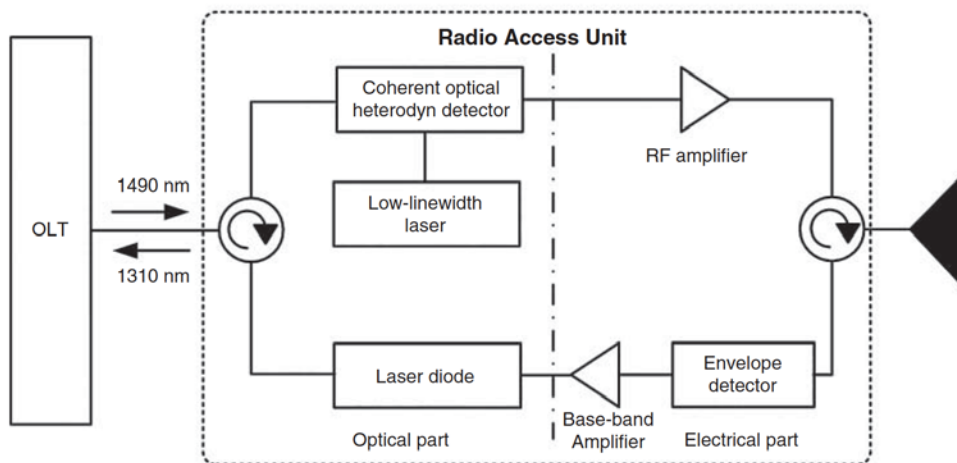


Рисунок 3 - Гібридна архітектура RAU для розширення GPON

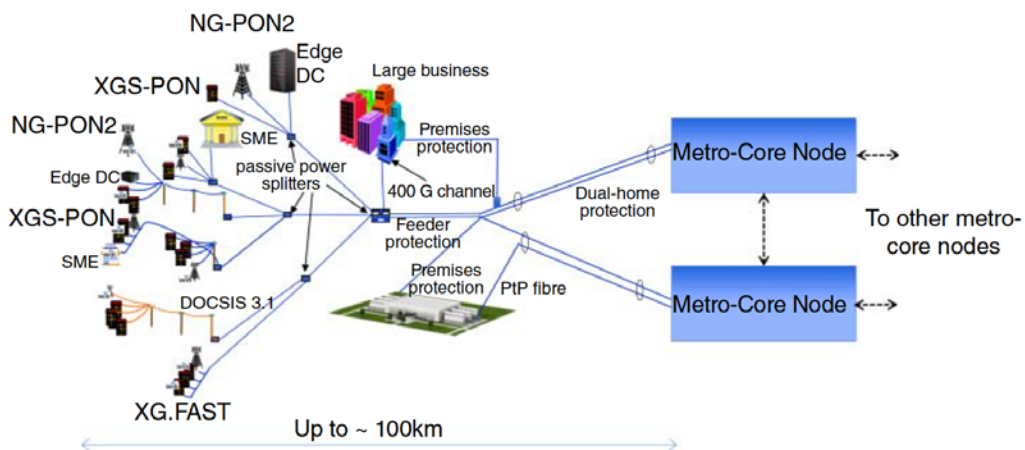


Рисунок 4 - Архітектура LR-PON, що забезпечує масову консолідацію вузлів

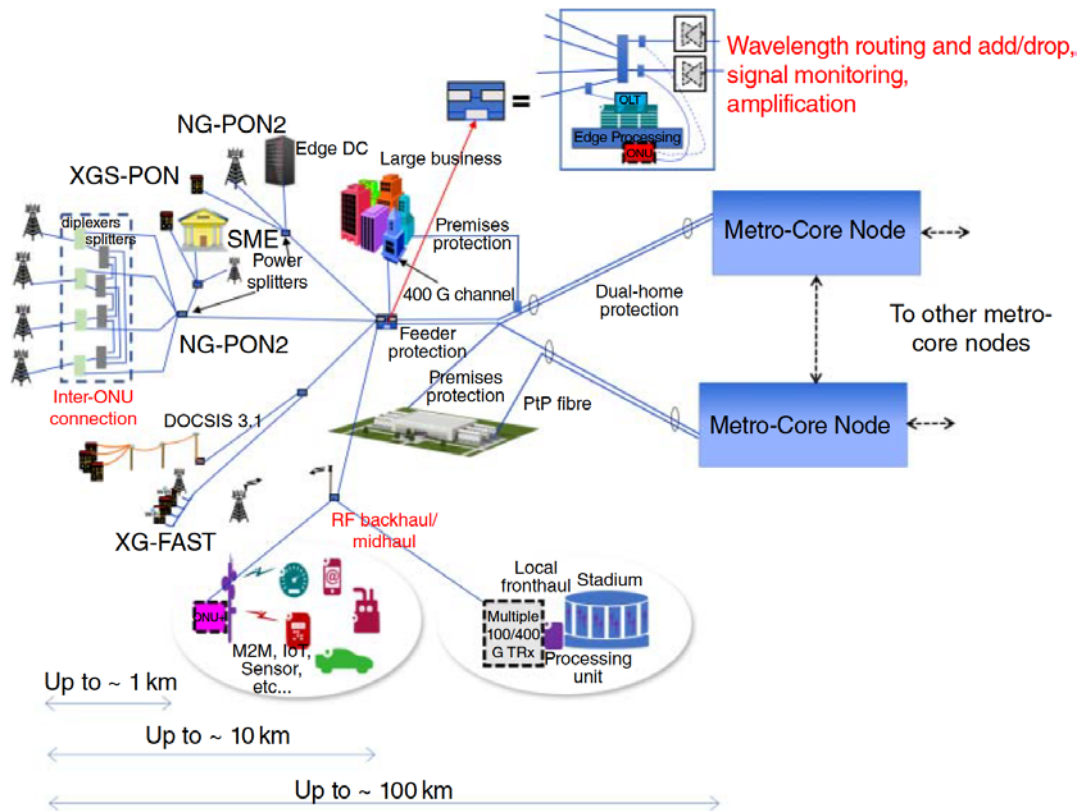


Рисунок 5 - Конвергентна архітектура сегменту мережі доступу/метро з підтримкою 5G та міжмеревим зв'язком між ONU

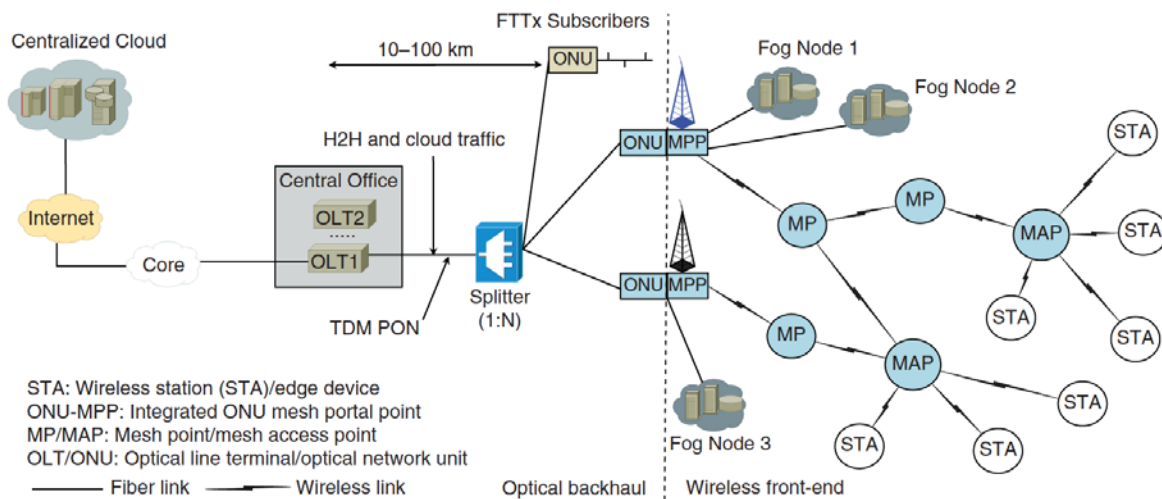


Рисунок 6 - Мережева архітектура туманних обчислень розширених мереж FiWi

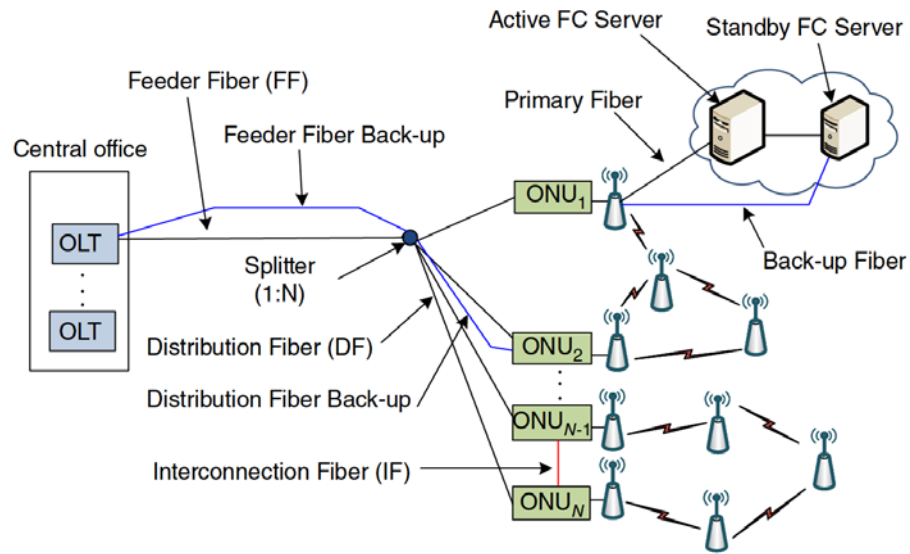


Рисунок 7 - Схема захисту оптичних магістралей, туманних обчислень і бездротових мереж.

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження мережі 5G на основі оптичних технологій

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

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

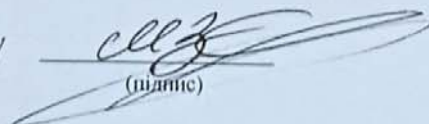
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 98,93 % Схожість 1,07 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

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

Автор роботи


(підпис)

Валь А.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.
(прізвище, ініціали)