

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методика побудови транс-національної мережі передачі
даних з використанням DWDM Alien-wave»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Роман ЛИСЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:
здобувач вищої освіти
група ІСДМ-62

Роман ЛИСЕНКО

Керівник:
науковий ступінь,
вчене звання

Ольга ПОЛОНЕВИЧ
к.т.н., доцент

Рецензент:
науковий ступінь,
вчене звання

Київ 2024

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК
« _____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

_____ Лисенко Роману

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Методика побудови транс-національної мережі передачі даних з використанням DWDM Alien-wave

керівник кваліфікаційної роботи Ольга ПОЛОНЕВИЧ к.т.н., доцент,

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «15» 10.2024р. №320

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «29» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Науково-технічна література, конфігурація оптичних мультиплексорів / демультимплексорів (CWDM, DWDM) та крос-з'єднувачів (OXC, ROADM), Міжнародні стандарти та рекомендації щодо побудови оптичних мереж (ITU-T, IEEE).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Тенденції зростання пропускної здатності оптичної мережі (модуляція амплітуди імпульсів (PAM), мультиплексування з поділом простору (SDM), розширення оптичного спектру).

Переваги використання спільного спектру та технології Alien Waves.

Розробка інструментів моделювання мережі для оцінки та прогнозування продуктивності Alien Waves.

Архітектура SDN та її переваги для управління мережею.

Розширення протоколу OpenFlow для підтримки транспортних мереж.

Практична реалізація SDN на проєкті NORDUnet UNINETT.

5. Перелік графічного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «19» жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз наявної науково-технічної літератури	19.10-05.11.24	виконано
2	Вивчення матеріалів для аналізу існуючих рішень контролю конфігурацій	05.11-12.11.24	виконано
3	Дослідження технологій PAM-4 та SDM	13.11-19.11.24	виконано
4	Аналіз стандартів IEEE, ITU-T та OIF	20.11-25.11.24	виконано
5	Моделювання та оцінка продуктивності Alien Waves	27.11-03.12.24	виконано
6	Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат	11.12-20.12.24	виконано
7	Розробка демонстраційних матеріалів	21.12-29.12.24	виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Роман ЛИСЕНКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

кваліфікаційної роботи

(підпис)

Ольга ПОЛОНЕВИЧ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 100 стор., 5 табл., 40 рис., 61 джерело.

Мета роботи – розробка методики побудови транс-національної мережі передачі даних з використанням технології DWDM Alien-wave, яка забезпечить високу пропускну здатність, надійність та оптимізоване використання спектральних ресурсів

Об'єкт дослідження – процес побудови транс-національної мережі передачі даних з використанням технології DWDM Alien-wave.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оптимізації використання спектральних ресурсів, архітектури та топології, а також методи забезпечення надійності транс-національних мереж передачі даних з використанням DWDM Alien-wave

Короткий зміст роботи: В роботі проведено аналіз існуючих перспективних рішень для розширення використання оптичного методу передачі даних, включаючи технології PAM-4, SDM та розширення оптичного спектру. Розглянуто переваги використання спільного спектру та технології Alien Waves, а також питання частотного та часового розподілу в мережі. Досліджено динамічність транспортної оптичної мережі та застосування SDN для управління мережею.

В рамках роботи розроблено інструмент моделювання для оцінки продуктивності Alien Waves та проведено експериментальні дослідження для підтвердження його точності. Проаналізовано найкращі практики з інших мережових проектів та проведено симуляцію роботи SDN-контролера в пакетно-оптичному середовищі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ALIEN WAVES, PAM-4, SDM, ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ, ТРАНС-НАЦІОНАЛЬНА МЕРЕЖА, ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНІ МЕРЕЖІ (SDN), ABNO, МОДЕЛЮВАННЯ, СПЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Purpose: To develop a method for constructing a trans-national data transmission network using DWDM Alien-wave technology, which will provide high bandwidth, reliability, and optimized use of spectral resources.

Object of research: The process of building a trans-national data transmission network using DWDM Alien-wave technology.

Subject of research: Methods and algorithms for optimizing the use of spectral resources, architecture and topology, as well as methods for ensuring the reliability of trans-national data transmission networks using DWDM Alien-wave.

Brief description of the work: The paper analyzes existing promising solutions for expanding the use of the optical data transmission method, including PAM-4, SDM technologies and optical spectrum expansion. The advantages of using a shared spectrum and Alien Waves technology are considered, as well as the issues of frequency and time distribution in the network. The dynamics of the optical transport network and the use of SDN for network management are investigated.

As part of the work, a simulation tool was developed to evaluate the performance of Alien Waves and experimental studies were conducted to confirm its accuracy. The best practices from other network projects were analyzed and a simulation of the SDN controller operation in a packet-optical environment was carried out.

KEY WORDS: DWDM, ALIEN WAVES, PAM-4, SDM, OPTICAL NETWORKS, TRANSNATIONAL NETWORK, SOFTWARE-DEFINED NETWORKS (SDN), ABNO, MODELING, SPECTRAL EFFICIENCY.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПЕРСПЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНОГО МЕТОДУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ	12
1.1 Тенденції зростання пропускної здатності оптичної мережі	12
1.2 Гнучкі оптичні мережі	28
РОЗДІЛ 2 СІЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРУ ТА ALIEN WAVES.....	40
2.1 Переваги використання спільного спектру та технології Alien Waves.	40
2.2 Розробка інструментів моделювання мережі	41
2.3 Найкращі практики з інших мережевих проєктів.....	46
2.4 Експериментальні сценарії та ключові результати	52
РОЗДІЛ 3 ЧАСТОТНИЙ ТА ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ.....	57
3.1 Розподіл частоти на фізичному рівні моделі OSI.....	57
3.2 Розподіл часу на мережевому рівні моделі OSI.....	70
РОЗДІЛ 4 ДИНАМІЧНІСТЬ ТРАНСПОРТНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ.....	77
4.1 Огляд транспортних оптичних мереж SDN.....	78
4.2 Практична реалізація SDN транспортної оптичної мережі на проєкті NORDUnet UNINETT.....	97
ВИСНОВКИ.....	109
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	111
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	120

ВСТУП

Актуальність дослідження обумовлена стрімким зростанням обсягів передачі даних у сучасному інформаційному суспільстві, що викликано розвитком хмарних технологій, потокового мультимедіа, Інтернету речей та метавсесвіту. Ця тенденція вимагає впровадження ефективних технологій для створення швидкісних і надійних транс-національних мереж передачі даних. Технологія DWDM Alien-wave, завдяки підвищеній спектральній ефективності та гнучкості в порівнянні з традиційним DWDM, має значний потенціал для задоволення цих потреб.

Дослідження орієнтоване на розробку методики побудови транс-національних мереж з використанням DWDM Alien-wave, що враховує особливості міжнародних стандартів, юридичні аспекти та проблеми безпеки. Враховуючи обмежену кількість практичних реалізацій і наукових робіт, присвячених даній темі, результати дослідження мають важливе практичне значення для телекомунікаційних компаній та інтернет-провайдерів, які прагнуть розширити свої мережі та забезпечити високоякісні послуги передачі даних в глобальному масштабі.

Мета дослідження полягає розробці методики побудови транс-національної мережі передачі даних з використанням DWDM Alien-wave, яка забезпечить:

1. Максимально можливу пропускну здатність за рахунок ефективного використання технології Alien-wave та доступного спектра оптичного волокна;
2. Високу надійність з'єднання шляхом впровадження схем резервування і захисту від відмов;
3. Оптимізацію використання спектральних ресурсів для мінімізації витрат на обслуговування та розширення мережі.

Об'єктом дослідження є процес побудови транс-національної мережі передачі даних з використанням технології DWDM Alien-wave, спрямований на

забезпечення високої пропускної здатності, надійності з'єднання та оптимізації використання спектральних ресурсів

Предметом дослідження є методи та алгоритми оптимізації використання спектральних ресурсів, архітектури та топології, а також методи забезпечення надійності транс-національних мереж передачі даних з використанням DWDM Alien-wave.

Метою дослідження є розробка комплексної методики побудови транс-національної мережі передачі даних з використанням передової технології DWDM Alien-wave. Дана методика буде спрямована на досягнення максимально можливої пропускної здатності мережі з одночасним забезпеченням її високої надійності та безперебійної роботи. Вона включатиме алгоритми ефективного розподілу спектральних ресурсів, що дозволить мінімізувати витрати на обслуговування та розширення мережі. При цьому будуть враховані особливості транс-національних мереж, такі як необхідність дотримання міжнародних стандартів та законодавства, а також забезпечення належного рівня безпеки даних. Розроблена методика має стати практичним інструментом для створення ефективних і надійних транс-національних мереж передачі даних нового покоління.

Наукові результати. В рамках дипломної роботи розроблено комплексну методику побудови транс-національних мереж передачі даних на базі DWDM Alien-wave. Вона включає алгоритми оптимізації спектральних ресурсів, рекомендації щодо вибору архітектури і методи забезпечення надійності з'єднання. Досліджено вплив ключових факторів на ефективність мережі та проведено моделювання для оцінки її характеристик. Сформульовано практичні рекомендації щодо застосування методики.

Практична значимість дослідження полягає в можливості застосування розробленої методики для проектування і оптимізації транс-національних мереж передачі даних, що дозволить підвищити їх ефективність, надійність і безпеку, а також знизити витрати на їх побудову та обслуговування.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПЕРСПЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНОГО МЕТОДУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Для реалізації концепції розширення ємності оптичної передачі даних необхідно дотримуватися суворих вимог до базової інфраструктури як транспортної мережі, так і фізичної оптичної мережі. Ці вимоги можна класифікувати за двома основними категоріями: висока пропускна здатність та гнучке використання. Незважаючи на те, що кінцевий користувач рідко взаємодіє безпосередньо з цими шарами, їхня важливість для забезпечення пропускної здатності та гнучкості залишається критичною. Без необхідної пропускної здатності навіть найефективніший механізм не зможе забезпечити корисний результат для кінцевого користувача. Крім того, для ефективного використання наданої пропускної здатності необхідні механізми гнучкості, такі як гнучкі оптичні мережі (FON).

З урахуванням цих вимог, у цьому розділі розглядаються технології, що забезпечують пропускну здатність, які на думку дослідників будуть необхідні в майбутньому

1.1 Тенденції зростання пропускної здатності оптичної мережі

Нові схеми модуляції дозволяють передавати більше бітів на символ, і особлива увага приділяється чотирирівневій модуляції амплітуди імпульсів (PAM-4), оскільки вона є простішою та, відповідно, більш економічною, ніж її аналоги - квадратурна фазова модуляція (QPSK) та квадратурна амплітудна модуляція (QAM). Іншим способом збільшення пропускної здатності є забезпечення більшої кількості режимів на одне ядро, тому в контексті NREN досліджуються методи мультиплексування з поділом простору (SDM).

Альтернативним способом є збільшення кількості оптичних мод на волокно та ширше використання спектру.

Тому вважаємо за необхідність розглянути основні технології підвищення пропускної здатності мережі.

Модуляція амплітуди імпульсів (PAM). Сьогодні високорівневі формати модуляції широко використовуються на лінійній стороні передавальних ліній, такі як квадратурна фазова модуляція з подвійною поляризацією (DP-QPSK) у реалізаціях щільного мультиплексування з поділом за довжиною хвилі (DWDM) на 100G 50 ГГц, але на стороні клієнта все ще використовується модуляція без повернення до нуля (NRZ). У зв'язку з появою каналів передачі з вищою швидкістю передачі даних та необхідністю ще вищих швидкостей на інтерфейсах клієнтської сторони, група IEEE 802.3bs 400G, з метою визначення специфікації фізичного рівня на 400 Гбіт/с, вирішила використовувати PAM-4 як новий формат модуляції для фізичного рівня 400G з досяжністю понад 2 км. Використання високорівневого формату модуляції знижує вимоги до пристроїв з більшою пропускною здатністю. PAM-4 використовує чотирирівневе амплітудне детектування для подвоєння пропускної здатності з тими ж оптичними пристроями, але за рахунок нижчої продуктивності сигнал-шум (SNR) у порівнянні з NRZ [3; 4].

Традиційну модуляцію NRZ яка складається з 1 і 0, можна вважати PAM-2 (модуляція амплітуди імпульсів, двохрівнева). На рисунку 2.1 показано базове сигналювання та діаграми "око" для PAM-2-NRZ та PAM-4 [5].

Важливо зазначити, що на стороні клієнта з'являються високорівневі техніки модуляції. На першому етапі найпростішою формою є PAM-4.

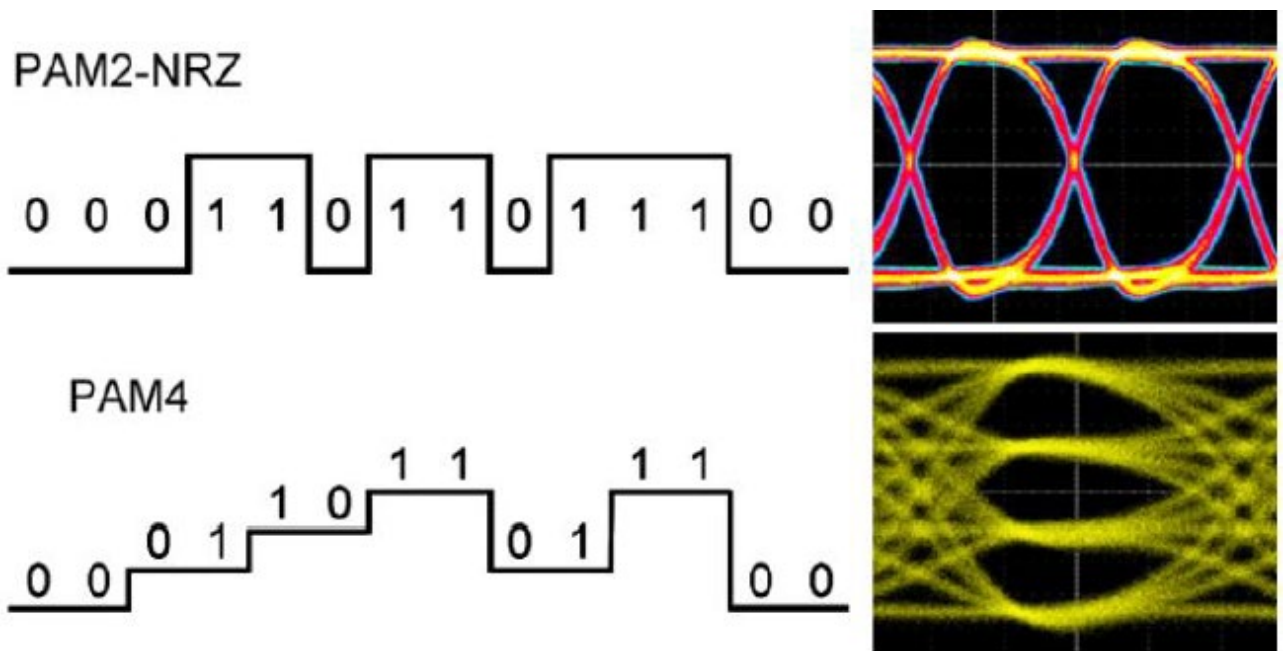


Рисунок 1.1 - PAM-2-NRZ та PAM-4: базове сигналювання та діаграми типу "око" [5]

Мультиплексування з поділом простору (SDM). Мультиплексування з поділом простору (SDM) є перспективною технологією для збільшення пропускної здатності оптичних мереж. SDM дозволяє передавати кілька незалежних сигналів через одне оптичне волокно, використовуючи різні просторові моди або окремі ядра. Це значно підвищує ефективність використання волоконної інфраструктури та дозволяє збільшити загальну пропускну здатність мережі.

Термін "мультиплексування з поділом простору" (SDM) зазвичай використовується для позначення новітніх технологій, а саме багатомодових волокон (MCF) та волокон з малою кількістю мод (FMF). Багатомодові та одномодові волокна вже кілька років є улюбленою темою досліджень. Техніки підсилення є важливими для практичного впровадження мультиплексування з поділом простору, і такі підсилювачі вже доступні. Європейська конференція з оптичних комунікацій (ECOC) та Виставка з оптичних волоконних комунікацій (OFC) є основними подіями, на яких представляються останні досягнення в цій галузі. Відкрите питання полягає в тому, чи хочуть NREN брати участь у таких

експериментах з SDM, оскільки здається, що системи на 100 Гбіт/с і 200 Гбіт/с є достатніми з точки зору пропускної здатності, і що наразі існує більша потреба для NREN у вирішенні таких питань, як програмно-визначені мережі та мережі з нульовим дотиком.

У системах з мультиплексуванням (SDM) можуть використовуватися як волокна з малою кількістю мод (FMF) так і багатомодові волокна (MCF). Тому розглянемо докладніше кожен із них.

Коли мова заходить про волокна з малою кількістю мод (FMF), можна згадати старі та добре відомі багатомодові волокна (MMF). Такі волокна підтримують сотні "мод" і вважаються дешевшим, але менш ефективним аналогом одномодових волокон. MMF передають різні моди, але всі ці моди представляють єдиний інформаційний потік і не можуть бути розрізнені до впровадження нових компенсуючих технік, заснованих на цифровій обробці сигналів (DSP), таких як технології множинного входу множинного виходу (MIMO). Техніки MIMO відомі з бездротових та інших систем, але їх впровадження в оптичних мережах не є поширеним через високі частоти світла порівняно з радіочастотами. Техніки DSP, що використовуються для сучасних когерентних оптичних систем передачі, відомі вже багато років і використовувалися в модемах та бездротових системах. Основною перешкодою для реалізації DSP у кремнії або інших напівпровідниках була терагерцова область (тобто дуже високі швидкості) оптичних довжин хвиль.

Однак MMF підтримують понад 100 просторових мод у C-діапазоні з тим самим діаметром оболонки 125 мікрон, що є дуже важливим, оскільки можна використовувати стандартні зварювальні апарати, з'єднувачі та інше існуюче обладнання. Звичайно, MIMO повинна справлятися з найбільш шкідливим ефектом – перехресними завадами. "Мультиплексування з поділом простору: Майбутнє волоконно-оптичних комунікацій" [6] надає детальний опис переваг цього SDM на основі MMF, включаючи використання селективних перемикачів довжин хвиль (WSS), ербієвих волоконних підсилювачів (EDFA) та раманівських підсилювачів.

Проблеми з MMF-SDM можуть бути вирішені, коли через оптичні волокна передаються лише кілька мод. Багато корисних спостережень можна знайти в "Оптичні підсилювачі для передачі з мультиплексуванням з поділом простору" [7]. FMMF зазвичай підтримують до 15 мод, але це число обмежене до 6, оскільки в доступних сьогодні підсилювачах з малою кількістю мод шести-модові EDFA є найбільш практично продемонстрованими. Перший EDFA, що підтримує три моди, був продемонстрований у 2011 році. З цього видно, що SDM не є тривіальною областю: додавання лише трьох просторових мод вимагає кількох років інтенсивних досліджень, і такі експерименти демонструються лише в кількох провідних дослідницьких центрах по всьому світу. Обмежуючим фактором є диференціальне модальне підсилення (DMG), яке має бути мінімальним. Поточна ситуація полягає в тому, що 10 просторових мод можуть бути підтримані за допомогою оптимізації розподілу E_r у волокні. Використовуються різні техніки накачування для досягнення низького DMG, і були запропоновані та досліджені як схеми накачування ядра, так і оболонки, причому останні вважаються більш перспективними.

Багатоядерні волокна (MCF) є перспективним напрямком розвитку технології мультиплексування з поділом простору (SDM), хоча вони також мають свої специфічні проблеми. Існують волокна з до 30 ядрами, проте відповідні техніки підсилення знайти складно. Зварювання та з'єднання таких волокон є значно складнішими завданнями. Загальнонаціональні дослідницькі заходи в Японії підсумовані в "PAM-4 Design Challenges and the Implications on Test" [4]. Описані високотехнологічні MCF з загасанням 0,181 дБ/км і перехресними завадами на рівні 90 дБ/км для 7-ядерних волокон. Очікується, що відстані передачі для сигналів 32 QAM досягатимуть 10 000 км. Техніки з малою кількістю мод поєднуються з багатоядерними волокнами для досягнення ще більшої кількості просторових каналів, і були продемонстровані волокна з 36 ядрами та 3 модами. Описано з'єднання MCF з SMF, і досліджено два методи – вільний простір і волоконні пучки. Останній метод вважається більш придатним для економічного виробництва. Згадуються багатоядерні та маломодові

підсилювачі, і проблеми схожі на ті, що описані в "Development of Space Division Multiplexing Technologies in Japan" [8].

Розширення оптичного спектру за межі С-діапазону. Передача даних у L-діапазоні (1570 нм – 1605 нм) є зрілою технологією, яка використовується як у грубому мультиплексуванні з поділом за довжиною хвилі (CWDM), так і в щільному мультиплексуванні з поділом за довжиною хвилі (DWDM). Ця технологія має ті ж переваги, що й передача в С-діапазоні, особливо щодо спектральної сумісності з ербієвими волоконними підсилювачами (EDFA). Відомо, що L-діапазонні EDFA працюють на хвості характеристик випромінювання Er^{3+} , і через нижчу ефективність поглинання/випромінювання вони спочатку вимагали у 7–10 разів довших легованих волокон і високих потужностей накачування порівняно з С-діапазоном. Довгі леговані волокна страждали від вищої поляризаційної модової дисперсії (PMD) і більшого впливу нелінійності через збільшене чотирихвильове змішування. Цю проблему було вирішено шляхом введення дуже сильно легованих ербієвих волокон, що зменшило довжину волокна з 50–100 м до 12 м [9]. Дещо гірше співвідношення продуктивності до вартості (гірший OSNR, дорожчі леговані волокна та потужніші насоси) передачі в L-діапазоні порівняно з С-діапазоном пояснюється тим, що передача в L-діапазоні використовується виключно на волокнах G.653 (вони не підходять для DWDM у С-діапазоні через наявність нульової довжини хвилі хроматичної дисперсії в цьому діапазоні) або в поєднанні з традиційною передачею в С-діапазоні. Раманівське підсилення знову набуває інтересу з появою когерентних систем передачі і також доступне для L-діапазону [10]; через дещо нижче загасання накачування воно навіть ефективніше, ніж для С-діапазону. Практичний досвід показав, що такі необхідні компоненти L-діапазону, як передавачі, пасивні елементи або крос-з'єднувачі довжин хвиль, виробляються в менших обсягах і тому доступні з довгими термінами поставки порівняно з компонентами С-діапазону.

Останнім діапазоном передачі з низькими втратами у стандартному одномодовому волокні є S-діапазон (1460 нм – 1530 нм). На жаль, через

відсутність зрілої технології підсилення, яка б доповнювала технологію EDFA, S-діапазон не використовується для передачі DWDM. Запропоновані підсилювачі на основі волокон, легованих тулієм, зазвичай страждають від низької ефективності, високого рівня шуму або необхідності у волокнах, чутливих до навколишнього середовища, наприклад, на основі фторидів [11]. Потенціал розподіленого раманівського підсилення для S-діапазону також обмежений через високе загасання волокна на довжині хвилі накачування близько 1420 нм. Тому цей діапазон часто використовується для CWDM або пасивних оптичних мереж.

Альтернативним рішенням для підвищення пропускної здатності оптичних транспортних систем є розширення спектру за межі вікна L-діапазону [12]. Використання діапазону 2000 нм активно обговорюється між постачальниками оптичних транспортних систем та дослідницькими групами в університетах, які розробляють ключові компоненти, такі як підсилювачі. Крім того, це питання обговорюється між постачальниками оптичних транспортних систем та користувачами – телекомунікаційними операторами. Такий перехід може призвести до збільшення загальної доступної пропускної здатності оптичної системи передачі до 130 ТГц. Необхідне оптичне обладнання, головним чином підсилювачі, які обмежують відстань передачі, вже доступне, а саме тулієві (TDFA) та гольмієві (HDFA) підсилювачі. Можливе комбіноване вікно підсилення становить 1650 нм – 2150 нм (TDFA – 34 ТГц; HDFA – 8,3 ТГц). Технологія оптичних волокон також вже доступна. Наприклад, волокно ZBLAN має мінімальне загасання 0,65 дБ/км при 2700 нм. Інші комбінації матеріалів забезпечують мінімальне загасання в діапазоні 2000 нм, і теоретично можливе досягнення втрат 0,03 дБ/км. Високошвидкісні кремнієві фотодетектори для діапазону 2000 нм вже мають необхідні параметри [13]. Вони можуть використовуватися в лавинному режимі та виготовлятися за технологією кремній-на-ізоляторі (SOI) з товщиною 220 нм. Кремнієва фотоніка, двовимірні матеріали (такі як графен і MoS_2) та метаматеріали також можуть покращити технологію передавачів і знизити витрати на виробництво, і вже доступні. Одним

із прикладів є низьковтратна повністю оптична модуляція у волокні, покритому графеном.

Як видно, існуючі технології можуть знизити витрати на виробництво нового типу обладнання та значно покращити доступну пропускну здатність оптичної системи передачі. Найбільш перспективним аспектом є використання технологій та виробничих методів для фотонних систем, які значною мірою використовують досвід кремнієвої промисловості.

На рисунку 1.2 показані діапазони передачі волоконної оптики із значеннями загасання для типового одномодового волокна. Як зазначено вище, криві загасання відрізняються для кожного типу передового волокна.

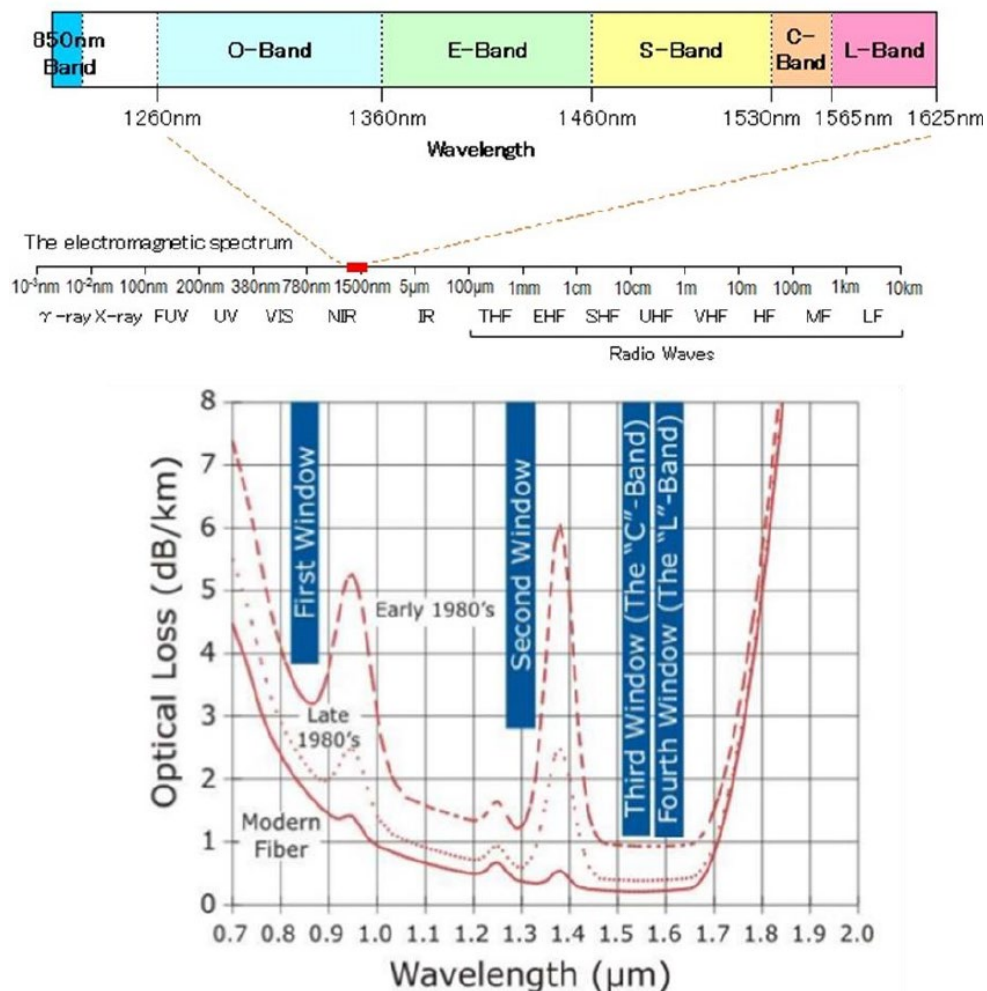


Рисунок 1.2 - Волоконно-оптичні смуги передачі для стандартного волокна SMF

Огляд переваг і недоліків різних оптичних діапазонів, які обговорювалися, наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Різні оптичні діапазони та їх властивості

Діапазон	Переваги	Недоліки
O, S	• Недорога технологія транспондерів • Найкраще рішення для систем FTTx; продуктивність/вартість	• Короткий до середнього діапазон • Обмежена продуктивність • Не може бути використаний для DWDM
C, L	• Підходить для високопродуктивних систем • Найнижче затухання для типових оптичних волокон • Може бути використаний для DWDM • Великий потенціал для подальшого розвитку • Недорогі підсилювачі	• Дорога технологія передавачів
U/XL та вище	• Потенційно висока пропускна здатність для високопродуктивних систем	• Наразі не використовується • Потребує нових волокон та підсилювачів • Дорога розробка

Стандартизація високих швидкостей передачі даних та понад 100 Гбіт/с. Важливий прогрес у стандартизації високих швидкостей передачі даних досягається завдяки трьом організаціям зі стандартизації. Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE-SA) зосереджується на розробці протоколів мереж LAN та Ethernet. Міжнародний союз електрозв'язку (ITU-T) більше займається протоколами транспортних мереж. Нарешті, Форум оптичної взаємодії (OIF) базується на основі IEEE та ITU-T; OIF залучає постачальників та зацікавлені сторони для визначення деталей конкретного стандарту.

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE-SA). Робоча група IEEE 802.3 розробляє стандарти для Ethernet-мереж. IEEE 802.3 має кілька проектів, що стосуються специфікацій Ethernet, які працюють на швидкостях 25 Гбіт/с, 50 Гбіт/с, (наступне покоління) 100 Гбіт/с, 200 Гбіт/с та 400 Гбіт/с

Ці заходи організовані в різні дослідницькі групи та робочі групи. Дослідницькі групи розробляють ідею на ранній стадії та намагаються отримати схвалення Запиту на авторизацію проекту (PAR) і визначити його цілі. PAR є засобом, за допомогою якого проекти стандартів розпочинаються в межах IEEE-SA. PAR визначають обсяг, мету та контактні точки для нового проекту. Робочі групи беруть ідею з етапу схваленого PAR до моменту затвердження стандарту. Цей процес зазвичай займає кілька років.

Наразі існує кілька активних дослідницьких груп та робочих груп під керівництвом IEEE 802.3

Ті, що стосуються стандартизації високих швидкостей передачі даних, включають:

- IEEE P802.3bs 400 Гбіт/с Ethernet Task Force.
- IEEE P802.3by 25 Гбіт/с Ethernet Task Force.
- IEEE 802.3 50 Гбіт/с Ethernet Over a Single Lane Study Group.
- IEEE 802.3 Next Generation 100 Гбіт/с Ethernet & 200 Гбіт/с Ethernet Study Group.

Метою робочої групи 802.3bs є визначення параметрів управління доступом до середовища Ethernet (MAC), специфікацій фізичного рівня та параметрів управління для передачі кадрів формату Ethernet на швидкості 400 Гбіт/с. Заклик до інтересу відбувся у березні 2013 року, а перше засідання дослідницької групи відбулося у травні 2013 року. Дослідницька група поставила завдання забезпечити специфікації фізичного рівня, які підтримують відстані зв'язку щонайменше 100 м по MMF, щонайменше 500 м по SMF, щонайменше 2 км по SMF та щонайменше 10 км по SMF, а також підтримують опціональні інтерфейси підключення 400 Гбіт/с (AUI) для застосувань "чіп-чіп" та "чіп-модуль". Остаточне затвердження стандарту планується до кінця 2017 року.

Обговорювалися питання розширення сфери застосування на кадри формату Ethernet зі швидкістю 100 Гбіт/с та 200 Гбіт/с. Розробка електричних інтерфейсів I/O на 50 Гбіт/с дозволить створювати пристрої та системи, здатні підтримувати кілька швидкостей Ethernet, які базуються на цілих кратних 50 Гбіт/с, таких як 100 GbE, 200 GbE та 400 GbE. Обговорювалися питання, як багатоканальні рішення 100G/200G можуть бути включені до проекту 802.3bs.

Проект 50G. Основною метою проекту 50G є вибір рішень, які забезпечують найнижчу вартість, найменше енергоспоживання та найменший розмір для 50G. Він був ініційований двома дослідницькими групами для вивчення двох (пов'язаних) тем: оптимізованого проекту з однією лінією для Ethernet на 50 Гбіт/с та багатоканальних варіантів цього.

Дослідницька група NG 100/200 GbE, NGOATH. Прогрес на сьогодні для дослідницької групи IEEE 802.3 Next Generation 100 Gb/s Ethernet & 200 Gb/s Ethernet включає:

- Деякий чіткий консенсус щодо різних цілей для однолінійних 50G.
- Деякий чіткий консенсус, що деякі аспекти 200G (переважно логіка, можливо AUI, можливо SMF) є потенційно додатковими робочими пунктами, які може взяти на себе .3bs.
- Багато плутанини щодо цілей 100G, оскільки люди усвідомлюють виклики роботи через вибір PMD або проблеми зворотної сумісності.
- Деякі ранні думки, що деякі багатоканальні PMD, які використовують ці нові однолінійні 50G, можуть бути виконані в рамках того ж проекту, щой однолінійна робота (з застереженням щодо 100G).

На проміжному засіданні (спільне засідання дослідницьких груп 50G та NGOATH) були запропоновані деякі суттєві зміни до цілей зазначених вище груп (50G, NG 100/200 GbE та .3bs). Список змін можна знайти на веб-сторінках групи на сайті IEEE.

Згідно з цими змінами, P802.3bs має підтримувати швидкість передачі даних MAC 200 Гбіт/с на додаток до 400 Гбіт/с і забезпечуватиме специфікації фізичного рівня, які підтримують роботу на 200 Гбіт/с на відстанях:

- Щонайменше 2 км по SMF.
- Щонайменше 10 км по SMF.

Підтримка P802.3bs для роботи на 400 Гбіт/с на наступних носіях та відстанях не змінилася:

- Щонайменше 100 м по MMF.
- Щонайменше 500 м по SMF.
- Щонайменше 2 км по SMF.
- Щонайменше 10 км по SMF.

Оскільки специфікація одномодового 200 Гбіт/с була перенесена до 802.3bs, специфікації багатомодового будуть частиною нової робочої групи, яка також займатиметься 50 Gigabit Ethernet.

Нова робоча група також працюватиме з цілями, визначеними в , а саме:

1. Визначити однолінійний 50 Гбіт/с PNY для роботи:
 - По мідних двохосьових кабелях.
 - По друкованій платі.
 - По MMF на відстанях до щонайменше 100 м.
 - По SMF на відстанях до щонайменше 2 км.
 - По SMF на відстанях до щонайменше 10 км.
2. Визначити 200 Гбіт/с PNY для роботи по:
 - Мідних двохосьових кабелях.
 - Друкованій платі.
 - MMF на відстанях до щонайменше 100 м.
3. Визначити дволінійний 100 Гбіт/с PNY для роботи по мідних двохосьових кабелях.
4. Визначити дволінійний 100 Гбіт/с PNY для роботи по друкованій платі.
5. Визначити дволінійний 100 Гбіт/с PNY для роботи по MMF на відстанях до щонайменше 100 м.

Media		400G (G1)	50G	100G (Gn)	200G
PCB Traces		16X25G			
		8x50G	1x50G	2x50G	4x50G
BP			1x50G	2x50G	4x50G
Cu Cable			1x50G	2x50G	4x50G
MMF		16X25G	1x50G	2x50G	4x50G
SMF	500m	4x100G	1x50G	2x50G? 1x100G?	4x50G? 2x100G?
	2km	8x50G	1x50G	2x50G? 1x100G?	4x50G? 2x100G?
	10km	8x50G	?	?	?
	40km		?	?	?

new
technology
development

Рисунок 1.3 -Теоретична точка розвитку нової технології в стандарті 802.3bs

Сектор стандартизації електрозв'язку (ITU-T). ITU-T зосереджується на стандартизації OTN (включаючи G.709, G.798, G.872 та інші рекомендації). Ведеться робота над тим, що називається "Beyond 100G" OTN (B100G), що є більш складним ландшафтом, ніж 100G, де один формат модуляції охоплював широкий спектр застосувань майже на будь-якій відстані (100G DP-QPSK у 50 ГГц частотному слоті був ефективним до приблизно 4000 км). З'являються нові клієнти понад 100G (200 GbE, 400 GbE та Flex Ethernet), які потребують перенесення, і, загалом, формат модуляції та ефективна швидкість передачі даних на довжину хвилі змінюються залежно від відстані (наприклад, те саме обладнання може підтримувати 100G DP-QPSK, 150G DP-8QAM або 200G DP-16QAM, зменшуючи відстань від приблизно 4000 км до 1000 км зі збільшенням швидкості передачі даних). Однохвильові 400G або вище менш поширені, оскільки відстань стає занадто короткою, щоб бути цікавою. Тому, крім різноманітних швидкостей довжин хвиль, ще одним принципом роботи B100G є визначення нових транспортних контейнерів, які розподіляються на кілька довжин хвиль або субносіїв. Розробляється модульний формат кадру, який можна використовувати для опису контейнерів, таких як поточний ODUk, у

кроках по 100G. Цей контейнер може бути відображений на одну довжину хвилі або розподілений на кілька довжин хвиль.

Хоча багато сигналів, що передаються через оптичні мережі (можливо, включаючи кілька довжин хвиль у сукупності), мають розмір кратний 100G, існують деякі непарні швидкості, такі як 150G. Вони будуть розглядатися з точки зору управління, описуючи ці сигнали у модульному форматі 100G, але вказуючи, що певна кількість пропускної здатності (представлена як кількість "трибутарних слотів") недоступна на певному інтерфейсі. Оскільки ці типи інтерфейсів є однопостачальними інтерфейсами лінійної сторони, стандарти не будуть визначати конкретний формат кадру для них, лише інформаційний вміст, який потрібно передавати через ці інтерфейси.

Для клієнтських інтерфейсів, так само як був визначений інтерфейс для клієнта OTU4, який повторно використовував модулі, що підключаються на 100 GbE, очікується, що клієнтські інтерфейси B100G будуть визначені на основі модулів, що підключаються на 400 GbE, та об'єднаних модулів, що підключаються на 100 GbE.

Форум оптичної взаємодії (OIF). OIF зосереджується на гнучких Ethernet та гнучких когерентних DWDM рамках. Flex Ethernet — це метод, який підтримує об'єднання 100G Ethernet PHY без використання груп агрегації посилення (LAG) для створення потоків з більшою швидкістю, а також каналоутворення, що підтримує кілька менших потоків (наприклад, 10G, 25G), які передаються через групу об'єднаних PHY. Однією з причин важливості цього в обговоренні високих швидкостей передачі даних є те, що спочатку передбачалося, що першим клієнтом, який потребуватиме перенесення через OTN більше 100G, буде 400 GbE, завершення якого заплановано на кінець 2017 року. Flex Ethernet може забезпечити клієнтів >100G через об'єднання кількох 100G раніше цього. Ще одним відповідним проектом OIF є Flex Coherent DWDM framework, який забезпечить специфікацію правильних компонентів для створення типів інтерфейсів, що з'являються в OTN мережах (інтерфейси,

керовані DSP, які можуть підтримувати різні формати модуляції з різними ефективними швидкостями передачі даних залежно від відстані).

Експериментальні дослідження партнерів NREN. У червні 2015 року PSNC провела тести на передачу 400G у мережі PIONIER. Тести були підготовлені та проведені разом з ADVA Optical Networking. Випробування проводилися в мережі PIONIER, на відстані 385 км волокна, між двома науково-дослідними та освітніми центрами в Познані та Варшаві. Система передавала дані безперервно протягом 14 годин без жодних блокових помилок. Тестова система використовувала програмно-визначену оптику для забезпечення гнучких швидкостей передачі даних та модуляції. Це означає, що мережа може інтелектуально масштабуватися від 200 Гбіт/с до 300 Гбіт/с до 400 Гбіт/с і від QPSK до 8QAM до 16QAM за потреби. Усі варіанти конфігурації та модуляції були протестовані та оцінені командою PSNC.

Випробування 400 Гбіт/с проводилося з використанням ресурсів робочої мережі PIONIER. PIONIER є консорціумом польських науково-дослідних та освітніх організацій, і його мережа експлуатується в Польщі PSNC. Для цілей випробування система була налаштована з двома довжинами хвиль по 200 Гбіт/с, що працюють на 16QAM в межах оптичного суперканалу зі спектральною шириною 100 ГГц. Система також включала реконфігуровані оптичні мультиплексори з додаванням/вилученням (ROADMs) та гібридні підсилювачі. Під час 14 годин тестування випробування показало безпомилкову передачу з відношенням сигнал/шум приблизно 20 дБ.

Під час тестів 400G результати були представлені в прямому ефірі на конференції TERENCE 2015. Після тестів PSNC встановила та налаштувала робоче з'єднання 400G між вузлами в Познані та Варшаві. PSNC також встановила друге з'єднання 400G, яке використовується для власної роботи та проектів.

CESNET тестувала та працювала з платформою ECI Apollo та Czech Light® Open DWDM разом. Система ECI Apollo має чудові характеристики та дуже компактна, що полегшує тестування. Під час випробувань CESNET перевірила

обидві системи на межі їх можливостей, довівши, що сигнали 200 Гбіт/с DP-16QAM можуть досягати понад 2000 км по стандартному одномодовому волокну G.652. Експерти CESNET та ECI також успішно продемонстрували можливості "чужих" довжин хвиль, які набирають популярності не тільки для NREN, але й у глобальному телекомунікаційному світі.

Варто зазначити, що системи 400G майже виключно складаються з 2x200G, де 200G передається через один канал DWDM з DP-16QAM. Справжні сигнали 400G з використанням DP-64QAM не були доступні у 2015 році (коли проводилися випробування CESNET), і здається, що майже всі постачальники перейшли від 100G з DP-QPSK (також відомого як DP4QAM) до 200G з DP-16QAM, а 400G розглядається як наступний крок для дійсно великих додатків, що вимагають великих обсягів даних.

CESNET та ECI також тестували передачу через каскад вузьких фільтрів DWDM, де сигнали 200G DP-16QAM могли передаватися через 8 вузьких мультиплексорів DWDM.

Останній важливий момент, який слід зазначити, це змішаний сценарій, коли "повільні" та амплітудно-модульовані сигнали, такі як 10G та 10G Ethernet, тестувалися разом з фазово-модульованими когерентними сигналами 100G та 200G. Знову ж таки, результати були дуже задовільними, обладйливими та перспективними для взаємної передачі високошвидкісних когерентних фазово-модульованих сигналів та дійсно повільних амплітудно-модульованих сигналів (тобто менше 1 Гбіт/с), які використовуються новими додатками, такими як точна передача часу або дистанційне зондування. Наскільки відомо CESNET, такі експерименти з реальним обладнанням є досить рідкісними.

Основні результати випробувань:

1. Успішне розширення всього оптичного діапазону до 2000 км з одноканальним 200G DP-16QAM.
2. Високошвидкісний трафік можна легко передавати як "чужі" довжини хвиль через виробничу мережу CESNET.

3. Сигнали 200 Гбіт/с можуть передаватися на відстань 240 км за один стрибок, без складного та потенційно небезпечного підсилення Рамана.

4. Нові способи компенсації хроматичної дисперсії в темних волоконних лініях зі змішаними когерентними та застарілими амплітудно-модульованими сигналами.

1.2 Гнучкі оптичні мережі

Проект GN3plus Open Call "Дослідження та експериментальна оцінка архітектур керування для оптимізації мережі flexgrid під час роботи" (REACTION) розробив сценарій гнучкої оптичної мережі, що дозволяє програмно керовану передачу суперканалів. Інновації були впроваджені в контексті архітектур площини даних, площини керування та стратегій маршрутизації та розподілу спектра

Перш ніж розглядати результати проекту REACTION, корисно обговорити один із ключових елементів гнучких оптичних мереж, а саме транспондери зі змінною пропускнуою здатністю (BVT). BVT нещодавно були впроваджені у багатошвидкісні транспондери від постачальників. BVT дозволяють налаштовувати певний набір функцій транспондера в точковому з'єднанні (один потік і один пункт призначення). Подальший розвиток BVT призвів до створення транспондерів зі змінною пропускнуою здатністю, що розділяються (S-BVT), які ще не доступні комерційно. S-BVT забезпечують можливість виділення певної кількості пропускнуої здатності на один або кілька незалежних потоків і передачу цих потоків до кількох пунктів призначення. S-BVT також дозволяють вибирати серед різних форматів модуляції, типів корекції помилок (FEC), швидкостей передачі даних та зайнятості оптичного спектра (гранулярність 12,5 ГГц, flexi-grid). Включення функцій flexi-grid та суперканалів у S-BVT вимагає, щоб усі вузли вздовж шляху з'єднання підтримували функціональність flexi-grid, але інші змінні в S-BVT можуть бути реалізовані в середовищі мережі з фіксованою сіткою.



Рисунок 1.4 – Шлях еволюції транспондерів

З точки зору площини управління, проект REACTION розробив рішення, що базується на розподіленій плоскості управління на основі GMPLS з архітектурою елемента обчислення шляхів (PCE). Зокрема, було досліджено нову архітектуру PCE. Архітектура базується на активному стані переднього PCE, який відповідає за обчислення маршрутизації та розподілу спектра (RSA), і задньому PCE, який відповідає за виконання складних рішень з реоптимізації мережі. Архітектура PCE також базується на північному розподілі інформації про стан зв'язку (LS) та інженерії трафіку (TE) через протокол прикордонного шлюзу (BGP) (тобто BGP-LS), який використовується для забезпечення архітектури PCE (також у контексті ієрархічної реалізації для багатодомених сценаріїв) адекватною інформацією про мережу.

Маршрутизація та розподіл спектра: були розроблені та оцінені нові алгоритми маршрутизації та розподілу спектра (RSA) в контексті гнучких оптичних мереж і, зокрема, для включення в запропоновану архітектуру PCE. Можливості S-BVT були оцінені в контексті відновлення та операцій планування мережі:

Відновлення: багатошляхове відновлення та стиснення бітрейту були застосовані для максимізації кількості відновленого бітрейту, також використовуючи обмежені частини спектральних ресурсів уздовж кількох маршрутів. Була введена архітектура програмно-визначеної мережі (SDN) для адекватної підтримки конфігурації S-BVT. Архітектура SDN була застосована для експериментальної оцінки того, що загальний час переналаштування після

виявлення збою завершився протягом двох секунд, що значною мірою домінувало за рахунок власного контролю оптичних вузлів.

Операції планування мережі: для збільшення відновлюваності трафіку в мережах з гнучкою сіткою був застосований алгоритм оптимізації ремонту після збою з багатошляховим відновленням (MP-AFRO), щоб зменшити кількість підключень шляхом агрегування тих, що належать до одного оригінального з'єднання, і перенаправлення отриманого з'єднання для звільнення спектральних ресурсів. Евристичний алгоритм був розгорнутий у інструменті планування в режимі реального часу у вигляді бекенд PCE (bPCE) у архітектурі управління мережевими операціями на основі додатків (ABNO), що контролює мережу. bPCE був підключений до централізованого активного стану PCE.

Крім того, переваги гнучкої сітки були оцінені в контексті мережі UNINETT NREN. Очікувана еволюція матриці трафіку NREN була прийнята для оцінки переваг, наданих впровадженням систем передачі з високою швидкістю з і без технології гнучкої сітки. Результати показали, що виснаження волокна відбудеться приблизно через сім років з цього моменту, що буде відкладено у випадку мереж з гнучкою сіткою.

Гнучкі оптичні мережі максимізують спектральну ефективність за допомогою суперканалів на гнучкій сітці каналів. Суперканали отримують негативний вплив через нелінійні взаємодії тісно розташованих підносіїв і звуження смуги пропускання в мережевих ROADMs. Було проведено числовий аналіз для оцінки оптимізації суперканалів з метою максимізації добутку спектральної ефективності та оптичної досяжності [24]. Нелінійні взаємодії мінімізуються шляхом оптимізації потужності підносіїв, де крайові підносії мають меншу потужність запуску. Штраф за звуження смуги пропускання оптимізується шляхом введення захисної смуги навколо кожного суперканалу. Найкраща продуктивність з точки зору добутку спектральної ефективності та оптичної досяжності досягається для захисної смуги суперканалу шириною 6 ГГц (хоча 12,5 ГГц, як правило, є мінімальною гранулярністю). Підканали в межах суперканалу можуть мати форму Ніквіста за допомогою оптичного

інверсно-гаусового фільтра другого порядку для покращення використання смуги пропускання підканалів. Такі оптимізовані суперканали отримують переваги від мінімальної частотної гранулярності фільтруючих елементів 3,125 ГГц, які вже доступні на ринку [25].

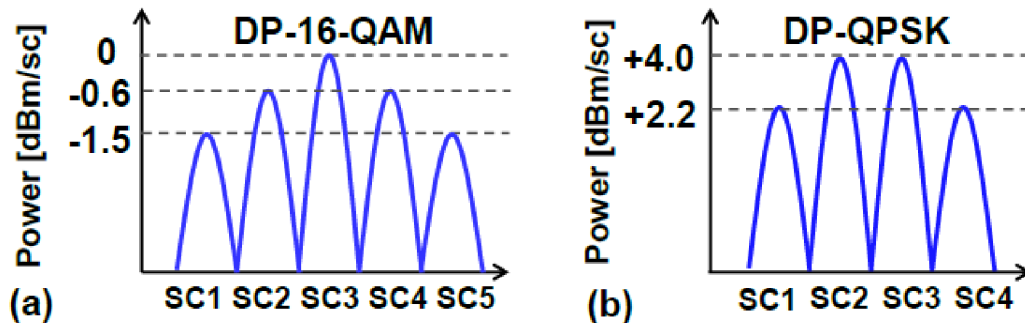


Рисунок 1.5 - Оптимальна потужність запуску піднесучих для суперканалів 1 Тбіт/с 5-SC-DP-16-QAM та 400 Гбіт/с 4SC-DP-QPSK для методу попереднього підсилення потужності піднесучих (SCPP)

Хоча багато постачальників пропонують готові мережеві рішення для магістральних мереж, зростає потреба у взаємодії постачальників для підсистем мережі або навіть елементів, щоб зменшити загальні витрати. Для майбутньої гнучкої оптичної мережі важливою вимогою є спільна платформа управління мережею з однаковим доступом до всіх елементів мережі, незалежно від їх походження. Крім того, пропонуються гнучкі інструменти планування для повної оптимізації використання ресурсів у мережі [26]. Нові системи управління мережею потрібні раніше, ніж нові оптичні волокна. Очікується, що доступна ємність поточної волоконної інфраструктури триватиме до кінця наступного десятиліття [27].

Зараз більшість системних інтеграторів розробляють трансивери зі швидкістю понад 100 Гбіт/с. Хоча стандартизація "чорного каналу" (BL) на 100 Гбіт/с ще не завершена, зараз саме час почати думати про те, як реалізувати взаємодію BL на ще вищих швидкостях каналів. Мережі NREN часто складаються з обладнання, придбаного у різних постачальників систем. З'єднання терміналів (наприклад, маршрутизаторів і комутаторів) з оптичною

мережею на основі мультиплексування з щільним поділом за довжиною хвилі (DWDM) традиційно здійснювалося шляхом розгортання транспондерів з внутрішнім розмежуванням між транспортною мережею та клієнтським рівнем. Це з'єднання також можна здійснити, видаливши одну пару передавачів (TX) і приймачів (RX) для кожного каналу (усунувши транспондери та замінивши їх так званими кольоровими інтерфейсами в пакетних машинах), що дозволяє заощадити кошти. Ця конфігурація відома як підхід BL, і пов'язані з нею специфікації для взаємодії між постачальниками вже є частиною рекомендацій ITU-T G.698.1 і G.698.2 для DWDM-з'єднань з оптичними лінійними підсилювачами та без них відповідно. Ця конфігурація часто називається концепцією "чужої довжини хвилі", коли DWDM TX і DWDM RX надаються одним і тим самим постачальником А. Концепція чужої хвилі розглядається більш детально в розділі 3. З'єднання DWDM складається з волокон і оптичних мережевих елементів – наприклад, оптичних (де)мультиплексорів, підсилювачів і (реконфігурованих) оптичних мультиплексорів введення/виведення [(R)OADM] – і вважається "чорним", якщо деталі дизайну є власністю дизайнера BL. Однак загальні найгірші характеристики передачі BL повинні бути визначені, наприклад, мінімальна/максимальна накопичена дисперсія, максимальна диференціальна групова затримка та максимальне відношення сигнал/шум (OSNR) на шляху. У чинній версії G.698.2 [28] стандартизовані коди застосування для сигналів з модуляцією без повернення до нуля з швидкістю передачі даних до номінальних 10,71 Гбіт/с. Наразі робота ITU-T G.698.2 BL зосереджена на сигналах з модуляцією з поляризаційним мультиплексуванням і квадратурною фазовою маніпуляцією (PM-QPSK) зі швидкістю 100 Гбіт/с. Цей формат модуляції вимагає чітких визначень і методологій специфікації для параметрів, які не присутні в існуючих стандартах оптичного інтерфейсу, таких як векторна величина помилки (EVM) або спектральний екскурс

У разі використання одноканального зв'язку необхідно враховувати наступні основні параметри передачі (див. [29]):

1. Формат модуляції. Можуть підтримуватися різні типи форматів модуляції, що забезпечується використанням цифро-аналогового перетворювача на передавачі. Можливі формати включають двійкову фазову маніпуляцію (BPSK), квадрофазну маніпуляцію (QPSK), m-квадратурну амплітудну модуляцію (QAM) тощо.

2. Частота вибірки та аналогова смуга пропускання. Для забезпечення сумісності необхідно гарантувати мінімальні апаратні вимоги щодо частоти вибірки, роздільної здатності АЦП (аналогово-цифрового перетворювача) та аналогової смуги пропускання.

3. Алгоритми цифрової обробки сигналів (DSP). У разі використання алгоритмів з підтримкою даних (data-aided) може знадобитися стандартизація, оскільки навчальні послідовності повинні бути узгоджені між передавачем (TX) та приймачем (RX). З іншого боку, якщо застосовуються сліпі алгоритми DSP, потрібні менші зусилля для стандартизації.

4. Параметри оптичного шару. Для забезпечення сумісності необхідно визначити оптичні параметри в межах суворо обмеженого робочого діапазону. Діапазон значень вихідної потужності на передавачі (тобто потужність запуску) і приймачі (тобто максимальні значення загальної та поканальної оптичної потужності, а також чутливість до вхідної потужності) потребують спеціальної стандартизації.

5. Частотний слот. Необхідно визначити діапазон налаштування довжини хвилі, точність розділення слота та фактичну номінальну центральну частоту, а також можливі необхідні оптичні крос-з'єднання та їх характеристики фільтрації. Цю інформацію необхідно надати не лише передавачу (TX) і приймачу (RX), але й проміжним вузлам комутації.

На додаток до цих параметрів для кожного носія, необхідно враховувати наступну інформацію в з'єднаннях суперканалів, що складаються з декількох субносіїв:

1. Кількість субносіїв. Потрібно визначити кількість підтримуваних субносіїв (наприклад, вісім або чотири субносії у випадку каналу зі швидкістю 1 Тб/с).

2. Міжсубносійний інтервал. Інтервал між субносіями має відповідати специфікаціям гнучкої сітки (наприклад, з кроком 6.25 ГГц).

Сумісність двох реалізацій S-BVT (гнучкого широкосмугового передавача) нещодавно була продемонстрована на пан'європейському багатодоменному тестовому стенді гнучкої оптичної мережі (EON) з кількома постачальниками [30] в рамках проекту IDEALIST [31]. Було оцінено дві реалізації S-BVT від Міжуніверситетського національного консорціуму з телекомунікацій (CNIT)/Ericsson та Coriant, які використовували корекцію помилок із жорстким рішенням (HD FEC) і м'яким рішенням (SD FEC). Архітектура управління дозволила налаштувати S-BVT так, щоб досягти передачі між різними постачальниками без збоїв на відстані до 300 км відповідно до поточних стандартів FEC.

Тестовий стенд, зображений на Рисунку 2.6, складався з площин даних і управління.

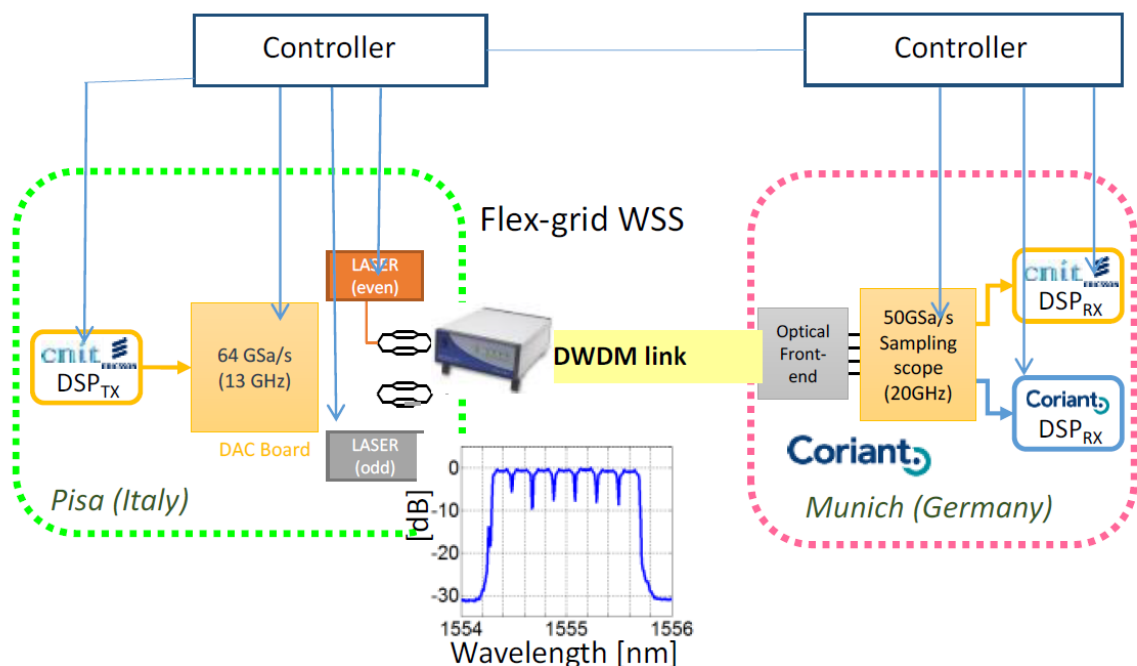


Рисунок 1.6 - Пан'європейський тестовий стенд за участі кількох партнерів.

Налаштування площини даних включає вузли з гнучкою сіткою (flexi-grid), які базуються на налаштовуваних спектрально-селективних перемикачах (SSS), DSP-блок CNIT/Ericsson на передавачі (Tx) і два різні блоки DSP (CNIT/Ericsson та Coriant) на приймачі (Rx) як частину когерентного оптичного тестового стенда. Передавач здатний забезпечити суперканал із різною кількістю конфігурованих носіїв та пропускну здатністю (тобто 1 носій для 100 Гбіт/с, 3 носії для 400 Гбіт/с і 7 носіїв для 1 Тбіт/с). При 1 Тбіт/с використовувалися сигнали PM-16QAM з формуванням Нюкіста із значенням скосу $= 0.05$ та швидкістю символів $= 23$ Гбод.

Площина управління реалізується за допомогою контролерів, розташованих на кожному фізичному вузлі мережі. Контролери з'єднані з тестовим стендом площини даних (тобто SSS, Tx і Rx) за допомогою інтерфейсів USB, серійних та GPIB. Контролери можуть автоматично налаштовувати параметри SSS (тобто форму фільтра як зарезервований частотний слот), параметри транспондерів (тобто швидкість символів, кількість носіїв, центральні частоти субносіїв) та параметри DSP (тобто формат модуляції, FEC).

Сумісність між продуктами різних постачальників (CNIT/Ericsson та Coriant) була досягнута шляхом обміну новими атрибутами коду додатків (AC) і класу транспондерів (TC), відповідно до рекомендацій ITU [28].

На Рисунку 2.7 показано продуктивність передачі для одного постачальника ($CNIT_{TX} \rightarrow CNIT_{RX} - SV$) і між постачальниками ($CNIT_{TX} \rightarrow COR_{RX} - CV$), де COR означає Coriant. В обох випадках використовувалися сліпі алгоритми DSP [32], оскільки сценарій сумісності не допускав використання алгоритмів, які вимагають знання про лінію [33] або навчальних послідовностей

[34].

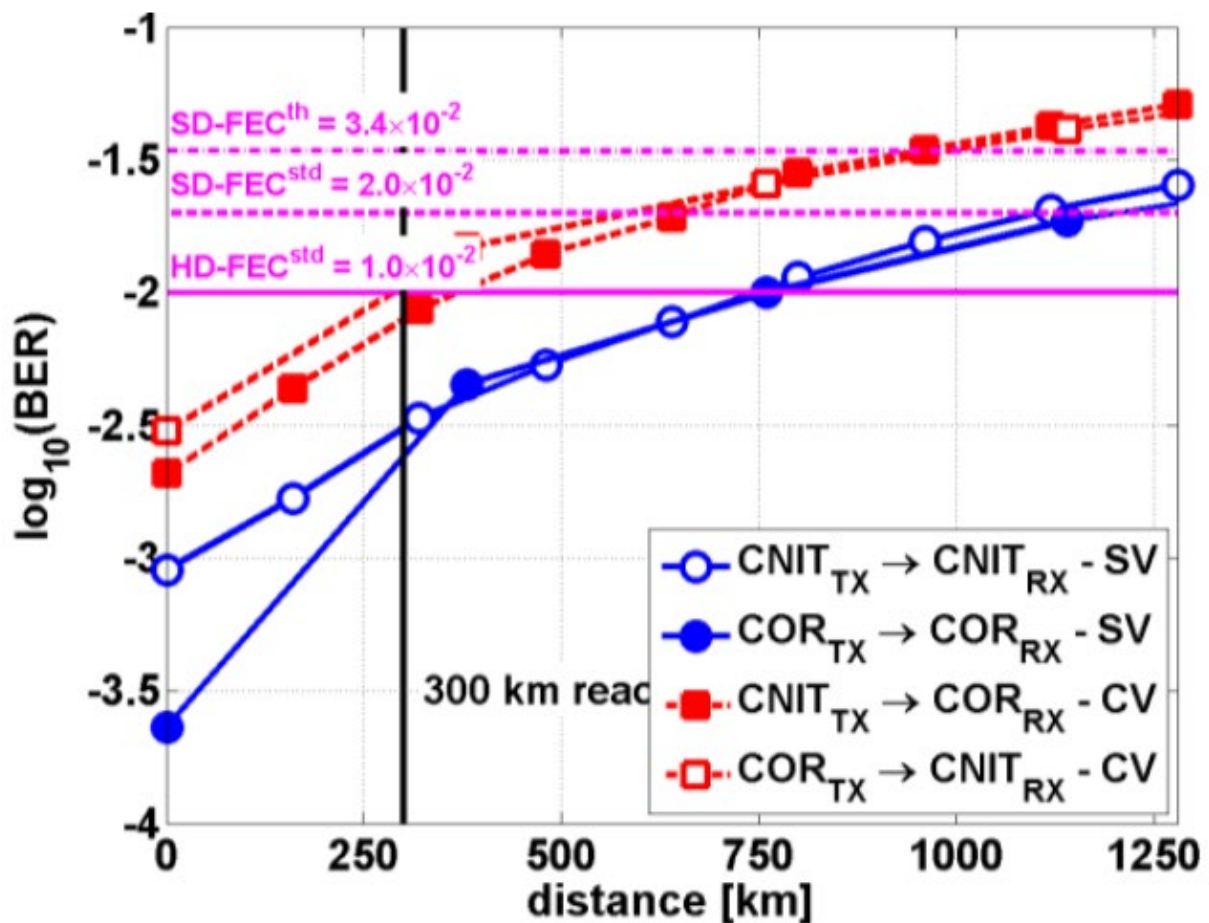


Рисунок 1.7 - Продуктивність BER (помилки бітової швидкості).

Якщо обирається рішення між постачальниками (CV), можна використовувати лише вже стандартизовану корекцію помилок (FEC). Наприклад, стандарт ITU G975.1 з жорстким рішенням (HD-FECstd) та накладними витратами 20% може використовувати поріг попередньої помилки бітів ($\text{pre-FEC BER} = 1 \times 10^{-2}$). Це значення може збільшитися, якщо нові SD-FEC будуть стандартизовані, до розумного порогу $\text{pre-FEC BER} = 2 \times 10^{-2}$.

На основі порогових значень pre-FEC можна зробити такі висновки щодо експерименту, проведеного з використанням тестового стенда, зображеного на Рисунку 1.6:

Якщо передбачається використання вже стандартизованого HD-FECstd, гарантована передача до ~750 км у разі передачі від одного постачальника (SV). У режимі між постачальниками (CV) ця відстань скорочується вдвічі.

Хоча продуктивність системи значно зменшилася, такий сценарій все одно забезпечуватиме передачу без помилок у CV-режимі для більшості європейських ліній.

Якщо буде прийнято стандартизовану SD-FECstd, досяжність наблизиться до 1,100 км для SV-передачі та ~600 км для CV-передачі.

Нарешті, у разі використання пропрієтарної FEC відстані передачі становитимуть ~1,800 км [35], і знову близько половини для CV-передачі.

Ці значення наведені у Таблиці 2.2.

Таблиця 1.2

Показники ефективності

Досліджений кейс	Дальність (км)		
	HD-FEC ^{std}	SD-FEC ^{std}	SD-FEC th
SV	750	1100	1800
CV	300	600	900

На додаток до результатів проведеного експерименту, на Рисунку 2.7 також представлені результати, отримані в межах іншого експерименту, описаного в [29; 32]. У цьому попередньому аналізі конфігурація постачальників була змінена на (CORTX □ CORRХ - SV) та між постачальниками (CORTX □ CNITRX - CV). У [29; 35] конфігурація каналу була дещо іншою (32 Гбод і 38 ГГц міжканальний інтервал).

Продуктивність цього експерименту показана кривими з заповненими маркерами на Рисунку 1.7, і в цьому порівнянні чітко видно, що обидва сценарії з одним постачальником та два сценарії між постачальниками мають схожу продуктивність.

З точки зору DSP, зниження продуктивності у CV може бути пов'язане з відсутністю знання про систему, наприклад, компенсації зсуву I/Q передавача/приймача.

Передача у CV-режимі зі стандартним HD-FEC може досягати ~300 км, і, отже, якщо потрібні більші відстані, має бути досягнуто рішення щодо стандартизації SD-FEC у межах комітетів ITU.

Для задоволення майбутніх потреб у пропускній здатності оптичних мереж і підвищення їхньої ефективності введення гнучкості в мережу є найбільш економічно ефективною стратегією [1; 31]. У довгостроковій перспективі, для забезпечення передачі сигналів клієнтів зі швидкістю 1 Тбіт/с у транспортних мережах єдиним економічно ефективним варіантом є перехід від фіксованої мережі до гнучкої оптичної мережі.

Підрозділ JRA1 T1 провів опитування постачальників у межах проєкту GN4-1, щоб визначити доступні функціональності та ті, які з'являться протягом двох років. Існує різноманітність рішень та реалізацій, але частина загальних функціональностей була виявлена майже у всіх реалізаціях постачальників.

Таблиця 1.3 показує ці підмножини.

Таблиця 1.3

Налаштовувані параметри в сучасних реалізаціях багатошвидкісних транспондерів

Тип FEC	Формат модуляції	Спектральна щільність	Лінійна швидкість	Кількість носіїв	Швидкість символів (Baud rate)
G-FEC HG-FEC SD-FEC E-FEC U-FEC	BP-BPSK BP-QPSK BP-8QAM BP-16QAM	37.5 ГГц до 200 ГГц із кроком 12.5 ГГц	50G 100G 200G 400G	1 - 2	25 Гбод – 32 Гбод

Не всі ці параметри підтримуються всіма постачальниками. Існують деякі незначні відмінності між ними. Формат модуляції та FEC є найбільш базовими загальними будівельними блоками в існуючих транспондерах із підтримкою кількох швидкостей. Спектральна щільність і швидкість символів (Baud rate), навпаки, реалізовані трохи по-різному в залежності від постачальника. Щодо спектральної щільності, можна зустріти транспондери з обмеженою гнучкістю

налаштування спектра, а також транспондери, які дозволяють налаштовувати градацію із кроком 0.5 ГГц.

Перевага транспондерів із гнучкою швидкістю полягає в тому, що вони дають операторам мережі можливість налаштовувати параметри транспондера, щоб підтримувати певну послугу з найвищим рівнем використання мережі. Наприклад, якщо оператори хочуть надати послугу 400G на короткій відстані, найбільш оптимізованим способом є вибір максимально можливого формату модуляції зі SD-FEC для мінімізації використання спектральної щільності.

Різні типи FEC додають певні накладні витрати до каналу передачі. Обсяг накладних витрат може варіюватися від 7% до понад 20%. Більші накладні витрати забезпечують більший коефіцієнт посилення кодування. Типи FEC, які використовуються в транспондерах, зазвичай є пропрієтарними для кожного постачальника, що означає неможливість спільного використання транспондерів від різних постачальників. Винятками є G-FEC і FEC із високим коефіцієнтом посилення (HG), що підтримуються кількома постачальниками.

2 СІЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРУ ТА ALIEN WAVES

2.1 Переваги використання спільного спектру та технології Alien Waves

Чужі хвилі (Alien Waves, AW) — це довжини хвиль, які є невідомими для домену мережі і ділять спектр із «рідними» довжинами хвиль. Іншим терміном для позначення чужих хвиль є «спільне використання спектра» (Spectral Sharing). Ця тема обговорювалася в спільноті NREN (національних дослідницьких та освітніх мереж) протягом багатьох років і нарешті набуває популярності, оскільки AW усе частіше впроваджуються в мережах NREN.

Оскільки дослідження дедалі більше стають глобальними, дослідницькі мережі також повинні ставати більш динамічними та гнучкими, розширюючи свої ресурси й можливості за межі окремих країн, регіонів або доменів. Для того щоб підтримувати майбутні дослідницькі проєкти та глобальні партнерства, дослідницькі мережі можуть розвиватися більш відкрито та федеративно. Замість створення нових багатодомених послуг у традиційний спосіб «перетину кордонів», де інформація зазвичай обмінюється на мінімальному рівні (наприклад, обмін інформацією у форматі «чорне-біле» на найпростішому інтерфейсі), дослідницькі мережі можуть руйнувати ці межі, використовуючи доступні ресурси та відкриваючи доступ до них (наприклад, обмін інформацією на рівні OTN або доступ до спектра в іншій мережі).

Одним із способів реалізації цього для окремих дослідницьких мереж може бути відкриття доступу до спектра DWDM, пропонуючи можливість використання іноземної інфраструктури. Прикладом є чужі хвилі, коли ресурси мережі оператора використовуються для транспортування оптичних каналів, які оператор не контролює.

У минулому в дослідницьких спільнотах проводилося кілька досліджень і експериментів щодо зв'язку за допомогою чужих хвиль. Зокрема, учасники JRA1 T1, SURFnet і NORDUnet, об'єднали зусилля, щоб перетворити ці експерименти

на реальні виробничі послуги, які зараз використовуються для стабілізації та розширення їхніх мереж.

Оскільки партнерство SURFnet і NORDUnet щодо розробки послуг чужих хвиль було започатковано вже деякий час тому, було проведено значну кількість тестувань, щоб забезпечити надійність і цілісність взаємодії оптичних сигналів. Крім того, зусилля з планування та розробки були спрямовані на визначення правильних зон відповідальності, відповідних процедур і належних інструментів моніторингу для впровадження послуг у виробництво.

Хоча постачальники традиційно дотримуються більш консервативного підходу до спільного використання своїх мережевих можливостей (оскільки це зазвичай зменшує їхній дохід), у галузі все ж простежується тенденція до відкритості до цієї концепції. Платформа Ciena DWDM (6500) має налаштування для додавання каналів із "чужими" довжинами хвиль і навіть може контролювати їхню потужність у межах системи. Інші постачальники, такі як Alcatel Lucent (зі своєю платформою 1626LM) та ADVA (з їхніми системами FSP 2000 / FSP 3000), також підтримують прийом чужих хвиль. Infinera також підтримує роботу з чужими хвилями, але у менш масштабованій конфігурації.

2.2 Розробка інструментів моделювання мережі

У межах проєкту GN3plus у рамках Open Call проєкту MOMoT [36] було розроблено багатодомений інструмент моделювання оптичних мереж (MOMoT) для оцінки та прогнозування продуктивності чужих хвиль (AW) та аналізу наслідків для існуючого трафіку на шляху мережі. Під час проєкту GN4-1 інструмент моделювання був додатково розроблений підрозділом JRA1 T1, і до нього були додані нові функції.

Інструмент MOMoT дозволяє користувачам вводити певні характеристичні параметри, такі як довжина від точки А до точки В, довжина хвилі, вхідна потужність, швидкість передачі даних тощо, і на основі цих даних інструмент оцінює, чи ймовірно, що з'єднання буде успішним, і який вплив це

може мати на існуючі послуги. Інструмент виконує розрахунок за принципом «на швидку руку» та оцінює доцільність впровадження чужої хвилі (AW) у певному мережевому сценарії.

Розробка інструмента здійснювалася з урахуванням швидкості та ефективності, тому замість виконання повноцінного, детального і тривалого багатоканального моделювання було застосовано підхід «зони безпеки». Інструмент швидко оцінює багатоканальні ефекти без глибокого моделювання та попереджає користувача про можливі наслідки.

Інструмент моделювання оцінює швидкість бітових помилок (BER) для чужих хвиль у оптичних мережах з комутацією каналів, з урахуванням таких форматів модуляції:

- Ключування "включено-вимкнено" (On-off keying, OOK) із прямим детектуванням.
- Поляризаційне мультиплексування квадрофазної маніпуляції (PM-QPSK) із когерентним детектуванням.

Таким чином, типові швидкості передачі даних, які враховуються, можуть становити 10 Гбіт/с та 100 Гбіт/с.

Інструмент моделювання є програмним забезпеченням (.exe) з зручним для користувача інтерфейсом, у якому можна встановлювати параметри з'єднання, рідних і чужих довжин хвиль. На основі заданих вхідних параметрів програма надає оцінку швидкості бітових помилок (BER).

Користувач може вводити різні параметри, серед яких швидкість передачі даних для чужої довжини хвилі, міжканальний інтервал, формат модуляції та рівні потужності. У поєднанні з інформацією про розташування волокна з дисперсійною компенсацією (DCF) інструмент надає наступний вихідний результат:

Оцінка BER до FEC: у цьому полі відображається оцінена швидкість бітових помилок (BER) для чужої довжини хвилі.

Попередження про перевищення порогу потужності чужої довжини хвилі у 2 дБм. Це введено, оскільки надмірний рівень потужності може спричинити надмірну фазову модуляцію (XPM) на активних довжинах хвиль.

У разі введення PM-QPSK чужої хвилі в рідну мережу OOK: вихідні повідомлення відображатимуть BER чужої хвилі при зміні ширини захисного інтервалу між чужою хвилею та рідною OOK.

Дійсно, BER PM-QPSK сильно залежить від наявності сусідніх OOK через XPM. Таким чином, збільшення відстані між PM-QPSK і OOK покращує продуктивність PM-QPSK. Захисний інтервал визначається як кількість вільних каналів між PM-QPSK та OOK.

Інший тип вихідного повідомлення з'являється, якщо продуктивність сильно впливає поляризаційна модова дисперсія (PMD).

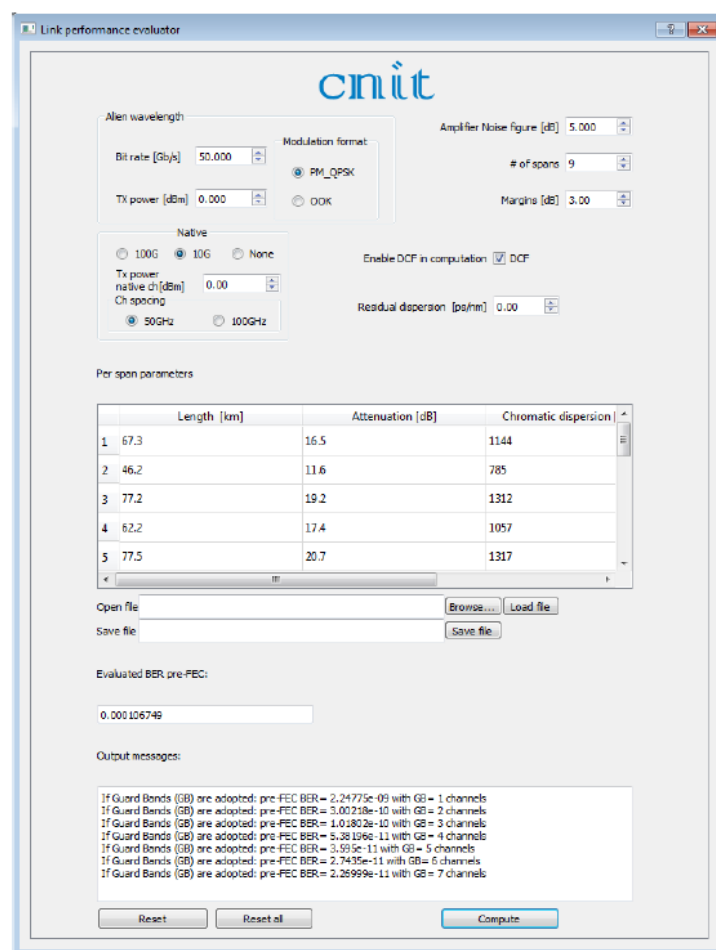


Рисунок 2.1 - Інтерфейс інструмента моделювання та вихідні повідомлення, включаючи інформацію про захисний інтервал.

Інструмент моделювання базується на аналітичній моделі для оцінки BER, описаній у статті "Modeling and Distributed Provisioning in 10–40–100-Gb/s Multirate Wavelength Switched Optical Networks" [37]. Для двох різних технік передачі використовуються такі моделі:

1. OOK із прямим детектуванням: наприклад, підходить для швидкості 10 Гбіт/с.
2. PM-QPSK із когерентним детектуванням: наприклад, підходить для швидкості 100 Гбіт/с.

Модель спрямована на надання оціненого значення BER до корекції помилок (pre-FEC BER) як для чужої довжини хвилі, так і для рідних світлових шляхів, активних у мережі. Модель та інструмент моделювання базуються на припущеннях, описаних у [37], які коротко підсумовані тут:

1. Коефіцієнт шуму підсилювача вважається однаковим для всіх ділянок.
2. Наступні параметри волокна є однаковими для всіх ділянок і не доступні для користувача: ефективна площа $80 \mu\text{m}^2$, параметр PMD $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.
3. Цифрова обробка сигналів (DSP) на приймачі для сигналів PM-QPSK може повністю компенсувати лінійні спотворення (тобто як дисперсію поляризаційного режиму (PMD), так і хроматичну дисперсію (CD)).
4. Чотирихвильове змішування (FWM), стимульоване розсіювання Рамана (SRS) та стимульоване розсіювання Брілюєна (SBS) не включені до моделі явно. Ці ефекти можуть розглядатися як граничні значення у найгіршому випадку (наприклад, нижче 1 дБ як штраф оптичного відношення сигнал/шум (OSNR) [37]). У будь-якому разі рівні потужності, зазвичай використовувані в телекомунікаційних мережах, досить низькі, щоб ці ефекти можна було вважати незначними.
5. Інші ефекти, такі як старіння, фільтраційні ефекти тощо, враховуються як граничні значення до OSNR у розрахунках, які можна налаштувати через інтерфейс. Типове значення для цих граничних значень може становити 3 дБ.

Загалом прийняті моделі враховують наступні фізичні спотворення:

- Ампліфіковане спонтанне випромінювання (ASE).
- Дисперсія поляризаційного режиму (PMD).
- Хроматична дисперсія (CD).
- Самофазова модуляція (SPM).
- Крос-фазова модуляція (XPM). XPM є особливо актуальною, коли довжина хвилі PM-QPSK оточена довжинами хвиль OOK.
- Як зазначалося раніше, інші фізичні спотворення враховуються через налаштовувані граничні значення у найгіршому випадку.

Для отримання більш детальної інформації про прийняті моделі зверніться до [37].

У цьому підрозділі підсумовані основні вдосконалення в порівнянні з версією інструмента, представленою в межах проєкту GN3plus Open Call MOMoT:

1. Додано обчислення BER для 10G OOK.
2. Включено граничні значення як вхідний параметр системи.
3. Розблоковано швидкість передачі даних у випадку 10G OOK.
4. Змінено горизонтальний заголовок таблиці.
5. Виправлено помилку під час завантаження деяких конфігураційних файлів: додано перевірку структури конфігураційного файлу (щоб уникнути аварійного завершення роботи інструмента під час запуску).
6. Вирішено проблему, пов'язану з повідомленнями про помилки «попередження: послаблення VOA» та «Помилка 2» (уникнуто проблем із конкретними конфігураційними файлами з високим рівнем потужності): ці попередження та повідомлення про помилки більше не з'являються.

Інструмент моделювання, розроблений у межах проєкту GN3plus Open Call MOMoT, оцінює для підмножини доступних модулювань вплив і доцільність введення чужих хвиль у транспортні оптичні мережі. Інструмент був додатково розроблений у контексті GN4-1, і серед інших функцій було додано обчислення BER для 10G OOK, яке спеціально запитували NREN у GN3plus.

Інструмент забезпечує простий графічний інтерфейс користувача та враховує широкий спектр фізичних спотворень, які мають значення при передачі чужих хвиль.

2.3 Найкращі практики з інших мережевих проєктів

Для того щоб отримати практичний досвід і розробити рекомендації щодо проєктування, введення в експлуатацію та обслуговування послуг на основі чужих хвиль, у спільнотах NREN було проведено різноманітні випробування та дослідження. У цьому розділі представлені загальні найкращі практики та уроки, отримані з випробувань чужих хвиль, які проводили сторонні учасники JRA1 T1 NREN — SUNET та UNINETT, а також із досвіду операторів NREN.

Налаштування чужих хвиль між двома дослідницькими мережами зводиться до технічних аспектів того, наскільки добре платформи підтримують впровадження та управління чужими довжинами хвиль. Незважаючи на це, не меншою проблемою є встановлення партнерських відносин із іншими дослідницькими мережами. Вкрай важливо, щоб аспекти впровадження послуг, такі як узгодження відповідальності або визначення процедур експлуатації, вирішувалися спільно й на ранньому етапі співпраці.

Інші важливі фактори включають:

1. визначення стандартів і узгодження технічних деталей для впровадження послуг;
2. документування всіх параметрів проєктування та експлуатаційних значень (наприклад, потужності запуску, вхідних значень приймача тощо);
3. достатній моніторинг послуг на основі чужих хвиль;
4. чітке звітування про тривоги та проблеми для кожного з партнерів.

Концепція спільного використання мережевих ресурсів і відкриття для нерідних сигналів не обов'язково має обмежуватися прийняттям окремих сигналів. Замість того, щоб лише призначати визначену точку входу на виділеному каналі,

можна ділитися частиною рідного спектра (або навіть повним спектром) із партнером, надаючи йому кращі можливості для розширення. Ця концепція зазвичай називається спільним використанням спектра (spectrum sharing).

Під час етапу проєктування нової мережі SUNET (шведська дослідницька мережа) було вирішено застосувати новий підхід до встановлення з'єднання між університетськими маршрутизаторами.

Замість використання традиційного способу побудови мереж, у якому для підключення використовуються дорогі транспондери, SUNET планує використовувати когерентні кольорові інтерфейси в маршрутизаторах. Зокрема, ці когерентні інтерфейси — це лінійні картки 100G Juniper із клієнтськими інтерфейсами CFP2, які будуть напряду з'єднані з наступним університетським сайтом (червона лінія на Рисунку 3.2 нижче) як чужі хвилі через оптичні підсилювачі ADVA.

Крім того, магістральні маршрутизатори також з'єднуються через чужі хвилі (сині лінії на Рисунку 3.2).

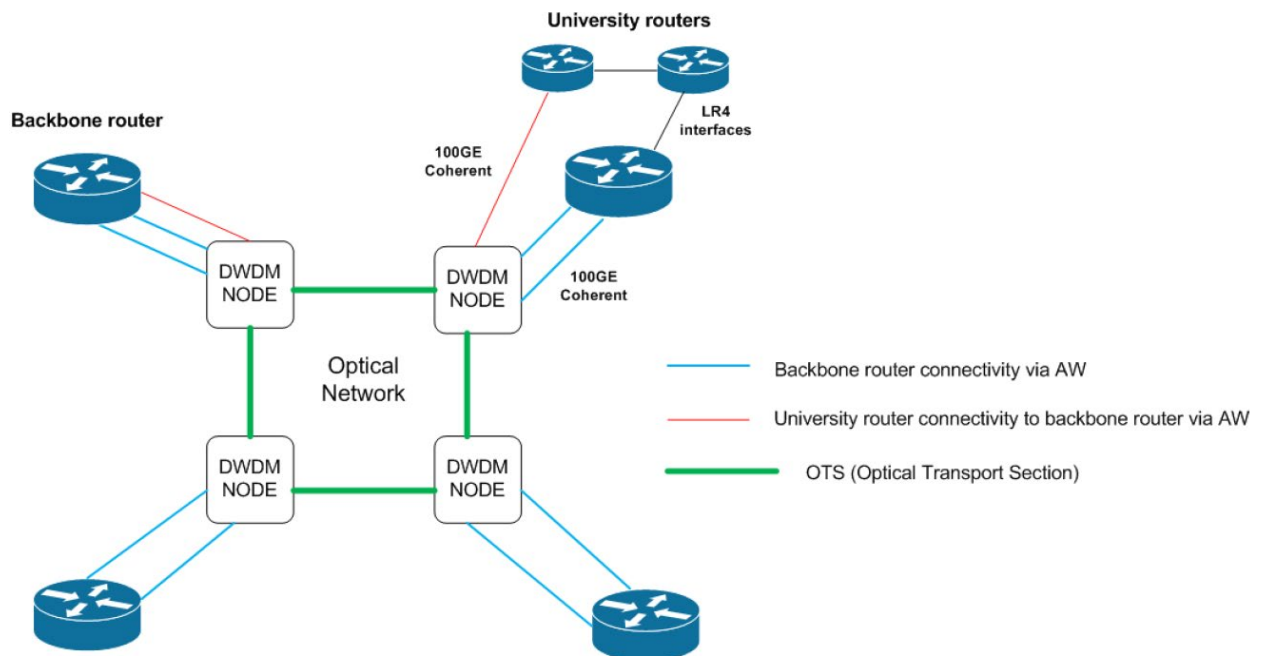


Рисунок 2.2 - Налаштування оптичної мережі.

Ефективні канали (що генеруються лінійними картками Juniper) будуть, таким чином, «чужими» для платформи ADVA. Планується здійснювати контроль і управління спектром у співпраці, використовуючи площину управління GMPLS для взаємодії систем ADVA та Juniper.

Когерентні лінійні картки 100G від Juniper є бета-версією, і SUNET є одним із перших клієнтів у світі, хто їх випробовує. Процес побудови цієї мережі вже розпочато, і перше з'єднання було встановлено; завершення всієї мережі очікується до жовтня 2016 року.

Метою тестування було перевірити підтримку 100G чужих довжин хвиль у оптичній мережі UNINETT (норвезької NREN). Крім того, UNINETT прагнула отримати досвід роботи з новими картами 100G OTN/DWDM від Juniper і Cisco та довести їхню взаємодію. Були проведені такі тести:

1. Тест 100G чужої довжини хвилі (AW) одного постачальника на платформі Coriant hiT 7300.

2. Тест 100G чужої довжини хвилі (AW) від кількох постачальників на платформі Coriant hiT 7300.

DWDM шлях з'єднання було встановлено через дві точкові DWDM системи на основі платформи Coriant hiT 7300 між Тронгеймом і Осло. Як показано на Рисунку 2.3 нижче, DWDM системи на стороні Осло з'єднані між собою за допомогою виділеного темного волокна між мультиплексором (mux) та демультимплексором (demux).

Обидва маршрутизатори розташовані в Тронгеймі, але в різних локаціях. Для створення 40 Гбіт/с трафіку через з'єднання 100G AW використовувався тестовий генератор Spirent із 10G інтерфейсом і логічною петлею на маршрутизаторах.

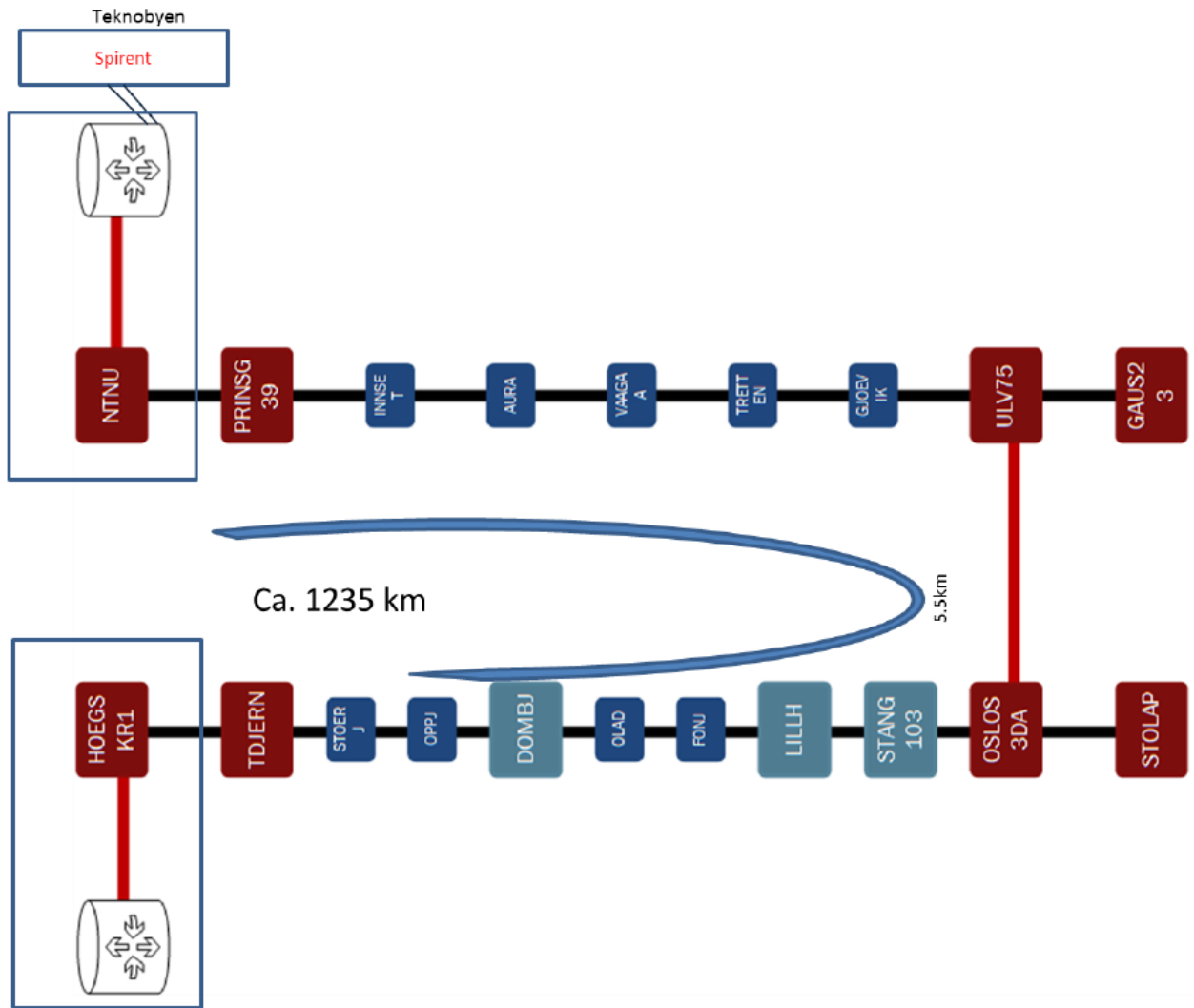


Рисунок 2.3 - Сценарій тестування взаємодії Cisco–Juniper у мережі UNINETT.

Загальна довжина тестового шляху DWDM становить 1235 км і включає дев'ять вузлів типу "оптичний лінійний підсилювач" (optical line repeater), шість OADM та два термінали. Одна з DWDM систем базується на міжканальному інтервалі 100 ГГц, а інша — на 50 ГГц. Використання системи на обох платформах перевищує 50%, при цьому працює суміш робочих довжин хвиль 10G та 100G. Довжини хвиль 100G та 10G згруповані в окремі оптичні діапазони із захисним інтервалом у 200 ГГц між ними. Загальне значення OSNR становить близько 16.2 дБ.

100G DWDM MX MIC базується на технології 100G CFP2-ACO когерентної знімної оптики. Обидва маршрутизатори були налаштовані з HG-

FEC (сумісність між постачальниками) на частотному каналі 193 ТГц. Було створено навантаження у 40 Гбіт/с через з'єднання 100G AW, і тест проводився протягом кількох днів.

На Рисунках 3.4 та 3.5 показано результати на інтерфейсах Juniper. Як видно з рисунків, втрати пакетів і помилки після корекції помилок (post-FEC) не були зареєстровані. На Рисунку 3.4 показані мінімальні та максимальні значення pre-FEC BER, виміряні протягом 1-секундного інтервалу за 15-хвилинний період

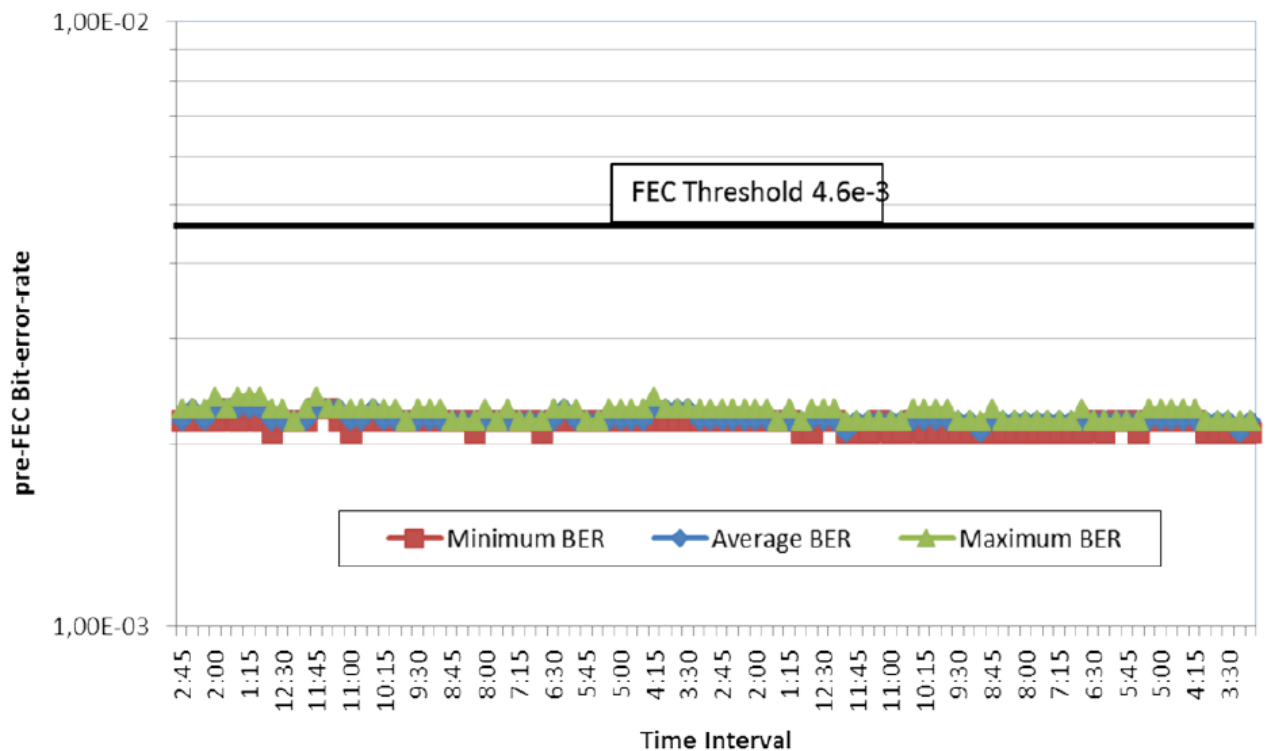


Рисунок 2.4 - Швидкість бітових помилок до корекції (Pre-FEC) на маршрутизаторі Juniper.

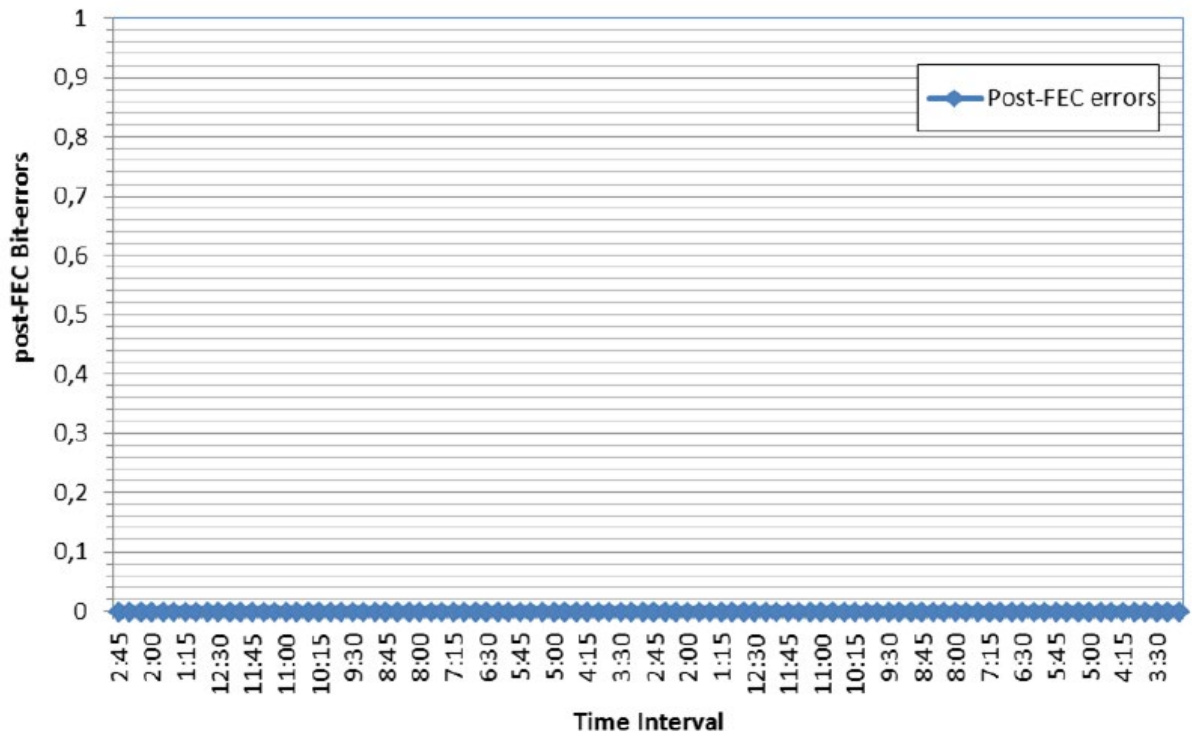


Рисунок 2.5 - Бітові помилки після корекції FEC

Результати тесту виявилися кращими, ніж очікувалося. Налаштування маршрутизаторів та DWDM було виконано відповідно до процедури і без жодних перешкод. Навіть за умови, що значення OSNR у системі DWDM було близьким до межі роботи HG-FEC, не було зареєстровано жодних бітових помилок до корекції (pre-FEC) або втрат пакетів.

Чужі хвилі та спільне використання спектра мають багато можливостей і значний потенціал у дослідницьких спільнотах. Як згадувалося в попередніх розділах SURFnet та NORDUnet вже впровадили деякі свої послуги як чужі хвилі, і стабільність цих послуг була доведена у виробничому середовищі протягом кількох років.

Готовність до впровадження довжин хвиль від інших постачальників (які працюють на інших системах та в інших центрах управління) базується на попередніх моделюваннях, експериментах та випробуваннях, проведених NREN та в контексті GÉANT, які надали впевненість для початку реальної реалізації.

Під час згаданих експериментів і моделювань було досліджено можливість знаходження оптимальної області потужності для взаємодії рідних і чужих сигналів. Очевидно, що нелінійні ефекти стають помітними при відносному збільшенні інтенсивності сигналу, і результати експериментів показали проблеми фазової модуляції (крос-фазової та самофазової), коли використовувалися надмірно високі рівні потужності сигналу або занадто малий захисний інтервал.

Окрім цих висновків, було зроблено висновок, що операційні виклики у встановленні партнерських відносин для спільного використання хвиль або спектра є настільки ж важливими, як і вирішення технічних проблем на етапі введення в експлуатацію.

2.4 Експериментальні сценарії та ключові результати

Було проведено кілька експериментальних розгортань за участю та без участі партнерів JRA1 T1. Результати цих експериментів корисні для набуття впевненості та створення деяких інженерних правил для оптимальної реалізації.

Ще одним важливим питанням є визначення фактичних параметрів проєктування та конкретних фізичних значень, необхідних для впровадження чужих хвиль.

Саме тут інструмент MOMoT може бути дуже корисним, оскільки він зручно дозволяє розрахувати вплив взаємодії чужих і рідних сигналів. З його допомогою легко змодельовати виробниче середовище та розрахувати конкретні значення, які використовуватимуться під час введення в експлуатацію чужих хвиль.

Однак для того, щоб бути впевненими у цих значеннях, було проведено верифікаційне тестування для перевірки точності інструмента та, за необхідності, внесення виправлень і вдосконалень. Початкове верифікаційне тестування було проведено в рамках GN3plus через випробування із SURFnet і Dante, результати якого порівнювалися з оцінками інструмента MOMoT.

Для отримання більшої впевненості у верифікації бажано проводити кілька випробувань для підтвердження точності інструмента. Тому було проведено додаткові випробування в діючій виробничій мережі NORDUnet із використанням показника "BER залежно від потужності запуску" як критерію продуктивності.

У першому випробуванні NORDUnet з'єднав два транспондери (на одному майданчику в Копенгагені 1), а потім налаштував канал, який йде в одному напрямку з Копенгагена до Гамбурга і назад до Копенгагена.

З'єднання з Копенгагена 2 до Гамбурга 1 проходить через Фюн і далі в напрямку Німеччини. Інше з'єднання, з Гамбурга 2 назад до Копенгагена 1, проходить через Зеландію, і загальна відстань становить приблизно 1,000 км.

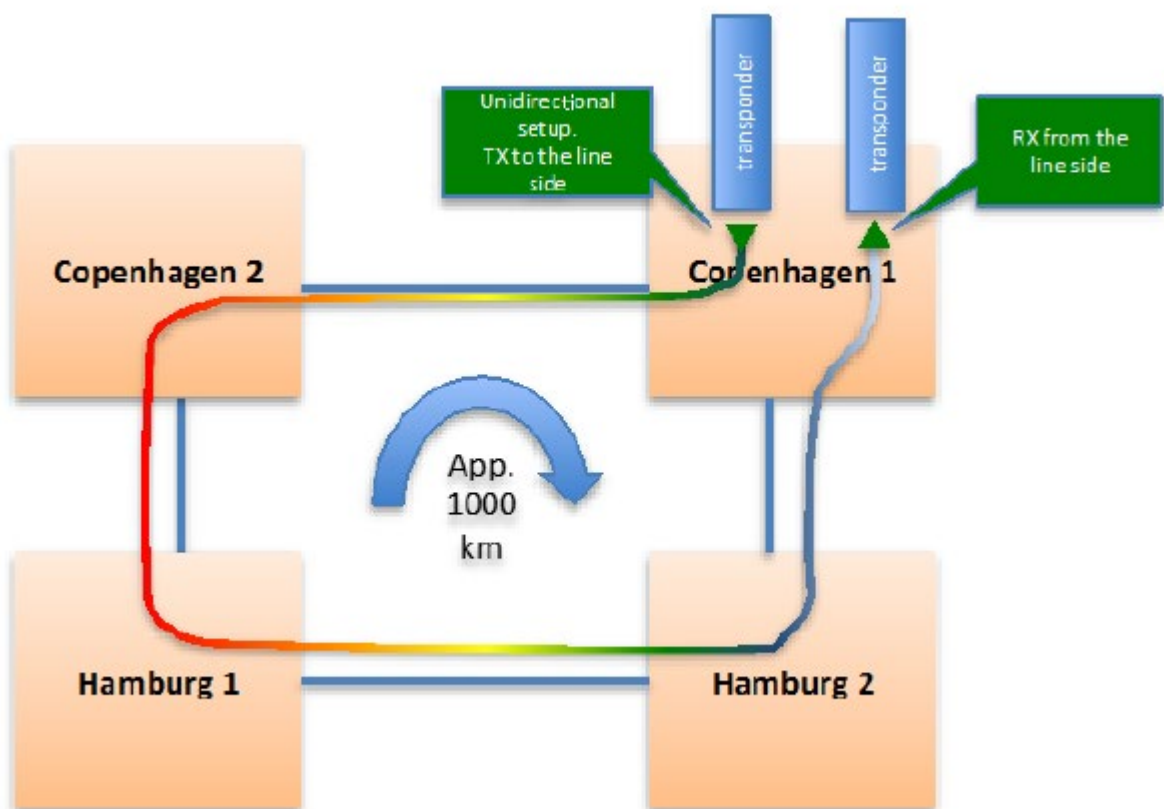


Рисунок 2.6 - Сценарій тестування між Копенгагеном і Гамбургом.

На жаль, досяжність транспондерів, доступних для випробування, виявилася недостатньою, і порівняти результати з інструментом MOMoT не

вдалося. Через це обмеження досяжності було швидко прийнято рішення провести інше випробування в тій самій мережі, але на меншій відстані.

Друге випробування охоплювало приблизно 300 км і проходило з Копенгагена (Данія) до Гетеборга (Швеція). Як і в першому випробуванні, два транспондери були з'єднані в традиційній точковій однонаправленій конфігурації (див. Рисунок 3.7). Знову ж таки, було додано канал разом із нормальними виробничими послугами із захисним інтервалом у 500 ГГц.

Канал вручну налаштовували за потужністю, щоб відповідати решті спектра через три вузли, і залишали статичним після балансування з'єднань. Значення RX pre-FEC вимірювалися в кінцевій точці В у Гетеборзі залежно від зміни потужності запуску в початковій точці А у Копенгагені 1.

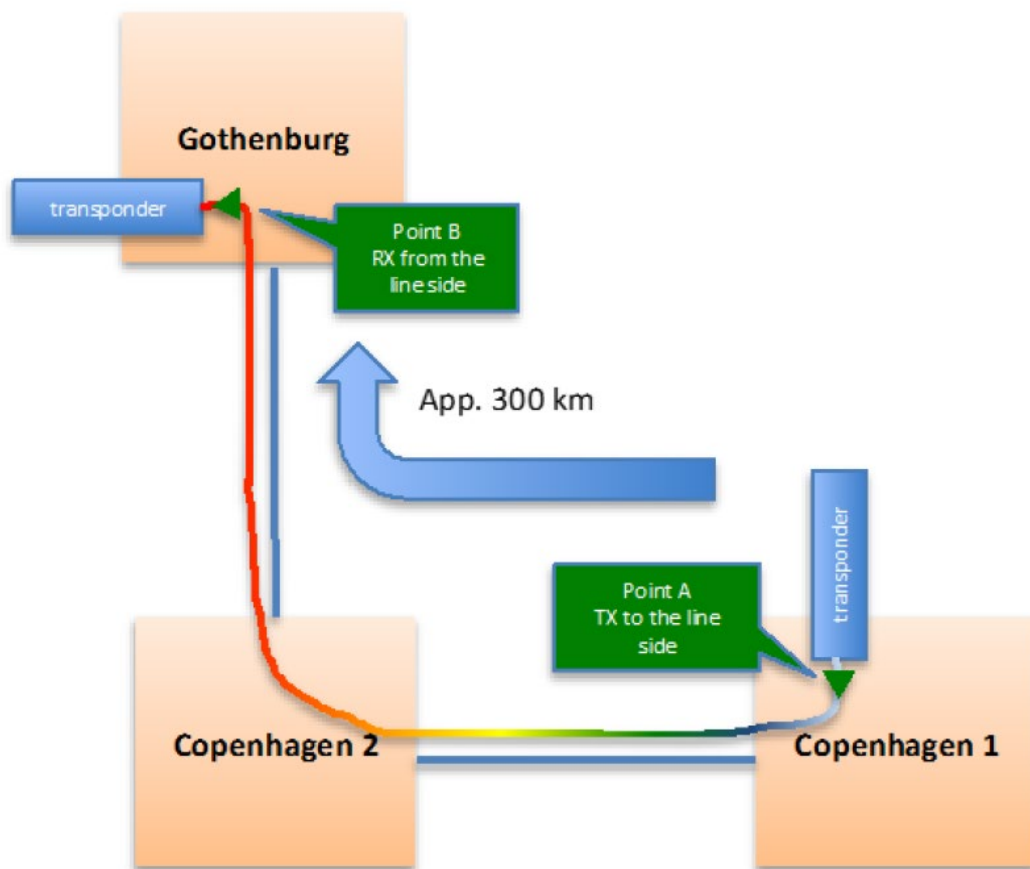


Рисунок 2.7 - Сценарій тестування на відстані 300 км між Копенгагеном і Гетеборгом.

Для перевірки прогнозів інструмента MOMoT були використані значення посилення Гетеборг, такі як довжини ділянок, потужність запуску, швидкість передачі даних і формат модуляції, як вхідні дані.

На Рисунку 3.8 показано порівняння фактичних вимірювань на лінії та трьох графіків, що представляють три різні сценарії, розраховані інструментом. Значення запасу (M) і коефіцієнта шуму (NF) варіювалися парами: (M = 3, NF = 3), (M = 3, NF = 7) та (M = 7, NF = 7). Запас є параметром, який враховує старіння волокна та інші нефіксовані фактори. Типове значення близько 3 добре представляє середнє оптичне з'єднання.

Коефіцієнт шуму підсилювачів часто відомий для оптичних мереж. Однак у цьому випадку його значення не було перевірено, тому були обрані два варіанти.

На Рисунку 3.8 видно, що результати інструмента доволі добре відповідають фактичним вимірюванням, особливо для кривої інструмента (M = 3, NF = 7). Однак при вхідній потужності понад 1 дБ лабораторна крива починає згинатися вниз. Це можна пояснити обмеженням потужності, що має місце в з'єднанні. Через керування коефіцієнтом посилення підсилювачів ефект подальшого збільшення потужності зменшується.

Також слід зазначити, що лабораторна крива була зміщена паралельно на 5 дБ вліво на цьому графіку, що враховує втрати, які виникають на початковому етапі передачі та під час роботи селективного перемикача довжин хвиль. З точки зору оцінки лінії AW, де ці втрати невідомі, оцінка якості з'єднання не буде перебільшеною, а, скоріше, песимістичною щодо успішності з'єднання. Тому завжди бажано мінімізувати втрати на вставці або враховувати їх у розрахунках.

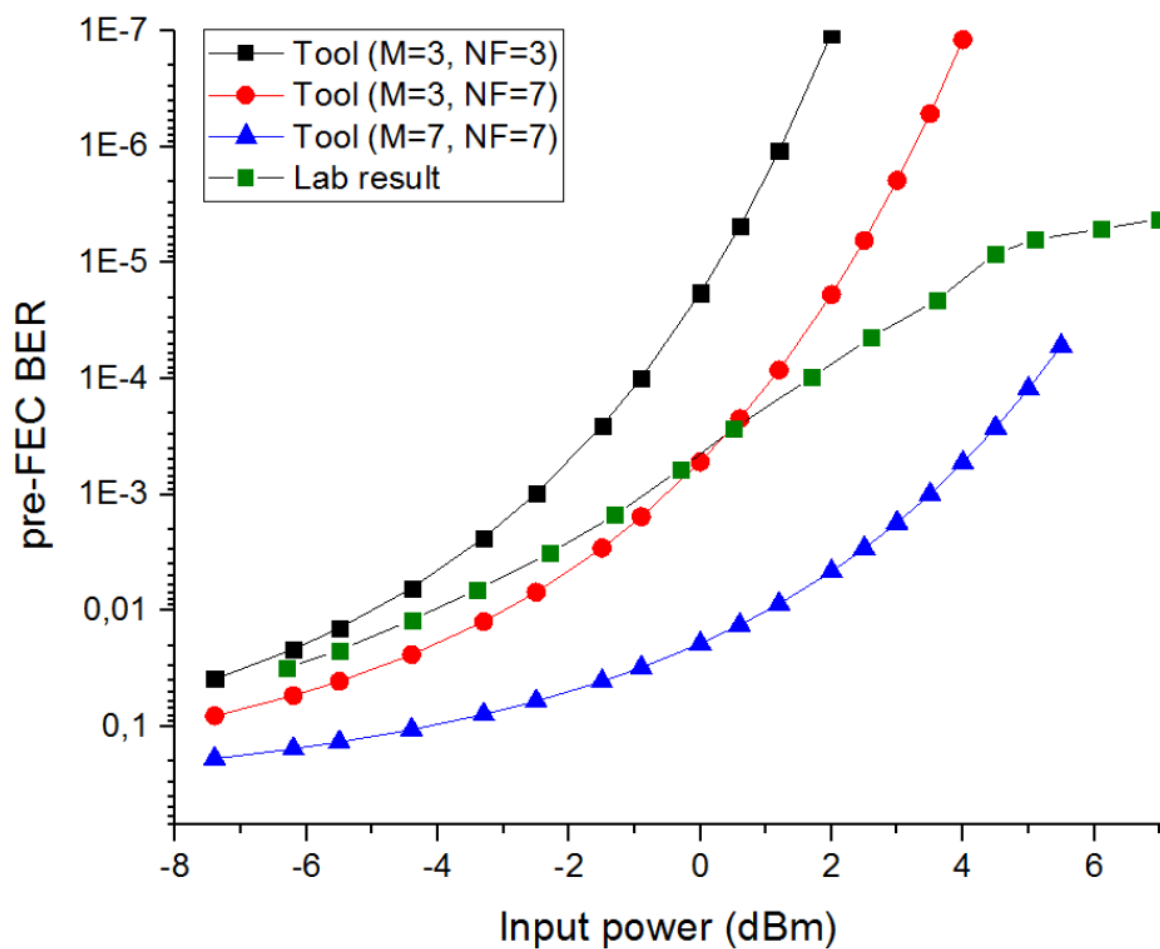


Рисунок 2.8 - Порівняння кривих pre-FEC BER за результатами польових вимірювань (лабораторія) та трьох кривих, створених інструментом MOMoT

3 ЧАСТОТНИЙ ТА ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ

Для забезпечення безконтактної (zero-touch) підключеності та підтримки низки вимогливих застосувань необхідно впроваджувати механізми синхронізації та розподілу інформації про час і частоту між лабораторіями та користувачами. Рішення цього завдання можна шукати на різних рівнях, і в цьому розділі питання розглядається як на фізичному рівні, так і на рівнях 2/3.

У Розділі 4.1 описані концепції розподілу точного часу та стабільної частоти на фізичному рівні. Розглядаються різні концептуальні архітектури та описані кілька спільних між-NREN експериментів, проведених на з'єднаннях протяжністю до 1,500 км. Результати вказують на життєздатність цих концепцій, а також надано огляд майбутніх викликів.

Хоча фізичний розподіл часу є дорогою та точною магістраллю, точна передача часової інформації також може підтримуватися на вищих рівнях. Це розглядається в Розділі 4.2 із застосуванням аудіо та відео як прикладних кандидатів. Зокрема, досліджується протокол точного часу (Precision Time Protocol, RTP) і його робота для з'єднань, які працюють поверх тунелів MPLS. Також обговорюється спільний експеримент, який оцінює RTP через стандартне інтернет-з'єднання на 500-кілометровому з'єднанні між Ерлангеном і Прагою.

3.1 Розподіл частоти на фізичному рівні моделі OSI

Точний час або стабільна частота потрібні для багатьох застосувань у навігації, метрології, телекомунікаціях, геодезії, астрономії та інших наукових і промислових галузях. Одним із джерел точного часу часто є приймач глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), який забезпечує сигнал один імпульс на секунду (1PPS). Однак таке рішення має обмежену масштабованість і іноді є неможливим через проблеми з установкою антени (наприклад, великі будівлі, тунелі). Крім того, розподіл часу та частоти через оптичні канали дозволяє значно покращити точність і стабільність порівняно з методами GNSS [38; 39].

Точна передача часу та ультрастабільної частоти відкриває можливості для проведення експериментів із високим рівнем точності, недосяжним до цього часу. Серед прикладів, хоча й не вичерпних:

1. Мережі антен в астрофізиці.
2. Вимірювання фундаментальних констант (наприклад, стала Больцмана).
3. Тестування супутникових з'єднань (наприклад, сигнал Metrological Fibre Network with European Vocation + (REFIMEVE+) може використовуватися Європейським космічним агентством (ESA) у програмі просторових атомних годин PHARAO/ACES протягом наступних кількох років).
4. Тести фундаментальної фізики [40; 41] (наприклад, спектроскопія водню та його похідних, високоточна спектроскопія в фізиці атомів, іонів і молекул, пошук ефекту порушення паритету в молекулах).
5. Геодезичні застосування (вимірювання припливів, сейсмологія).

Стандартна передача через пари волокон використовується в телекомунікаційних додатках, але через численні ефекти час затримки передачі може змінюватися, наприклад, залежно від температурної залежності показника заломлення, теплового розширення матеріалу, дисперсії поляризаційного режиму тощо. Це не є проблемою для передачі даних. Однак для надзвичайно точної передачі часу або ультрастабільної частоти затримка розповсюдження повинна бути стабільною. Це можна досягти, використовуючи той самий фізичний шлях (волокно, підсилювачі, мультиплексори тощо) для обох напрямків передачі та додатково покращити шляхом стабілізації часу розповсюдження.

З цієї точки зору, розподіл може здійснюватися або через пару односпрямованих каналів, або через один двоспрямований канал. Далі канал може використовувати виділене волокно або довжину хвилі (λ), наступним чином:

Метроологічні інститути можуть орендувати власну інфраструктуру темного волокна для передачі метрологічних сигналів незалежно від будь-якого оператора або мережі NREN. Наприклад, PTB у Німеччині придбала IRU на волокно між Брауншвейгом і Мюнхеном (920 км) та між Брауншвейгом і Страсбургом (700 км) і створила на їх основі мережу зв'язку. Також проєкт OPTIME у Польщі базується на використанні виділених волокон. Це рішення надає значну автономію експерименту та можливість використовувати нестандартні системи передачі DWDM, наприклад, дослідні матеріали чи підсилювачі Брілюена замість підсилювачів ербію. Основний недолік цього підходу для метрологічних лабораторій — це необхідність у специфічних компетенціях для запуску RFQs, управління волоконною мережею та, що найважливіше, додаткове фінансування для IRU.

Другий підхід полягає у спільному використанні спектра з партнером (наприклад, NREN), який орендує темне волокно, і метрологічною лабораторією, якій надається можливість використовувати волокно NREN для передачі своїх метрологічних сигналів. У цій інфраструктурі WDM метрологічний сигнал вважається «чужим» і може бути довжиною хвилі WDM або ширшою частиною спектра. Спільне використання волокна та, відповідно, розподіл витрат між партнерами є основною перевагою цього рішення. Більше того, метрологічна лабораторія покладається на компетенції NREN для управління мережею та може зосередитися виключно на своїй основній діяльності. Однак спільне використання спектра між різними типами оптичних сигналів може призвести до компромісів у архітектурі та продуктивності.

Очевидно, що створення двоспрямованого каналу через виділене волокно потребує спеціалізованого обладнання, наприклад двоспрямованих підсилювачів. Аналогічно, якщо волокно спільно використовується зі спадковими DWDM системами, всі спадкові односпрямовані компоненти мають бути обійдені (див. Рисунок 4.1).

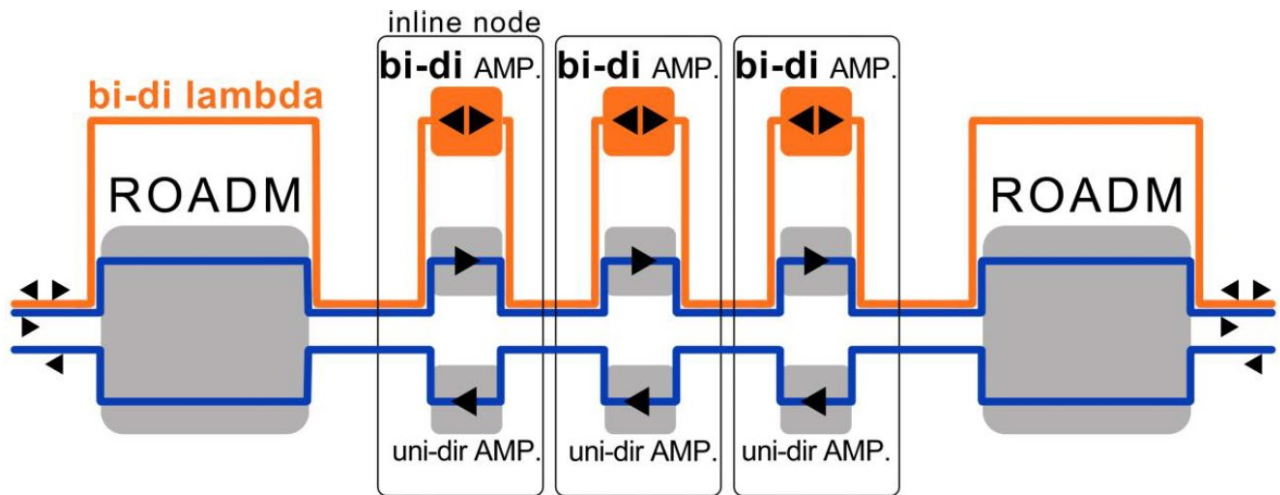


Рисунок 3.1 - Двоспрямований канал у спадковій системі передачі DWDM

Різні типи взаємоділених архітектур можуть бути створені. У наступних підрозділах детально розглядаються двоспрямовані та односпрямовані чужі довжини хвиль (λ).

З практичної точки зору, двоспрямована чужа довжина хвилі (λ) або кілька таких хвиль можуть бути встановлені лише в системах CWDM або пасивних DWDM; усі телекомунікаційні системи з оптичними підсилювачами містять ізолятори, які запобігають двоспрямованій роботі. Цей факт обмежує досяжність. Однак кілька пасивних ділянок можна об'єднати разом і підсилити зовні.

Такий об'єднаний λ для точної передачі часу, створений у мережі CESNET у 2013 році, був описаний у статті All optical two-way time transfer in strongly heterogeneous networks [42]. Він складається з частин CWDM і DWDM із загальним послабленням 22+21 дБ, як показано на Рисунку 4.2.

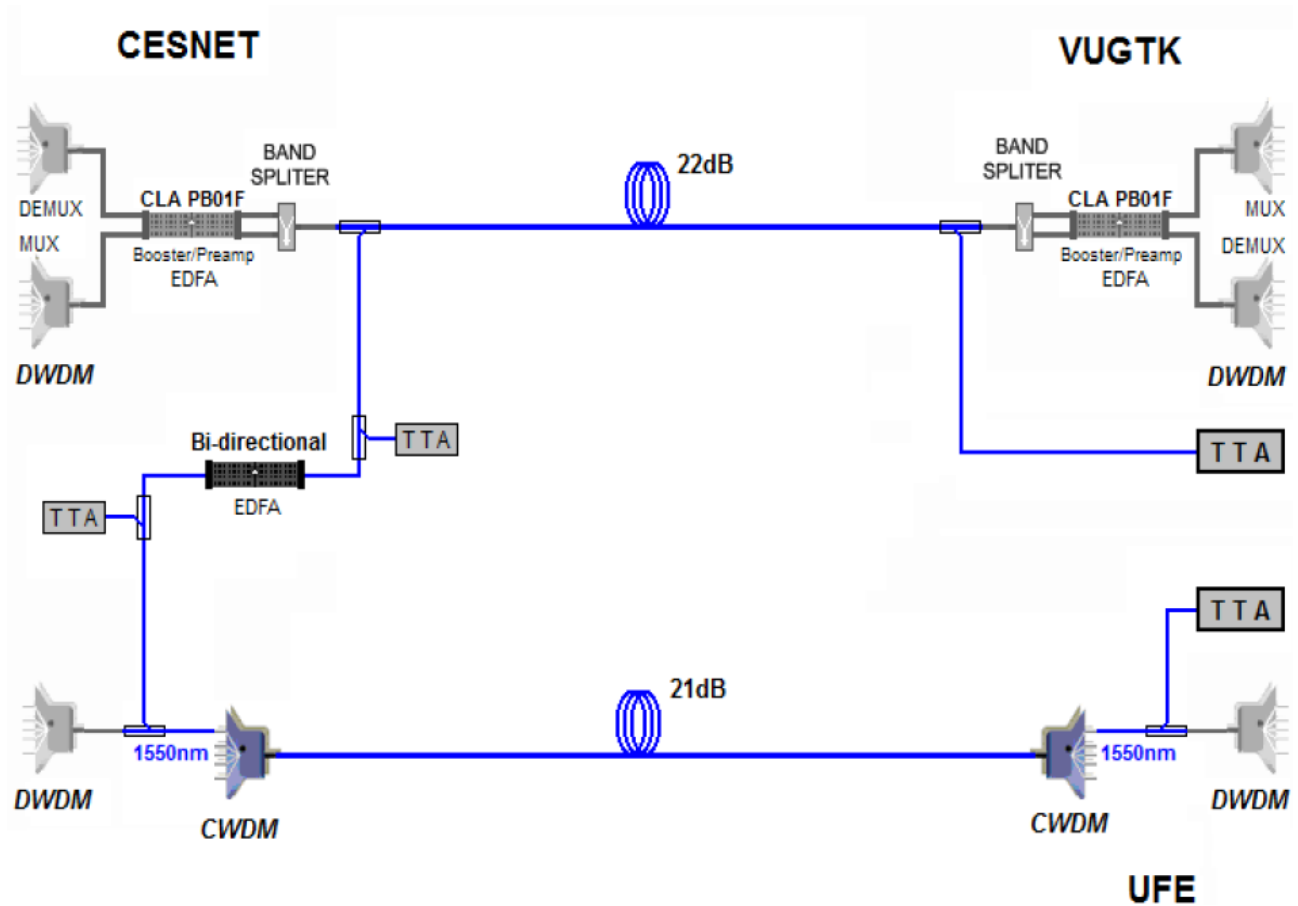


Рисунок 3.2 - Шлях UFE (Прага) – VUGKT (Печни): об'єднання пасивних довжин хвиль (λ)

Ця архітектура здебільшого використовується в рамках проекту REFIMEVE+ у Франції, метою якого є розгортання національної інфраструктури на магістралі DWDM мережі RENATER для поширення ультрастабільної частоти до наукових лабораторій. Метрологічний сигнал передається двоспрямовано через кожне темне волокно для точного компенсування, тому це рішення не відповідає звичайним технологіям DWDM, які вимагають ізоляторів.

На Рисунок 3.3 зображено лінію Nancy–Reims у мережі RENATER, обладнану для передачі REFIMEVE+.

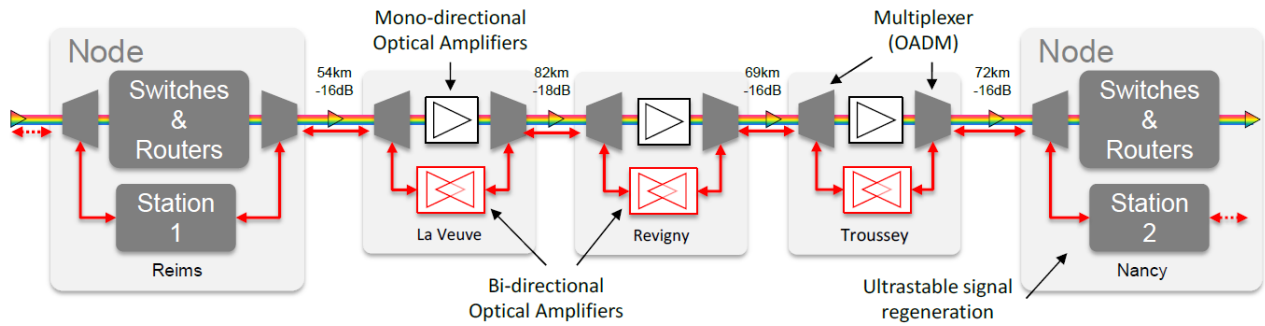


Рисунок 3.3 - Детальна схема ділянки між Реймсом і Нансі

На кожному вузлі PoP і лінійному підсилювачі (ILA) встановлюються спеціальні OADM для того, щоб метрологічний сигнал (червоним кольором) обходив обладнання DWDM. Після вилучення у вузлах ILA сигнал підсилюється окремо від сигналу NREN. Встановлення OADM спричиняє додаткове послаблення у 1.6 дБ на кожній ділянці.

CESNET у 2014 році повідомила про точну передачу часу на 306-кілометровій лінії Прага–Брно [42]. Ця лінія підтримує системи передачі як у C-діапазоні, так і в L-діапазоні. Надмірне послаблення у 27 дБ на ділянці Прага–Потехи було вирішене шляхом створення двоспрямованого вузла ILA.

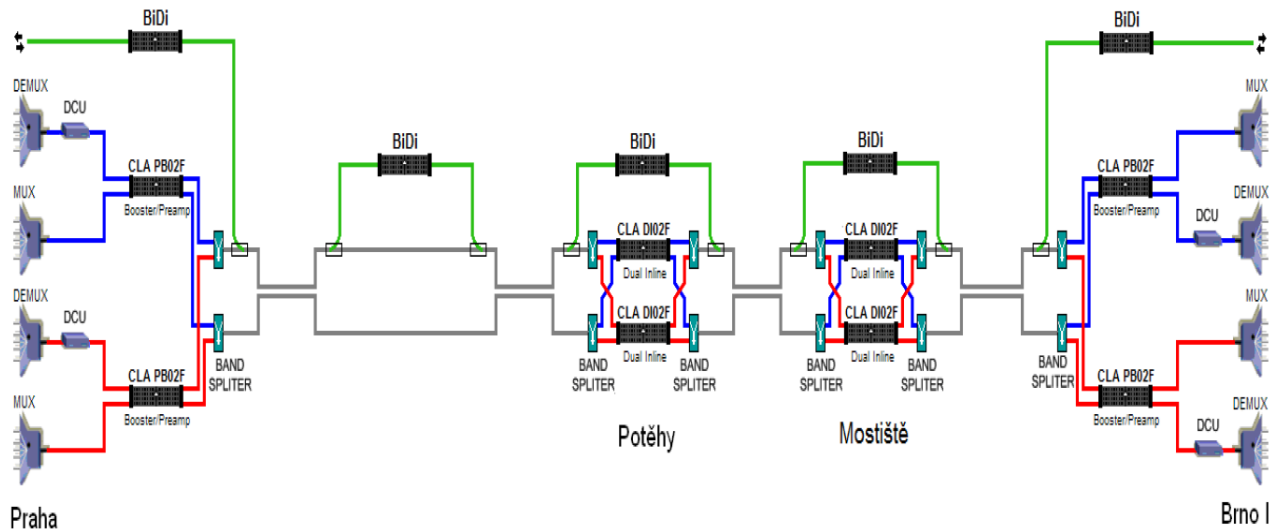


Рисунок 3.4 - Лінія Прага–Брно, системи C- та L-діапазонів, 306 км.

Рішення з односпрямованою чужою довжиною хвилі, яке менш точне, ніж двоспрямовані рішення (точність 10^{-16} замість 10^{-20} для 1,000 км), дозволяє уникнути проблеми роботи з пристроями передачі, що не сумісні з обладнанням

DWDM. Метрологічний сигнал передається через весь фотонний рівень, наданий NREN/оператором, включаючи односпрямовані EDFA.

Точна передача часу між Прагою та Віднем за односпрямованими довжинами хвиль успішно функціонує з 2011 року [42]. Довжини хвиль проходять через дві різні системи передачі, що дозволяє порівнювати національні апроксимації UTC: UTC(TP) та UTC(BEV).

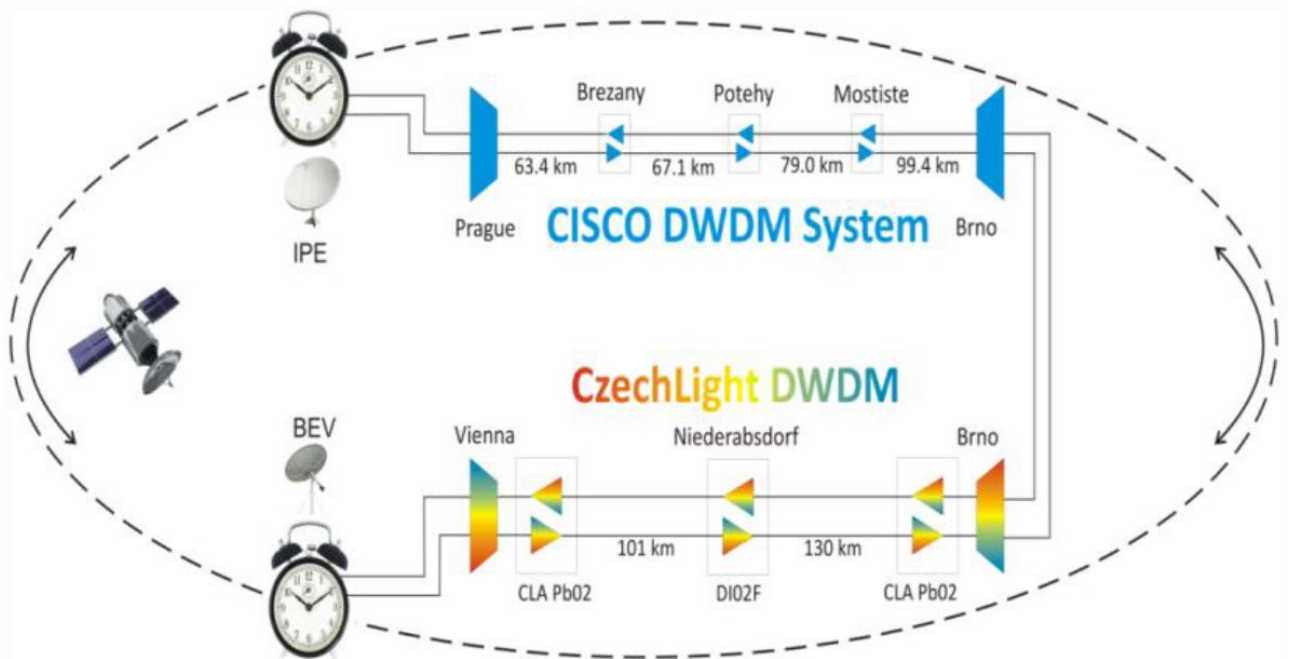


Рисунок 3.5 - Дві односпрямовані довжини хвиль, використані для передачі часу між Прагою та Віднем, 2 x 550 км.

У 2015 році було проведено оцінку продуктивності першої гілки мережі REFIMEVE+ від Парижа до Страсбурга [43]:

- Париж–Нансі–Париж (1,100 км).
- Париж–Страсбург–Париж (1,480 км): розширення лінії Париж–Нансі.

На ділянці Париж–Нансі–Париж була продемонстрована стабільність частоти на рівні 4×10^{-16} при часі інтеграції 1 с, яка знижується до 5×10^{-20} при часі інтеграції 60,000 с. Така продуктивність стабільності дозволяє порівнювати найкращі оптичні годинники лише за 100 с.

Часткова нестабільність частоти залежно від часу усереднення для компенсованого оптичного каналу Віллетанез–Нансі–Віллетанез (1,100 км, червоні квадрати) та його продовження до Страсбурга (сині кола). Стабільності розраховані за даними типу "-type" із використанням модифікованого відхилення Аллана.

На рисунку 3.6 зображена часткова нестабільність частоти залежно від часу усереднення для компенсованого оптичного каналу Віллетанез–Нансі–Віллетанез (1100 км, червоні квадрати) та його продовження до Страсбурга (сині кола). Стабільності розраховані за даними типу "-type" із використанням модифікованого відхилення Аллана.

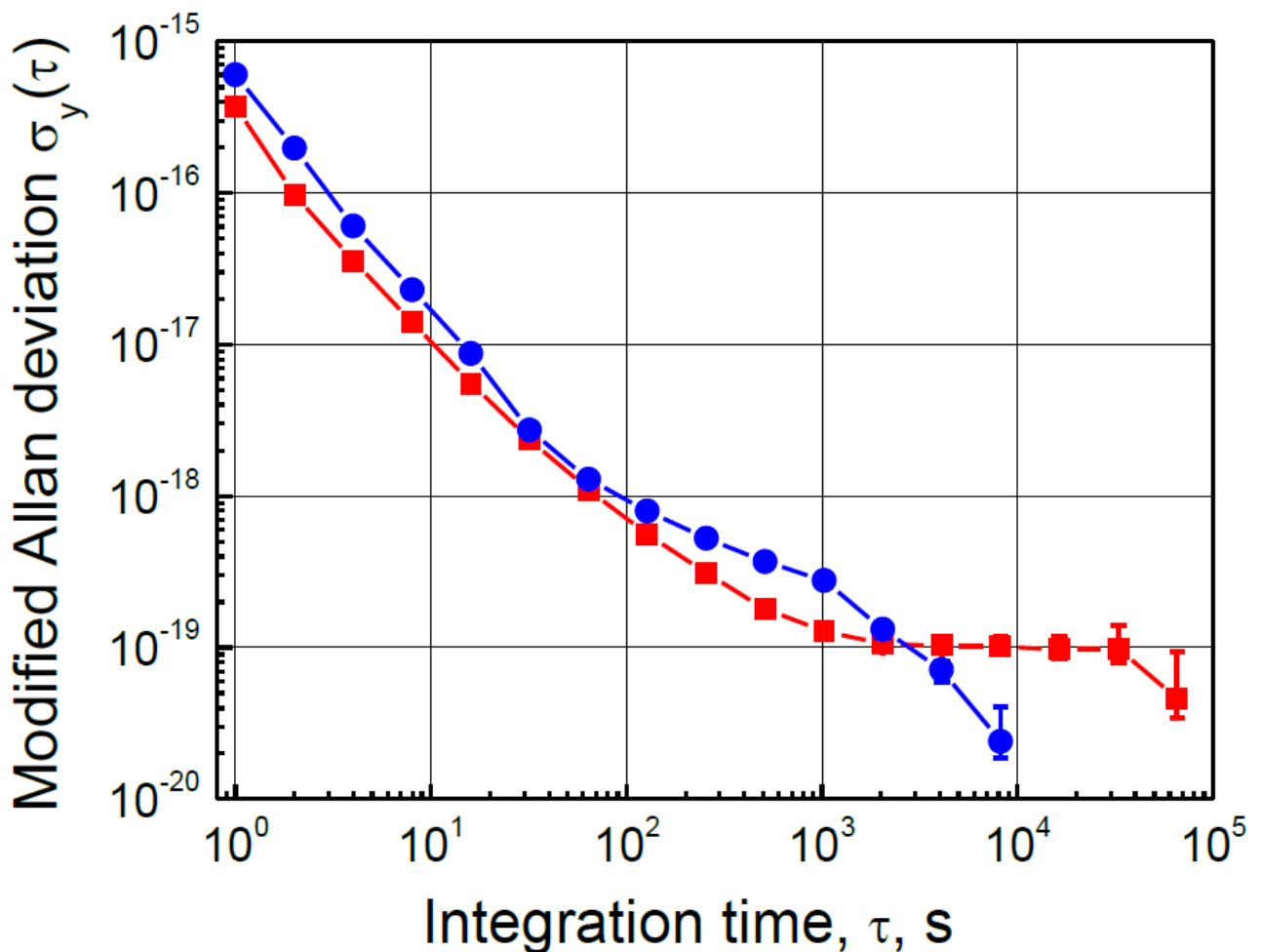


Рисунок 3.6 - Часткова нестабільність частоти залежно від часу усереднення для гілки мережі REFIMEVE+.

На лінії Париж–Страсбург–Нансі забезпечити довготривалу стабільну роботу було складніше, ніж на лінії Нансі. Команда REFIMEVE+ спостерігала нестабільності коефіцієнтів посилення EDFA, викликані змінами температури в приміщенні. Оскільки вхідний оптичний сигнал може бути дуже слабким, стабілізацію лінії стає складніше реалізувати. Наразі це обмежує довготривалу роботу оптичної лінії, вимагаючи періодичних сеансів переналаштування.

Гілка REFIMEVE+ Париж–Страсбург і лінія РТВ Брауншвейг–Страсбург з'єднуються у вузлі РоР мережі RENATER у Страсбурзі, де розташоване обладнання для порівняння частот. У 2015 році ця конфігурація дозволила вперше здійснити порівняння двох стронцієвих атомних годинників через довгодистанційні волоконно-оптичні лінії між двома Національними метрологічними інститутами (NMI).

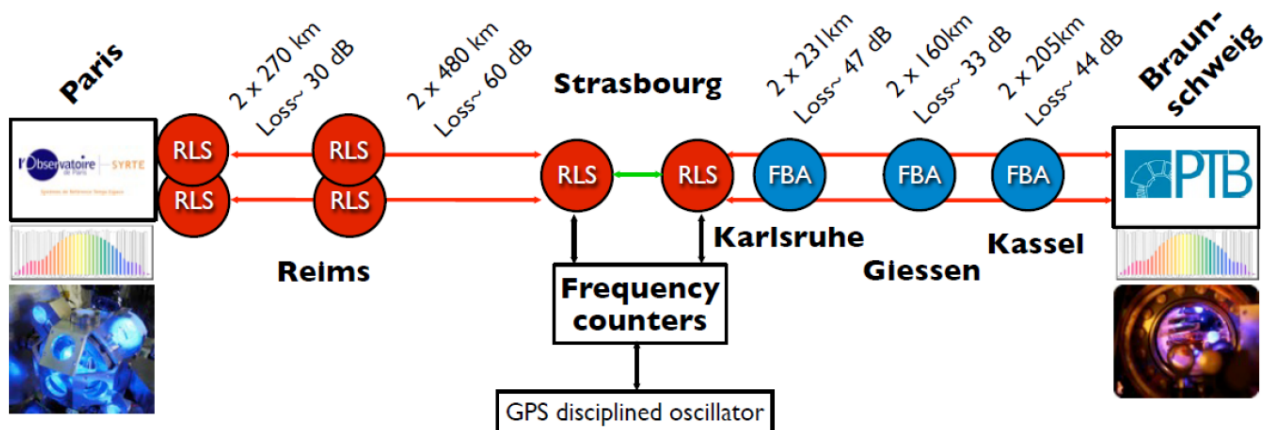


Рисунок 3.7 - Топологія лінії Париж–Брауншвейг із порівнянням частот у Страсбурзі.

Французькі та німецькі лінії, описані на Рисунку 4.7, побудовані на основі різних технологій передачі. На французькій стороні сигнал періодично підсилюється за допомогою лазерних ретрансляційних станцій (RLS) та підсилювачів EDFA, тоді як РТВ використовує підсилення волокон Брілюєна (FBA).

Дві незалежні частоти випромінюються французькими та німецькими атомними годинниками і порівнюються в Страсбурзі, де GPS дозволяє оцінити частотну нестабільність SrPTB-SrSYRTE, як показано на Рисунку 4.8 нижче [45]:

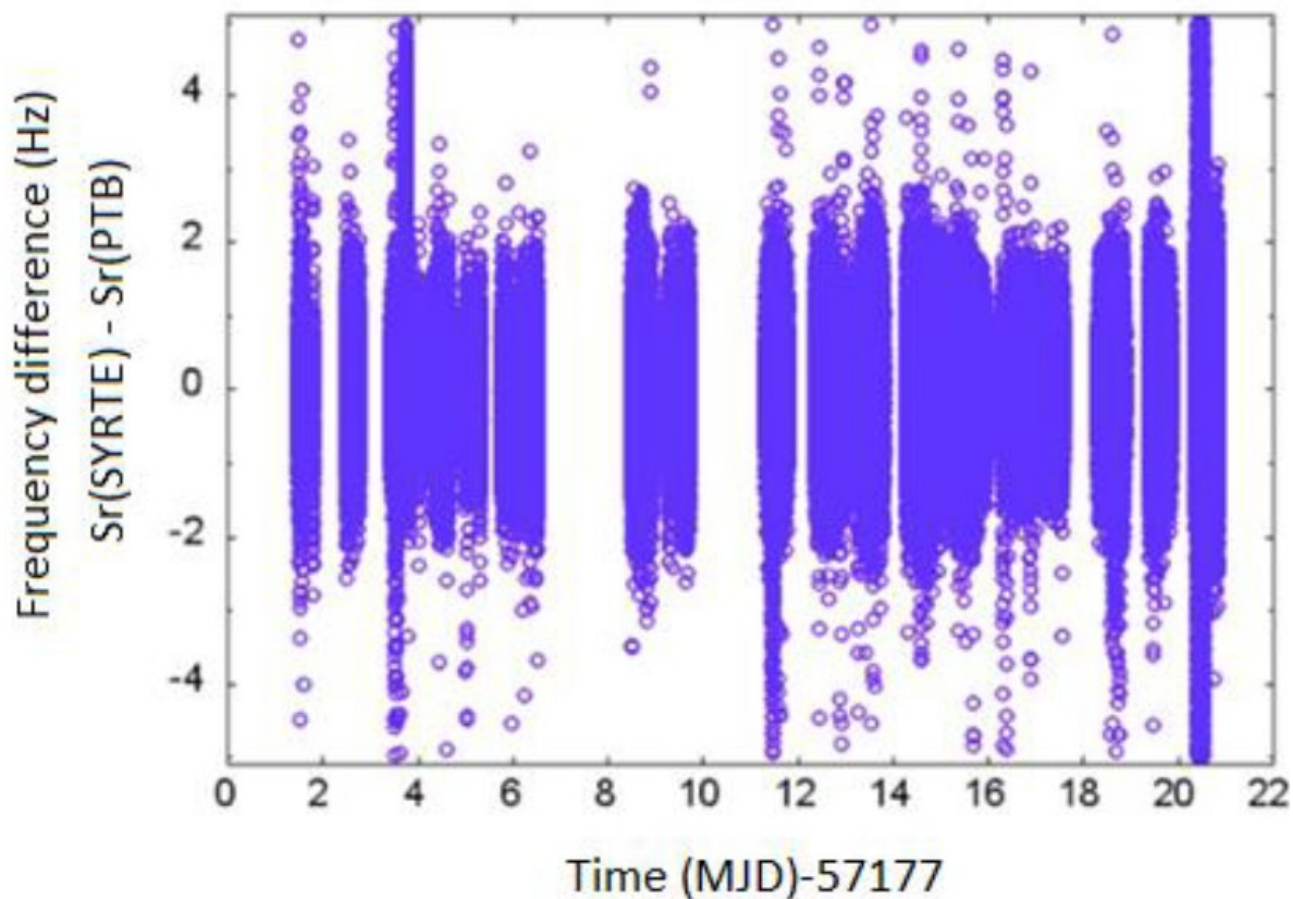


Рисунок 3.8 - 25-денне порівняння атомних годинників Парижа та Брауншвейга у Страсбурзі.

Частотна нестабільність, виражена загальним відхиленням Аллана, показує статистичну невизначеність менше ніж 3×10^{-17} протягом одного дня вимірювань і 2×10^{-17} у діапазоні від 5,000 до 50,000 секунд.

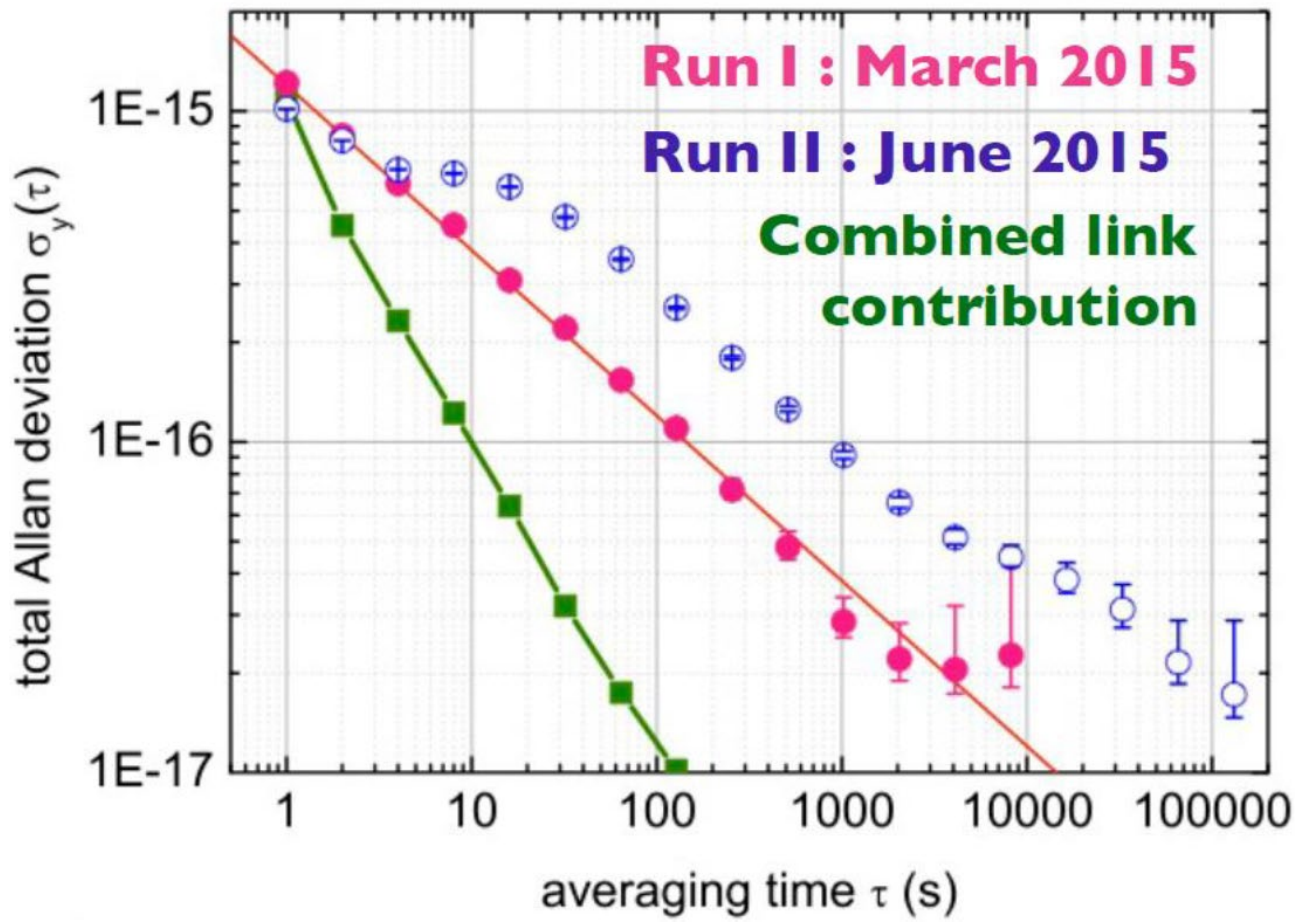


Рисунок 3.9 - Частотна нестабільність під час двох етапів експерименту.

Стабільність передачі часу зазвичай виражається через відхилення часу (TDEV), вперше представлене в All optical two-way time transfer in strongly heterogeneous networks [42]. Порівняння невизначеності між оптичною передачею часу та методами на основі GPS на лінії Прага–Відень (як на Рисунку 4.5) показано на Рисунку 4.10.

Ця лінія з'єднує чеські та австрійські лабораторії Національного еталона часу та частоти. В обох лабораторіях встановлено калібрувальні приймачі GPS, що дозволяє порівнювати національне представлення часових шкал: UTC(TP) у Празі та UTC(BEV) у Відні. Таким чином, оптичну передачу часу (червона лінія) можна безпосередньо порівняти з передачею часу на основі GPS.

Зелена лінія показує TDEV методу спільного спостереження (Common View, CV GPS), коли сигнал одного й того самого супутника GPS, видимого з обох точок, порівнюється.

Синя лінія відображає результати техніки високоточного позиціонування (PPP), яка використовує фазові й кодові спостереження GPS для постобробки даних.

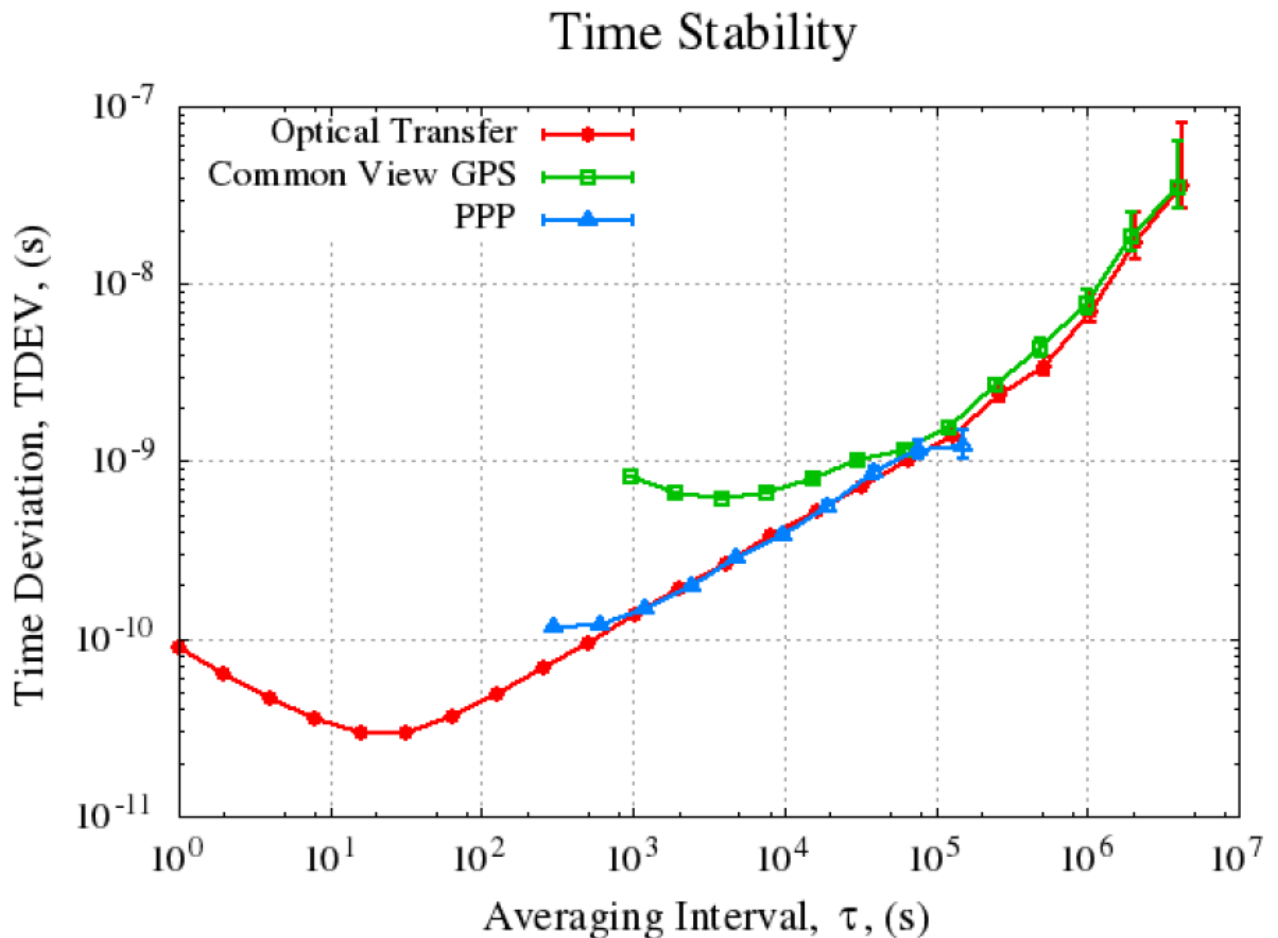


Рисунок 3.10 - Оптична та GPS передача часу Прага–Відень, 550 км.

Стабільність передачі часу, виміряна між двома атомними годинниками (цезієвим годинником у Празі та водневим лазером у Брно, з'єднання як на Рисунок 4.4), показана на Рисунок 4.11. Спадаюча частина графіка характерна для білого фазового шуму, який зменшується зі збільшенням інтервалу усереднення. Для інтервалів, довших за 10 с, домінує білий частотний шум

годинників (зростаюча частина графіка), і тому вплив шуму, створюваного системою передачі часу, стає непомітним.

Згідно з Рисунком 4.11, найменша невизначеність, досягнута для передачі часу Прага–Брно, становить 17 пс при інтервалі усереднення 8 с.

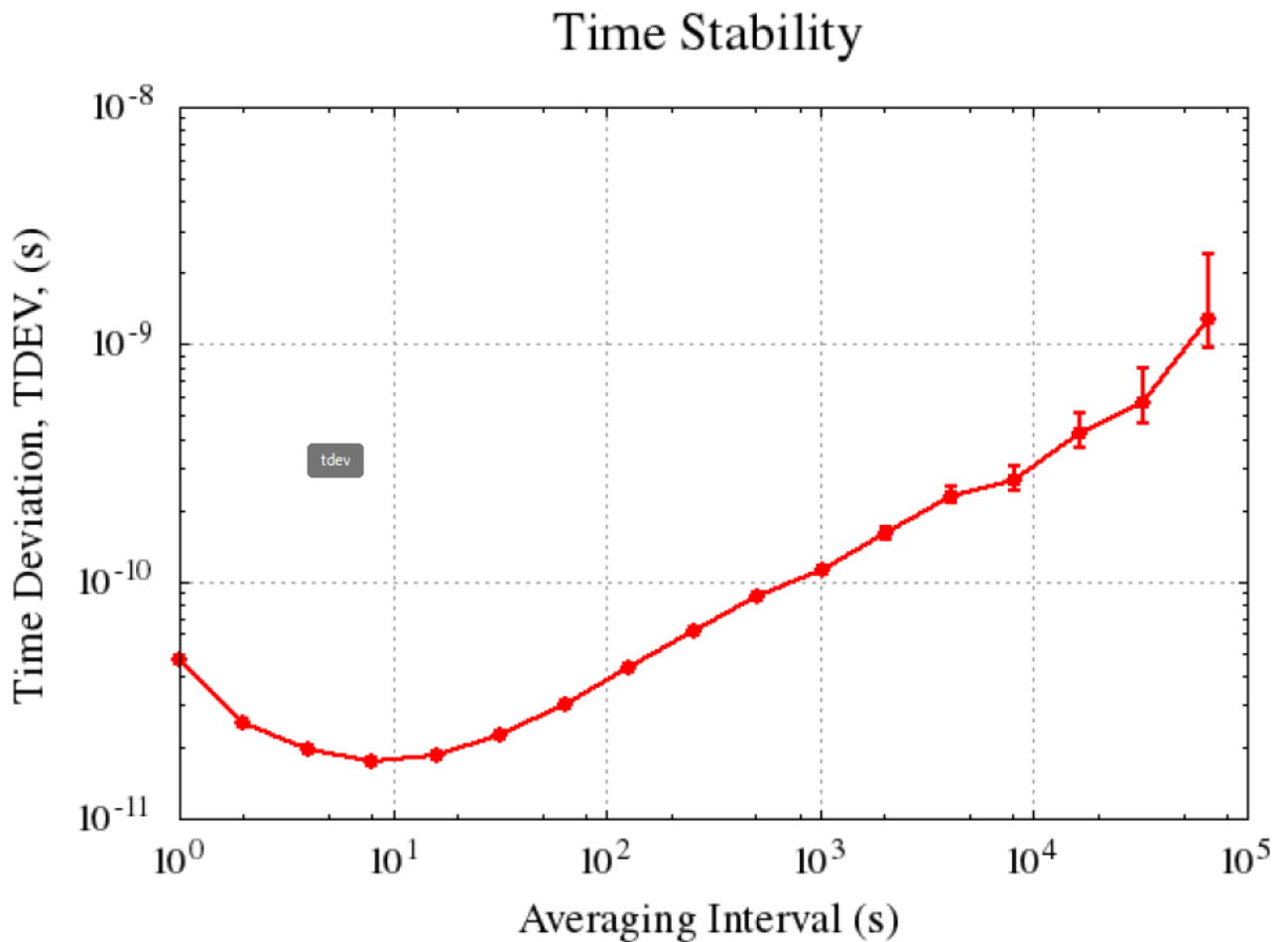


Рисунок 3.11 - Передача часу Прага–Брно.

Передача за допомогою односпрямованих хвиль може здійснюватися за допомогою зрілих технологій із використанням загальних чужих хвиль високої продуктивності, які все ще перевершують методи GNSS.

Точна передача часу та ультрастабільної частоти у вигляді двоспрямованої чужої довжини хвилі перебуває на початковому етапі розвитку. Більшість розгорнутих з'єднань є точковими з'єднаннями з фіксованою довжиною хвилі. Регенерація сигналу на іншу довжину хвилі є складним завданням через високу вартість точних лазерів і станцій передавачів-приймачів, а також тому,

що більшість підсилювачів і передавального обладнання є прототипами та потребують промислового виробництва.

Відповідно, для створення дистанційно керованої, автоматизованої та гнучкої метрологічної мережі необхідно вирішити кілька завдань:

1. Забезпечити можливість "мультикастингу" ультростабільної частоти до різних вузлів PoP (перше випробування було проведене у 2015 році в рамках проєкту REFIMEVE+ [46]).

2. Забезпечити можливість моніторингу цих сигналів на оптичному рівні, враховуючи, що вони є вузькосмуговими та двоспрямованими.

3. Створити та протестувати SNMP MIBs та/або альтернативні рішення для дистанційного моніторингу метрологічного обладнання.

4. Знайти надійний та економічно ефективний спосіб моніторингу обладнання сторонніх виробників (тобто метрологічних лінійних підсилювачів) у NREN ILAs.

5. Визначити найкращі практики конфігурації метрологічної мережі (посилення підсилювачів, рівні оптичної потужності, які слід вибрати для досягнення найкращої продуктивності без порушення трафіку NREN) для моделювання метрологічних чужих довжин хвиль на інфраструктурах NREN DWDM.

6. Зрозуміти типи інцидентів, які можуть виникати в метрологічній мережі, та забезпечити ефективне навчання NREN і GÉANT NOCs.

3.2 Розподіл часу на мережевому рівні моделі OSI

Для синхронізації годинників у мережі було запропоновано протокол точного часу (PTP) (протокол IEEE 1588), який дозволяє досягати точності годинників у локальних мережах (LAN) в межах субмікросекундного діапазону. Завдяки такій точності PTP підходить для вимірювальних і керувальних систем [47] і забезпечує більшу точність, ніж протокол часу мережі (NTP).

PTP також має перевагу у зниженні витрат на приймачі GPS, оскільки не всі вузли мережі повинні мати доступ до сигналів GPS: можна використовувати PTP-вузли (наприклад, у місцях, де сигнали GPS недоступні), які отримують синхронізацію годинників, використовуючи довідковий сигнал від GPS-орієнтованого головного годинника PTP (grandmaster clock) в іншому місці мережі.

Оскільки PTP був спочатку розроблений для локальних мереж (LAN), у рамках проєкту GN4-1 було проведено кілька експериментів для визначення рівня синхронізації годинників із використанням PTP у широкомасштабних мережах, де більші відстані та більші затримки впливають на алгоритм затримок PTP.

Наступні розділи описують експерименти через тунелі MPLS, а також довгострокові тести синхронізації PTP через Інтернет.

WAN-мережа складається з маршрутизаторів Cisco, з'єднаних через 10 GE канали. MPLS-тунель був створений між Мюнхеном і Франкфуртом, а також між Франкфуртом і Берліном. Пропускна здатність цих тунелів не обмежувалася.

Було виконано вимірювання на рівні L2 для оцінки характеристик цих тунелів; результати показали, що джиттер пакетів знаходився в межах 50–60 мкс.

AES67 over WAN

WAN Testsetup 1

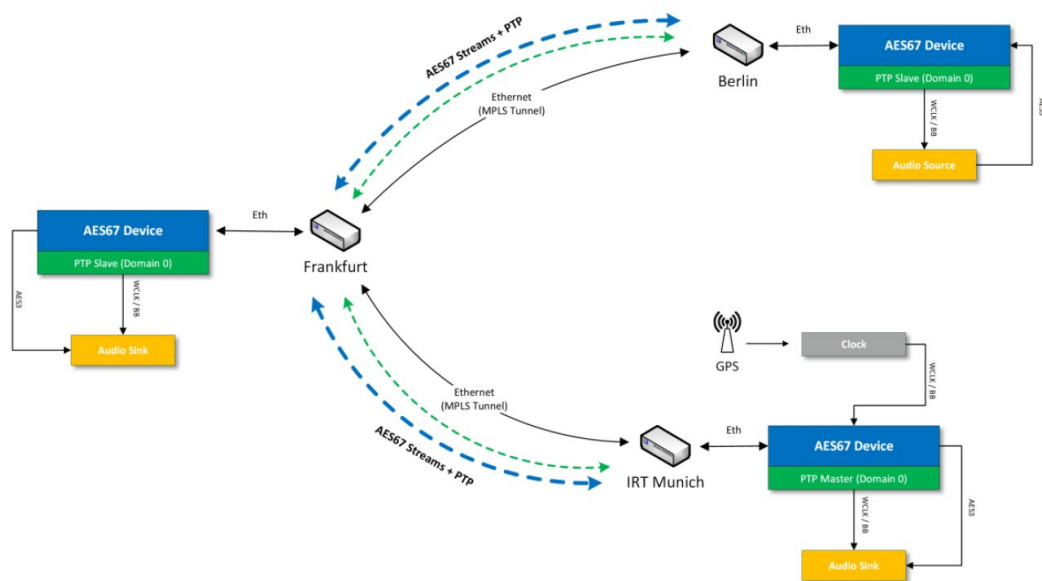


Рисунок 3.12 - Налаштування тесту 1 у тестах AES через WAN.

Кожне джерело та приймач аудіо були синхронізовані за допомогою PTP. Однак встановити передачу аудіо без помилок не вдалося, і клацання в аудіо постійно було чути. Через настільки значні спотворення якості аудіосигналу навіть не було необхідності використовувати будь-які аудіовимірювання для оцінки якості звуку.

AES67 over WAN

WAN Testsetup 2

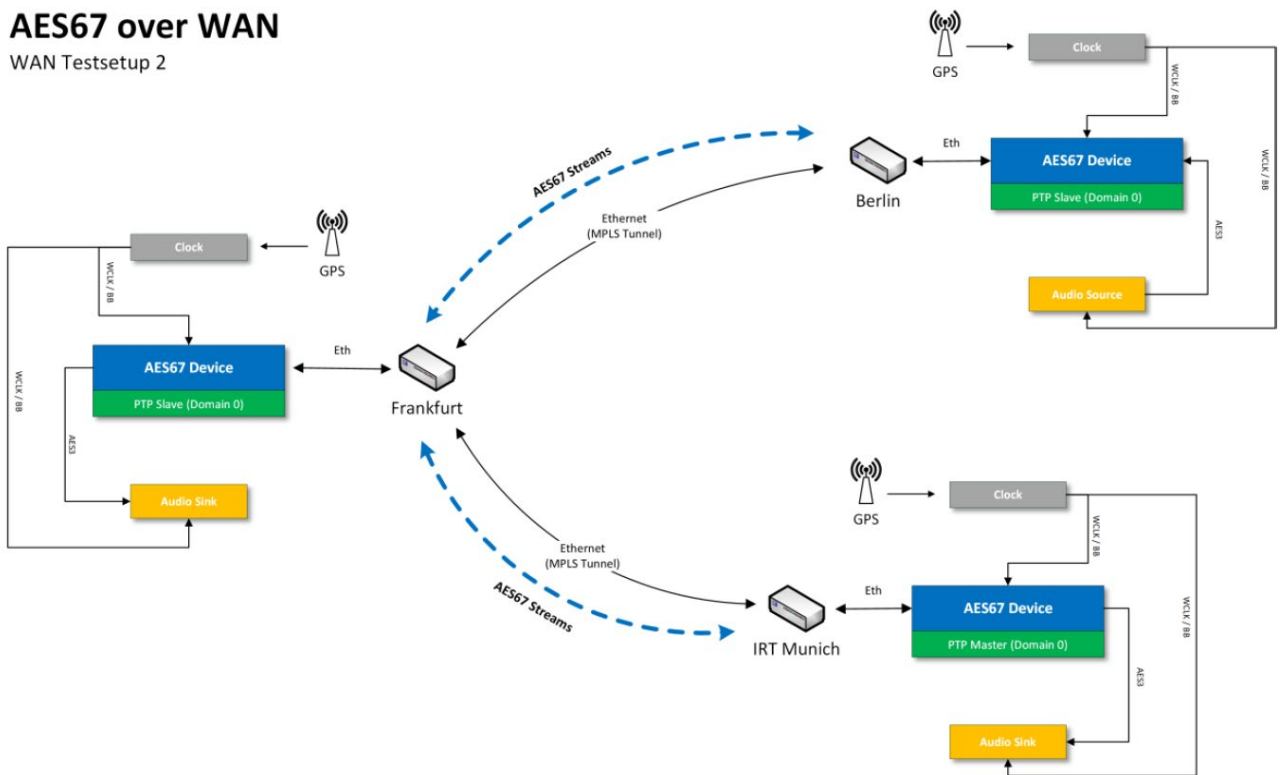


Рисунок 3.13 - Налаштування тесту 2 у тестах AES через WAN.

У налаштуванні тесту 2 (показано на Рисунку 4.13) головний годинник PTP (синхронізований через GPS) був розташований у кожному місці. Синхронізація часу та частоти виконувалася поза мережею через GPS, а не через тунель MPLS. На відміну від налаштування тесту 1, передача аудіо без помилок була можливою. Клацання в аудіо не спостерігалися, а вимірювання рівнів якості аудіо підтвердили суб'єктивне враження.

Існують два можливих пояснення такої різної поведінки: синхронізація PTP через тунель MPLS була недостатньо точною, можливо також, що реалізація PTP на обладнанні для аудіо (AES67) була обмежена певним чином.

У середовищі LAN пристрої AES67 працювали без помилок. Тест пристроїв AES67 із послідовно підключеним емулятором WAN вказав, що джиттер пакетів RTP у 50 мкс спричиняв постійні клацання в аудіо, як описано вище.

Наразі описані тести повторюються з використанням інших пристроїв AES67. Для зменшення джиттера пакетів RTP буде також змінено дизайн мережі.

Існуючі стандарти та рекомендації не описують необхідної точності RTP для аудіо- та відеозастосувань.

Протягом кількох тижнів були проведені тести RTP через Інтернет між Ерлангеном (Німеччина) та Прагою (Чехія). У Празі було встановлено головний годинник RTP (синхронізований через GPS), а RTP-вузол (slave) за 500 км в Ерлангені використовував цей чеський головний годинник як референс сигналу.

Коли тести були вперше розпочаті 21 вересня 2015 року, вузол виявив референс сигнал протягом 30 секунд і підтвердив синхронізацію. До завершення тестів 9 листопада 2015 року вузол чотири рази втрачав референс сигнал і змінював свій стан на некалібрований (Таблиця 3.1).

Протягом кількох тижнів були проведені тести RTP через Інтернет між Ерлангеном (Німеччина) та Прагою (Чехія). У Празі було встановлено головний годинник RTP (синхронізований через GPS), а RTP-вузол (slave) за 500 км в Ерлангені використовував цей чеський головний годинник як референс сигналу.

Коли тести були вперше розпочаті 21 вересня 2015 року, вузол виявив референс сигнал протягом 30 секунд і підтвердив синхронізацію. До завершення тестів 9 листопада 2015 року вузол чотири рази втрачав референс сигнал і змінював свій стан на некалібрований (Таблиця 3.1).

Відключення референса	(Повторне) виявлення референса	Тривалість часу	Дні між збоями
2023-10-07 18:27:29 UTC	2023-10-07 18:30:47 UTC	0:03:18	22 дні
2023-11-02 18:50:55 UTC	2023-11-02 18:52:46 UTC	0:03:18	26 днів
2023-11-02 18:59:47 UTC	2023-11-02 19:01:29 UTC	0:01:42	0 днів
2023-11-04 17:16:33 UTC	2023-11-04 17:30:51 UTC	0:14:18	2 дні

Таблиця 3.1 - Відключення та повторне підключення вузла до референс сигналу.

Значення затримки шляху та зміщення годинника досліджувалися протягом трьох періодів: 21–25 вересня, 28 вересня – 9 жовтня та 31 жовтня – 9 листопада 2015 року. Значення затримки шляху між Ерлангеном і Прагою в ці періоди варіювалися від мінімуму 4.883 мс до максимуму 26.432 мс. Ця максимальна затримка шляху сталася 7 жовтня, коли вузол втратив зв'язок із головним годинником (Рисунок 4.14):

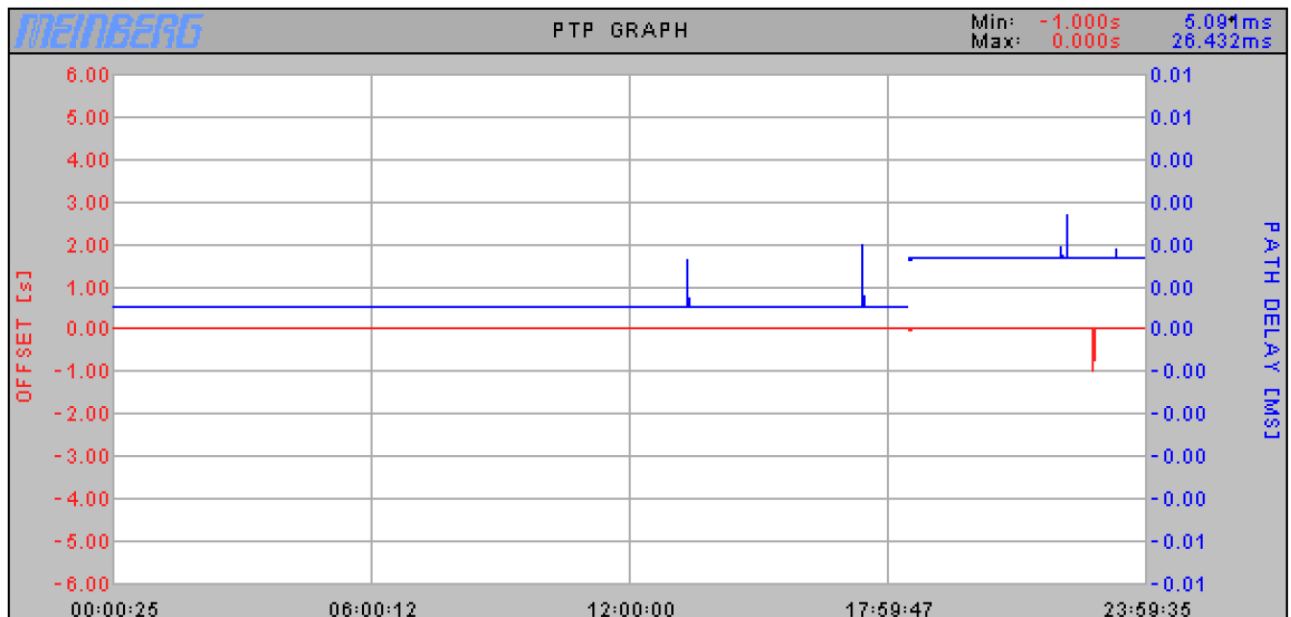


Рисунок 3.14 - Зміщення годинника та затримка шляху 7 жовтня 2015 року між Ерлангеном і Прагою.

Такий стрибок у затримці свідчить про те, що пакети раптово були перенаправлені через інший шлях. Відключення референса сталося як наслідок у той самий час (18:50:55).

2 листопада 2023 року вузол двічі втратив зв'язок із референсом у Празі між 18:50:55 і 19:01:29 UTC. Вимірювання затримки шляху протягом цього періоду показують підвищення із більшою варіативністю порівняно з годинами до та після втрати референс сигналу (Рисунок 3.15):

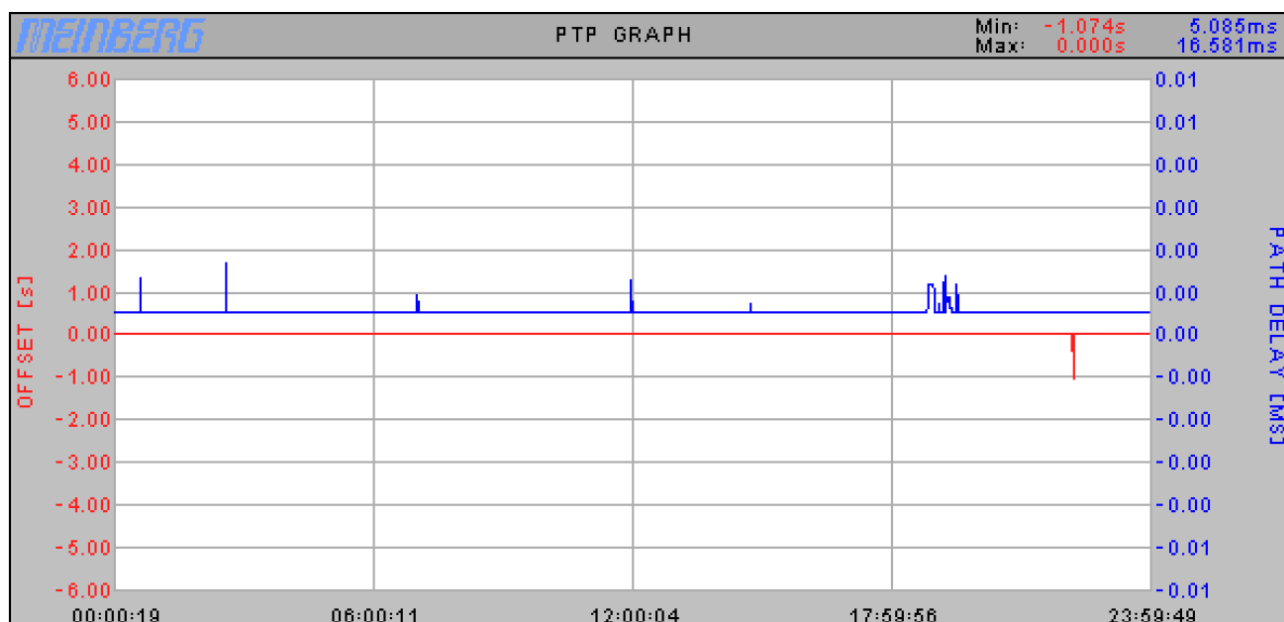


Рисунок 3.15 - Зсув годинника та затримка шляху 2 листопада 2015 року між Ерлангеном і Прагою

4 листопада 2015 року вимірювання показали, що в момент розриву синхронізації від підпорядкованого пристрою до головного пристрою значення не були зареєстровані — ані для зсуву годинника, ані для затримки шляху (Рисунок 4.16)

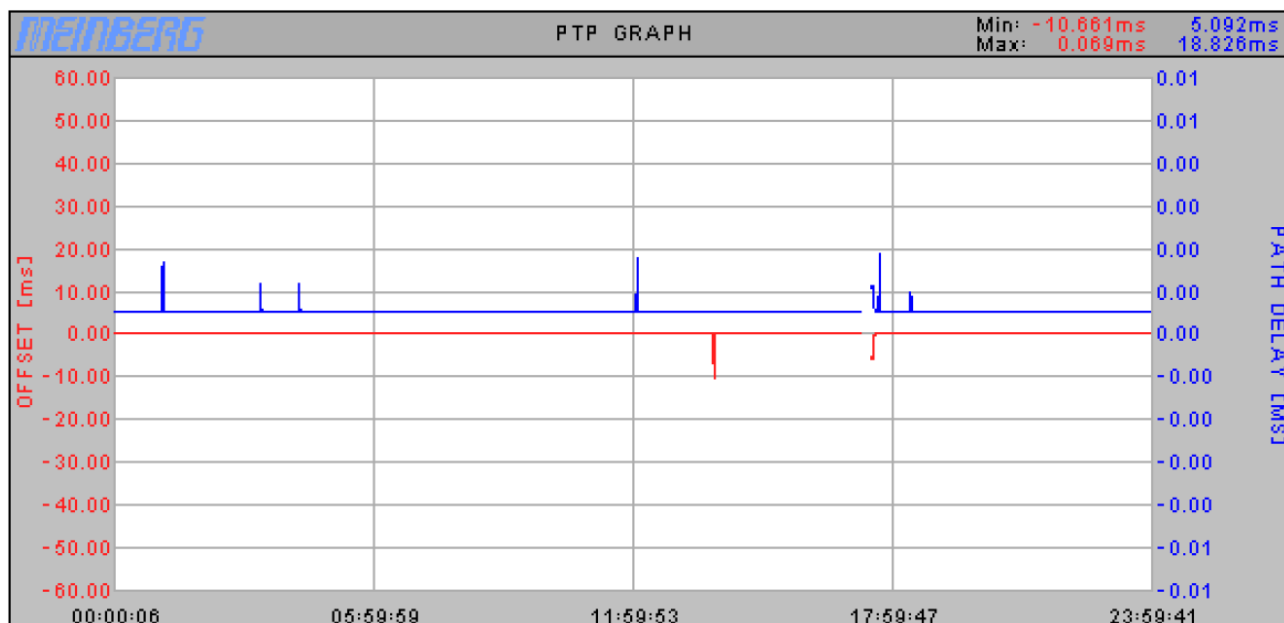


Рисунок 3.16 - Зсув годинника та затримка шляху 4 листопада 2015 року між Ерлангеном і Прагою

На цей момент незрозуміло, що стало причиною переривання вимірювань та втрати еталонного сигналу.

Ці довгострокові вимірювання показують, що несприятливі умови мережі можуть призводити до втрати еталонного сигналу, який отримує підпорядкований пристрій РТР від головного годинника. Зсуви годинника в діапазоні мілісекунд або навіть секунд є досить значними. Тестування слід повторити, розташувавши головний годинник і підпорядкований пристрій ближче один до одного, щоб перевірити, як сприятливо впливають коротші затримки шляху. Необхідно провести додаткові дослідження на різних відстанях, зокрема на більших відстанях і протягом триваліших періодів часу, щоб визначити, як далеко можна розташовувати підпорядковані пристрої від головних годинників РТР і як саме умови мережі, такі як джиттер, впливають на калібрування підпорядкованого пристрою до головного.

У тестах аудіо AES67 через WAN, описаних вище, джиттер у MPLS-тунелі становив лише 50–60 мкс; однак навіть за таких умов не вдалося отримати чітке аудіо без спотворень і шумів. Необхідно провести більше експериментів, щоб визначити, чи є причиною аудіо спотворень значення джиттера в мережі, чи використання іншого обладнання може дати кращі результати. Оскільки існуючі стандарти та рекомендації не описують рівень точності РТР, необхідний для тимчасових аудіо- та відеозастосувань, потрібно виконати ще багато додаткових тестів у різних сценаріях, щоб звузити вимоги до мережевого джиттера або втрат сигналу.

4 ДИНАМІЧНІСТЬ ТРАНСПОРТНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Динамічність мережі — це здатність мережі швидко та оптимально реагувати і адаптуватися до змін попиту або умов, таких як ресурси, трафік, використання сервісів і збоїв. Ця властивість є ключовою для забезпечення того, щоб національні ресурси та освітні мережі могли відповідати новим і змінним вимогам до послуг.

Для повного використання збільшеної пропускної здатності, як описано в розділах 2 і 3, необхідно мати можливість оркеструвати мережеві ресурси, а за потреби — також ресурси обчислень і зберігання даних. Програмно-визначені мережі (SDN) набули популярності, головним чином на рівні пакетного шару, як нова парадигма управління мережевими ресурсами та програмованості мережевих функцій. Концепція SDN також поступово проникає в транспортний шар, що дозволяє використовувати інтегровані, безшарові підходи до відновлення, враховуючи як транспортний, так і пакетний шари.

У цьому розділі розглядається управління та оркестрування транспортних мережевих ресурсів. Спочатку, в розділі 5.1, розглядаються основи традиційного SDN, його застосування до транспортного SDN та основні тенденції розвитку. Далі розглядаються розширення протоколу OpenFlow для підтримки транспортних мереж (розділ 5.1.2), а потім піднімається питання оркестраційного шару, де описуються операції мережі, орієнтовані на застосунки (ABNO), як інструмент оркестрації (розділ 5.1.3), а також обговорюється демонстраційний приклад, розроблений партнером (розділ 5.1.4).

Нарешті, спеціальний випадок оптимізації сценарію відмови в мережі NORDUnet використовується для концептуальної оцінки потенційних переваг використання транспортного SDN у поєднанні з відкритою операційною системою мережі (ONOS) для забезпечення безшарового відновлення.

4.1 Огляд транспортних оптичних мереж SDN

Наявність технології гнучкої сітки (flexible grid) сприяє більш ефективному використанню спектра та еволюції до еластичних оптичних мереж (EON). Використовуючи еластичні оптичні мережі на основі цієї технології, можна надавати різні сервіси, адаптуючи ширину частотного слоту оптичного з'єднання до необхідної швидкості передачі даних. Алгоритм надання ресурсів має обчислювати маршрут і знаходити частотний слот, який повинен бути суміжним у спектрі та залишатися однаковим на всіх ланках маршруту [48], якщо не використовуються дорогі спектральні конвертери. Крім того, алгоритм повинен обирати між різними форматами модуляції, щоб ефективно використовувати оптичні ресурси залежно від довжини обчисленого маршруту.

Попри ці досягнення, динамічність на оптичному рівні поки що залишається обмеженою через значну агрегацію трафіку, яка виконується на вищих рівнях мережі. Тому оптичні транспортні мережі в даний час залишаються статично налаштованими та керованими. Фактично, довгострокові цикли планування забезпечують оновлення та підготовку оптичних транспортних мереж до наступного періоду планування, зазвичай з установкою резервної пропускної здатності для підтримки прогнозованого трафіку та сценаріїв відмов.

Однак із впровадженням нових сервісів, таких як міжцентрове з'єднання дата-центрів, які мають надавати національні освітні та дослідницькі мережі (NRENs), можна очікувати значних змін у трафіку. Ці зміни стосуватимуться не лише обсягів трафіку, але й його розподілу та динамічності.

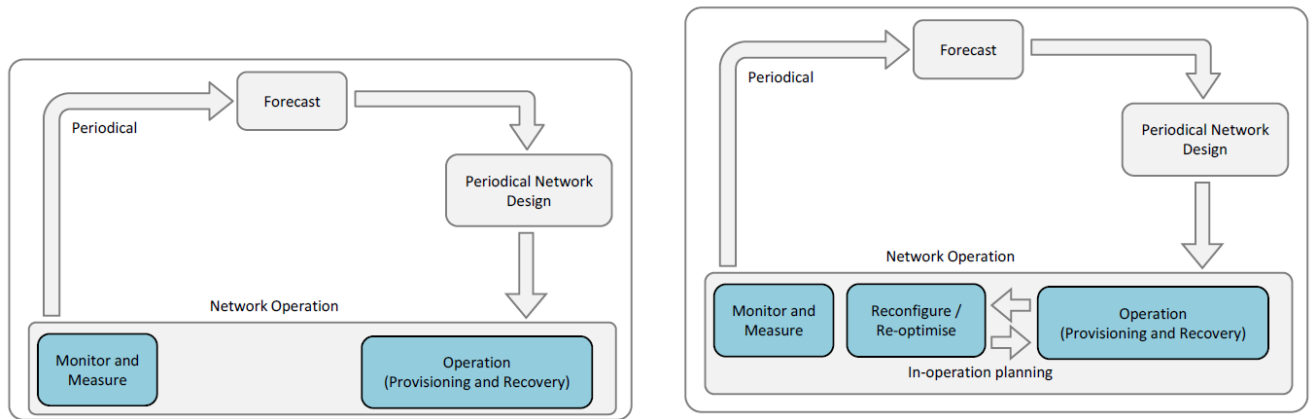


Рисунок 4.1 - Життєвий цикл транспортних мереж із (а) динамічністю та (b) плануванням під час експлуатації.

Життєвий цикл мережі складається з декількох етапів, які виконуються послідовно. Початковий етап отримує дані із сервісного рівня та про стан ресурсів вже розгорнутої мережі, а також конфігурує мережу для того, щоб вона могла впоратися з прогнозованим трафіком протягом певного періоду часу. Після завершення фази планування створюються рекомендації, на основі яких наступним кроком є проектування, перевірка та ручне впровадження змін у мережу. У процесі експлуатації пропускна здатність мережі постійно моніториться, а ці дані використовуються як вхідні параметри для наступного циклу планування (Рисунок 5.1(a)).

Робота з динамічністю трафіку вимагає автоматизації надання з'єднань, що пояснює розвиток централізованих архітектур, заснованих на концепції програмно-визначених мереж (SDN).

SDN відокремлює функції управління та пересилання даних, що дозволяє програмно управляти мережею та абстрагувати базову інфраструктуру для додатків і мережевих сервісів. SDN є динамічною, керованою, економічно вигідною та адаптивною технологією, що робить її ідеальною для високошвидкісних, динамічних сучасних додатків.

Динамічне управління мережею може знижувати витрати, але також може призводити до неефективного використання мережевих ресурсів. Щоб вирішити цю проблему, ресурси мережі можуть бути доступними завдяки застосуванню

планування мережі під час експлуатації [49], тобто шляхом переконфігурації та/або реоптимізації мережі за запитом, що веде до розширеного життєвого циклу мережі (Рисунок 5.1(b)).

Еволюція SDN і її подальший розвиток зіграли найбільш значущу роль у створенні мереж пакетної передачі наступного покоління, щоб задовольнити майбутні соціальні потреби зростаючого населення. SDN як програмована мережа з можливістю «надання послуг на льоту» викликала великий інтерес як у наукових колах, так і в промисловості.

Концепція SDN бере свій початок із галузі комп'ютерної інженерії, де архітектура, заснована на абстракції, спростила завдання написання та підтримки програмного забезпечення. Абстракція — це процес, завдяки якому дані та програми визначаються у формі, схожій на їхнє значення, приховуючи деталі реалізації. Можна визначити різні рівні абстракції, які забезпечують різну кількість деталей (високий і низький рівні) і, своєю чергою, створюють різні інтерфейси (екземпляри абстракції). Мета парадигми SDN досягається шляхом переосмислення архітектури мереж, щоб вони працювали подібно до архітектур обчислювальних систем.

На рисунку 5.2 показано логічний вигляд архітектури SDN. У цій архітектурі можна виділити три шари: шар додатків, шар управління та шар даних. Таким чином, парадигма SDN передбачає мережеву архітектуру, у якій мережеві пристрої (маршрутизатори, комутатори, оптичні вузли тощо) стають програмованими. Ця мета досягається за допомогою введення відповідних рівнів абстракції, які доступні для додатків через використання інтерфейсів управління, зокрема інтерфейсів програмування додатків (API).

Інтерфейс між шаром додатків і шаром управління називається північним інтерфейсом (NBI) і визначається API, тоді як інтерфейс між шаром управління та шаром даних є південним інтерфейсом (SBI), який визначається різними специфікаціями протоколів, з яких найбільш популярним є OpenFlow.

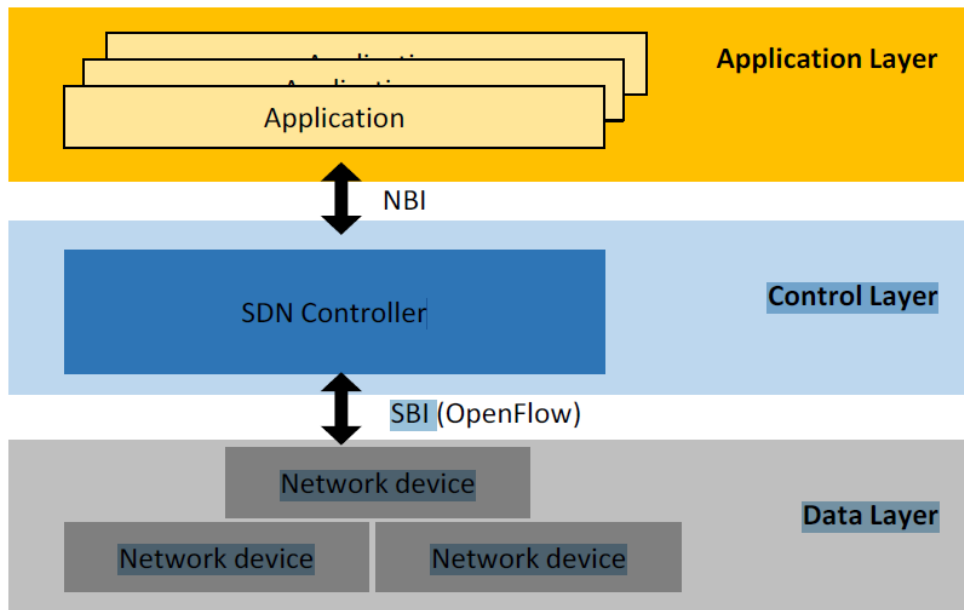


Рисунок 4.2: Архітектура SDN

Інтелект мережі (логічно) централізований у контролерах SDN, які підтримують глобальний огляд мережі. Як результат, мережа виглядає для додатків і механізмів політики як один логічний комутатор. Завдяки SDN підприємства та оператори отримують незалежний від постачальника контроль над усією мережею з однієї логічної точки, що значно спрощує проєктування та експлуатацію мережі. SDN також суттєво спрощує самі мережеві пристрої, оскільки їм більше не потрібно розуміти та обробляти тисячі стандартів протоколів, вони лише виконують інструкції від контролерів SDN. Порівняння між традиційними мережами та SDN наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 5.1

Порівняння традиційних мереж і SDN

Характеристика	Традиційні мережі	Програмно-визначені мережі (SDN)
Особливості	Дані та контрольні площини налаштовуються в кожному вузлі. Для кожної проблеми пропонується новий протокол з комплексним управлінням мережею.	Розділяє площини даних і управління за допомогою централізованого програмованого контролера, що робить управління мережею простим.
Конфігурація	Додавання нового обладнання до існуючої мережі вимагає врахування гетерогенності виробників пристроїв і інтерфейсів конфігурації, що потребує ручних процедур, які є трудомісткими та схильними до помилок.	Уніфікація площини управління для всіх типів мережевих пристроїв, включаючи маршрутизатори, комутатори та балансувальники навантаження, дозволяє автоматизувати конфігурацію з централізованою перевіркою через програмне забезпечення. Вся мережа може бути програмно налаштована і динамічно оптимізована відповідно до статусу мережі.
Продуктивність	Через гетерогенність мережевих пристроїв і співіснування різних технологій оптимізація продуктивності мережі в цілому є складним завданням.	Надає можливість покращити продуктивність мережі на глобальному рівні за допомогою централізованого управління та механізму зворотного зв'язку для обміну інформацією між різними рівнями мережевої архітектури.
Інновації	Виникають труднощі при впровадженні нових ідей і дизайну через широко використовуване пропрієтарне апаратне забезпечення, яке унеможливорює експерименти і прийняття інновацій.	Порівняно з традиційними мережами, SDN сприяє впровадженню нових ідей, додатків і сервісів, що приносять дохід, зручно і гнучко через програмовану платформу.
Вартість	Площини даних і управління інтегровані в комутатори, що ускладнює і здорожує їх виробництво.	Порівняно з традиційними мережами, SDN сприяє впровадженню нових ідей, додатків і сервісів, що приносять дохід, зручно і гнучко через програмовану платформу.

Підхід SDN став дуже природним для мереж пакетної передачі типу store and forward, особливо в сегментах магістральних і метромереж, а останнім часом також у сегменті доступу. Розширення архітектури SDN для оптичних мереж створює кілька викликів. Одним із ключових викликів у проєктуванні та експлуатації оптичних мереж є взаємодія, управління та контроль між оптичним і пакетним рівнями.

Різні органи стандартизації зараз працюють над розробкою стандартів SDN для оптичних мереж. Два основних стандарти/протоколи, пов'язаних із SDN в оптичній мережі:

1. GMPLS (Generalised Multi-Protocol Label Switching): часто використовується як площина управління для оптичного комутації; це запропонований стандарт IETF, який спрощує створення та управління IP-сервісами в оптичних мережах. GMPLS зазвичай використовується як площина управління для оптичного комутації.

2. SDN/OpenFlow: було розроблено спеціально для пакетної передачі і потребує модифікації, щоб забезпечити контроль у стилі SDN для оптичного рівня.

Робоча група Optical Transport у рамках Open Networking Foundation (ONF) займається впровадженням можливостей SDN/OpenFlow для управління оптичними транспортними мережами [50]. Робота включає визначення сценаріїв використання, створення цільової еталонної архітектури для управління оптичними транспортними мережами з використанням OpenFlow і створення розширень протоколу OpenFlow.

1. Визначені сценарії використання:
2. Прямий контроль оптичних компонентів у корпоративних мережах.
3. Віртуалізація мереж Carrier Ethernet.
4. З'єднання дата-центрів у постачальників послуг.
5. Інтеграція пакетно-оптичних рішень.

Послуги, такі як розподіл контенту, розподілені бази даних або з'єднання між центрами обробки даних, висувають нові вимоги до роботи мереж. Їм

потрібні резервування мережевої пропускної здатності на вимогу, специфічне для додатків, надійність і ресурси (наприклад, пропускна здатність) у різних мережевих додатках (наприклад, точка-точка, віртуалізація мережі або мобільний back-haul) і для ряду мережевих технологій — від пакетних до оптичних.

Середовище, що відповідає цим вимогам, називається мережевими операціями на основі додатків (ABNO) [51]. ABNO об'єднує багато існуючих технологій і може розглядатися як набір інструментів із додаванням кількох нових елементів.

Деякі визначені сценарії використання:

1. З'єднання між AS.
2. Операції та управління псевдодротами.
3. Багатошарові мережі.
4. Реоптимізація мережі та адаптивне управління мережею.
5. Оптимізація між рівнями.
6. Управління та експлуатація віртуальних топологій мереж.

ABNO включає менеджер надання ресурсів, відповідальний за встановлення з'єднань шляхом надання інструкцій площині управління GMPLS у мережах або програмування окремих мережевих пристроїв. У другому випадку менеджер надання ресурсів діятиме як контролер OpenFlow.

Крім того, поточна архітектура мережі повинна еволюціонувати, щоб включити функціональний блок між сервісним рівнем і мережевими елементами для підтримки мультисервісного надання послуг у багатовендорних і багатотехнологічних сценаріях.

Необхідні два стандартні інтерфейси:

1. Північний інтерфейс (NBI): Серед інших завдань, забезпечує абстрактоване уявлення про мережу, дозволяючи єдину точку входу для надання послуг і планування конфігурації мережі. Також цей інтерфейс дозволяє координацію між мережею та сервісним рівнем відповідно до вимог сервісів.

2. Південний інтерфейс (SBI): Охоплює надання послуг, моніторинг і отримання інформації.

Потенціал SDN, завдяки його розділенню площини управління та площини передачі даних, вже видно у світі пакетних мереж, причому великі виробники та постачальники послуг активно підтримують продукти та сервіси, засновані на SDN-технологіях. Переваги SDN для оптичного транспорту порівняно з існуючими рішеннями площини управління, такими як GMPLS, виявляються значними щодо кількох конкретних аспектів. SDN-архітектура може спростити складнощі роботи з трафіком між різними мережевими технологіями. Вона дозволяє абстрагувати базову інфраструктуру та використовувати її додатками та мережевими сервісами як віртуальну сутність.

Це дозволяє операторам мережі створювати та маніпулювати логічними картами мережі, створюючи кілька співіснуючих зрізів мережі (віртуальних мереж), незалежних від базової транспортної технології та мережевих протоколів. Крім того, розділення площини управління та передачі даних робить SDN підходящим кандидатом для інтегрованої площини управління, яка підтримує кілька доменів мережі та кілька транспортних технологій. Ця архітектура не лише підходить для вирішення поточних проблем оптичних мереж, пов'язаних із підтримкою різних адміністративних і технологічних сегментів і поєднанням пакетного та оптичного шарів, але й підтримує нові операції, такі як віртуалізація, міжшарова оркестрація, пропускна здатність на вимогу (BoD), балансування навантаження та багато іншого.

Через унікальні аналогові особливості оптичного шару, у процесі абстрагування оптичних ресурсів потрібно враховувати різні статичні та динамічні атрибути й властивості (наприклад, формат модуляції, пропускна здатність, потужність, перешкоди). Залежно від типу елементів оптичної передачі та мережі, а також вимог операцій вищих рівнів, необхідно визначити різні рівні абстракції (тобто обсяг інформації, який потрібно розкрити для вищого рівня).

Одним із ключових викликів оптимального використання оптичної інфраструктури є створення абстрактної моделі оптичних ресурсів і її опис таким чином, щоб вона була достатньо простою для використання вищими шарами управління та водночас відображала справжні властивості розподіленого, нелінійного, шумного та дисперсійного аналогового оптичного каналу. Існуючі моделі часто є консервативними або надмірно спрощеними й орієнтованими на системи прямого детектування, які зараз замінюються цифровими когерентними системами передачі. Ключовим викликом є розробка спрощених моделей фізичного оптичного шару, починаючи з розуміння основної фізики оптичного каналу та аналогових характеристик оптичного шару.

У контексті цієї технології метою є розширення протоколу OpenFlow для підтримки комутації каналів (circuit switching), де між кінцевими точками створюється виділений канал зв'язку, і забезпечення повного охоплення сценаріїв використання та робочих процесів операторів.

Це важливо, оскільки робота оптичної транспортної мережі суттєво відрізняється від роботи мереж із комутацією пакетів. Наприклад, перша зазвичай вимагає втручання оператора перед створенням нового оптичного з'єднання, а терміни роботи послуг зазвичай відрізняються.

З точки зору стандартизації, розширення OpenFlow для оптичних мереж сприймається як складне завдання через внутрішню складність оптичної технології. Однією з причин є відсутність загальної, комплексної абстрактної моделі оптичних пристроїв, таких як реконфігуровані оптичні крос-комутатори, а також пов'язаних інформаційних і даних-моделей.

Проте робоча група Optical Transport в ONF і інші організації, що займаються розробкою стандартів, уже роблять перші кроки в цьому напрямку, а також проводяться відповідні дослідницькі ініціативи. Фактично, робоча група Optical Transport в ONF працює над попередніми розширеннями OpenFlow для багатотехнологічних комутаторів із кодуванням міток GMPLS, адаптованими до OpenFlow 1.1. Очікується, що нові версії покращать підтримку оптичних мереж, щоб у більш комплексний спосіб вирішити виявлені вимоги як для фіксованих,

так і для гнучких сіток, зокрема конфігурацію фільтрів і перехресних з'єднань каналів у медіа-матрицях.

Північна абстракція (Northbound Abstraction) є вирішальною не лише для визначення сервісів і політик, заснованих на додатках, але й для інтеграції різних технологічних і адміністративних доменів, які характерні для магістральних мереж на основі оптики.

Абстракція додатків створюється на основі єдиної карти мережі, яка маніпулюється мережевим API. Ця єдина карта забезпечує повну видимість як мереж із комутацією пакетів, так і з комутацією каналів, дозволяючи створювати мережеві додатки, які працюють через кілька шарів і кілька оптичних технологій.

Один із способів представлення інформації для додатків — це використання графів. Деякі реалізації транспортних мережевих контролерів, такі як ONOS або P4.S, використовують мережеві графи як метод визначення північної абстракції. Ці графові абстракції допомагають функціям управління та контролю оптичних мереж використовувати численні алгоритми обчислення графів, які широко застосовуються в оптичному світі. Ще однією перевагою є використання існуючих і нових архітектур оркестрації PCE для безперешкодного визначення вимог до мережі через кілька адміністративних і технологічних доменів.

Органи стандартизації, зокрема IETF, працюють над вирішенням вимог операторів і NRENs, в результаті чого архітектура мережевих операцій на основі додатків (ABNO) пропонується як кандидат для впровадження. Архітектура ABNO складається з низки стандартних компонентів і інтерфейсів, які разом забезпечують метод управління та експлуатації мережі.

Спрощений вигляд архітектури ABNO представлений на рисунку 5.3 і включає наступні компоненти:

Контролер ABNO: Служить точкою входу до мережі для систем управління мережею (NMS/OSS) та сервісного рівня для надання послуг і розширеної координації мережі. Виконує роль системного оркестратора,

викликаючи свої внутрішні компоненти відповідно до визначеного робочого процесу.

Елемент обчислення маршруту (PCE): Визначається як сутність для обробки запитів на обчислення маршруту. Для передачі таких запитів і відповідей PCE може використовувати протокол PCER (Path Computation Element Protocol).

Менеджер віртуальної топології мережі (VNTM): Координує конфігурацію віртуальної топології мережі (VNT) шляхом створення або видалення з'єднань на нижчому рівні та оголошення змін мережевим сутностям вищого рівня.

Менеджер надання ресурсів: Відповідальний за встановлення з'єднань. Це може здійснюватися через інтерфейс площини управління за допомогою PCER або шляхом прямого програмування шляху передачі даних на окремих мережеских вузлах із використанням протоколу конфігурації мережі (NetConf) або виконуючи роль контролера OpenFlow.

Обробник операцій, адміністрування та технічного обслуговування (OAM): Відповідальний за виявлення несправностей і виконання дій для реагування на проблеми в мережі. Взаємодіє з вузлами для ініціювання OAM-дій, таких як моніторинг і тестування нових з'єднань і послуг.

Архітектура ABNO об'єднує ці компоненти в єдину систему для централізованого управління, автоматизації та оптимізації мережеских ресурсів.

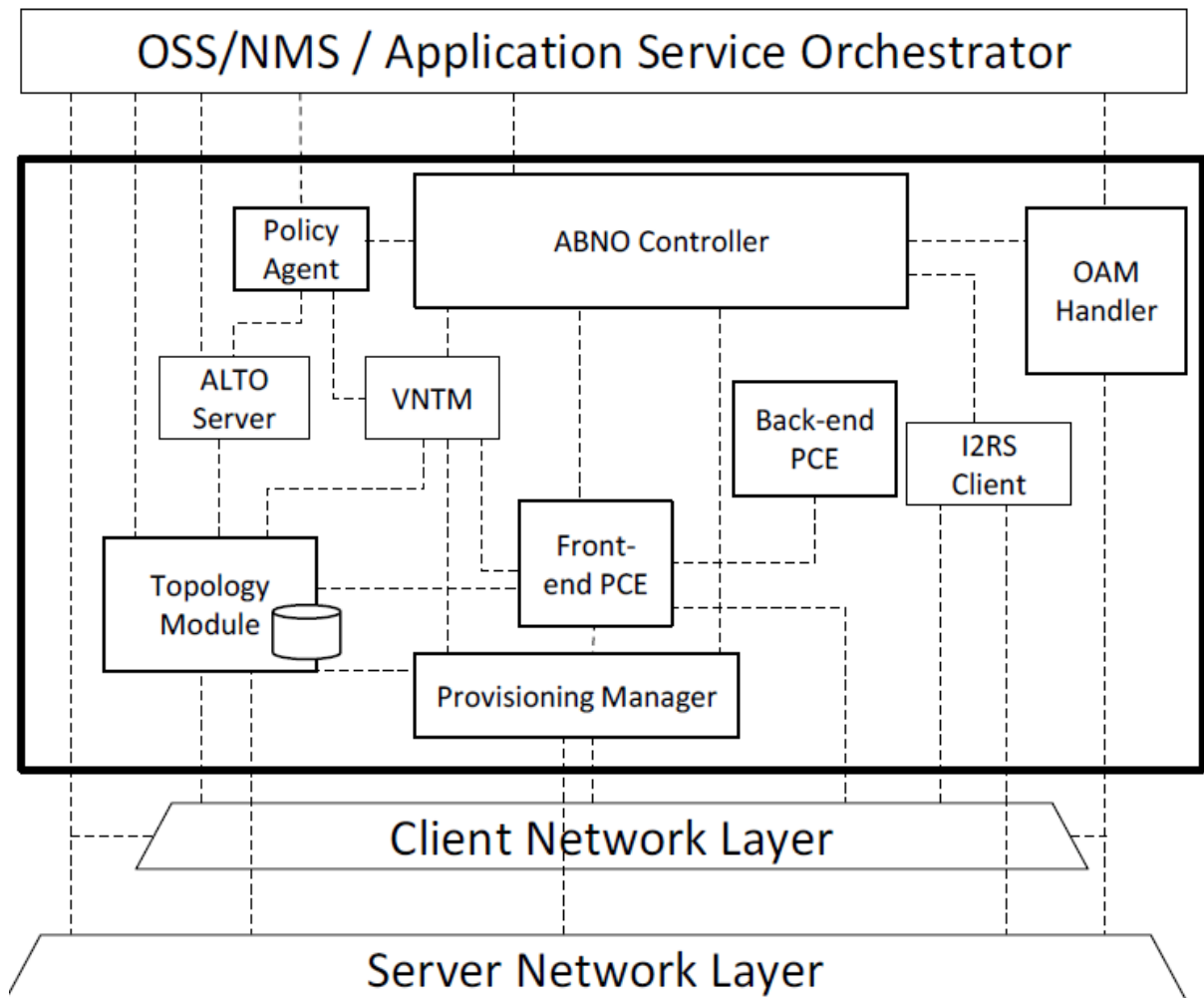


Рисунок 4.3 - Архітектура ABNO

Мультидоменна оптична транспортна мережа, що складається з гетерогенних оптичних транспортних технологій (наприклад, гнучка/фіксована сітка для оптичної комутації каналів та оптична комутація пакетів) і технологій площини управління (наприклад, централізований OpenFlow або розподілений GMPLS), не має природної сумісності, і для цього потрібен механізм оркестрації мережі. Оркестратор мережі дозволяє створювати наскрізні послуги в мультидоменних оптичних мережах, які включають різні транспортні технології та технології площини управління. SDN є ключовою технологією для вирішення цього завдання, оскільки розділення площини управління та передачі даних робить SDN підходящим кандидатом для оркестрації наскрізних послуг у різних доменах з гетерогенними технологіями транспорту та управління.

Архітектура ABNO є ідеальним елементом для такої оркестрації. На рисунку 5.4 представлені будівельні блоки архітектури ABNO, необхідні для підтримки мультідоменної та багатошарової оркестрації мережі. Контролер оркестрації виконує різні робочі процеси та може взаємодіяти з іншими блоками. Модуль топології збирає топологію доменів кожного SDN/OpenFlow контролера, представлену через NBI, і/або GMPLS/PCE доменів через нові протоколи, такі як BGP-LS, для отримання бази даних інженерії трафіку (TED) за допомогою BGP-пірингу. TED зберігає глобальну топологію мережі, що складається з внутрішньодоменних топологій з міждоменними зв'язками. Елемент обчислення маршруту (PCE) відповідає за обчислення маршрутів по графу мережі, наданому модулем топології, і потребує розширення для роботи з ідентифікаторами OpenFlow datapath. Менеджер надання ресурсів відповідає за запити на встановлення потоків до контролерів OpenFlow-доменів через NBI кожного контролера та до AS-PCE доменів GMPLS. Сервер потоків (Flow Server) відповідає за зберігання стану наданих потоків у базі даних LSPDB (Label Switch Path Database). Менеджер віртуальної топології мережі (VNTM) координує надання маршрутів у багатошарових мережах, виконуючи створення з'єднань на серверному рівні (наприклад, оптичні з'єднання) і їхнє підвищення до логічного зв'язку на клієнтському рівні (наприклад, IP-з'єднання). NBI контролерів SDN/OpenFlow або GMPLS/PCE зазвичай залежить від технології та постачальника. Таким чином, мережевий оркестратор повинен реалізувати різні плагіни для кожного з NBI контролерів.

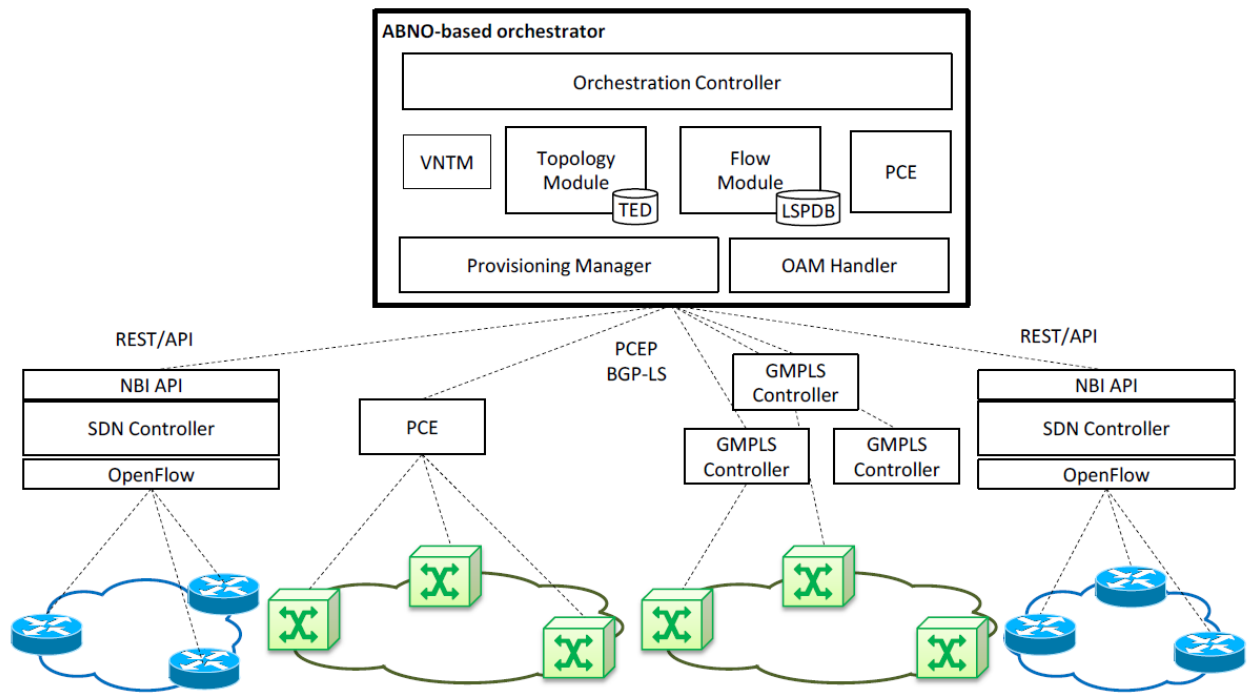


Рисунок 4.4: Оркестратор мережі на основі ABNO

Емульоване середовище розробляється в рамках завдання JRA1 Task 1. На рисунку 5.5 показано архітектуру оптичного домену, де розгорнуто контролер SDN, який вивчається. Контролер SDN має базу даних, що зберігає топологію мережі, стан мережевих ресурсів і вже встановлені з'єднання (маршрути з комутацією міток (LSPs)).

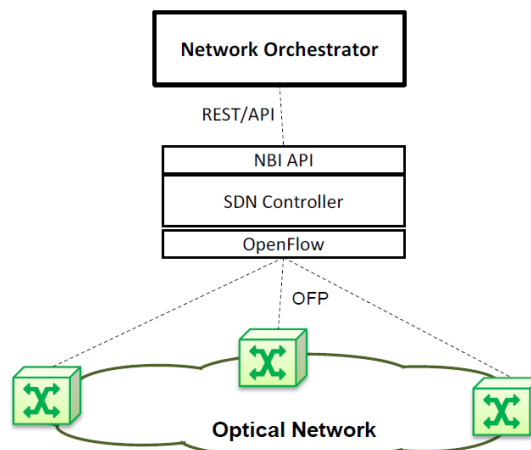


Рисунок 4.5 - Архітектура демонстратора оптичного домену

Для керування мережевими елементами з контролера SDN використовується протокол OpenFlow (OFP). Починаючи з версії OFP v1.4, було

додано нові властивості для підтримки оптичних портів, що дозволяють конфігурацію та моніторинг лазера на передавачі, а також частоти й потужності на приймачі. Ці властивості забезпечують підтримку оптичних портів в оптичних крос-комутаторах (ОХС). Однак вони не включають підтримку формату модуляції для передавачів. У зв'язку з цим у рамках завдання було реалізовано розширення для OFP v1.4 з метою підтримки форматів модуляції у вигляді властивостей EXPERIMENTER.

Щодо опису порту, стандарт ofp_port_desc_prop_optical наразі дозволяє отримувати такі характеристики порту: можливості (RX tunable, TX tunable, TX power adjustable, значення, задані в одиницях частоти або довжини хвилі), мінімальна та максимальна частота/довжина хвилі для TX і RX, відстань сітки TX і RX у частотних або довгохвильових одиницях, а також мінімальна і максимальна потужність TX.

Для розширення цих можливостей у рамках Завдання 1 було реалізовано нову експериментальну властивість для отримання форматів модуляції, які підтримуються портом. Ця властивість має назву ofp_port_desc_prop_experimenter_modulation_formats, і її структура виглядає наступним чином:

```
struct ofp_port_desc_prop_experimenter_modulation_formats {
    uint16_t type;           /* OFPPDPT_EXPERIMENTER. */
    uint16_t length;         /* Length in bytes of this property. */
    uint32_t experimenter;    /* Experimenter ID. */
    uint32_t exp_type;        /* Type=1 Modulation Formats Description. */
    uint8_t num_mod_formats;  /* Number of modulation formats supported. */
    uint32_t mod_formats[0];  /* List of modulation formats supported. Each following
    structure
                                ofp_port_desc_prop_experimenter_modulation_format. */
    uint32_t pad[0];          /* 64-bit alignment */
};

struct ofp_port_desc_prop_experimenter_modulation_format {
    uint16_t id;              /* Identifier of the modulation format. */
    uint16_t bits_per_symbol; /* Spectral efficiency in bits per baud. */
};
```

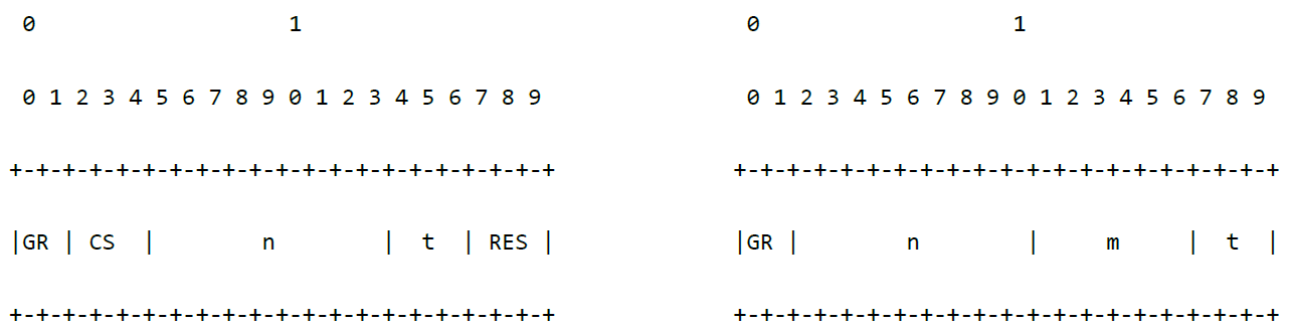
Повідомлення про конфігурацію порту наразі підтримують визначення таких параметрів конфігурації: прапорці конфігурації, центральна частота, зміщення, ширина слоту та потужність передачі порту. Однак вони не підтримують конфігурацію бажаного формату модуляції. У рамках Завдання

було реалізовано нову експериментальну властивість для встановлення бажаного формату модуляції порту. Ця властивість має назву `ofp_port_mod_prop_experimenter_modulation_format`, і її структура виглядає наступним чином:

```
struct ofp_port_mod_prop_experimenter_modulation_format {
    uint16_t type;                /* OFPPMPT_EXPERIMENTER. */
    uint16_t length;              /* Length in bytes of this property. */
    uint32_t experimenter;        /* Experimenter ID. */
    uint32_t exp_type;            /* Type=1 ModulationFormatConfiguration. */
    uint16_t mod_format_id;       /* Modulation format id. One from Modulation Formats
Description. */
    float_t symbol_rate;          /* Symbol rate in bauds/s formatted as an IEEE 32 bit
float */
    uint16_t num_subcarriers;      /* Number of subcarriers used. */
    uint16_t bits_per_symbol;     /* Bits per symbol as reported in Modulation Formats
Description. */
    uint32_t pad[0];              /* 64-bit alignment */
};
```

Оптична мітка для WDM визначає ідентифікатор сітки, відстань між каналами та індекс номінальної центральної частоти, як це визначено в IETF RFC6205 [53]. У випадку технології гнучкої сітки (flexible grid) необхідно додати додаткове поле, яке визначає ширину слоту, як це зазначено в [54].

У демонстраційному прикладі в рамках Завдання було використано 20-бітну мітку, подібну до MPLS, структура якої фактично залежить від використовуваної технології.



Поля мітки мають наступну структуру:

Grid (GR, 2 біти): Підтримувані значення: 01 для ITU-T DWDM, 10 для ITU-T CWDM, 11 для гнучкої сітки (flexible grid), 00 зарезервоване значення

Channel Spacing (CS, 3 біти): Підтримувані значення: 001 для 100 ГГц, 010 для 50 ГГц, 011 для 25 ГГц, 100 для 12,5 ГГц, 101 для 6,25 ГГц, 000 зарезервоване значення

Для технології гнучкої сітки це поле вважається рівним 6,25 ГГц.

Nominal Central Frequency Index (n, 9 біт): Максимальна ширина спектра становить 4 ТГц; при використанні частотних зрізів шириною 6,25 ГГц потрібно закодувати 640 можливих індексів. Референсна центральна частота, наприклад, 193,1 ТГц, відповідає $n = 0$. Значення n є знаковим цілим числом у доповняльному коді, тому для його представлення потрібно 9 біт. Номінальна центральна частота обчислюється за формулою: $193,1 \text{ ТГц} + n \times \text{CS} / 1000$.

Slot Width (m, 6 біт): Це поле використовується лише для технології гнучкої сітки. Розмір поля m обчислено так, щоб дозволити кодування з'єднання зі швидкістю 1 Тб/с, яке при використанні найгіршого формату модуляції, наприклад QPSK, вимагає 20 частотних зрізів по 12,5 ГГц.

Ethernet Type (t, 3 біти): Це поле не є обов'язковим у форматі міток IETF, але воно потрібне для інтегрованого демонстратора Завдання 1. При інкапсуляції Ethernet-кадру у кадр MPLS його Ethernet-тип (наприклад, ARP, IP, IPv6, IGMP, MPLS тощо) замінюється на MPLS, що унеможливорює відновлення оригінального кадру на приймачі. З цієї причини було додано поле для кодування протоколу оригінального кадру. Підтримувані значення: 0000 для ARP, 0001 для IP, 0010 для IPv6, 0011 для IGMP, 0100 для MPLS. Решта значень зарезервовані для майбутнього використання.

У випадку мультідоменної/-шарової мережі мережевий оркестратор має бути налаштований поверх набору однорівневих/-доменних SDN контролерів. Для цього SDN контролери повинні експортувати топологію та ресурси базової мережі до оркестратора, щоб створити наскрізний огляд мережі. IETF наразі працює над визначенням моделей даних для опису оптичних мереж на основі YANG. Оскільки визначення YANG моделей ще не завершено, у демонстраційному середовищі в рамках Завдання було вирішено реалізувати REST/API, щоб SDN контролери могли експортувати свою топологію та ресурси.

Для створення, оновлення або видалення LSP необхідно розробити інший REST/API.

Для операції створення необхідно надати ідентифікатор LSP (символічну назву шляху), кінцеві точки LSP та об'єкт явного маршруту (ERO).

Для операції оновлення достатньо символічної назви шляху LSP та нового ERO.

Для операції видалення достатньо символічної назви шляху LSP.

Демонстратор для тестування функціональності однорівневої/-доменної мережі, описаної вище, було експериментально реалізовано за допомогою контролера Ryu SDN v3.25, оскільки він підтримує всі доступні версії OFP, а також стандартизовані розширення для оптичних портів. Додатки контролера, розроблені для Ryu, використовують поле cookie у кожному потоці, налаштованому в мережевих елементах, щоб ідентифікувати LSP, для якого налаштовується це правило.

Додаток контролера реалізовано на Python, і він налаштований із північним інтерфейсом у формі REST API, що використовується для отримання запитів від оркестратора. Крім того, було налаштовано південний інтерфейс для управління базовими мережевими елементами, який використовує OFP v1.4 із розширеннями для підтримки технологій WDM і гнучкої сітки (flexible grid).

Для оркестрації розгортання та конфігурації кожного мережевого елемента в топології використовувався Mininet v2.1.0. Кожен мережевий елемент було розгорнуто за допомогою моста OpenVSwitch v2.4.0 із оптичними розширеннями для емулявання технологій WDM і гнучкої сітки.

У рамках завдання було змодельовано передавання оптичного сигналу шляхом інкапсуляції кожного Ethernet кадру, що конвертується з електричного у оптичний сигнал, у кадр, подібний до MPLS, де мітка MPLS кодує оптичну спектральну мітку. Проміжні оптичні крос-комутатори (ОХС) комутують кадр відповідно до цієї мітки MPLS, а на приймачі мітка MPLS видаляється для відновлення початкового Ethernet кадру.

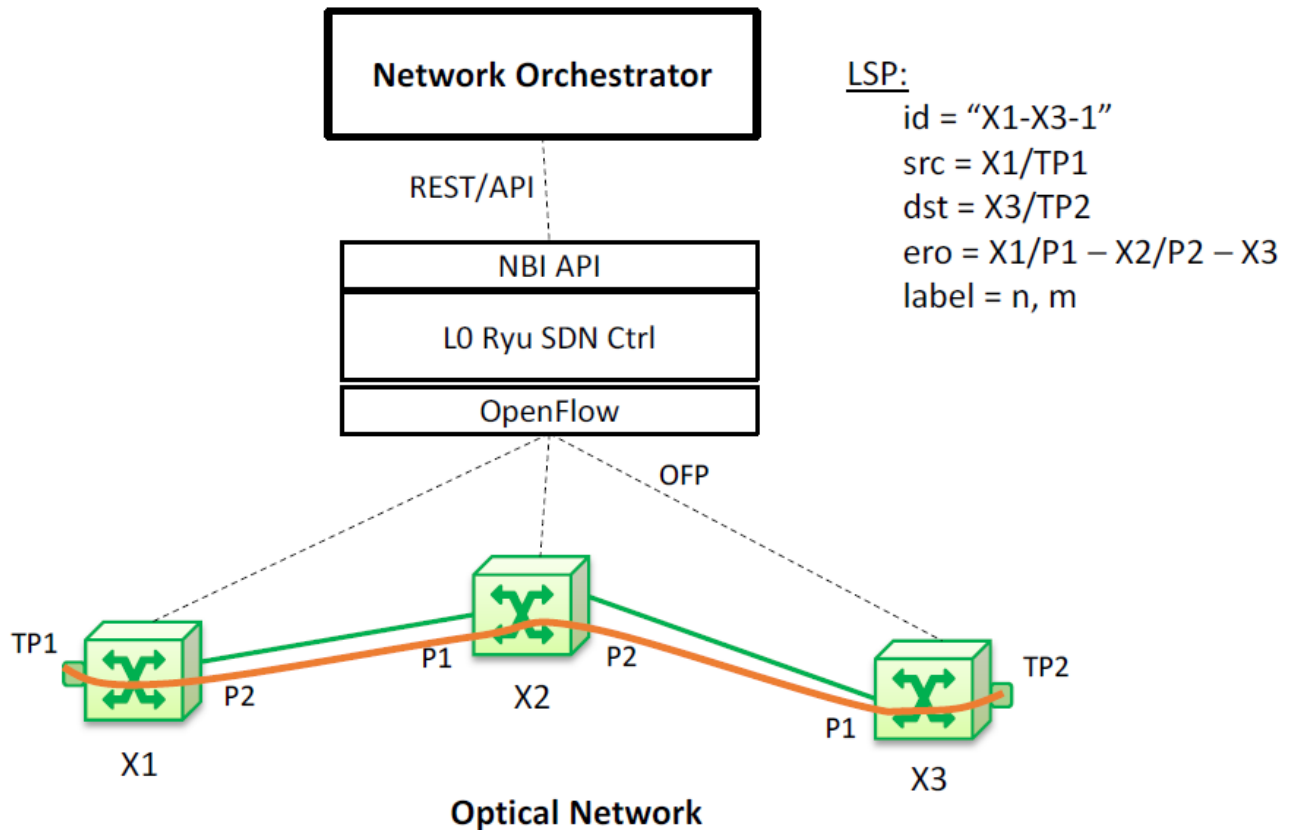


Рисунок 4.6 - Приклад налаштування LSP (маршруту з комутацією міток)

Коли мережевий оркестратор повинен налаштувати LSP, він обчислює явний маршрутний об'єкт (ERO), який містить призначення ресурсів для цього LSP уздовж маршруту. Наприклад, на рисунку 5.6 LSP, який потрібно налаштувати, проходить між X1/TP1 і X3/TP2.

Після отримання ERO у контролері SDN цей об'єкт використовується для налаштування передавачів і приймачів транспондерів і містить інформацію про вихідні та кінцеві точки, які вказують вузол і його порт. У прикладі, показаному на рисунку 5.6, вихідним портом є транспондер TP1 у X1, а кінцевим портом — транспондер TP2 у X3.

ERO визначає набір індивідуальних з'єднань, які потрібно налаштувати в кожному ОХС (оптичному крос-комутаторі) уздовж маршруту, і включає мітку, яка визначає частотний слот, що має бути використаний для LSP уздовж маршруту.

4.2 Практична реалізація SDN транспортної оптичної мережі на проєкті NORDUnet UNINETT

Цей випадок було обрано для дослідження, оскільки він представляє типову ситуацію в пакетно-оптичній мережі, де маршрутизація може бути не оптимальною через відсутність координації між елементами обчислення маршруту на різних рівнях мережі.

NORDUnet використовує три маршрутизатори (R-USI, R-OSC і R-TUG) для забезпечення IP-зв'язку з UNINETT (рисунок 5.7).

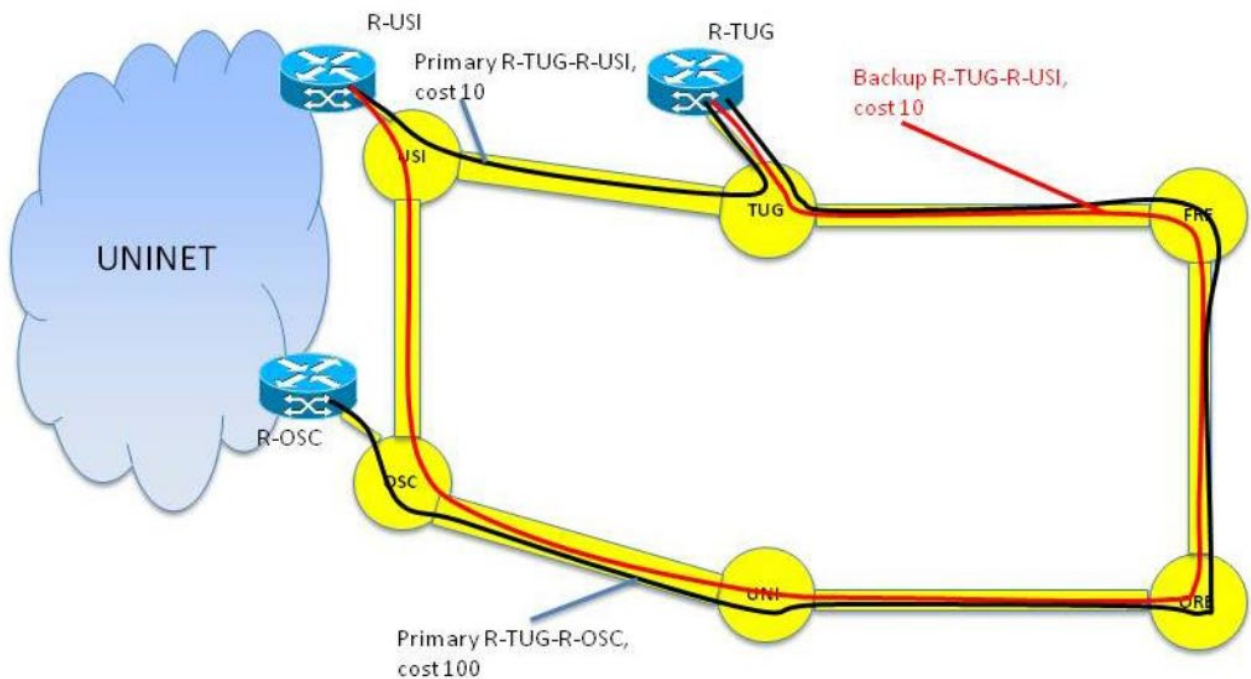


Рисунок 4.7 - Пакетний та оптичний рівні мережі NORDUnet

IP-трафік від NORDUnet до UNINETT агрегується маршрутизатором R-TUG і надсилається до пункту призначення в UNINETT через два основних з'єднання: R-TUG–R-USI (вартість 10) або R-TUG–R-OSC (вартість 100). Обидва з'єднання використовують інфраструктурні кола OTN/DWDM і мають пропускну здатність 10G.

З'єднання R-TUG–R-USI використовує пряме коло TUG–USI, тоді як з'єднання R-TUG–R-OSC використовує складене коло TUG–FRE–ORE–UNI–

OSC. Вартість з'єднань відображає характеристики використаних кіл, такі як відстань, кількість сегментів і затримки. Саме тому вартість з'єднання R-TUG–R-USI становить 10, тоді як R-TUG–R-OSC — 100.

Оптичні бокси (TUG, USI, OSC та інші) мають 10GE порти для з'єднання з IP-маршрутизаторами та 100G порти для ліній із кадрюванням ODU4 для міжз'єднань. У межах оптичних боксів IP-трафік картографується у кадри ODU2e, які потім мультиплексуються у відповідні часові слоти сигналу ODU4.

Під час нормальної роботи маршрутизатор R-TUG надсилає IP-пакети до UNINETT через маршрутизатор R-USI, оскільки вартість цього маршруту (10) є меншою за вартість альтернативного маршруту через маршрутизатор R-OSC (100).

Проблема неефективної маршрутизації виникає, коли відбувається збій у волокні між USI і TUG. OTN-рівень оптичної мережі NORDUnet має площину управління GMPLS, яка використовується для перенаправлення OTN-кіл у разі збоїв волокна або довжин хвиль. Таким чином, коли протокол OSPF виявляє втрату зв'язності вздовж OTN-круга TUG–OSC, він перераховує маршрут і налаштовує резервний. У цьому випадку резервний маршрут проходить через волоконне кільце за маршрутом TUG–FRE–ORE–UNI–OSC–USI.

Для IP-маршрутизаторів перенаправлення, яке відбувається на OTN-рівні, залишається невидимим, і маршрутизатор R-TUG продовжує надсилати IP-пакети до UNINETT через маршрутизатор R-USI, оскільки вартість цього маршруту все ще дорівнює 10. Насправді, після перенаправлення R-TUG мав би надсилати трафік до UNINETT через R-OSC, оскільки цей маршрут на OTN-рівні має кращі характеристики (кількість хопів, відстань, затримка), ніж маршрут через R-USI.

Однак для цього маршрутизатори повинні були б знати оновлені вартості OTN-кіл, але такої автоматичної взаємодії між IP і OTN-рівнями обладнання мережі NORDUnet (маршрутизатори Juniper і оптичні бокси Ciena OTN/DWDM) не підтримують.

Як результат, маршрут із R-TUG до пунктів призначення в UNINETT залишається неефективним, із додатковим оптичним хопом у порівнянні з альтернативним маршрутом через R-OSC, що призводить до збільшення затримки сигналу вздовж маршруту. Така ситуація триває до ручного втручання адміністратора IP, який коригує вартості маршрутів відповідно до інформації, отриманої від адміністратора мережі ONP/DWDM — неформальної процедури, яка може зайняти багато часу та бути схильною до помилок.

Описана вище проблема не є специфічною для NORDUnet, оскільки історично площа управління IP працювала автономно, без будь-якої взаємодії з оптичними рівнями. Тому узагальнемо поточну ситуацію та розвиток взаємодії між рівнями, щоб створити контекст для подальшого розгляду SDN як природного способу забезпечення ефективної маршрутизації в багаторівневих пакетно-оптичних мережах.

Зазвичай пакетні та оптичні мережі провайдера (якщо він володіє обома) управляються двома різними командами мережевих адміністраторів (іноді навіть двома різними Центрами операційної підтримки (NOC)). Адміністратори оптичної мережі встановлюють з'єднання на основі кіл для IP-маршрутизаторів відповідно до запитів адміністраторів пакетної мережі, які вказують кінцеві точки та пропускну здатність з'єднання.

Якщо адміністратор пакетної мережі, який подає такий запит, враховує топологію оптичної мережі, отриманий маршрут може бути оптимальним або близьким до оптимального. Однак, якщо такий запит робиться "наосліп", тобто без знання топології оптичної мережі, результат може бути далеким від оптимального.

Впровадження GMPLS забезпечило автоматичну взаємодію між площинами управління пакетних і оптичних мереж. Проте основна модель функціональності взаємодії IP-GMPLS, названа моделлю накладення (overlay model), дуже схожа на описаний вище ручний "сліпий" режим. У моделі накладення площа управління IP має обмежений огляд топології оптичної мережі, бачачи лише точки входу в оптичну мережу, до яких підключені

маршрутизатори. Потім вона надсилає запит до площини управління GMPLS для налаштування кола між двома такими точками входу. Ефективність результуючого маршруту, що проходить через рівні IP-OTN-DWDM, у цій моделі залежить, до певної міри, від удачі.

Інша модель GMPLS – модель пірів (peer model) – передбачає, що всі вузли обох мереж мають повне уявлення про безшарову топологію комбінованої пакетно-оптичної мережі. У цьому випадку маршрутизація може бути оптимальною; це залежить від використовуваного протоколу маршрутизації, але, в принципі, наявність повної інформації про топологію на кожному мережевому вузлі потенційно дозволяє досягти ефективної маршрутизації.

Реалізація моделі пірів GMPLS стикається з кількома викликами:

1. IP-мережа та базова оптична мережа можуть бути під різним адміністративним управлінням – така ситуація була дуже типовою в минулому; зараз дедалі більше провайдерів володіють і управляють обома типами мереж.

2. Усі мережеві вузли – IP-маршрутизатори та OTN/DWDM-комутатори – повинні підтримувати протоколи GMPLS; для маршрутизаторів це не є загальнопоширеним, оскільки протоколи GMPLS відрізняються від стандартних протоколів площини управління IP.

3. Складність завдання обчислення маршруту значно зростає з додаванням додаткових вузлів і зв'язків у граф топології комбінованої мережі; це може виявитися надто складним завданням для мережевих вузлів.

Через ці виклики розвиток технології GMPLS та її застосувань здебільшого залишився в межах моделі накладення (overlay model) і, таким чином, не може використовувати потенційні переваги маршрутизації на основі глобального огляду топології пакетно-оптичної мережі.

Парадигма SDN передбачає логічно централізоване управління мережею. Одним із наслідків цієї парадигми є те, що вона забезпечує природний спосіб керувати всіма рівнями мережі з однієї точки (SDN-контролера), яка має глобальний огляд мережі в цілому та оптимізує її роботу відповідно.

Глобальний огляд пакетно-оптичної мережі можна досягти через два види узагальнення [55]:

1. Абстракція спільного потоку (common-flow abstraction), яка узагальнює потоки пакетів і потоки каналів.

2. Абстракція спільної карти (common-map abstraction), яка дозволяє представляти топологію пакетно-оптичної мережі як плоску безшарову карту.

3. Переваги глобального огляду пакетно-оптичної мережі є багатогранними, оскільки такий підхід дозволяє оптимізувати різні аспекти роботи мережі, включаючи встановлення оптимальних маршрутів для комбінованих потоків (пакет-канал-пакет) на наскрізній основі.

Управління SDN пакетно-оптичною мережею, засноване на узагальненій безшаровій топології, схоже на підхід моделі пірів GMPLS, але краще справляється із зазначеними вище викликами:

1. Мережевим вузлам не потрібно запускати складні протоколи GMPLS. Замість цього їм потрібно лише відповідати специфікаціям SDN-комутаторів (наприклад, від ONF) і підтримувати протокол взаємодії між контролером SDN і комутатором (наприклад, OpenFlow).

2. Збільшення складності обчислення маршруту через збільшення розмірності комбінованого графа мережі не є великою проблемою для централізованої обчислювальної потужності SDN-контролера: розгортання одного або кількох дуже потужних комп'ютерів із додатком для обчислення маршрутів (PCE) значно простіше, ніж збільшення обчислювальної потужності кожного мережевого вузла.

Звісно, як і в моделі пірів GMPLS, безшаровий глобальний підхід SDN не може допомогти, якщо пакетні та оптичні мережі знаходяться під різним адміністративним управлінням.

Управління пакетно-оптичною мережею на основі SDN може також використовувати підхід накладення (overlay). У такому випадку існують дві окремі бази даних топологій: одна для пакетної мережі, інша — для оптичної мережі [51]. Два різні SDN-контролери окремо управляють своїми мережами, але

координують свою роботу за необхідності. Наприклад, коли SDN-контролер IP-мережі має налаштувати новий зв'язок між маршрутизаторами, він надсилає запит SDN-контролеру оптичної мережі із зазначенням кінцевих точок і пропускної здатності з'єднання.

Підхід SDN безшарової моделі до випадку використання NORDUnet формує топологію, показану на рисунку 5.8. Топологія включає як фізичні, так і віртуальні елементи комбінованої мережі.

Фізичні елементи представлені фізичними портами та зв'язками — волокнами між маршрутизаторами та 10GE портами оптичних вузлів.

Віртуальні елементи включають довжини хвиль рівня DWDM, часові слоти рівня OTN і віртуальні порти.

Віртуальний порт виконує відображення даних між рівнями. Наприклад: Віртуальний порт 1 оптичного вузла TUG відображає вхідні пакети потоку пакетів у кадри ODU2e. Віртуальний порт 2 вузла TUG відображає дані ODU2e у часові слоти кадру ODU4 на одній із довжин хвиль, що виходять із одного з 100G портів TUG.

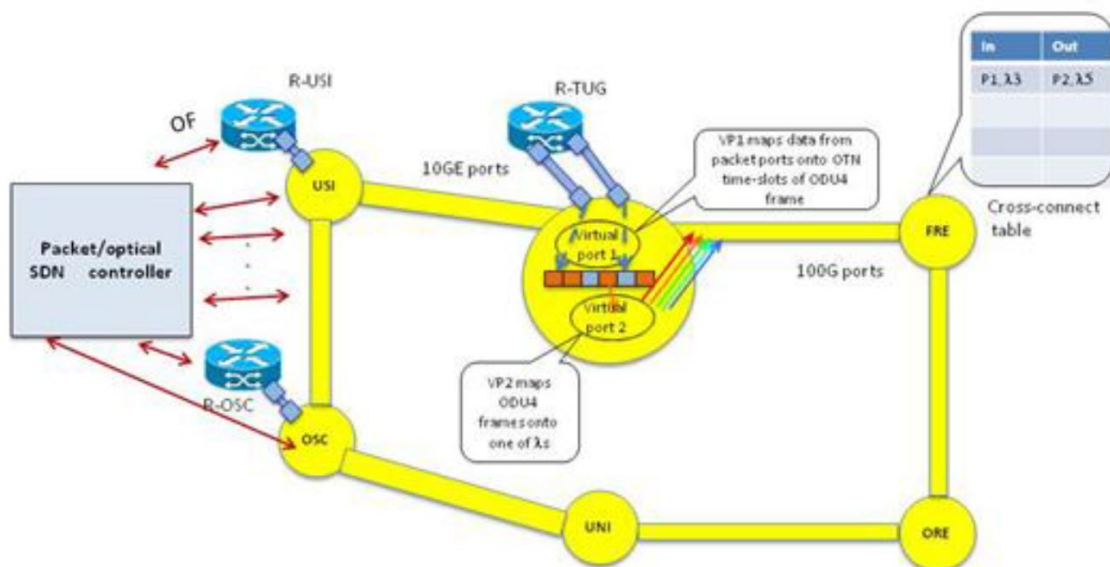


Рисунок 4.8 - Глобальний огляд безшарової топології NORDUnet

Приклад кількох перших хопів маршруту потоку 3, який проходить через пакетний порт 2 на R-TUG, а потім через TUG і FRE до R-USI, може виглядати так:

R-TUG {Flow3, Port2} -> TUG {Port2->VP1} -> TUG {VP1-mapping->ODU2e} -> TUG {VP1->VP2} -> TUG {VP2-multiplexing-> (ODU4, time-slots k, ..., j)} -> TUG {VP2-mapping->(λ 3, Port2)} -> FRE {(Port1, λ 3)->(Port2, λ 5)} -> ...

Цей приклад демонструє, що розмір комбінованого безшарового графа топології мережі зростає не лише тому, що комбінована топологія включає більше фізичних вузлів і зв'язків, ніж кожна окрема топологія (пакетна чи оптична). Це зростання також є результатом множинних варіантів, які створюють операції відображення (mapping) та мультиплексування. Наприклад, кадр ODU2e може бути відображений на різні довжини хвиль вихідного порту 2, і кількість варіантів залежить від доступності 80 часових слотів у кадрі ODU4 кожної довжини хвилі.

Глобальний огляд комбінованої пакетно-оптичної топології NORDUnet надає елементу PCE (обчислення маршруту) контролера SDN можливість знайти оптимальний маршрут від R-TUG до UNINETT відповідно до метрики. Метрика може бути досить традиційною, наприклад, кількість фізичних хопів, або більш складною, враховуючи затримки сигналу, коефіцієнт помилок (BER) тощо.

Якщо використовувати кількість хопів як метрику, то неважко побачити, що збій у волокні (між USI і TUG) повинен викликати перенаправлення потоків, які йдуть від R-TUG до UNINETT, через R-OSC, а не через R-USI, як це сталося в реальності, оскільки маршрут через R-OSC має на один хоп менше.

Мета цієї симуляції полягала у визначенні того, наскільки ефективно існуючі SDN-контролери можуть приймати рішення щодо маршрутизації в пакетно-оптичних мережах, використовуючи кейс NORDUnet як референтну топологію.

Для симуляції було обрано open network operating system (ONOS) [52], оскільки:

1. Це дуже популярний відкритий SDN-контролер, розроблений Open Networking Lab (ON.Lab) — некомерційною організацією, заснованою винахідниками та лідерами SDN зі Стенфордського університету та Університету Каліфорнії, Берклі.

2. Дистрибутив ONOS включає навчальний додаток для пакетно-оптичних мереж, який підтримує маршрутизацію без рівнів (layerless routing).

3. Він інтегрований з Mininet [56] і LINC Open Extension (LINC-OE) switch [57], що імітує DWDM мультиплексор і підтримує протокол OF v.1.3.

На жаль, Завданню 1 не вдалося знайти програмну реалізацію, яка б імітувала комутатор із можливостями OTN, як це потрібно для кейсу NORDUnet. Програмне забезпечення LINC-OE виявилось найбільш підходящим для цієї мети, оскільки воно підтримує мультиплексування та перехресне з'єднання довжин хвиль у середовищі фіксованої сітки (80 довжин хвиль на порт). LINC-OE було написано до того, як ONF опублікувала Optical Transport Protocol Extensions v.1.0, тому воно використовує власну версію розширень для OF 1.3, які підтримує SDN-контролер ONOS.

Незважаючи на відсутність функціональності OTN, двошарова топологія (IP і DWDM) дозволяє (до певної міри) імітувати процеси прийняття рішень щодо маршрутизації в трирівневій мережі NORDUnet.

Якщо припустити, що кадри ODU4 для всіх 80 довжин хвиль кожного оптичного 100G порту мережі NORDUnet завжди мають 8 вільних часових слотів, необхідних для мультиплексування додаткового кадру ODU2e, то вибір оптимального маршруту не залежатиме від деталей рівня OTN і залежатиме лише від маршрутів довжин хвиль. На момент симуляції інфраструктури OTN і DWDM у мережі NORDUnet не були перевантажені, тому це припущення виглядає обґрунтованим, і симуляція двошарової мережі повинна була дати правдоподібні результати.

Рисунок 5.9 нижче показує уявлення топології ONOS для симуляції кейсу NORDUnet. Топологія включає три маршрутизатори (R-TUG, R-USI і R-UNI), які симулюються стандартним програмним забезпеченням комутатора Mininet.

Шість оптичних вузлів NORDUnet (TUG, FRE, ORE, UNI, OSC і USC) симулюються програмним забезпеченням LINC-OE.

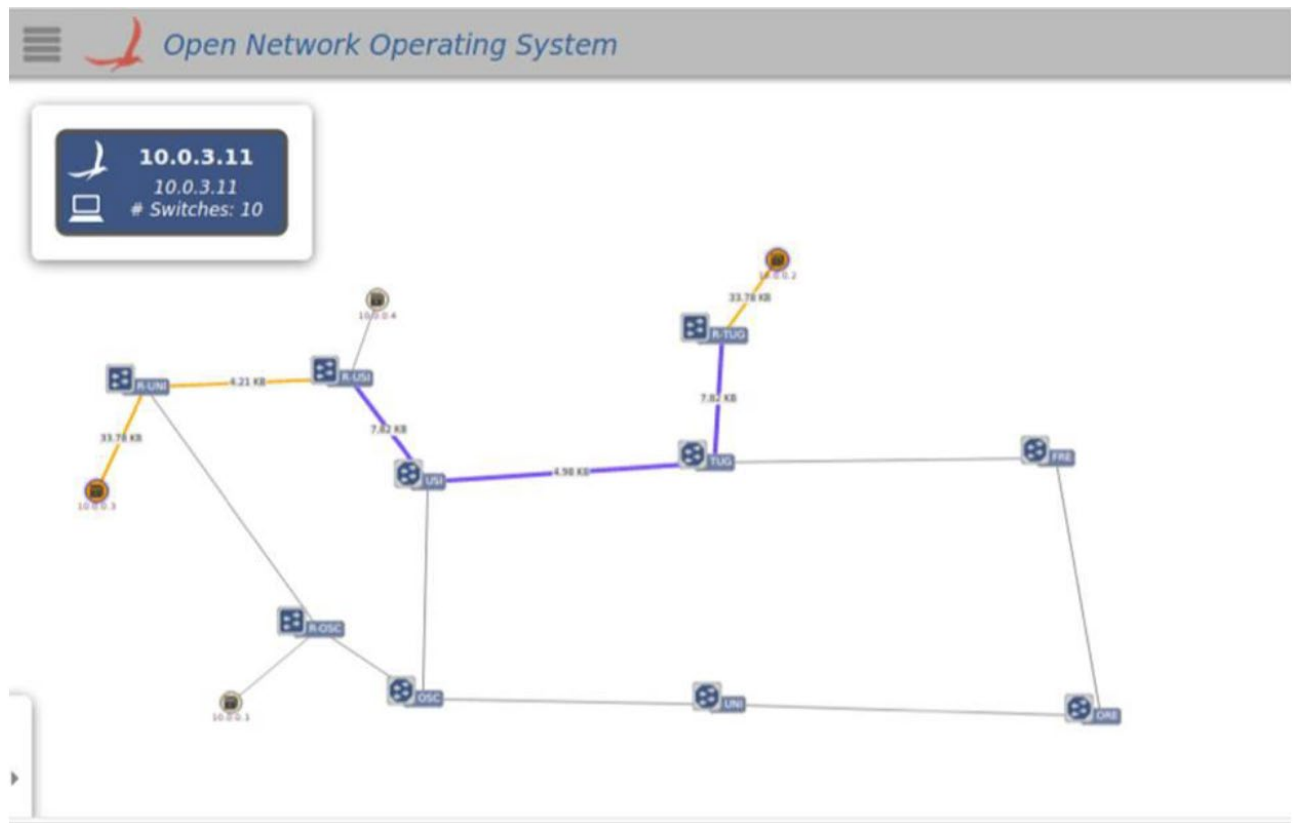


Рисунок 4.9 - Основний маршрут між R-TUG і маршрутизатором UNINETT

Маршрутизатор R-UNI було додано до топології для представлення IP-призначення в UNINETT, щоб елемент PCE ONOS міг приймати рішення про наскрізну маршрутизацію. R-UNI з'єднаний двома пакетними з'єднаннями з маршрутизаторами NORDUnet R-USI і R-OSC, щоб забезпечити різноманітні маршрути від NORDUnet до UNINETT. Маршрутизатор R-UNI не відповідає жодному реальному маршрутизатору UNINETT (на відміну від інших вузлів топології); його було додано лише для того, щоб мати якусь кінцеву точку (sink point) в UNINETT.

Крім того, до топології було додано кілька хостів Mininet для симуляції наскрізних потоків, які активують механізм intent ONOS, що, своєю чергою, викликає роботу PCE ONOS.

Уявлення топології відображає той факт, що ONOS розглядає пакетно-оптичну мережу як безшарову, розміщуючи вузли різних типів на одному рівні.

Маршрут, знайдений ONOS PCE для ситуації, коли в мережі немає збоїв, показано на Рисунку 5.9 жовто-фіолетовою лінією. Жовті відрізки відповідають пакетним потокам, тоді як фіолетові — оптичним потокам. Цей маршрут має мінімальну кількість переходів між кінцевими вузлами серед усіх можливих маршрутів між R-TUG і R-UNI.

Результат перенаправлення потоків між R-TUG та R-UNI після збою показано на Рисунку 5.10. Збій був змодельований шляхом зміни стану порту TUG 100G, спрямованого на USC, на «down» у конфігураційних файлах системи відповідного комутатора LINC-OE. ONOS PCE знайшов новий маршрут, який проходить через R-OSC, а не через R-USI, як це відбулося насправді. Іншими словами, ONOS PCE, враховуючи комбіновану топологію без шарів, знайшов маршрут, який був на один перехід кращим за той, що був визначений ізольованим протоколом OSPF, який бачив лише топологію рівня OTN.

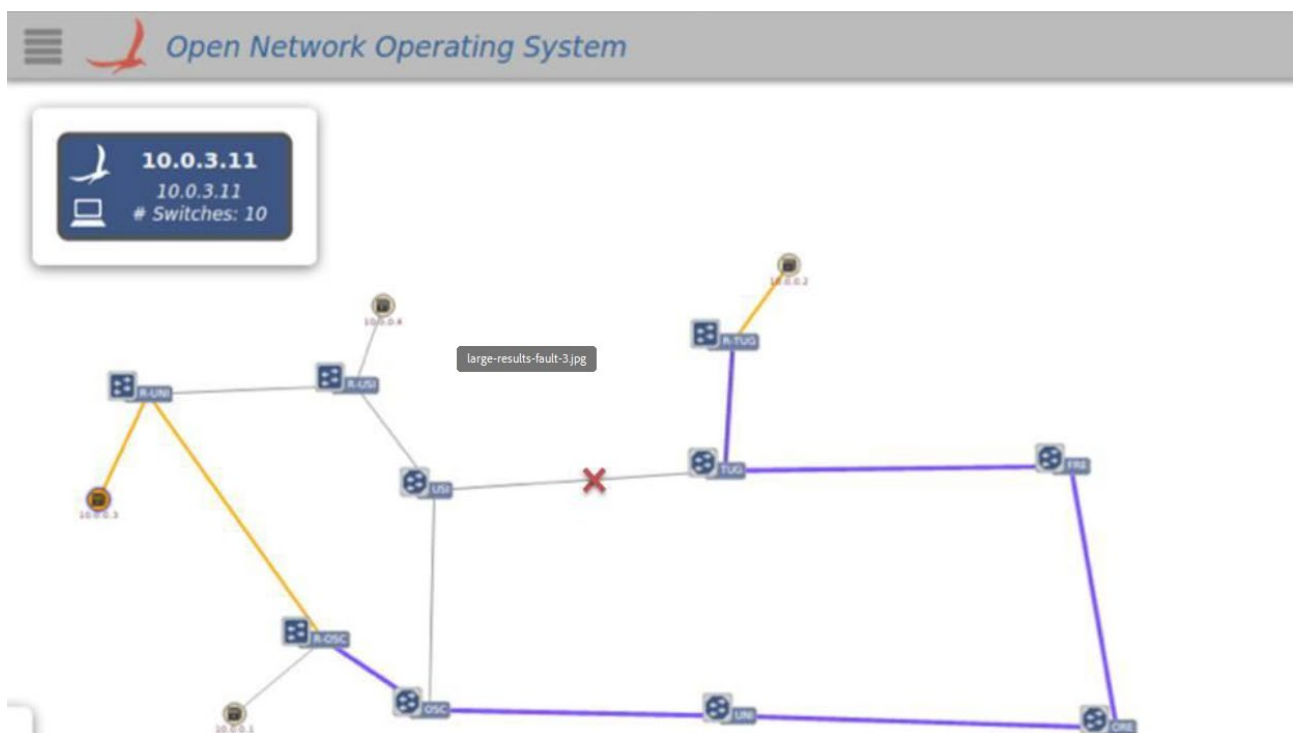


Рисунок 4.10 - Резервний маршрут між R-TUG та маршрутизатором UNINETT

Результати моделювання виглядають досить обнадійливими, оскільки демонструють, що сучасний SDN-контролер, зокрема ONOS у цьому випадку, може ефективно працювати в пакетно-оптичному середовищі, використовуючи

глобальний огляд об'єднаної мережі. Водночас, очевидно, що необхідний подальший розвиток у цьому напрямку, наприклад, можливість працювати з комутаторами OTN, а також здатність задавати більш складні метрики, ніж просто кількість переходів, і деякі інші.

Програмно-визначені мережі (SDN), які тепер охоплюють не лише пакетний рівень, але й транспортний, є перспективною концепцією для забезпечення динамічності мережі, необхідної для повного використання підвищеної пропускної здатності, обговореної в Розділах 2 та 3. SDN може спростити складнощі управління трафіком між різними мережевими технологіями, пропонуючи централізований інтегрований огляд на кількох рівнях. Це дозволяє абстрагувати базову інфраструктуру (у вигляді карт і графів) і використовувати її як віртуальну сутність для застосунків та мережевих сервісів.

Така архітектура не лише добре підходить для вирішення сучасних проблем в оптичних мережах, пов'язаних із підтримкою різних адміністративних і технологічних сегментів, а також для подолання розриву між пакетним і оптичним рівнями, але й підтримує нові операції, такі як віртуалізація, міжрівнева оркестрація, пропускна здатність на вимогу (BoD), балансування навантаження тощо. Розширення протоколу OpenFlow, розроблені ONF, ще більше розширюють потенціал SDN в оптичних мережах.

Подібним чином середовище операцій на основі додатків (ABNO) стає дедалі популярнішим як механізм оркестрації для задоволення нових вимог (таких як резервування мережевої підключеності, надійності та ресурсів на вимогу або залежно від застосунку) нових сервісів. JRA1 T1 створила інтегрований демонстратор на основі ABNO, який надає змодельоване середовище для оцінки здатності SDN керувати мережевими ресурсами та забезпечувати програмованість функцій мережі. Він використовує розширення протоколу OpenFlow у формі властивостей EXPERIMENTER для забезпечення підтримки формату модуляції для передавачів.

Приклад використання для оптимізації сценарію збою продемонстрував здатність транспортного SDN, у поєднанні з відкритою мережевою операційною системою (ONOS), ефективно працювати в пакетно-оптичному середовищі, використовуючи глобальний огляд об'єднаної мережі та приймаючи оптимальні рішення щодо маршрутизації для забезпечення відновлення без рівнів. Водночас зрозуміло, що необхідний подальший розвиток у цьому напрямку, зокрема здатність працювати з комутаторами OTN та можливість задавати більш складні метрики, ніж просто кількість переходів, і деякі інші.

ВИСНОВКИ

Ряд нових форматів і модуляцій зараз пропонують можливості для збільшення пропускної здатності оптичного волокна, хоча жоден з них не є абсолютно безпроблемним. Техніки модуляції вищого порядку на стороні клієнта почали з'являтися, і найпростішою, а отже, найекономічнішою на цьому етапі є PAM-4. Технології просторового мультиплексування (SDM), такі як FMF (множинні моди) та MCF (множинні сердечники), є перспективними, проте вони мають свої обмеження, зокрема пов'язані з доступними методами підсилення сигналу.

Паралельно з важливим прогресом у стандартизації високих швидкостей передачі даних, який досягається трьома організаціями стандартизації, партнери GÉANT — PSNC і CESNET — провели успішні експерименти з передачею на швидкості 400G. Це включало використання програмно-визначеної оптики для забезпечення гнучких швидкостей передачі та модуляцій. Як результат, PSNC встановила та налаштувала два діючих 400G канали, а тести CESNET продемонстрували успішне розширення оптичного охоплення до 2000 км із високошвидкісним трафіком, який можна легко транспортувати як сторонні довжини хвиль через виробничу мережу CESNET. Ці впровадження є прямим результатом експериментів, проведених у рамках проєкту GN4-1, і демонструють життєздатність високошвидкісної передачі даних для NREN.

Щодо забезпечення ефективного та оптимального використання доступної пропускної здатності через гнучкі оптичні мережі (FON), проєкт GN3plus Open Call під назвою REACTION вніс значні інновації в області плейну даних (підтримка роздільності), плейну управління (нова архітектура PCE) та стратегій маршрутизації й розподілу спектра (нові алгоритми RSA). Подальший розвиток після REACTION покращив здатність FON до максимізації спектральної ефективності та охоплення шляхом мінімізації негативних наслідків. У майбутньому зростає потреба у забезпеченні взаємодії між вендорами для

підсистем або навіть окремих елементів мережі, а також у створенні спільної платформи управління мережею.

Огляд постачальників BVT показав підмножину спільних функціональних можливостей, хоча реалізації — особливо в аспектах спектральної зайнятості та швидкості символів (Baud rate) — варіюються залежно від постачальника. Крім того, взаємодія двох реалізацій S-BVT нещодавно була продемонстрована в рамках тестового середовища IDEALIST для еластичної оптичної мережі (EON) на пан'європейському мультівендорному мультідоменному рівні. Експерименти довели необхідність нового стандарту корекції помилок із м'яким прийняттям рішень (soft-decision FEC), який значно збільшить охоплення при передачі як у межах одного постачальника, так і між різними вендорами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Deliverable D12.3 (DJ1.1.1) Future Network Architectures / W. H та ін. [https://geant3plus.archive.geant.net](https://geant3plus.archive.geant.net/Documents/D12-3_DJ1-1-1_Future-Network-Architectures.pdf). URL: https://geant3plus.archive.geant.net/Documents/D12-3_DJ1-1-1_Future-Network-Architectures.pdf (дата звернення: 19.01.2025).
2. Lange Bjørn, L., Bozorgebrahimi, K., Camisard, E., Gasner, P., Hůla, M., Karásek, M., Lund, R., Nuijts, R., Octavian, R., Škoda, P., Šíma, S., Turowicz, P., Turza, K., Tyley, S., Vojtěch, J., Vraciu, V., & Zervas, G. (2015). Deliverable DJ1.2.1: State-of-the-Art Photonic Switching Technologies.
3. Dey S. NeoPhotonics blog. PAM4: The Solution For 400G Client Side Links. URL: <http://blog.neophotonics.com/pam4-the-solution-for-400g-client-side-links/>.
4. Keysight: Design, Emulate, and Test to Accelerate Innovation. URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04746/application-notes/5992-0527.pdf> (дата звернення: 19.01.2025).
5. PAM4 Signaling in High Speed Serial Technology: Test, Analysis, and Debug. Test and Measurement Equipment | Tektronix. URL: <http://www.tek.com/document/application-note/pam4-signaling-high-speed-serial-technology-test-analysis-and-debug> (дата звернення: 19.01.2025).
6. Photonics. IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity. URL: <https://www.ieee.org/ns/periodicals/Photo/oct2015/html5/index.html> (дата звернення: 19.01.2025).
7. Photonics. IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity. URL: <https://www.ieee.org/ns/periodicals/Photo/oct2015/html5/index.html> (дата звернення: 19.01.2025).
8. Sakaguchi J. J., Klaus W., Puttnam B. J., Awaji Y. Development of Space Division Multiplexing Technologies in Japan // IEEE Photonic Soc. News. 2015. Vol.

29, No. 5. URL: <http://www.ieee.org/ns/periodicals/Photo/oct2015/html5/index.html> (дата звернення: 03.12.2024).

9. Tammela S. Fiber Amplifiers, Directly Modulated Transmitters and a Ring Network Structure for Optical Communications. Helsinki University of Technology, 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/36145031_Fiber_amplifiers_directly_modulated_transmitters_and_a_ring_network_structure_for_optical_communications (дата звернення: 03.12.2024).

10. Puc A. et al. L-Band unrepeated WDM experiment over 451 km using all-Raman amplification and ROPA // Xtera Technical Paper. URL: http://www.xtera.com/wp-content/uploads/2015/10/lbandUnrepeated_2008.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

11. Sakamoto T., Aozasa S. I., Yamada M., Shimizu M. Hybrid fiber amplifiers consisting of cascaded TDFA and EDFA for WDM signals // J. Light. Technol. 2006. Vol. 24, No. 6. Pp. 2287–2295. URL: https://www.researchgate.net/publication/3243513_Hybrid_fiber_amplifiers_consisting_of_cascaded_TDFA_and_EDFA_for_WDM_signals (дата звернення: 03.12.2024).

12. Ellis A. D., Mac Suibhne N., Saad D., Payne D. N. Communication networks beyond the capacity crunch // Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci. 2016. Vol. 374, No. 2062.

13. Ackert J. J., Thomson D. J., Shen L., Peacock A. C., Jessop P. E., Reed G. T., Mashanovich G. Z., Knights A. P. High-speed detection at two micrometres with monolithic silicon photodiodes // Nat. Photonics. 2015. Vol. 9, No. 6. Pp. 393–396. URL: <http://www.nature.com/nphoton/journal/v9/n6/full/nphoton.2015.81.html> (дата звернення: 03.12.2024).

14. IEEE 802. URL: www.ieee802.org/3 (дата звернення: 03.12.2024).

15. D'Ambrosia J. 802.3bs Project Documentation // IEEE 802.3. 2015. URL: http://www.ieee802.org/3/50G/public/adhoc/archive/dambrosia_120215_50GE_NGO_ATH_adhoc_v2.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

16. Anslow P., Brown M. 50G, 100G, 200G Work Partitioning // IEEE 802.3. 2015. URL: http://www.ieee802.org/3/50G/public/adhoc/archive/anslow_120915_50GE_NGOATH_N_adhoc.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

17. IEEE. 50 Gb/s Ethernet over a Single Lane and Next Generation 100 Gb/s and 200 Gb/s Ethernet Study Groups Adopted Objectives // IEEE 802.3. URL: http://www.ieee802.org/3/50G/public/objectives_50G_NGOATH_01a_0316.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

18. Hardy S. IEEE sets objectives for 200 Gigabit Ethernet // Lightwave Online. 2016. URL: <http://www.lightwaveonline.com/articles/2016/03/ieee-sets-objectives-for-200-gigabit%20ethernet.html?cmpid=EnlENABLINGMarch102016&eid=288553906&bid=1335905%20> (дата звернення: 03.12.2024).

19. Trowbridge S., Anslow P. OTN Support for 25GbE. URL: http://www.ieee802.org/3/25GSG/public/Sept14/trowbridge_25GE_01_0914.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

20. OIF Aims to Enable More Flexible Ethernet. URL: <http://www.lightreading.com/ethernet-ip/100g-ethernet/oif-aims-to-enable-more-flexible-ethernet/d/d-id/713717> (дата звернення: 03.12.2024).

21. Porchivina D. OIF Launches Flex Coherent DWDM Framework Effort, Elects New Officers, 19 November 2015. URL: <http://www.oiforum.com/oif-launches-flex-coherent-dwdm-framework-effort-elects-new-officers/> (дата звернення: 03.12.2024).

22. ECI® and CESNET Announce Successful Trial of 400G Flex-Grid Blade Over Live CESNET Network in the Czech Republic, 9 December 2015. URL: <http://www.ecitele.com/media/1504/successful-400g-trial-with-cesnet-120915.pdf> (дата звернення: 03.12.2024).

23. GEANT3Plus. Reaction Open Call Optical Project. URL: <http://geant3plus.archive.geant.net/opencall/Optical/Pages/REACTION.aspx> (дата звернення: 03.12.2024).

24. Vassilieva O., Yamauchi T., Oda S., Kim I., Hoshida T., Aoki Y., Rasmussen J. C., Sekiya M. Flexible grid network optimization for maximum spectral efficiency and reach // In: 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). 2015. Pp. 1–3.

25. Khodashenas P. S. Evaluating the Optimum Filter Resolution and Sub-Channel Spectrum Granularity for Flexible Super-Channels // Conf. Opt. Fiber Commun. Tech. Dig. Ser. 2015. Vol. 2015-. URL: https://www.researchgate.net/publication/273662612_Evaluating_the_Optimum_Filter_Resolution_and_Sub-Channel_Spectrum_Granularity_for_Flexible_Super-Channels (дата звернення: 03.12.2024).

26. Gkamas V. A comparison study of joint and sequential multi-layer planning for IP over flexible optical networks // Opt. Fiber Commun. Conf. Ofc 2015. 2015.

27. Ehrhardt A., Weiershausen W., Gunkel M., Mattheus A. High-speed networks in field operation: An operator's view // In: 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). 2015. Pp. 1–3.

28. ITU-T Recommendation G.698.2. Amplified multichannel dense division multiplexing applications with single channel optical interfaces. 2009. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.2/en> (дата звернення: 03.12.2024).

29. Gunkel M. et al. Vendor-interoperable elastic optical interfaces: Standards, experiments, and challenges // IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw. 2015. Vol. 7, No. 12. URL: <https://www.osapublishing.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-7-12-B184> (дата звернення: 03.12.2024).

30. Gonzalez de Dios O., Casellas R., Paolucci F., Napoli A., Gifre L., Dupas A., Hugues-Salas E., Morro R., Belotti S., Meloni G., Rahman T., Lopez V., Martinez R., Fresi F., Bohn M., Yan S., Velasco L., Layec P., Fernandez-Palacios J. Experimental Demonstration of Multi-vendor and Multi-domain Elastic Optical Network with Data and Control Interoperability over a Pan-European Test-bed // J. Light. Technol. 2016. Vol. 34, Issue 7. Pp. 1610–1617. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7407291&url=http%3A%2F>

%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D7407291 (дата звернення: 03.12.2024).

31. Napoli A., Bohn M., Rafique D., Stavdas A., Sambo N., Poti L., Nolle M., Fischer J. K., Riccardi E., Pagano A., Di Giglio A., Moreolo M. S., Fabrega J. M., Hugues-Salas E., Zervas G., Simeonidou D., Layec P., D'Errico A., Rahman T., Gimenez J. P. F.-P. Next generation elastic optical networks: The vision of the European research project IDEALIST // IEEE Commun. Mag. 2015. Vol. 53, No. 2. Pp. 152–162. URL: <http://cpham.perso.univ-pau.fr/ENSEIGNEMENT/PAU-UPPA/RHD/PAPER/EON.pdf> (дата звернення: 03.12.2024).

32. Kushnerov M., Hauske F. N., Piyawanno K., Spinnler B., Alfiad M. S., Napoli A., Lankl B. DSP for Coherent Single-Carrier Receivers // J. Light. Technol. 2009. Vol. 27, No. 16. Pp. 3614–3622. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5071205&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5071205 (дата звернення: 03.12.2024).

33. Napoli A., Maalej Z., Sleiffer V. A. J. M., Kushnerov M., Rafique D., Timmers E., Spinnler B., Rahman T., Coelho L. D., Hanik N. Reduced Complexity Digital Back-Propagation Methods for Optical Communication Systems // J. Light. Technol. 2014. Vol. 32, No. 7. Pp. 1351–1362. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6717017&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F50%2F4357488%2F06717017.pdf%3Farnumber%3D6717017> (дата звернення: 03.12.2024).

34. Kushnerov M., Chouayakh M., Piyawanno K., Spinnler B., de Man E., Kainzmaier P., Alfiad M. S., Napoli A., Lankl B. Data-Aided Versus Blind Single-Carrier Coherent Receivers // IEEE Photonics J. 2010. Vol. 2, No. 3. Pp. 387–403. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5447711 (дата звернення: 03.12.2024).

35. Gunkel M. et al. Elastic Black Link for Future Vendor Independent Optical Networks // Conf. Opt. Fiber Commun. Tech. Dig. Ser. 2015. Pp. 1–3, 22-26 March. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7121612&url=http>

%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F7111754%2F7121453%2F07121612.pdf%3Farnumber%3D7121612 (дата звернення: 03.12.2024).

36. GEANT3Plus. MOMoT Optical Project. URL: <http://geant3plus.archive.geant.net/opencall/Optical/Pages/MOMoT.aspx> (дата звернення: 03.12.2024).

37. Sambo N., Secondini M., Cugini F., Bottari G., Iovanna P., Cavaliere F., Castoldi P. Modeling and Distributed Provisioning in 10–40–100-Gb/s Multirate Wavelength Switched Optical Networks // J. Light. Technol. 2011. Vol. 29, No. 9. Pp. 1248–1257. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5722966&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F50%2F4357488%2F05722966.pdf%3Farnumber%3D5722966> (дата звернення: 03.12.2024).

38. Rost M., Piester D., Yang W., Feldmann T., Wübbena T., Bauch A. Time Transfer Through Optical Fibres Over a Distance of 73 km with an Uncertainty Below 100 ps // Metrologia. 2012. Vol. 49, No. 6. Pp. 772–778. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.4467.pdf> (дата звернення: 03.12.2024).

39. Śliwczyński Ł., Krehlik P., Lipiński M. Optical fibers in time and frequency transfer // Meas. Sci. Technol. 2010. Vol. 21, No. 7. P. 075302. URL: https://www.researchgate.net/publication/258294827_Optical_fibers_in_time_and_frequency_transfer (дата звернення: 03.12.2024).

40. Matveev A., Parthey C. G., Predehl K., Alnis J., Beyer A., Holzwarth R., Udem T., Wilken T., Kolachevsky N., Abgrall M., Rovera D., Salomon C., Laurent P., Grosche G., Terra O., Legero T., Schnatz H., Weyers S., Altschul B., Hänsch T. W. Precision measurement of the hydrogen 1S-2S frequency via a 920-km fiber link // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110, No. 23. P. 230801. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.230801> (дата звернення: 03.12.2024).

41. Matveev A., Parthey C. G., Predehl K., Alnis J., Beyer A., Holzwarth R., Udem T., Wilken T., Kolachevsky N., Abgrall M., Rovera D., Salomon C., Laurent P., Grosche G., Terra O., Legero T., Schnatz H., Weyers S., Altschul B., Hänsch T. W. Precision measurement of the hydrogen 1S-2S frequency via a 920-km fiber link //

Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110, No. 23. P. 230801. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.230801> (дата звернення: 03.12.2024).

42. Vojtěch J., Smotlacha V., Radil J. All optical two-way time transfer in strongly heterogeneous networks // In: Proceedings of Spie--the International Society for Optical Engineering. 2014. Vol. 9202. P. 92020S. URL: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2061346> (дата звернення: 03.12.2024).

43. Chiodo N., Quintin N., Stefani F., Wiotte F., Camisard E., Chardonnet C., Santarelli G., Amy-Klein A., Pottie P.-E., Lopez O. Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison // Opt. Express. 2015. Vol. 23, No. 26. Pp. 33927–33937. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.05885.pdf> (дата звернення: 03.12.2024).

44. Allan variance. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Allan_variance (дата звернення: 03.12.2024).

45. Pottie P.-E. Remote comparisons Sr-Sr OLC with a long haul optical fiber link // In: Nano-k conference. 2015. URL: http://gdr-af2015.sciencesconf.org/conference/gdr-af2015/program/pottie_1.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

46. Bercy A. Ultra-stable optical fiber link: multiple-users dissemination, study of fundamental and technological limits and new applications. University Paris, 2015.

47. Technical Committee. IEEE Std 1588-2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Vol. 2008, No. July. 2008. URL: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4579760&filter=AND\(p_Publication_Number:4579757\)](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4579760&filter=AND(p_Publication_Number:4579757)) (дата звернення: 03.12.2024).

48. Velasco L., Castro A., Ruiz M., Junyent G. Solving Routing and Spectrum Allocation Related Optimization Problems: From Off-Line to In-Operation Flexgrid Network Planning // J. Light. Technol. 2014. Vol. 32, No. 16. Pp. 2780–2795. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6781635&url=http%3A%2F>

%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6781635 (дата звернення: 03.12.2024).

49. Velasco L., Castro A., King D., Gerstel O., Casellas R., Lopez V. In-operation network planning // IEEE Commun. Mag. 2014. Vol. 52, No. 1. Pp. 52–60. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6710064&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6710064 (дата звернення: 03.12.2024).

50. ONF. TR 509 – Optical Transport Use Cases. Open Networking Foundation, 2014. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/optical-transport-use-cases.pdf> (дата звернення: 03.12.2024).

51. King D., Farrel A. A PCE-based Architecture for Application-based Network Operations // IETF – RFC 7491. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7491> (дата звернення: 03.12.2024).

52. ONOS Project. URL: <http://onosproject.org> (дата звернення: 03.12.2024).

53. Otani T., Li D. Abstract Generalized Labels for Lambda-Switch-Capable (LSC) Label Switching Routers // IETF. 2011. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6205> (дата звернення: 03.12.2024).

54. Farrel A., King D., Li Y., Zhang F. Generalized Labels for the Flexi-Grid in Lambda Switch Capable (LSC) Label Switching Routers // IETF Work in Progress. Progress Draft: draft-ietf-ccamp-flexigrid-lambda-label-05. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-ccamp-flexigrid-lambda-label-05> (дата звернення: 03.12.2024).

55. Das S. PAC.C: A Unified Control Architecture for Packet and Circuit Network Convergence. 2012. URL: http://yuba.stanford.edu/~sd2/Thesis_Saurav_Das.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

56. Mininet Overview. URL: <http://mininet.org/overview> (дата звернення: 03.12.2024).

57. Linc-OE: OpenFlow 1.3 with OE. URL: <https://github.com/FlowForwarding/LINC-Switch/blob/internals-oe->

doc/docs/LINC_internals.md#linc-oe-openflow-13-with-oe (дата звернення: 03.12.2024).

58. Extensions to the OpenFlow Protocol in support of Circuit Switching. Addendum to OpenFlow Protocol Specification (v1.0) – Circuit Switch Addendum v0.3. June 2010. URL: http://archive.openflow.org/wk/images/8/81/OpenFlow_Circuit_Switch_Specification_v0.3.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

59. Optical Transport Protocol Extensions, Version 1.0, March 15, 2015 // ONF TS-022. URL: https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/Optical_Transport_Protocol_Extensions_V1.0.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

60. Zhang F. (ed.) GMPLS Signaling Extensions for Control of Evolving G.709 Optical Transport Networks // Request for Comments: 7139. March 2014. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7139> (дата звернення: 03.12.2024).

61. Protocol for automatic discovery in transport networks // ITU-T G.7714.1/Y.1705.1 (01/2015). URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.7714.1/en> (дата звернення: 03.12.2024).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)



**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему: «Методика побудови транс-національної мережі передачі даних з
використанням DWDM Alien-wave»

Виконав: Роман ЛИСЕНКО
здобувач вищої освіти група ІСДМ-62
Керівник: Ольга ПОЛОНЕВИЧ
к.т.н., доцент

Київ 2024

Актуальність теми: Стрімке зростання обсягів передачі даних зумовлено розвитком сучасних технологій:

- Хмарні сервіси — забезпечення швидкого доступу до великих обсягів інформації
- Стрімінгове мультимедіа — висока якість та великі обсяги потокових даних.
- Інтернет речей (IoT) та метавсесвіт — потребують високошвидкісної, стабільної передачі даних.

Ці виклики створюють потребу в ефективних рішеннях для побудови швидкісних транснаціональних мереж передачі даних. Технологія DWDM Alien-wave пропонує оптимальне використання спектральних ресурсів та високу гнучкість технології.

Мета дослідження - розробити методику побудови транснаціональної мережі передачі даних, яка забезпечить:

- ✓ Максимально можливу пропускну здатність.
- ✓ Високу надійність з'єднання.
- ✓ Оптимізацію використання спектральних ресурсів для зниження витрат.

Завдання дослідження:

1. Аналіз перспективних рішень для розширення оптичних мереж.
2. Розробка інструментів моделювання для оцінки продуктивності DWDM Alien-wave.
3. Дослідження методів забезпечення надійності та ефективності.
4. Впровадження технологій SDN (Software-Defined Networking) для керування мережею.

Об'єкт дослідження: Процес побудови транснаціональної мережі передачі даних з використанням технології DWDM Alien-wave.

Предмет дослідження: Методи та алгоритми оптимізації спектральних ресурсів, архітектури та топології, а також забезпечення надійності таких мереж.

Основні технології використані в дослідженні

Модуляція амплітуди імпульсів (PAM-4)

- Використання чотирирівневої модуляції для подвоєння пропускної здатності.
- Ефективність при передачі даних на високих швидкостях.
- Основні переваги: спрощення структури передавачів та зниження вартості.

Мультиплексування з поділом простору (SDM)

- Дозволяє передавати декілька сигналів через одне волокно за допомогою багатомодових або маломодових ядер.
- Збільшує ефективність використання волоконної інфраструктури.

Розширення спектра (L-діапазон)

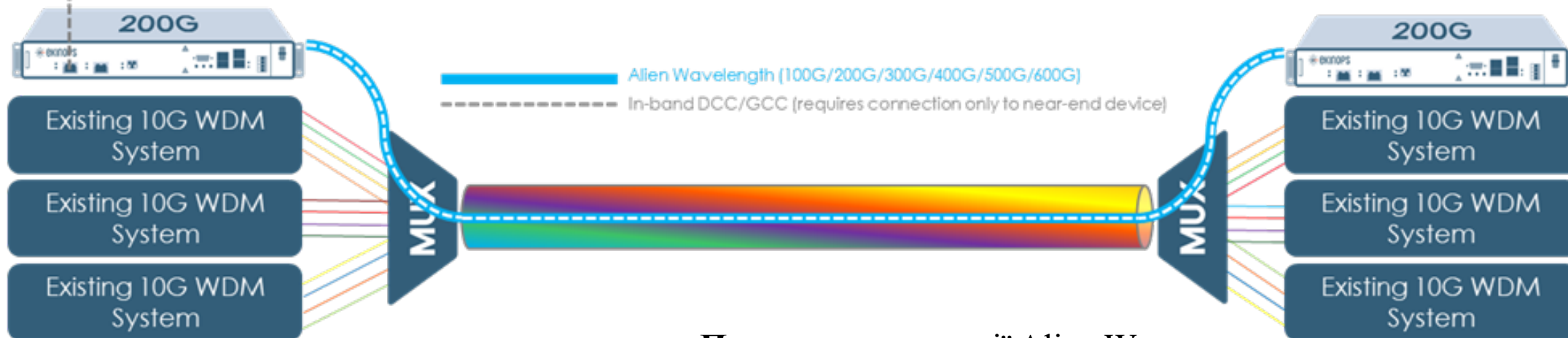
- Передача даних у L-діапазоні (1570–1605 нм) дозволяє використовувати ширший спектр.
- Рішення для збільшення пропускної здатності.

Технологія Alien Waves

- Спільне використання спектра між декількома операторами для зниження витрат.
 - Гнучкість і сумісність з різними архітектурами мереж.
- 



Технологія DWDM Alien-wave



Alien Waves — це технологія передачі даних в оптичних мережах, яка дозволяє різним операторам використовувати спільний спектр оптичного волокна, не втручаючись в інфраструктуру один одного.

Переваги технології Alien Waves:

- Оптимізація ресурсів: зниження витрат через спільне використання спектральних каналів.
- Гнучкість: сумісність з різними мережевими архітектурами та обладнанням.
- Висока ефективність: максимізація використання пропускної здатності волокна.
- Економія: зменшення необхідності розгортання нової інфраструктури.

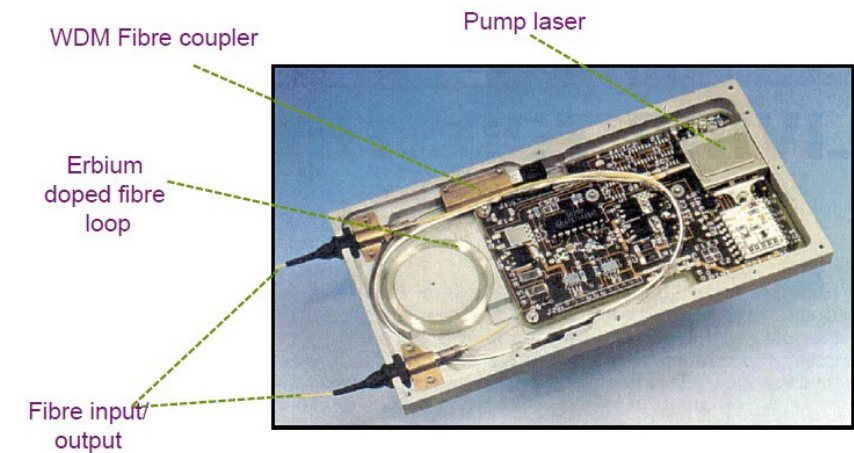
Мультиплексори та демультиплексори (CWDM/DWDM):
Забезпечують поділ та об'єднання оптичних сигналів у волокні.



Крос-з'єднувачі (OXC, ROADM):
Динамічне управління маршрутами сигналів.



Оптичні підсилювачі: Підтримка передачі сигналів на великі відстані (EDFA, Raman).



Спільне використання спектра та Alien Waves

У другому розділі розглядаються переваги використання технології Alien Waves для спільного спектрального ресурсу. Обговорено методи оптимізації використання спектра, що дозволяють різним операторам ефективно працювати в одній мережі без втручання в інфраструктуру один одного. Розроблено інструменти моделювання мережі для оцінки продуктивності Alien Waves та проведено експериментальні сценарії, які підтвердили їх ефективність. Розділ також містить аналіз найкращих практик з інших мережевих проектів для вдосконалення технології.

Основні тези: 2-го розділу:

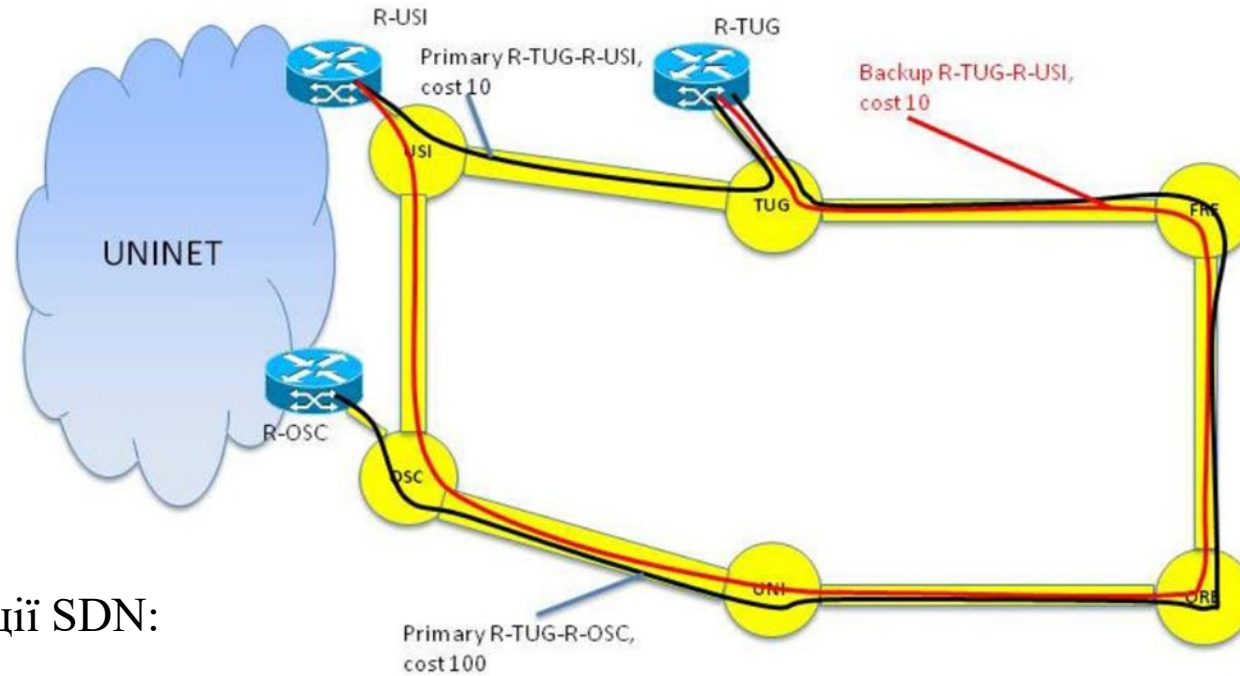
- ✓ Запропоновані методи ефективного використання спільного спектра в мультиоператорських мережах.
- ✓ Створено інструменти для симуляції роботи Alien Waves, що дозволяють оцінювати продуктивність
- ✓ Проведені тестові сценарії показали, що використання Alien Waves забезпечує високу пропускну здатність та стабільність з'єднань.
- ✓ Вивчено та адаптовано найкращі рішення з існуючих транснаціональних мереж для підвищення ефективності Alien Waves.
- ✓ Доведено, що технологія дозволяє зменшити витрати на інфраструктуру та підвищити гнучкість управління мережею.

Частотний та часовий розподіл в національних мережах

У третьому розділі аналізуються принципи частотного та часового розподілу в транснаціональних мережах передачі даних. Розглянуто аспекти фізичного рівня моделі OSI для частотного розподілу та мережевого рівня для часового. Описані методи, що забезпечують ефективне використання доступних спектральних ресурсів та зниження затримок у мережі. Додатково розглянуто механізми управління спектром, що сприяють підвищенню надійності та пропускної здатності мережі.

- ✓ Розробка підходів до частотного розподілу: Запропоновано методи оптимізації використання спектральних ресурсів на фізичному рівні, що підвищують ефективність DWDM-технологій.
- ✓ Інтеграція частотного та часового розподілу: Продемонстровано, як поєднання цих підходів може забезпечити баланс між пропускною здатністю та мінімізацією затримок.
- ✓ Удосконалення механізмів синхронізації: Розроблено способи управління часовими інтервалами для зниження затримок і підвищення надійності передачі даних.
- ✓ Врахування національних особливостей: Проаналізовано виклики, пов'язані з багатозадачними національними мережами, включаючи роботу в мультиоператорському середовищі.
- ✓ Підтвердження ефективності підходів: Проведені моделювання показали значне зростання продуктивності мережі за рахунок розумного управління спектральними та часовими ресурсами.

NORDUnet UNINETT



Основні досягнення реалізації SDN:

Централізоване управління мережею: Використання SDN-контролера для інтеграції та моніторингу мережевих ресурсів.

Автоматизація процесів: Динамічне резервування каналів і налаштування спектральних ресурсів у реальному часі.

Інтеграція з DWDM: Оптимізація роботи оптичних мультиплексорів та демультимплексорів через програмне керування.

Підвищення надійності: Реалізація схем резервування для захисту від відмов обладнання.

Висновки:

1. Ряд нових форматів і модуляцій зараз пропонують можливості для збільшення пропускної здатності оптичного волокна, хоча жоден з них не є абсолютно безпроблемним. Техніки модуляції вищого порядку на стороні клієнта почали з'являтися, і найпростішою, а отже, найекономічнішою на цьому етапі є PAM-4. Технології просторового мультиплексування (SDM), такі як FMF (множинні моди) та MCF (множинні сердечники), є перспективними, проте вони мають свої обмеження, зокрема пов'язані з доступними методами підсилення сигналу.
2. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) є важливим для побудови національних мереж, оскільки дозволяє передавати велику кількість даних через одне оптичне волокно, використовуючи різні довжини хвиль (канали). Це забезпечує високу пропускну здатність, масштабованість та економію ресурсів, адже існуюча інфраструктура може підтримувати значно більше трафіку без необхідності прокладати додаткові волокна. Крім того, DWDM забезпечує гнучкість і сумісність із сучасними мережевими технологіями, такими як SDN, що критично для динамічних і надійних транснаціональних мереж.
3. У роботі реалізація мережі ґрунтується на використанні технології DWDM Alien-wave, що дозволяє ефективно оптимізувати спектральні ресурси та забезпечити високу пропускну здатність. Було розроблено інструмент моделювання для оцінки продуктивності мережі, а також проведено експериментальні дослідження, які підтвердили стабільність передачі даних і надійність з'єднань. Практична реалізація включає інтеграцію SDN-контролера для динамічного управління мережею, що дає можливість адаптувати її до змін трафіку та забезпечувати стабільну роботу в реальному середовищі.

Дякую за увагу!