

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра авіоніки**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

_____ (Юрій Грищенко)
“ ____ ” _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
МАГІСТРА**

**Тема: Моделювання процесів передачі інформації в розгалужувачах
бортових волоконно-оптичних лініях зв'язку**

Виконавець: _____

Керівник: _____

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

Нормоконтролер: _____

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра авіоніки

Спеціальність 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ (Юрій Грищенко)
« _____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи **Моделювання процесів передачі інформації в розгалужувачах бортових волоконно-оптичних лініях зв'язку**

затверджена наказом ректора від « _____ » _____ 2023 р. № _____

2. Термін виконання роботи: з _____ по _____

3. Вихідні дані до роботи: Технологія побудови волоконно-оптичної лінії зв'язку WDM, PON/WDM; робоча довжина хвилі: 0,1 мкм - 3,5 мкм; діапазон температур від -40°C до +85°C.

4. Зміст пояснювальної записки: _____

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

8. Дата видачі завдання: “ _____ ” _____ 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Моделювання процесів передачі інформації в розгалуджувачах бортових волоконно-оптичних лініях зв'язку» ___сторінки, ___рисуноків, ___таблиць, ___використаних джерел.

ЛІТАК, СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ КАНАЛ, ОПТИЧНИЙ СИГНАЛ, МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження – архітектура бортової волоконно-оптичної системи інформаційного обміну перспективного літака, предмет дослідження – передачаоптичного сигналу в волоконно-оптичних лініях зв'язку та розгалуджувачах.

Мета кваліфікаційної роботи – організація архітектури бортової системи інформаційного обміну з використаннямволоконно-оптичних каналів передачі інформації для перспективного літака.

Метод дослідження – дослідження та синтез оптичних схем та з'єднання в бортових каналах передачі інформації.

Установлено, що досліджуванаярхітектура бортової системи інформаційного обміну для перспективного літака із застосуванням волоконно-оптичних каналів передачі відповідає сучасним технологіям; досліджено залежність довжини регенераційної ділянки від параметрів системи передачі та проведено моделювання розповсюдження сигналу в оптичних розгалуджувачах для різних кутів зварювання та довжин хвиль.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендуються використовувати при проведенні наукових досліджень, навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців, які працюють в авіаційній галузі.

Прогнозовані припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – розробка надійних кінцевих модулів на програмуючих інтегральних схемах дляволоконно-оптичних систем інформаційного обміну у якості швидкісних каналів інформаційного обміну на борту літака.

ВСТУП

Волоконна оптика на даний час набула широкого розвитку і знаходить застосування у різних галузях науки і виробництва (зв'язок, радіоелектроніка, енергетика, термоядерний синтез, медицина, космос, машинобудування, літальні апарати, обчислювальні комплекси і т.п.). Темпи зростання волоконної оптики та оптоелектроніки на світовому ринку випереджають усі інші галузі техніки і складають 40% на рік. Техніко-економічний аналіз показав, що в перспективі при масовому виробництві оптичних волокон вони будуть конкурентноздатними з електричними провідниками при потребах забезпечення передачі сигналів у діапазонах частот $10^7 \dots 10^9$ Гц.

Поширення світла по прозорих стрижнях шляхом багаторазових повних внутрішніх відбиттів, звісно, було відоме давно.

Наприкінці ХІХ століття, коли ще не існувало малопотужних і економічних електричних ламп, для освітлення в ряді випадків використовувалося світло, створюване електричною дугою. Ученими був запропонований спосіб передачі світла по порожнім світловодам для освітлення декількох приміщень від одного джерела світла. Світловод являв собою порожні металеві трубки з внутрішньою дзеркальною поверхнею. Промінь світла завдяки відбиттям від внутрішньої поверхні труби поширювався по світловоду і виходив із протилежного кінця.

У 1966 р. С.К. Као і Г.А. Хокхемом (США) було запропоновано використовувати волоконні світловоди для цілей зв'язку – передавати по них світловий промінь, джерелом якого можуть бути лазер або світловипромінюючий діод.

Широка смуга пропускання – обумовлена надзвичайно високою частотою несучої 10^{14} Гц. Це дає потенційну можливість передачі по одному оптичному волокну потоку інформації у декілька терабіт у секунду. Велика

смуга пропускання - це одне з найбільш важливих переваг оптичного волокна над мідним або будь-яким іншим середовищем передачі інформації.

Випускається в теперішній час вітчизняними і закордонними виробниками промислове оптичне волокно, що має загасання 0,2-0,3 дБ на довжині хвилі 1,55 мкм у розрахунку на один кілометр. Мале загасання і невелика дисперсія дозволяють будувати ділянки ліній без ретрансляції довжиною до 100 км і більше.

Волоконно-оптичні кабелі (ВОК) мають меншу вагу й об'єм у порівнянні з мідними кабелями в розрахунку на ту саму пропускну здатність. Наприклад, 900-парний телефонний кабель діаметром 7,5 см, може бути замінений одним волокном з діаметром 0,1 см. Якщо волокно "одягти" у безліч захисних оболонок і покрити сталеву стрічковою бронею, діаметр такого ВОК буде 1,5 см, що в кілька разів менше розглянутого телефонного кабелю.

Низький рівень шумів у волоконно-оптичному волокні дозволяє збільшити смугу пропускання, шляхом передачі різної модуляції сигналів.

Оскільки волокно виготовлене з діелектричного матеріалу, воно несприйнятливие до електромагнітних впливів з боку навколишніх мідних кабельних систем і електричного обладнання, здатного індукувати електромагнітне випромінювання (лінії електропередачі, електрорушійні установки і т.п.). У багатоволоконних кабелях також не виникає проблеми перехресного впливу електромагнітного випромінювання, що властиве багатопарним мідним кабелям.

Оскільки ВОК практично не випромінює в радіодіапазоні, то передану по ньому інформацію важко підслухати, не порушуючи сеансу прийому-передачі. Системи моніторингу (безперервного контролю) цілісності оптичної лінії зв'язку, використовуючи властивості високої чутливості волокна, можуть миттєво відключити канал зв'язку, що зламується, і подати сигнал тривоги. Сенсорні системи, що використовують інтерференційні ефекти розповсюджуваних світлових сигналів (як по різних волокнах, так і

різної поляризації) мають дуже високу чутливість до коливань, до невеликих перепадів тиску. Такі системи особливо необхідні при створенні ліній зв'язку в урядових, банківських і деяких інших спеціальних службах, що пред'являють підвищені вимоги до захисту даних.

Через відсутність іскроутворення оптичне волокно підвищує безпеку мережі на хімічних, нафтопереробних підприємствах, при обслуговуванні технологічних процесів підвищеного ризику.

Волокно виготовлене з кварцу, основу якого складає двоокис кремнію, широко розповсюдженого, а тому недорогого матеріалу, у відмінності від міді. У даний час вартість волокна стосовно мідної пари співвідноситься як 2:5. При цьому ВОК дозволяє передавати сигнали на значно більші відстані без ретрансляції. Кількість регенераторів на протяжних лініях скорочується при використанні ВОК.

Згодом волокно зазнає деградації. Це означає, що загасання в прокладеному кабелі поступово зростає. Однак, завдяки досконалості сучасних технологій виробництва оптичних волокон, цей процес значно уповільнений, і термін служби ВОК складає приблизно 25 років. За цей час може переїнитися кілька поколінь/стандартів приймально-передавальних систем.

У даний час оптичні волокна використовуються не тільки для зв'язку на великі відстані, а усе більш широкого застосування вони знаходять у локальних волоконно-оптичних мережах зв'язку засобів обчислювальної техніки і так само в системах бортового обладнання ВС.

Сучасне бортове авіаційне обладнання представляє собою сполучення вимірювальних перетворювачів параметрів польоту літака і датчиків контролю роботи його систем, обчислювальних засобів і пристроїв відображення інформації.

Отже, в даній кваліфікаційній роботі розглянемо архітектуру побудови бортових мереж та проведемо дослідження розповсюдження оптичного сигналу по лініям зв'язку.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Розділ 1

АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЗ ЗВ'ЯЗКУ В АВІОНІЦІ

Вступ до розділу 1

Використання волоконної оптики набирає обертів у сучасній авіоніці, оскільки це допомагає вирішити проблеми розміру, ваги та потужності (SWaP) у системах наступного покоління. Волоконно-оптичні мережі можуть обробляти програми з високою пропускну здатністю, важить менше, ніж мідний дріт, більш стійка до електромагнітних перешкод (ЕМП) і надійніша. Виробники волоконно-оптичних роз'ємів і компонентів впроваджують інновації, щоб покращити керування кабіною та революціонізувати дизайн кабіни літака.

Волоконна оптика пропонує багато переваг порівняно з традиційною мідною проводкою, включаючи підтримку вищої пропускну здатності, меншу вагу, кращу цілісність сигналу та стійкість до електромагнітних перешкод.

Оптоволокно підтримує пропускну здатність понад 60 Тбіт/с, а мідний дротовий кабель – 10 Гбіт/с.

Волоконна оптика легка і має менший діаметр. Як правило, оптоволоконний кабель важить приблизно 4 фунти на 1000 футів, тоді як мідна проводка зазвичай важить 39 фунтів на 1000 футів.

Оптоволокно має кращу цілісність сигналу. Використовувати ретранслятор потрібно лише приблизно кожні 30 миль, порівняно з кожні три милі для мідної проводки, таким чином мінімізуючи обладнання та вагу бортової мережі літака.

Волоконна оптика захищена від електромагнітних перешкод. Таким чином, електричний шум, створюваний іншим обладнанням, не впливатиме на волоконну оптику, що дозволяє розташовувати обладнання в безпосередній близькості та економити простір. Що ще важливіше, запобігаючи витоку сигналу, волоконно-оптичні засоби також підвищують безпеку, оскільки хакери не можуть підхопити витоки.

1.1. Інновації в роз'ємах і з'єднаннях авіоніки

Багато програм авіоніки вимагають високошвидкісної роботи мереж. Наприклад, військовий винищувач оснащений високоефективним радаром для виявлення як цілей, так і наближених ракет. Відображення радіолокаційного зображення високої роздільної здатності 4K або 8K у кабіні потребує високошвидкісної обробки.

Відеокамери на борту винищувачів використовують цифрове стиснення для збереження пропускної здатності системи, але ціною затримки відображення зображення. Ці компроміси будуть непотрібними в авіоніці з використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку. Натомість завдяки високій пропускній здатності оптоволоконна система зможе надавати зображення в реальному часі без стиснення цифрового сигналу чи відеосигналу. Відмова від такого стиснення краще підтримує рішення пілота про хвилю бою за частки секунди на основі зображень з радара та камери.

Білл Вікс, старший науковий співробітник TE Connectivity, передбачає, що потреба у високошвидкісних інтерфейсах, таких як відео 4K/8K, LIDAR та інші системи виявлення та уникнення цілей, стимулюватиме попит на волоконну оптику. Він сказав, що платформи військових винищувачів наступного покоління повинні будуть транспортувати 100 Тбіт даних з надзвичайно низькою затримкою та обробляти цю інформацію з інтервалом менше секунди.

«Можливість усунути значну кількість спеціалізованих паралельних проводів шляхом інтеграції цих послуг у загальну високошвидкісну шину також призведе до потреби у волоконній оптиці та значно скоротить час, необхідний для проектування, встановлення та заміни комплексу джгутів проводів», – прокоментував Вікс.

За словами Пола Харта, головного технічного директора та технічного співробітника Curtiss-Wright, ситуаційна обізнаність буде додатково покращена за допомогою ADS-B In та FIS-B. Однак це викличе потребу в покращених дисплеях польоту з HD Video, ARINC 818 і шиною відеоданих авіоніки. На рис. 1.1. наведено конвертер відеоформату Curtiss-Wright на основі COTS XMC-FC1 підтримує XMC (VITA 42) мезонінну плату, яка може конвертувати 15 різних аналогових і цифрових відеоформатів.

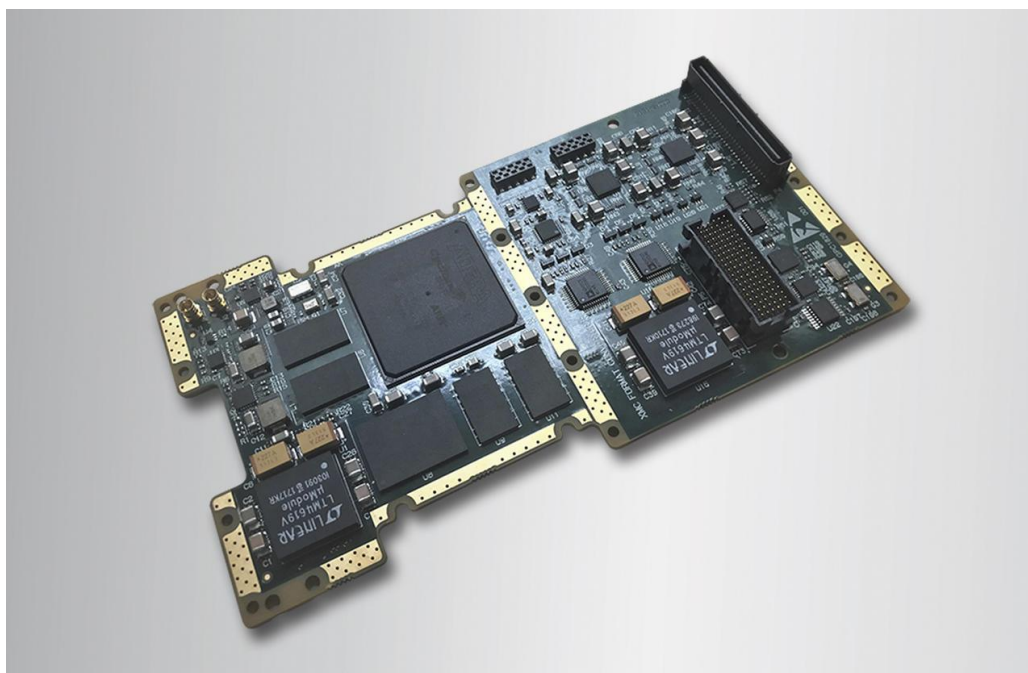


Рис. 1.1. Конвертер відеоформату Curtiss-Wright

Крім того, майбутні системи повітряних даних будуть більш точними (+/-0,25 millibar), що дозволить літакам літати ближче один до одного, збільшуючи пропускну здатність. Curtiss-Wright нещодавно представила модуль конвертера форматів XMC-FC1 RuggedVideoGatewayFormatConverter, який підтримує 15 різних аналогових і цифрових відеоформатів і роздільної

здатності, а також цифрову відеошинуванію ARINC 818 для спрощення перетворення відео авіоніки.

Оскільки все більше комерційних літаків надають швидший, безпечний Wi-Fi і кращі послуги розваг у польоті (IFE), очікується, що волоконно-оптичні мережі на комерційних рейсах швидко розширяться, щоб підтримувати мережеві топології, що обмінюються даними на швидкості понад 100 Гбіт/с. Волоконно-оптичні мережі з легкими волоконно-оптичними трансиверами можуть підтримувати ці високі швидкості без встановлення великих мережевих систем на основі міді. Наприклад, Radiall пропонує міжсистемне з'єднання на базі MT, розроблене таким чином, щоб витримувати суворі умови аерокосмічного середовища. Його Q-MTitan ARINC 846, який поставляється з 12 або 24 оптоволоконними каналами, допомагає заощадити вагу та простір.

«Постійним завданням є інтеграція все більшої кількості волокон з обмеженою площею, яка має підвищену міцність і відповідає аерокосмічним стандартам. Крім того, дуже важливим фактором є те, як забезпечити прості в установці готові рішення для системних інтеграторів. Ось де наш Q-MTitan ARINC 846 виділятиметься, оскільки його можна вставити в роз'єм COTS зі стандартною порожниною QuadraX №8», – сказав Кеті Комбет, менеджер із продукції волоконної оптики в Radiall.



Рис. 1.2. Серія Q-MTitan™ компанії Radiall відповідає ARINC 846

Його контакти підтримують стандартні багатоконтактні роз'єми, такі як роз'єми MIL-DTL-38999, ARINC 600 NSX, EN4644 EPX, EN4165, QuickFusio™.

У порівнянні з оптичними трансиверами, що використовуються в комерційному середовищі, конструкція ReflexPhotonics, яка використовується в авіації та космосі, є міцною та має відповідати розширеним вимогам щодо температури, вологості, ударів і вібрації та радіації (для застосування в космосі). Продукти мають відповідати таким стандартам, як MIL-STD 883 (випробування на удари, вібрацію та термоциклічні випробування), MIL-STD 202 (випробування на вологе тепло) і MIL-STD-810 (випробування на холодне зберігання). Авіаційні оптичні трансивери мають бути міцними та компактними.

«Фізичний простір є дорогоцінним товаром у все більш складних літаках і космічних кораблях, і зменшення сухої ваги покращує паливну ефективність і збільшує вантажопідйомність. У той час як мідь є економічно ефективним і добре зарекомендувала себе в кабелях авіоніки, розмір, вага, пропускна здатність і переваги заміни міді оптоволоконном спонукають до нових проектів і модернізації існуючої платформи авіоніки для впровадження оптичних трансиверів і кабельних систем COTS», – сказав Арлен Мартін, директор з маркетингу продуктової лінії ReflexPhotonics.



Рис. 1.3. Оптиволоконні трансивери ReflexPhotonics підтримують (a) електричний інтерфейс BGA, (b) електричний інтерфейс MegArray™ і (c) електричний інтерфейс LGA.

Компанія CarlisleInterconnect Technologies (CarlisleIT) також підкреслила важливість використання волоконної оптики для зменшення ваги. Він надає

повний спектр волоконно-оптичних кабелів і вузлів. Його волоконно-оптичний кабель LITEflight спеціально розроблений для підтримки аерокосмічних, військових, промислових та інших важких умов. З його захистом типовий волоконно-оптичний кабель буде важити лише близько 15 фунтів на милю кабелю, що набагато легше, ніж кабелі з мідного дроту.



Рис. 1.4. Волоконно-оптичний кабель CarlisleIT.

З його захистом типовий волоконно-оптичний кабель буде важити лише близько 15 фунтів на милю кабелю, що набагато легше, ніж кабелі з мідного дроту. Роз'єми та кабельні джгути стануть більш інтегрованими та модульними.

Замість одного кабельного джгута літаки можуть використовувати волоконно-оптичний кабельний джгут у модульному форматі, схожий на апаратну систему з декількома плагінними модулями. Якщо один модуль виходить з ладу, замість несправного можна підключити новий. Подібним чином, якщо виявлено проблему з джгутом кабелю, можна замінити джгут прямо в літаку, а не заземлювати літак для ремонтних робіт. Це підвищить ефективність встановлення та обслуговування.

Samtec розробила оптичну систему FireFlyMicroFlyoverSystem з розширеною температурою для військових, промислових і авіаційних застосувань. Продукт здатний передавати дані на швидкості до 10 Гбіт/с, працює від -40 0C до +85 0C і підтримує конфігурації x4 і x12.

Майбутні цілі оновлення швидкості знаходяться в межах 25 Гбіт/с для Samtec. Модуль сумісний із галузевими стандартами оптичних кінців, включаючи інтерфейси MT38999, MTP, MXC, ARINC 801 і ARIB STD-B58. Як показано на рис. 1.5, це приклад інтегрованого роз'єму та кабельного модуля, який стане трендом майбутнього. «Модульний підхід до конструкції

роз'ємів і кабелів не тільки спрощує проектування, але й економить простір і робить його привабливим для більшості застосувань авіоніки», — сказав Метт Бернс, менеджер з маркетингу технічних продуктів Samtec, Inc.



Рис. 1.5. Приклад інтегрованого роз'єму та кабельного модуля

Візуалізація ExtendedTemperatureOpticalFireFlyMicroFlyoverSystem демонструє, що можна налаштувати багато індивідуальних і гнучких конструкцій.

Очікується, що в найближчі кілька років швидкість мережі на основі оптоволокна зросте до 200 Гбіт/с. Трансивери та роз'єми швидко наздоганяють.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) є однією з областей, яка може отримати значну користь від майбутніх удосконалень кінцевої мети авіоніки.

БПЛА вже доступні сьогодні, наприклад військові дрони, якими керують дистанційно. Деякі вертольоти також автономні. Але воно ще в зародковому стані. До надійного БПЛА ще багато років. Але високошвидкісна здатність волоконно-оптичних мереж наблизить БПЛА ще на один крок.

Крім того, спеціальний модульний джгут кабелів/з'єднувачів потенційно змінить підхід до будівництва літаків. Будівництво нового літака, усунення несправностей або планове технічне обслуговування займе менше часу. Це означає, що це скоротить час перебування літака на землі, а разом із вбудованим штучним інтелектом літак зможе виконувати самодіагностику. Коротше кажучи, волоконно-оптичні з'єднувачі та з'єднувачі забезпечать більшу продуктивність, малі та легші конструкції, а авіаційна галузь у цілому стане більш ефективною та прибутковою.

1.2. Нові технології Ethernet для волоконно-оптичних проводів і кабелів

Коли пасажери сідають у літак і бачать, що під час польоту доступні розваги та зв'язок (IFEC), вони просто очікують, що це спрацює, практично не знаючи про дуже велику кількість проводів, кабелів та з'єднувальних компонентів, необхідних для підключення їхнього мобільного пристрою до веб-сайту або трансляції фільму на екран невдачі.

Незважаючи на те, що кількість нових замовлень, поставок і модернізації серед основних виробників оригінального обладнання для комерційних літаків досягла історичного мінімуму за останній рік, постачальники електропроводки, кабелів і з'єднувальних компонентів все ще знаходять способи впровадити інновації, які забезпечують більш швидку передачу даних.

Уповільнення комерційної частини спектру OEM також змусило деяких звернути увагу на інші сегменти галузі, такі як бізнес-авіація та оборонні або військові літаки.

«Важливо відзначити, що комерційна аерокосмічна промисловість значно постраждала через глобальну пандемію, що триває», — сказав Джеремі Мур, менеджер з продукції підрозділу аерокосмічної волоконної оптики W.L. Gore&Associates. «Це зупинило на невизначений термін дослідження та проекти, які були зосереджені на технологіях у галузі. Це призвело до повороту багатьох у бік оборонної промисловості, яка завдяки притаманним їм тривалим бюджетним асигнуванням змогла продовжувати модернізацію програм і систем за допомогою нових технологій, включаючи модернізацію оптоволоконна».

В останні роки Gore є одним із найрізноманітніших постачальників проводів і кабелів в аерокосмічній промисловості. Це було особливо очевидно в лютому, коли компанія підкреслила використання своїх кабелів для забезпечення обробки даних і зв'язку для фази входу, спуску та посадки марсохода Perseverance.

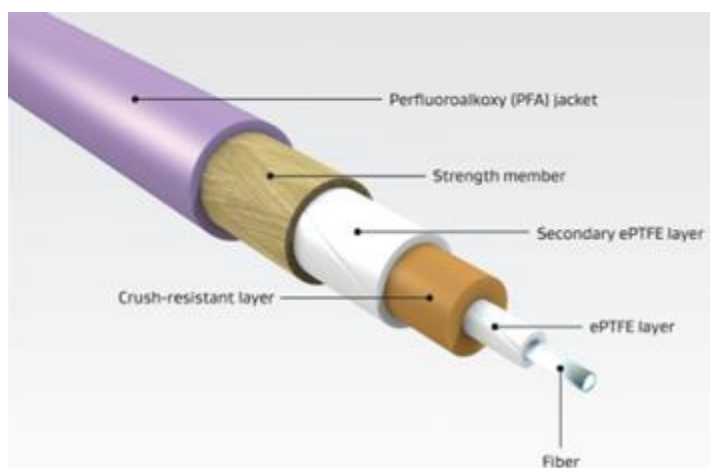


Рис. 1.6. Конструкція волоконно-оптичного кабелю

Повернувшись на Землю, Гор продовжує навчати комерційну та оборонну сторони аерокосмічної промисловості перевагам використання волоконної оптики для задоволення різних потреб у пропускній здатності та продуктивності авіаційних систем. Мур сказав, що компанія спостерігає зростання попиту на використання волоконної оптики для підтримки військових літаків, але «виробничі лінії авіаційного обладнання повільно з'являються в мережі, як і комітети галузевих стандартів, які просувають нові технології проводів і кабелів, а також визначають свої специфікації».

«Історично склалося так, що оптоволокно частіше використовується у світі комерційних літаків для таких систем, як інформаційні магістралі IFE, радіолокаційні системи, дисплеї кабіни 4К, а в деяких випадках навіть проводилося оптоволокно безпосередньо до сидінь для дисплеїв IFE. Волоконно-оптичне скло за своєю суттю більш крихке, ніж мідний сердечник, тому воно іноді може мати клеймо щодо використання його на

літаках, особливо в суворих умовах, або на жорстких маршрутних установках», – сказав Мур.

За словами Мура, зростаюча кількість радіолокаційних систем і сенсорів постійно підвищує продуктивність волоконної оптики для військових літаків. Однак є нові розробки, які з'являються і з комерційної сторони, в першу чергу завдяки роботі Підкомітету з волоконної оптики Комітету з електронної інженерії авіакомпаній (АЕЕС).

«Ми також бачимо потребу промисловості у волоконній оптиці в системах супутникового зв'язку, що використовують радіочастоту через волокно, яка в даний час визначається та уточнюється для промислового використання на засіданнях підкомітету з волоконно-оптичного зв'язку ARINC. Це допоможе продуктивності системи зі швидкістю підключення літаків і загальною пропускну здатністю, оскільки користувачі задовольняють потреби в більшій кількості даних, вищих швидкостях і меншій затримці. В даний час Gore пропонує технологію OM5, яка є найвищою пропускну здатністю, яку може підтримувати скловолокно, в нашій міцній упаковці малого форм-фактора», – сказав Мур.

Інша підгрупа АЕЕС, Підкомітет з систем кабіни (CSS), завершує роботу над специфікацією шини ARINC 854 CabinEquipmentNetwork, яка дозволить використовувати SinglePairEthernet в салонах комерційних літаків. Специфікація змінить традиційні конфігурації проводів і кабелів Ethernet в салонах літаків і по всьому літаку з 8 і 4-парних рішень на 2-парні.



Рис. 1.7. Підключення TE Екранований роз'єм 369
(Сполучена пара роз'ємів: Д369-МР33-НП0, Д369-МР33-НС0).

Роберт Мур, головний інженер високошвидкісного аерокосмічного підрозділу TE Connectivity, сказав *Avionics*, що його компанія є частиною комітету і відіграє важливу роль у перегляді стандартів, які були встановлені для автомобільного ринку, і того, як вони можуть адаптуватися до аерокосмічних застосувань.

«Ethernet, 100BaseT, 1000BaseT і 10000BaseT сьогодні використовуються в системах IFE», — каже Мур. «Таким чином, включення однопарного Ethernet є лише новим у тому, що призводить до простоти «з'єднання» однієї пари проводів, а не, скажімо, 2 пари квадратного кабелю у визначений розмір 8 контактів із 4 пар».

Мур також навів приклад того, як кабельні з'єднання Ethernet, що використовуються в інших додатках, показав сегменту аерокосмічної промисловості IFEC, як 100BaseT — мідний дріт витої пари, що забезпечує передачу даних зі швидкістю 100 Мбіт/с — традиційно підтримувався 4 парними кабелями, тоді як насправді дані, що протікають через них, передаються та приймаються лише 2 з 4 пар кабелю.

Це дозволило чіпсетам автоматично налаштовувати, які пари використовувати, якщо пара була пошкоджена або якщо було занадто багато погіршення сигналу на використовуваних парах за замовчуванням, сказав Мур.

«Індустрія IFE використовувала знання про те, що для реалізації 100BaseT потрібно лише дві пари, зосередившись на використанні 2-парних конструкцій у чотиривісній конфігурації як найменшої/найлегшої конфігурації для упаковки пар. У деяких реалізаціях 1000BaseT використовуються два чотиривісні кабелі, а не традиційні 4 пари під загальним екраном і оболонкою. Таким чином, використання однопарного Ethernet — це не посилення Ethernet на літаках, а спрощення монтажу», — каже Мур.

Система з'єднання Mini-ETH SinglePairEthernet була розроблена в минулому році для відповідності новому стандарту ARINC 854 для 100Base-T1. Однак компоненти передбачаються для досягнення швидкості передачі даних 1 Гбіт/с, що є кінцевою метою стандарту 854. Зниження ваги, запропоноване використанням SinglePairEthernet, може бути значним, особливо в деяких застарілих широкофюзеляжних літаках, на яких деякі авіакомпанії все ще літають, і які можуть відновитися, коли міжнародний попит пасажирів на авіаперельоти повернеться.

У офіційному документі TE «Удосконалення підключення літаків за допомогою рішення SinglePairEthernet» описується, як постійно зростаюча кількість екранів, датчиків, концентраторів даних, комутаторів, твердотільних накопичувачів, серверів IFE та іншої електроніки потребують рішень, які можуть забезпечити передачу даних при меншій кількості проводів.

Зайва вага суттєво впливає на показники палива. Наприклад, розглянемо широкофюзеляжний літак Boeing B747-400, який пролітає середню довжину ступеня 5 морських миль протягом 000 льотних годин на рік. Перенесення ваги проводки та роз'ємів (3 000 кг/1 814 фунтів) споживає майже 4 000 галонів реактивного палива щороку. Щорічна вартість такої кількості палива становить майже 60 000 доларів США.

Поточні та наступного покоління зв'язок літаків повітряно-наземні та супутникові мережі, а також їх провідні та кабельні компоненти також продовжуватимуть стимулювати попит на нові рішення з боку постачальників.

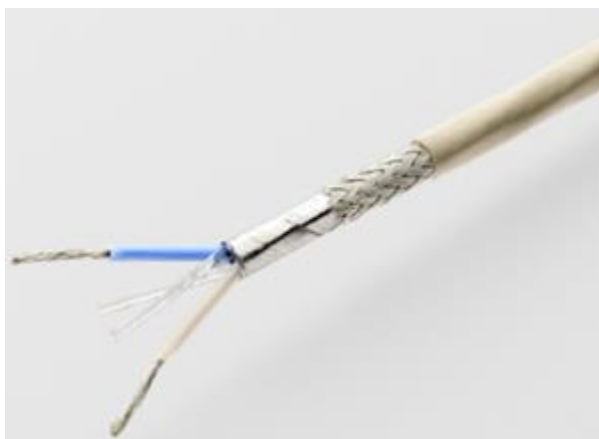


Рис. 1.8. Однопарний кабель Ethernet від TE Connectivity.

Наприклад, у січні постачальник проводів і кабелів CarlisleIT з Флориди отримав нову додаткову сертифікацію типу (STC) для встановлення системи Ка-діапазону HoneywellAerospaceJetWave. Джефф Белендорф, директор з управління продуктами та інтегрованими продуктами CarlisleIT, сказав, що процес STC вимагає детальної оцінки системи з'єднання електричної проводки (EWIS) та визначення зон літака, де вводиться нова проводка.

«CarlisleIT встановила саме цю конфігурацію STC на 32 літаки. Ці установки були виконані з використанням базової лінії FAA STC ST04334CH. Отримання компаньйона EASA STC розширює цю модифікацію, щоб вона була доступною і для європейських операторів. Цей інсталяційний пакет включає в себе повний джгут проводів системи SATCOM і з'єднання з системами та обладнанням літака. Це включає провід підключення, кабель Ethernet, коаксіальні кабелі з низькими втратами та всі необхідні відповідні роз'єми», – сказав Белендорф.

Модернізація бізнес-джетів новими можливостями зв'язку була постійним джерелом попиту на дотові та кабельні компоненти CarlisleIT протягом останнього року, оскільки комерційні авіаперевезення впали до історичного мінімуму.

«Сполучення бізнес-авіації було одним із місць, де попит на модернізацію справді не сильно сповільнився у 2020 році. CarlisleIT продовжує спостерігати стабільний попит як на компоненти, так і на

попередньо змонтовані підсистеми для встановлення оновлених систем підключення. Ми також продовжуємо спостерігати високий і зростаючий попит на розширені можливості розваг у салоні безпосередньо у виробників оригінального обладнання літаків. Це включає потребу в більшій кількості волоконно-оптичних кабелів для камер і точок доступу Wi-Fi, 4K HDMI для великих моніторів 4K з високою роздільною здатністю і навіть кабелів USB 3.1», – сказав Белендорф.

За словами Белендорфа, використання волоконної оптики також починає набувати все більшого поширення в салонах бізнес-джетів. Встановлення або модернізація бізнес-джетів може бути складнішим, особливо пошук місця для нового обладнання та кабелів.

Деякі з основних властивостей волокна, будучи більш ущільненими та легшими, ніж мідь, роблять його ідеальним для цих вузьких місць.

«Використання оптоволокна не тільки дозволяє отримати високу швидкість передачі даних, але й вписується в дуже вузькі простори, і немає жодних побоювань щодо конфліктів електромагнітних перешкод з паралельною проводкою або системами. Це дозволяє інсталляторам прокладати його практично в будь-якому місці. З авіаційним волокном сьогодні також більше комфорту. Розробники систем тепер частіше використовують оптоволокно у своїх конструкціях обладнання, а TOiP більш кваліфіковані в обслуговуванні систем на основі волокон», – сказав Белендорф.

Материнська компанія PIC Wire&CableCorporationAngelusCorporation також звернула увагу на потреби ринку ділової авіації в проводах і кабелях. Тоні Фірст, старший технічний інженер з продажу корпорації Angelus, сказав, що його компанія останнім часом спостерігає зростаючий інтерес до рішень для з'єднання HDMI та USB у салонах бізнес-джетів.

«У нас є продукт HDMI, і ми працюємо над випуском USB C для додатків у літаках. Ми стали свідками потреби в цих товарах на ринку корпоративної авіації», – сказав Форст. «Користувачі Ku та X Bands, такі як

ОЕМ-виробники корпоративних літаків, використовують нашу кабельну лінію Micromates. Ці діапазони охоплюють частоти до 26 ГГц. Деякі з систем авіоніки, включені в цю категорію, включають системи T-310 і JetwaveSystems».

Постачальники проводів і кабелів очікують зростання кількості нових бортових літаків технології розваг та зв'язку (IFEC) у літаках поточного та наступного покоління, щоб продовжити стимулювати попит на кабелі нового покоління.

Протягом наступних кількох років Мур з TE Connectivity вважає, що тенденції дротів і кабелів для авіаційних систем будуть слідувати за тим, що відбувається за межами авіації, у світі побутової електроніки.

«Я бачу, що швидкість передачі даних на літаках відповідає тенденціям, які відбуваються в комерційному світі», – сказав Мур. «Я думаю, що галузь показала, що для даних, що перевищують задану швидкість, волоконна оптика є кращим середовищем для передачі».

1.3. Аналіз застосування оптичної передачі даних на літаку

Перехід від застарілих централізованих архітектур керування до повністю розподілених архітектур керування двигуном можна здійснити крок за кроком, враховуючи проміжні архітектури. Крім того, для більшості авіаційних двигунів легше реалізувати такі архітектури з використанням застарілих датчиків, а потім перейти до повністю розподіленої архітектури [1-3]. Раніше різні дослідники досліджували системи керування Fly-by-light (FBL) [4-6, 8].

Пропускна здатність волоконно-оптичної мережі можна додатково збільшити за допомогою мультиплексування за довжиною хвилі (WDM), яке використовує лазери з різними довжинами хвиль для передачі даних по одному оптичному волокну. Цю техніку можна далі розділити на грубу WDM або щільну WDM в залежності від інтервалу каналів. Огляд розробок

технологій WDM для використання в аерокосмічних програмах наведені в відповідних посиланнях [7-10, 11, 12]. Наприклад, оптоволоконна мережа на основі WDM, яка може працювати в діапазоні температур від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, розглядається в [13]. Використання мережі OpticalRing на основі CWDM (CORIN) або на основі DWDM (DORIN) для керування двигуном літака обговорюється в [14].

На рис. 1.9 показаний приклад розподіленого керування двигуном з двома оптичними каналами зв'язку.

Інтелектуальні приводи датчиків, кожен з яких складається з модуля інтерфейсу волоконної шини (FBIM), модуля ТТР/С і модуля датчика/приводу, під'єднані до кожного з волоконно-оптичних каналів.

Магістральна архітектура розділеного мультиплексування (WDM) використовує грубу оптичну кільцеву мережу (CORIN) [14].

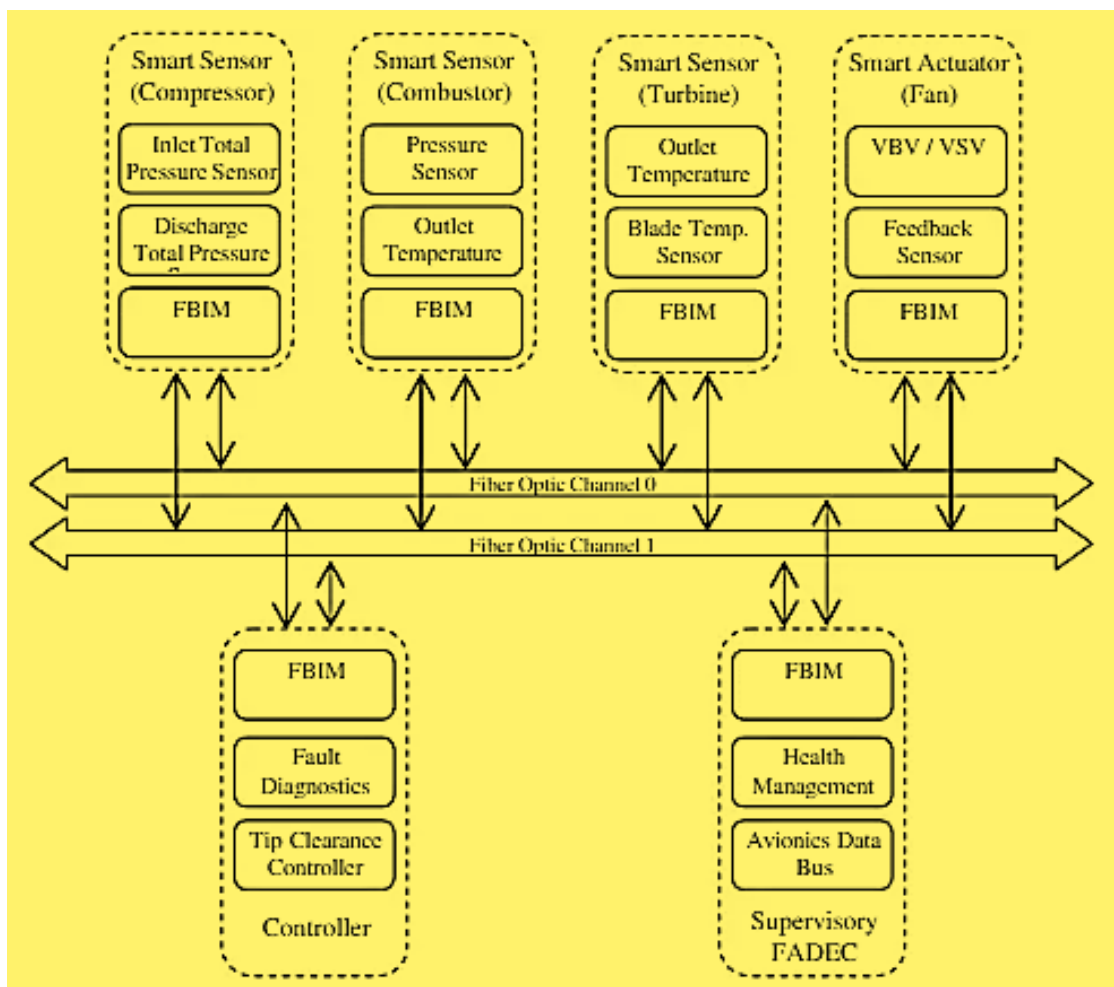


Рис. 1.9. Приклад архітектури для розподіленого керування двигуном з двома оптичними каналами зв'язку

При використуванні волоконно-оптичної техніки відкриваються значні перспективи для передачі інформації між взаємно нерухомими і обмежено рухомими об'єктами. Розробка і випробування волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) стосовно авіаційних задач мають велике місце в дослідницьких програмах передових держав світу.

Спочатку ВОЛЗ передбачалося використовувати для передачі широкопasmової інформації на великі відстані. Були проведені дослідження за оцінкою економічної ефективності таких систем. Проте розробка конкретної апаратури, випробування лабораторних і експериментальних систем виявили ряд істотних переваг ВОЛЗ в порівнянні з дротяними і коаксіальними системами, які зумовили доцільність впровадження волоконної техніки в апаратуру, призначену для інформаційного обміну на малих і надмалих відстанях (від одиниць до сотень метрів).

В даний час великі дослідження ведуться по розробці ВОЛЗ малої протяжності для застосування у внутрішньооб'єктових системах інформаційного обміну (в наземних обчислювальних комплексах, на кораблях, літаках і ін.).

Порівняння ВОЛЗ з іншими сучасними системами комунікацій показує їх істотні потенційні переваги у всіх випадках, окрім зв'язку між об'єктами, що рухаються. Результати, отримані на лабораторних макетах, експериментальних системах і у випробувальних польотах, демонструють наступні властивості ВОЛЗ:

- високий перешкодохист і стійкість до дії сигналів перехресних наведень;
- стійкість до дії електромагнітного імпульсу ядерного вибуху і інших потужних джерел зовнішніх електромагнітних перешкод;
- широку смугу пропускання при порівнянні маси та габаритів;

- значне зниження розмірів і маси обладнання;
- відносно низьку вартість;
- високий ступінь гальванічної розв'язки блоків апаратури по постійному і змінному струму;
- відсутність потреби в електричному заземленні і небезпеці коротких замикань;
- великий діапазон робочих температур;
- безпека при прокладці в пожежо- і вибухо- небезпечних місцях, оскільки в роз'ємах і при розриві кабелю не виникає іскра;
- можливість зниження загальної споживної потужності в системі;
- абсолютну скритність передачі інформації.

Однією з програм в цій області була програма ALOFT, почата за замовленням ВМС США, в рамках якої замінена мережа зв'язку блоків радіоелектронної апаратури (РЕА) на літаку А-7.

Обладнання розміщується в декількох відсіках і в кабіні, кабель проходить через три роз'єми, що герметизуються. Застосування волоконно-оптичних пристроїв дозволило отримати реальний вигравш в масі і вартості обладнання. Маса кабелю зменшилася в 12 разів, вартість впала в півтора рази. Всі зв'язки між блоками апаратури літака А-7 виконані на базі 13 волоконно-оптичних кабелів, кожний з яких сполучає тільки дві точки і працює в режимі ущільнення за часом. Кожна така лінія зв'язку має ширину смуги частот не менше 10 МГц. Програма ALOFT однозначно продемонструвала всі переваги ВОЛЗ як засобу, що забезпечує зниження маси бортової РЕА і підвищення її стійкості до дії перешкод у вигляді сигналів високої частоти, а також низькочастотних електромагнітних наведень.

Порівняльний аналіз вартості елементів бортової літакової апаратури передачі інформації, проведений в рамках програми, показав, що волоконно-оптична техніка зв'язку стане економічно більш вигідною, ніж провідникова. Проведена велика кількість досліджень щодо застосування

ВОЛЗ в різних системах на багатьох типах військових і цивільних літаків.

Застосування ВОЛЗ на літаках та основні переваги наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз застосування ВОЛЗ на літаках

Найменування системи та літака	Призначення	Основні переваги
Лінія передачі даних літака літака А-7	Обмін інформацією в навігаційній системі між центральною БЦОМ і 27 окремими блоками РЕО	Маса волоконного кабелю в 21 разів менше маси електричних кабелів, що раніш застосовували. Маса системи зменшилася в 12 раз.
ВОЛЗ в системі навігації і управління (NWDS) літака А-7Е	Для з'єднання системи відображення інформації з бортовою ЕОМ	Зменшення числа сигнальних кабелів, істотне зниження рівня перешкод і збільшення швидкості передачі даних. Маса кабелю зменшилася з 16 кг до 1,6 кг
Бортова ВОЛЗ для передачі даних на бомбардувальнику В-1 і літаках ПЛО	Для передачі сигналів між бортовими системами	Несприйнятливість до електромагнітних перешкод, що створюються бортовими системами. Розширення смуги частот тракту
Літакова розподільна система «Sostel»	Для забезпечення електричної розв'язки між сигнальними і потужними електричними ланцюгами і усунення паразитних зв'язків між системами літака і наземними контрольно-вимірювальними комплексами.	Підвищення захисту від перешкод, зменшення маси і об'єму, наявність гальванічної розв'язки між вхідними і вихідними ланцюгами РЕА
Бортова система дистанційного керування (СДК) літаком С-131	Для передачі сигналів керування літаком з кабіни льотчика до органів управління. В системі використовуються радіальний відгалужувач і 7 волоконно-оптичних джгутів	Збільшення швидкості передачі сигналів, підвищення захисту від перешкод СДК, зменшення об'єму і маси кабельної сіті

Лінія передачі даних на літаку YC-14	Для з'єднання БЦВМ в дистанційній системі управління польотом літака	Запобігання взаємного впливу каналів, поліпшення захисту від перешкод СДК
Лінія передачі даних на літаку «Комета»	Для зв'язку двох БЦВМ в системі обчислення і відображення навігаційних даних	Можливість заміни електричних кабелів волоконно-оптичними
ВОЛЗ для передачі даних на літаку РС-135	В рамках програми FOCAP. Для зв'язку бортової ЕОМ з виконавчими пристроями	Скорочення маси і об'єму в порівнянні з дротяними і кабельними лініями, підвищення захищеності від електромагнітних перешкод і наведень

Волоконно-оптичні джгути різного діаметра можуть використовуватися для передачі візуального зображення як в бортовій, так і наземній техніці. Зображення, сфокусоване на вхідний торець джгута, може передаватися з неістотними енергетичними втратами на відстань до 10 м і більше. Роздільна здатність цих джгутів складає 20–50 ліній на міліметр. Розроблені пристрої, що дозволяють підвищити роздільну здатність в два рази.

Джгути можна використовувати для передачі пілоту літака інформації від датчиків зображень: електронно-оптичних візирів, телевізійних і інших датчиків. Вони використовуються в пристроях спостереження за важкодоступними елементами конструкції літака при наземному обслуговуванні літаків і т.п.

Внутрішньолітакові системи зв'язку з низькими потоками інформації необхідні, наприклад, в системі керування літаком. В такій системі низька потрібна інформаційна місткість каналів зв'язку обумовлюється порівняно повільною зміною параметрів польоту літака. В системі управління літаком не реалізується потенційна широка смуга волоконного кабелю. Перевагами такої системи є в основному мала маса і стійкість до зовнішніх перешкод. Істотними є також і інші перераховані вище переваги.

В даний час намітився перехід від систем керування літаком за допомогою тяги до систем дистанційного керування (СДК) за допомогою волоконно-оптичної лінії.

В СДК літака волоконно-оптичні лінії використовуються для передачі інформації між ЕОМ, оскільки в літаку триразово зарезервована вся мережа збору даних, управління двигуном та аеродинамічними поверхнями.

Електронна система керування літаком, що складається з потрібного комплекту аналогово-цифрових і електронно-оптичних перетворювачів та цифрових ЕОМ, розроблена функціональна схема такої системи представлена на рис. 1.10. Аналогові сигнали від датчиків параметрів польоту і датчиків зворотнього зв'язку пристроїв управління поступають на аналогово-цифрові перетворювачі і далі в цифровому вигляді – в цифровий блок. По волоконних лініях зв'язку в ЕОМ поступають сигнали від датчиків дублюючих систем. Цифровий блок оцінює достовірність трьох сигналів, що поступили, і відповідно до програми роботи на даному етапі польоту виробляє сигнали управління, перетворювані далі в аналогову форму.

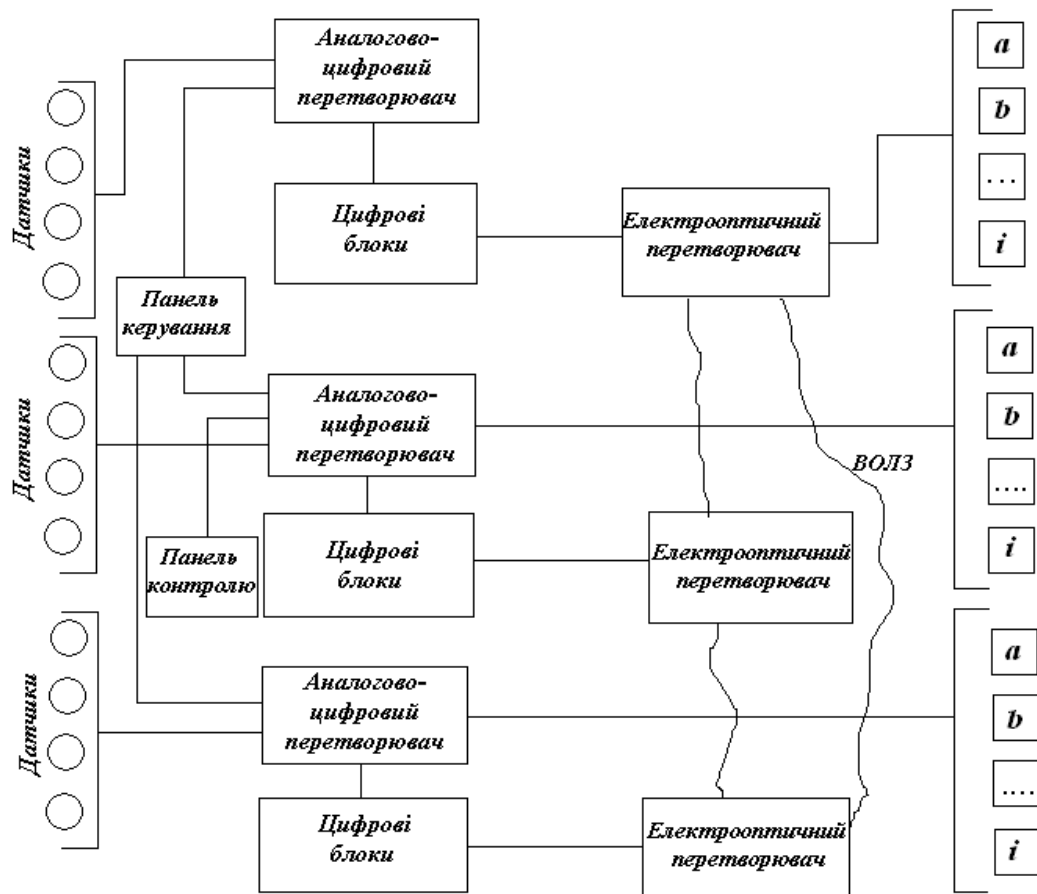


Рис. 1.10. Функціональна схема електронної системи управління польотом

Висновки до розділу 1

Сучасне бортове авіаційне обладнання представляє собою сполучення вимірювальних перетворювачів параметрів польоту літака і датчиків контролю роботи його систем, обчислювальних засобів і пристроїв відображення інформації. Волоконна оптика починає знаходити застосування на борту літака в якості локальних волоконно-оптичних мереж зв'язку.

Фундаментальною відмінністю волоконно-оптичних систем зв'язку від більш традиційних систем електричного зв'язку є те, що в якості несучих інформацію хвиль використовуються інфрачервоні світлові хвилі. Замість мідних проводів і кабелів на їхній основі для передачі оптичних сигналів використовуються оптичні волокна й оптичні кабелі.

Сьогодні багато бортових систем управління ЛА є досить складними системами. Більш того, такі системи управління відносяться до самого нового класу розподілених комп'ютеризованих систем цифрового управління. Застосування в архітектурі контролерних мереж оптоволоконних каналів передачі інформації дозволяє багаторазово підвищити перешкодозахищеність, пропускну здатність і надійність систем, що в підсумку визначає собою новий рівень якості управління.

Основна концепція авіоніки в перспективних ЛА заснована на інтеграції інформаційних датчиків усіх бортових підсистем з метою формування об'єктивної реальної картини зовнішньої обстановки, а також для виведення результуючої інформації на індикатори. У цьому випадку екіпаж стежить за бортовою інформацією, а система сама робить підключення необхідних датчиків, щоб відповісти на питання льотчика.

Отже, передача інформації по оптоволокну має цілий ряд переваг перед передачею по мідному провіднику. Стрімке впровадження в інформаційні мережі оптичних трактів є наслідком переваг, що впливають з особливостей поширення сигналу в оптичному волокні.

Розділ 2

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА РОЗПОДІЛ СИГНАЛІВ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

Вступ до розділу 2

Прогрес застосування волоконно-оптичних ліній зв'язку як у цивільних, так і у військових авіаційних літаках через надмірне навантаження на можливості дотепер існуючих радіочастотних (РЧ) мереж зв'язку на основі коаксіальних кабелів на борту сучасних літаків. Відтепер потрібні системи авіоніки, а саме бортові канали зв'язку з високою пропускнуою здатністю, легкі, стійкі до електромагнітних перешкод і дуже надійні.

Волоконно-оптична технологія зв'язку може вирішити всі ці виклики економічно ефективним способом. Останнім часом цифрові волоконно-оптичні системи зв'язку, де волоконно-оптична мережа діє як локальна мережа (LAN) для передачі цифрових даних, стали темою великих досліджень і розвитку. Хоча волоконно-оптична система може бути розроблена для передачі радіочастотних сигналів, цифрові волоконно-оптичні системи, що розробляються сьогодні, не здатні транспортувати радіочастотні сигнали мікрохвильового та міліметрового діапазонів, що використовуються в радіолокаційних та авіаційних системах на борту літака.

Останні досягнення в оптоволоконних технологіях, особливо довжини хвилі мультиплексування з розділенням (WDM), відкрило низку можливостей для проектування бортових волоконно-оптичних мереж, включаючи повністю оптичні мережі для радіолокації та авіоніки РЧ розподілу сигналу. Вже відома ціла низка різних нових підходів для волоконно-оптичної передачі бортових VHF і UHF радіосигналів з використанням комерційних стандартних (COTS) компонентів. Відносно переваг та недоліків кожної архітектури постійно обговорюється, і вказується на придатність кожної архітектури для конкретних застосувань. Волоконно-оптичні підходи демонструють кращу продуктивність, ніж інші традиційні

підходи з точки зору співвідношення сигнал/шум, потужності споживання та вимог до ваги.

2.1. Традиційні та сучасні волоконно-оптичні системи

Досягнення авіоніки в цивільних і військових літаках вимагають мікрохвильових частот з високою смугою пропускання та радіочастот міліметрового діапазону для мережі зв'язку. Ряд радіочастотних систем з їх мережею взаємозв'язку на основі коаксіальних кабелів і хвилеводів збільшують складність високочастотної мережі зв'язку на борту сучасних цивільних і військових літаків із зростанням проблеми, що пов'язана з електромагнітними перешкодами (ЕМП). Проста, надійна і легка система зв'язку, вільна від впливу електромагнітних перешкод і здатна підтримувати широкосмуговий радіочастотний зв'язок потребує майбутніх бортових систем авіоніки, що легко реалізується існуючими системами на основі коаксіального кабелю. Волоконно-оптичний зв'язок системи можуть відповідати всім викликам сучасних застосувань авіоніки в ефективній і ефективній формі економічно ефективного способу, коли одне волокно може замінити десятки радіочастотних кабелів [16]. Крім того, кілька оптичних волокон можна об'єднати в один волоконно-оптичний кабель, що має потенціал для зменшення ваги волоконно-оптичної кабельної мережі. Крім того, волоконно-оптичні компоненти для застосування в повітрі, що здатні витримувати несприятливі умови навколишнього середовища на борту літака, вже є в розробці [17-19].

На даний час для сучасної оптики використовуються дві різні оптичні області довжин хвиль зв'язок по оптоволокну. Ці області довжини хвилі становлять близько 1,31 а 1,55 мкм (1310 і 1550 нм відповідно). Для обох цих довжин хвиль для волоконно-оптичної системи передачі можуть бути використані методи: аналоговий і цифровий. Аналогові сигнали це безперервно сигнали, що змінюються, де потрібна точна форма хвилі

радіочастотного сигналу зберігається при передачі по волоконно-оптичному каналу. Для цього потрібен аналоговий волоконно-оптичний передавач і аналоговий волоконно-оптичний приймач повинні бути надзвичайно стабільними, лінійними та мати а великий динамічний діапазон. Ці вимоги значно збільшують вартість аналогової компонентів волоконної оптики, а саме передавачів і приймачів. З іншого боку, цифрові сигнали складаються одиниць і нулів, як у комп'ютерах. Цифровий сигнал не потребує збереження точності хвилі переданого сигналу, якщо переданий сигнал не спотворений настільки, що одиниці та нулі неможливо відрізнити один від одного. З цих причин цифрове волоконно-оптичне комунікаційне обладнання може добре працювати навіть за наявності шуму та спотворення оптичного сигналу.

Волоконно-оптичні мережі зв'язку на борту літаків для передачі цифрових даних комунікація останнім часом стала активною сферою досліджень і розробок [20-22].

Однак системи, що розробляються сьогодні, є цифровим волоконно-оптичним зв'язком системи, які здатні передавати лише цифрові дані, але не здатні транспортування радіочастотних сигналів від радарів та авіоніки з одного місця в інше на борту літака.

Аналогові волоконно-оптичні канали можна використовувати для передачі на борту літака радіочастотних сигналів мікрохвильового та міліметрового діапазонів з одного місця в інше. Це аналогові волоконно-оптичні лінії зв'язку приймають на вході радіочастотний сигнал, передають його по волокну та відтворюють на виході точну копію форми радіочастотного сигналу, що подається на нього на вхідному кінці. Радіочастотний сигнал може бути модульований сигналом базової смуги за допомогою будь-якої з методів аналогової або цифрової модуляції, але аналоговий волоконно-оптичний канал передає радіочастотний сигнал однаково незалежно від методу модуляції, який використовується для модуляції радіочастотного сигналу сигналом основної смуги.

На рис. 2.1 показано типовий радіочастотний сигнал (модульований аналоговою або цифровою модуляцією), що транспортуються аналоговим волоконно-оптичним каналом зв'язку.

Оптичний передавач передає оптичний сигнал в оптичне волокно. В іншому на кінці волокна нам потрібен оптичний приймач, який знову перетворить оптичний сигнал у радіочастотний.

Зазвичай одне волокно може передавати інформацію лише в одному напрямку (симплекс), тобто зазвичай потрібні два волокна для двонаправленого (дуплексного) зв'язку, однак, при мультиплексуванні з поділом довжин хвиль таке дозволяє використовувати те саме волокно для дуплексного зв'язку з використанням різних довжин хвиль.

Розглянемо ряд архітектур для розподілу радіочастотного сигналу із використанням традиційних гібридних РЧ-оптичних, а також сучасних повністю оптичних підходів. Інші принципи деяких нових волоконно-оптичних пристроїв та методи зв'язку, засновані на останніх досягненнях у волоконно-оптичних системах. Деякі узагальнені волоконно-оптичні мережі розподілу, включаючи повністю оптичні рішення та опис волоконно-оптичної архітектури для кількох джерел мережі з кількома пунктами призначення.

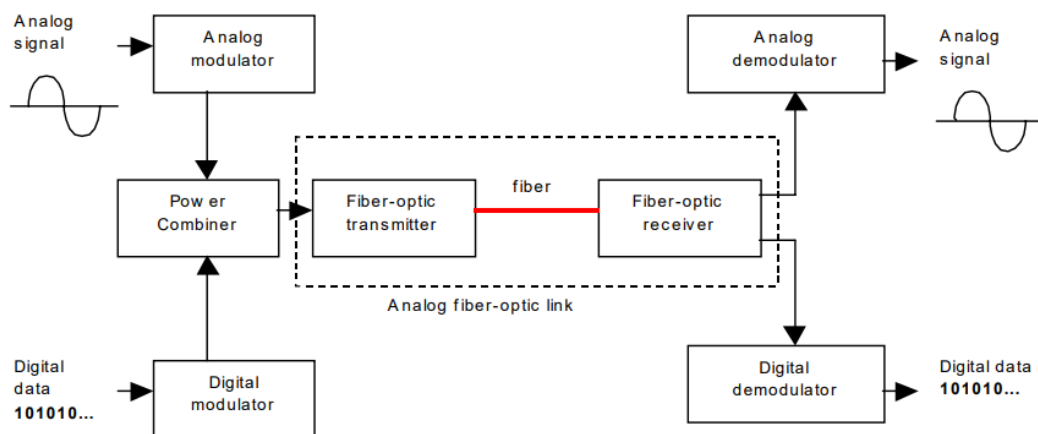


Рис. 2.1. Аналогове волоконно-оптичне з'єднання, що транспортує радіочастотні сигнали, де радіочастотний сигнал може модулюватися за допомогою методів аналогової або цифрової модуляції

Спочатку розглянемо, яким чином просту систему можна реалізувати за допомогою традиційних і сучасних загальнооптичних підходів. На рис. 2.2 показана така проста система, де бортова UHF-система зв'язується з UHF-антенною, а бортова VHF-система зв'язана за допомогою антени VHF.

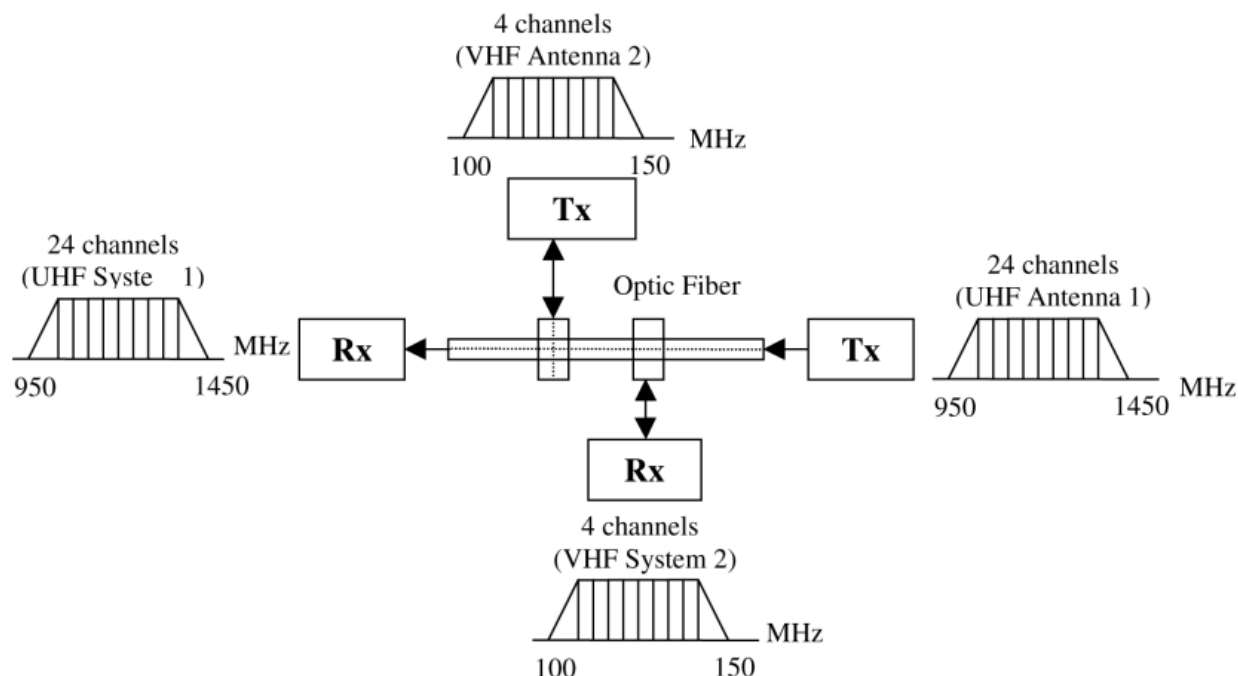


Рис. 2.2. Проста волоконно-оптична система зв'язку

У традиційному волоконно-оптичному виконанні для кожної системи використовуються окремі оптичні волокна через зв'язок точка-точка. Таким чином, одна пара волокон з'єднує VHF антену 1 з VHF системою 1, а інша пара з'єднує UHF-систему 2 з UHF-антенною 2. Кожен зв'язок «точка-точка» вимагає наявності волоконно-оптичного передавача (Tx), волоконно-оптичного приймача (Rx) і безперервний волоконно-оптичний шлях світла від кожного передавача до відповідного приймача. Така система вимагає три сегменти кабелю: лівий сегмент вимагає кабелю з двома волокнами, середній для сегмента, тобто, потрібен кабель із чотирма волокнами, а для правого сегмента – з двома волокнами. Для два волокна, що з'єднують VHF-антену 1 із VHF-системою 1, потрібне з'єднання кабелю: один раз на з'єднанні між лівим і центральним сегментами кабелю, і знову на стику між центральним і правим сегментами кабелю.

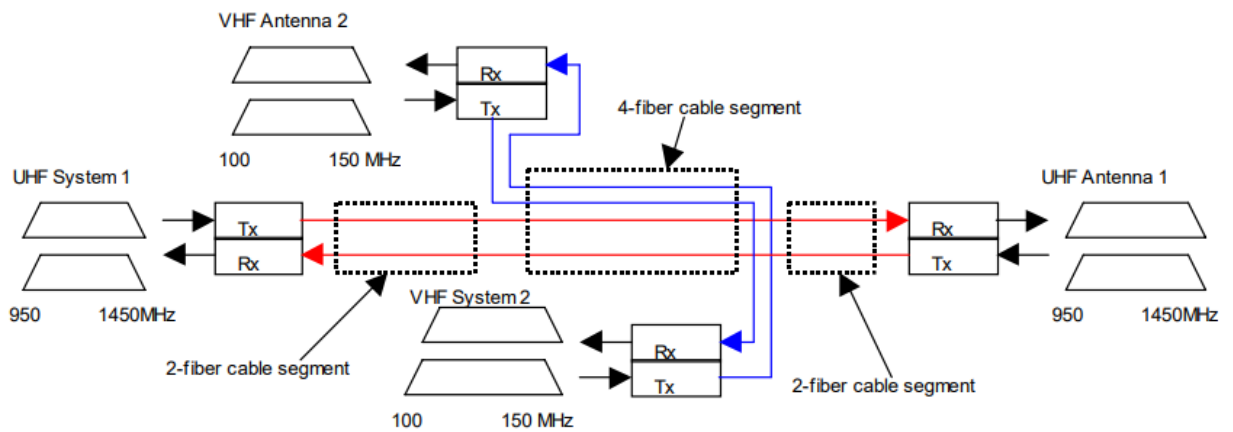


Рис. 2.3. Традиційне рішення волоконно-оптичної мережі
для взаємозв'язку

Rx представляє волоконно-оптичні передавачі, а Tx представляє волоконно-оптичні приймачі. Ця архітектура є простою, економічною та легкою для впровадження за наявності кількох систем, що повинні бути пов'язані між собою. Однак, якщо кількість систем, що необхідно підключити стає більшим і складним, використання оптоволоконних кабелів стає майже неможливим з кількістю волокна. Якщо використовуються кабелі з декількома волокнами, тоді необхідно зрощувати багато місць, що робить систему більш вартісною та ненадійною. З іншого боку, використовуючи багато одноволоконних або багатоволоконних кабелів зменшує переваги щодо зменшення ваги, тоді краще можна було б використовувати оптоволоконні кабелі з кількома волокнами. Проблеми, пов'язані з втратою сигналу на кожному з'єднанні, можна вирішити за допомогою оптоволоконна приймач і передавач у кожному з вузлів, де потрібно з'єднувати волокно. Це рішення, який ми називаємо гібридним РЧ-оптичним підходом, інший сучасний підхід, коли кілька хвиль різних довжин переносяться одним і тим же оптичним волокном, що використовує технологію мультиплексування за довжиною хвилі (WDM).

2.2. Гібридний РЧ-оптичний підхід

У цьому підході одне волокно передає всі РЧ-сигнали зліва направо, а інше волокно передає усі радіочастотні сигнали у зворотному напрямку. Ці волокна розщеплюються на кожен вузол, де до волокна потрібно додати радіочастотний канал, або вузол, де радіочастотний канал потрібно відкинути від волокна. Крім волоконно-оптичних передавачів і приймачів, для цього підходу нам також потрібні радіочастотні суматори потужності та радіочастотні демультиплексори.

Об'єднувачі радіочастотної потужності мультиплексують кілька різних радіочастотних каналів на один радіочастотний канал лінії передачі, тоді як радіочастотний демультиплексор відокремлює радіочастотний канал від радіочастотного діапазону частоти. Кожен вузол приймач/передавач повинен мати підсистему додавання каналів, яка для простої мережі вимагає лише двох підсистем додавання-відведення для VHF антени 2 і системи UHF 2.

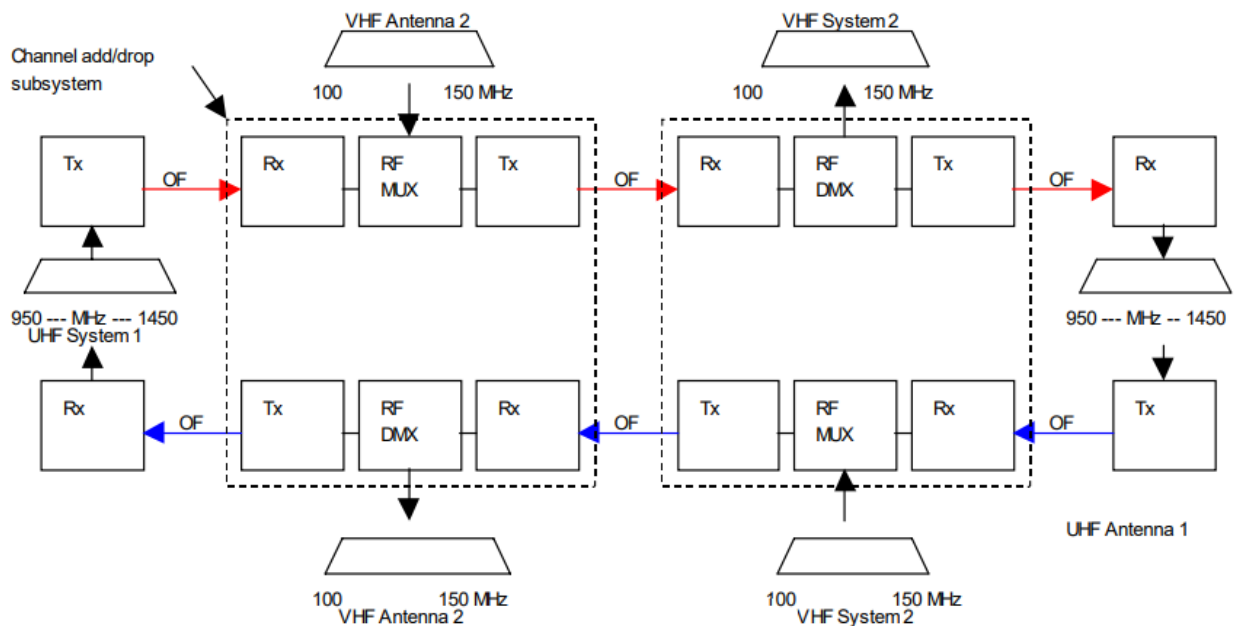


Рис. 2.4 Гібридний РЧ-оптичний підхід

Мультиплексор (MUX) представляє об'єднувач радіочастотної потужності (або мультиплексор). DMX представляє радіочастотний

демультиплексор. Перевагою цієї системи є те, що лише одна пара волокон йде від носової частини до хвостової частини літака діє як волоконно-оптична магістральна лінія. У будь-якій точці літака, якщо потрібно додати новий канал до волоконно-оптичної магістральної лінії, а канали, що надходять від волокна, перетворюються на радіочастоту за допомогою оптичного приймача локальний РЧ-сигнал мультиплексується з каналами вихідного каналу та мультиплексованим РЧ-сигналом сигнал знову надсилається до оптичного волокна, що йде донизу, за допомогою оптичного передавача.

Хоча цей підхід економить трохи клітковини порівняно з традиційним підходом, додаткові волоконно-оптичні передавачі та приймачі, а також РЧ об'єднувачі потужності та демультиплексори збільшують вагу та енергоспоживання такої системи.

2.3. Повністю оптичний підхід

Метод передачі більш ніж однієї довжини хвилі через оптичне волокно є називається мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM), яке є новим і розвивається технології. Використовуючи технологію WDM, можна спільно використовувати одне волокно для передачі двох або більше оптичних каналів на різних оптичних довжинах хвиль одночасно. Таким чином, єдиний волокно передає кілька оптичних довжин хвиль, і кожна з довжин хвиль несе а кількість мультиплексованих радіоканалів. У цьому підході нам потрібні оптичні розгалужувачі потужності, оптичні суматори потужності та оптичні демультиплексори довжин хвиль. Розгалужувачі оптичної потужності розділити оптичну потужність, отриману від вхідного оптичного волокна, на дві або більше рівних або нерівні фракції, і кожна фракція передається на нове вихідне волокно.

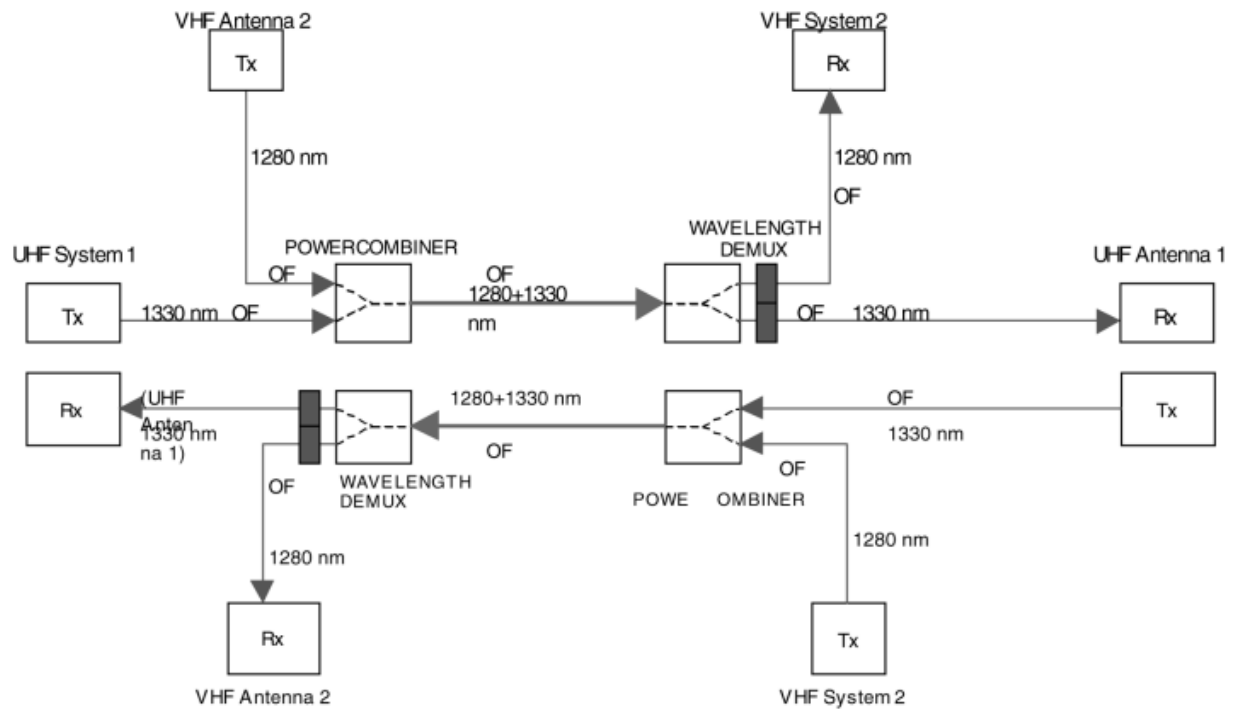


Рис. 2.5. Оптичне рішення для волоконно-оптичної системи з використанням мультиплексування та поділом довжин хвиль

Щоб реалізувати систему на рис. 2.5, ми можемо вибрати довжину хвилі 1330 нм для системи VHF, тоді як система UHF буде передавати сигнал на довжині хвилі 1280 нм. (І сплітер, і об'єднувач мають однакову фізичну конструкцію. Отже, єдиний компонент може працювати або як об'єднувач, або як роздільник, в залежності від способу його роботи). При цьому, потрібні два волокна, по одному для передачі в кожному напрямку. Однак, нам не потрібні чотири волокна в центральному сегменті.

Для волокна, що передає сигнал зліва направо оптичні сигнали від двох передавачів, один від системи VHF 1 та інші від UHF-антени 2 об'єднуються оптичним суматором потужності. Один з передавачів працює на довжині хвилі 1280 нм, а другий передавач працює на довжині хвилі 1330 нм. Суматор на UHF-антені 2 поєднає обидва довжини хвилі та запускає об'єднану потужність на одне волокно, яке проходить точку, де розташована UHF система 2. У цей момент розподільник потужності розділяє загальну суму потужності на дві рівні половини. Приймач для UHF системи 2 на 1280

нм прийме свій канал від UHF-антени 2 через один із портів сплітера. Інший порт в розгалужувач передає половину сигналу, який приймає VHF-антена 1. Приймач на VHF антени 1 приймає свій канал від VHF системи 1 на 1330 нм. Обидва приймачі (UHF-система 2 і VHF-антена 1) повинні мати можливість вибору правильної довжини хвилі (1280 і 1330 нм).

Правильна довжина хвилі може бути легко розділена за допомогою оптичного демультиплексора довжини хвилі на приймачі. Для комунікації у зворотному напрямку, нам потрібне інше волокно, що йде у зворотному напрямку напрямку, і ще два об'єднувачі/сплітери. Перевагою цього методу є те, що він є повністю оптичним рішенням, де оптичний сигнал, введений у систему оптичним передавачем, залишається в оптичній формі доти, поки оптичний сигнал приймається відповідним оптичним приймачем. Таким чином, існує повний шлях світла між оптичним передавачем і оптичним приймачем для кожної довжини хвилі яка присутня в системі, і немає перетворення оптико-радіочастотного та радіочастотно-оптичного, що може погіршити співвідношення сигнал/шум РЧ сигналу, який переноситься оптичним сигналом.

Здатність передавати багато радіочастотних сигналів на різних довжинах хвиль в одному оптоволоконніозначатимуть економію ваги. Крім того, використання мультиплексорів та демультиплексорів з довжинами хвиль, які є пасивними компонентами, не потребують джерело живлення, а це зменшує енергоспоживання порівняно з гібридними РЧ-оптичними системами.

2.4. Волоконно-оптичні системи розподілу сигналу

Розглянемо принципи проектування волоконно-оптичної системи для розподільної мережі, що поширює радіочастотний сигнал, котрий надходить з одного джерела (наприклад, антени) і розподіляє його на кілька точок літака. На рис. 2.6 показано оптоволоконна система розподілу сигналу

системи в деталях. Одна VHF-антена приймає РЧ сигнали, які необхідно розповсюдити на ряд бортових систем (1, 2, 3 і т. д.). тоді може бути застосований або гібридний РЧ-оптичний підхід, або повністю оптичний підхід.

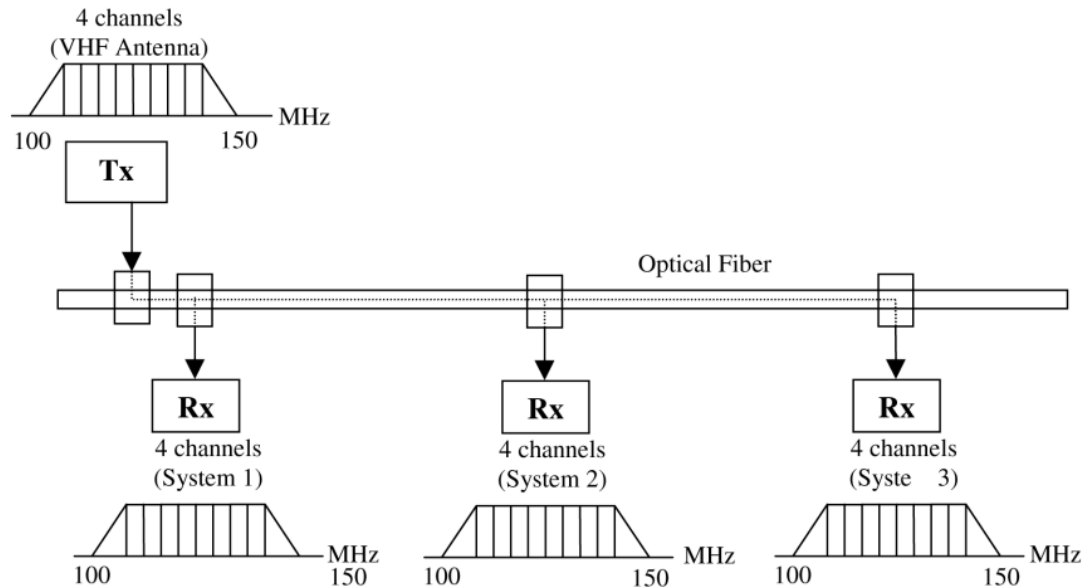


Рис. 2.6. Оптиволоконна система розподілу сигналу.

Для гібридного РЧ-оптичного підходу застосування такої ідеї може бути на кілька вузлів. Є тільки одна пара волокон, що проходять від носової частини до хвоста літака. У кожній точці (вузол) вхідний оптичний сигнал, що надходить з лівого боку, перетворюється на РЧ, локальний радіочастотний канал виділяється, і новий оптичний сигнал передається по оптичному передавача до вихідного оптичного каналу. На рис. 2.7 показано деталі реалізації такого підходу, де кожен вузол є приймальним вузлом. Деталі кожного вузла є описано на рис. 2.8.

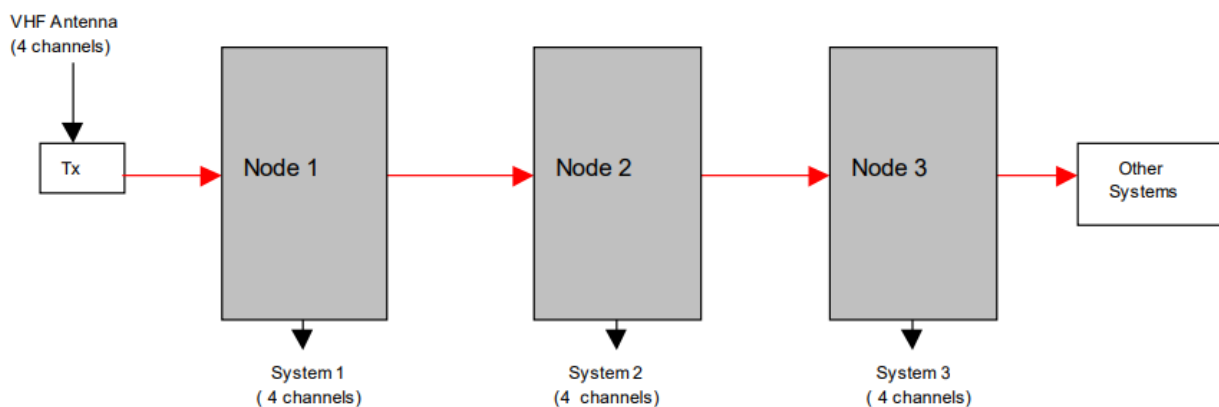


Рис. 2.7. Принципова діаграма гібридного РЧ-оптичного рішення.

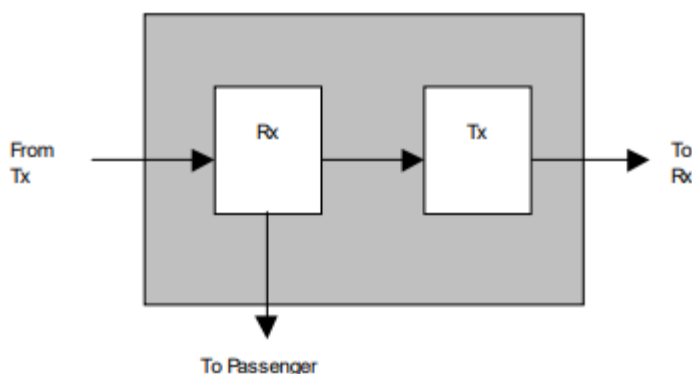


Рис. 2.8. Детальна схема приймального вузла.

Це рішення є простим і вимагає лише одного волокна, що проходить по усій довжині літака. Однак для кожного вузла потрібен волоконно-оптичний передавач, а також приймач.

При застосуванні повністю оптичного підходу, волоконно-оптичний розгалужувач, розділяє оптичну потужність сигналу, отриману від волокна на кілька каналів, а потім передає далі в кожний канал окремо по волокну.

Зазвичай розгалужувач, як пристрій простий і легкий за конструкцією. Використовуючи один або більше рівнів розгалужувачів, можна створити дерево розподілу з одного джерела оптоволоконного сигналу.

На рис. 2.9 показано повністю оптичне рішення проблеми розподілу сигналу. У цьому підході спочатку перетворюється радіочастотний сигнал в оптичний за допомогою передавача оптоволоконна. Потім він розбивається за допомогою оптичного розгалужувача від одного до восьми каналів. Кожен з

розподілених оптичних сигналів можуть проходити через повторювачі (де слабкий оптичний сигнал спочатку перетворюється на радіочастоту, а потім повторно передається волоконно-оптичним передавачем, як на рис. 2.10). Кожен з оптичних сигналів потім знову розбиваються на вісім за допомогою іншого рівня оптичних дільників потужності. Якщо ретранслятори не використовуються, то кожен приймач отримує лише $1/64$ оптичної потужності, що передає оптичний передавач на антені.

Ця система є дуже вигідною, оскільки оптичний сигнал розподіляється за допомогою повністю оптична мережа (за винятком повторювачів, якщо вони потрібні) і загальний дизайн системи є простим і легким у реалізації.

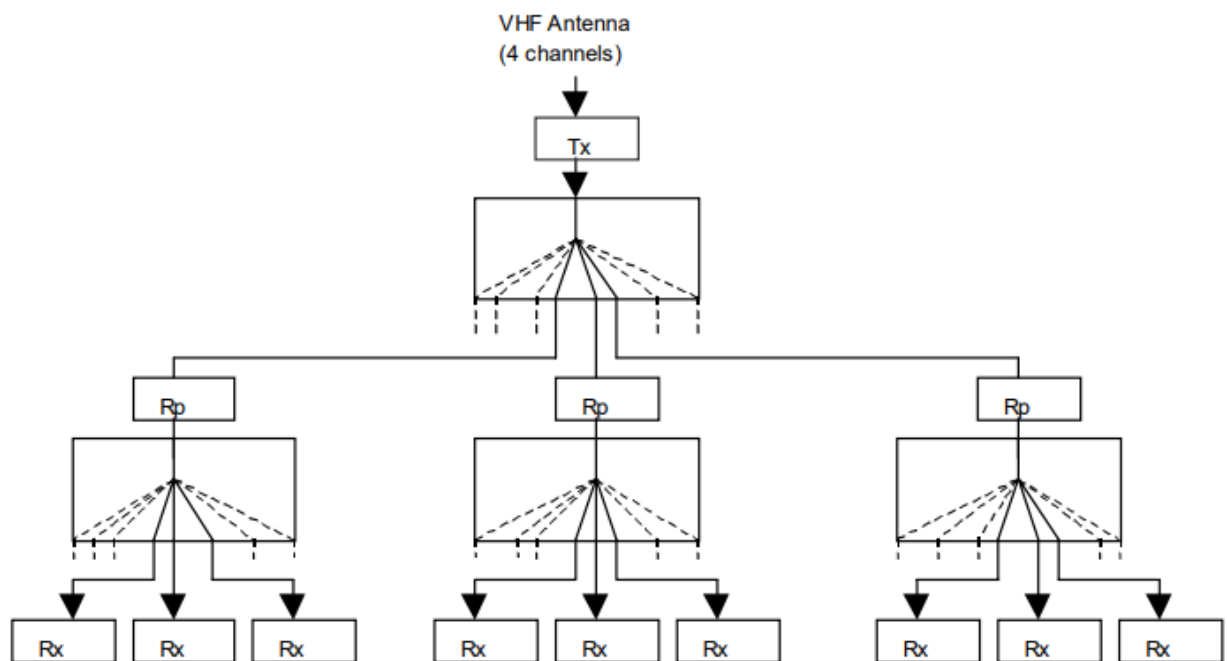


Рис. 2.9. Схематична діаграма повністю оптичного рішення.

Rp представляє необов'язкові ретранслятори, що можуть або не можуть знадобитися в залежності від потужності сигналу на кінцевих приймачах.

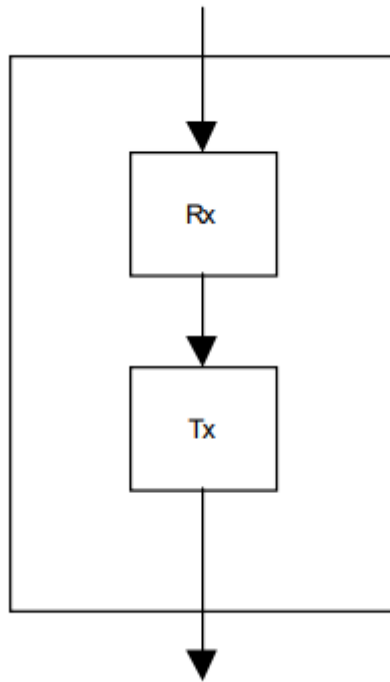


Рис. 2.10. Детальна схема ретранслятора (Rp)

2.5. Системи з кількома передавачами та приймачами

Розглянемо методологію проектування бортової системи де кілька вузлів передають, і кожна з систем на борту літака повинна буде здатна приймати передачу від будь-якого з передавачів.

На рис. 2.11 показано комунікаційну архітектуру з трьома антенами з яких передаються оптичні сигнали, і ці сигнали повинні транспортуватися до будь-якої з бортових систем. Можемо взяти або гібридний РЧ-оптичний підхід або повністю оптичний підхід.

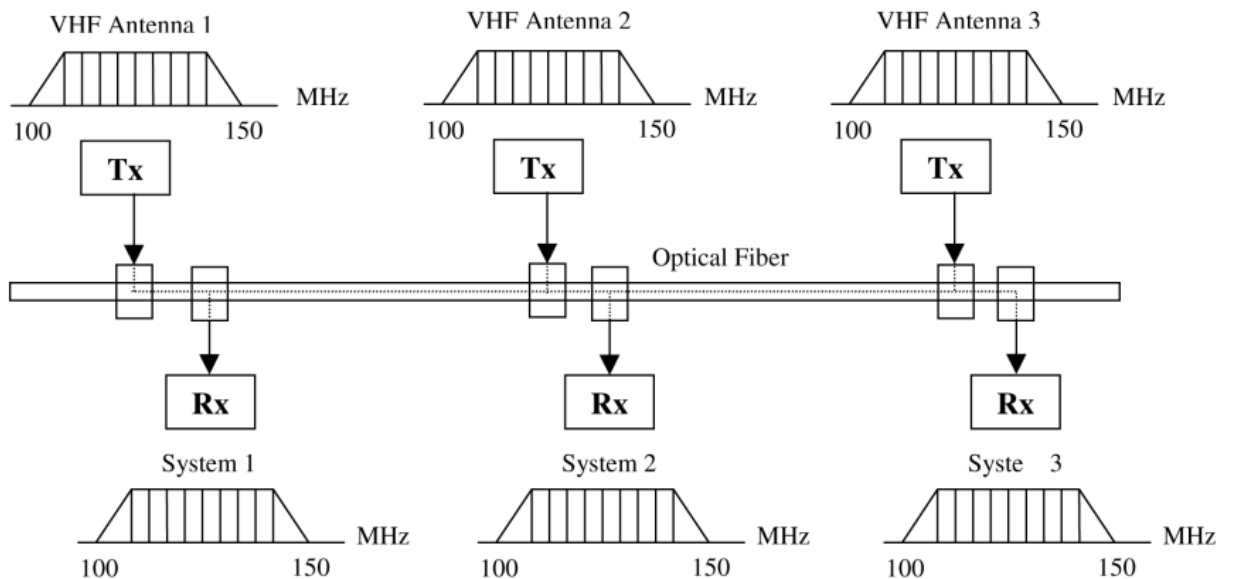


Рис. 2.11. Архітектура волоконно-оптичної мережі зв'язку з кількома передавачами та приймачами.

При гібридному РЧ-оптичному підході використовують два волокна, що проходять у протилежних напрямках по всій довжині літака. У місці розташування кожної (передавальної) антени або (приймальної) системи, оптичний сигнал спочатку перетворюється на РЧ, а потім або додається новий РЧ-канал у випадку передавального вузла, або отриманий сигнал повторно передається у разі прийому вузол. На рис. 2.12 показана блок-схема такого передавача та приймача система. Вузли антени є вузлами передачі (Tx), тоді як вузли системи є вузлами приймальних (Rx) вузлів. Деталі кожного з передавального та приймального вузлів є показано на рис. 2.13 і 2.14 відповідно. На кожному з передавальних і приймальних вузлів, оптичний сигнал перетворюється на радіочастотний, додається або виділяється радіочастотний канал, а потім новий оптичний сигнал передається з радіочастотного сигналу.

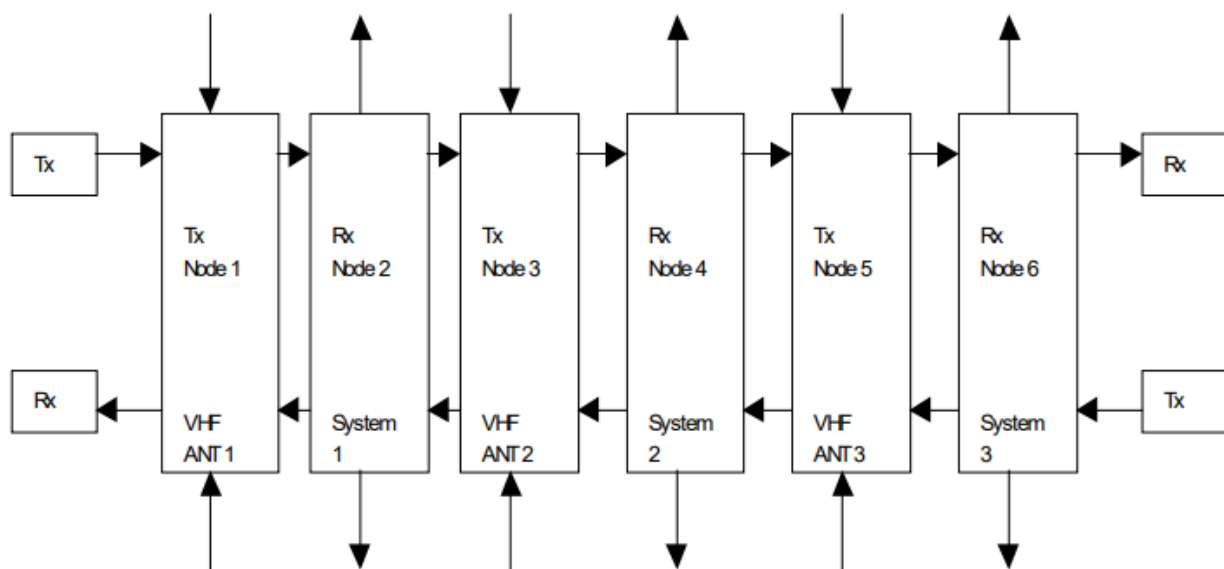


Рис. 2.12. Гібридне РЧ-оптичне рішення з декількома джерелами та декількома пунктами призначення

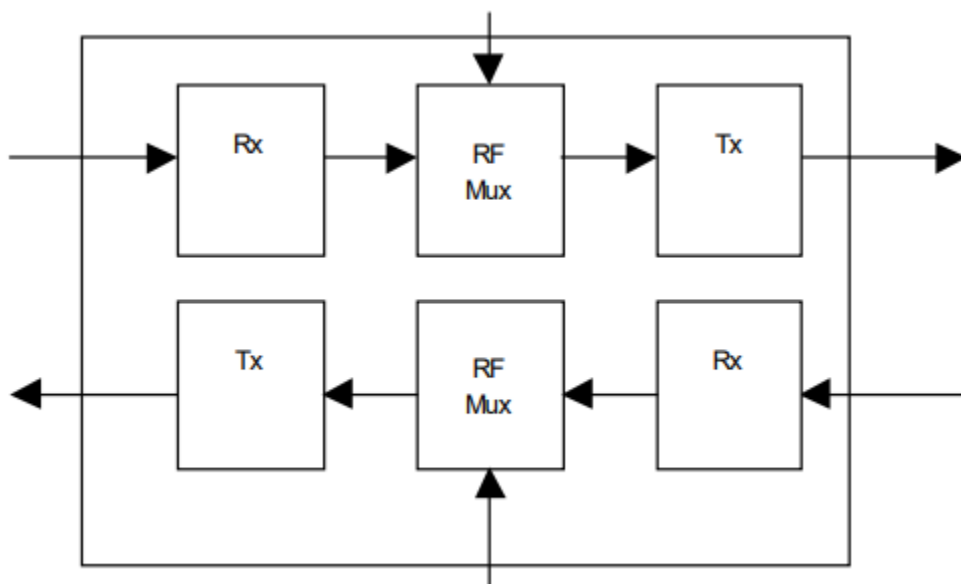


Рис. 2.13. Детальна схема вузла передачі (Tx).

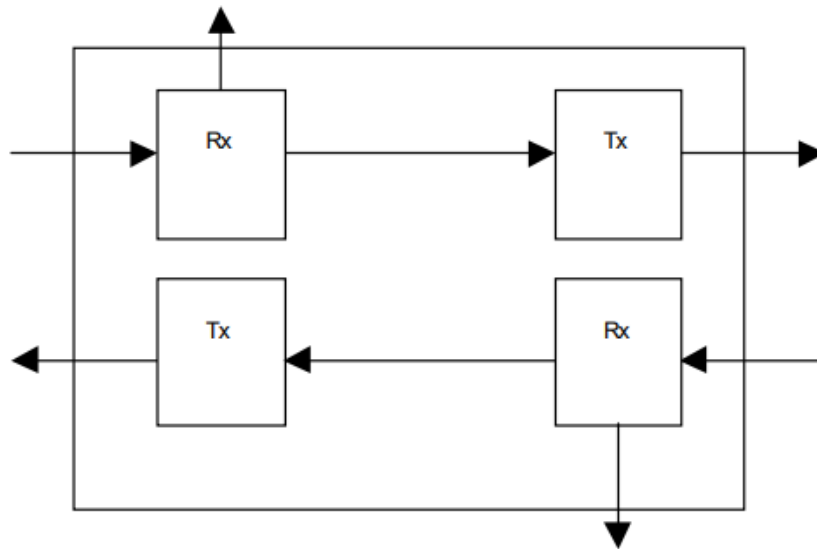


Рис. 2.14. Детальна схема приймального (Rx) вузла.

Це рішення має перевагу в тому, що оптичний сигнал посилюється на кожному вузлі, тому втрата сигналу на роз'ємах не є проблемою. Крім того, ця система використовує тільки два зустрічних волокна. Система має той недолік, що багато потрібно використовувати волоконно-оптичних передавачів та приймачів. Крім того, сигнал, який було введено в волокно на крайньому лівому кінці досягає крайнього правого кінця після великої кількості перетворень оптичного сигналу в радіочастоту та радіочастоти в оптичний сигнал, що може спричинити погіршення якості радіочастотного сигналу в значній мірі, і радіочастотний сигнал може мати неприйнятне співвідношення сигнал/шум.

При повністю оптичному підході використовують щільне мультиплексування за довжиною хвилі (DWDM) технології, де кілька довжин хвиль, які розділені лише кількома нанометрами, передаються через те саме волокно. Різні передавачі передають оптичні сигнали на різних довжинах хвиль. Так само, як і в попередніх рішеннях, нам потрібні два волокна для передачі оптичних сигналів у двох напрямках. Від кожної антени по два окремих передавачів, що використовуються для передачі оптичних сигналів по двом лініям та транспортують оптичні сигнали у двох (протилежних) напрямках. Кожна приймальна система приймає оптичні

сигнали від антени або з верхнього оптоволоконна, або з нижнього, але не з обох оптичних волокон з однакових антен (незалежно від того, чи розташована приймальна система ліворуч чи праворуч від антени).

На рис. 2.15 показана блок-схема повністю оптичної системи з декількома передавачами і декількома приймачами.

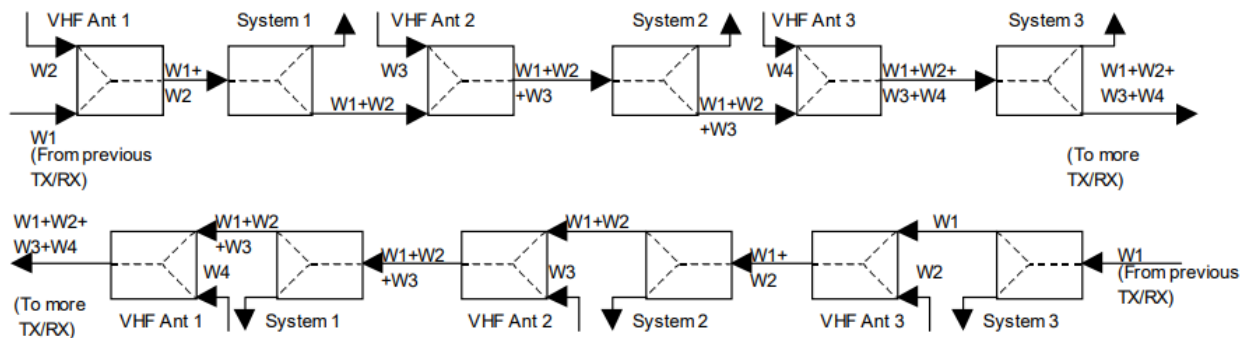


Рис. 2.15. Повністю оптичне рішення з використанням щільного мультиплексування за довжиною хвилі для реалізації архітектури мережі з кількома джерелами та кількома приймачами.

Кожен із передавальних вузлів додає нову довжину хвилі (W_1 , W_2 тощо) до набору довжини хвилі, що переноситься оптичним волокном за допомогою оптичної потужності. Кожен приймальний вузол використовує оптичний розгалужувач для поділу вхідного сигналу та прийому на частину оптичного сигналу, що передається через оптичне волокно. Кожен із приймальних систем приймають більше ніж одну довжину хвилі. За допомогою довжини хвилі демультимплексори, кожна з довжин хвиль (W_1 , W_2 , W_3 тощо) може бути розділена. Від кожної розділеної довжини хвиль, окремі приймачі можуть отримати окремі радіочастотні сигнали, що передається різними передавальними вузлами (антенами).

Ця система має перевагу в тому, що система використовує лише два волокна для з'єднання велика кількість передавальних і приймальних вузлів. Рішення повністю оптичне, а шлях світла встановлюється між кожним оптичним передавачем і приймачем. Оскільки немає оптико-радіочастотного та радіочастотно-оптичного перетворення, проблема співвідношення

сигнал/шум деградація усувається, що є істотною проблемою в гібридному РЧ-оптичному рішенні розглянутого вище. Вибравши відповідні коефіцієнти розподілу потужності на розподільниках потужності, потужність сигналу може підтримуватися на високому рівні в кожній точці, незважаючи на втрати на роз'єми.

Висновок до розділу 2

Розглянули низку різних нових підходів до волоконно-оптичної системи передачі бортових VHF та UHF радіочастотних сигналів для авіоніки та радіолокаційних систем за допомогою (COTS) компонентів. Майже в усіх випадках є можливість застосовувати гібридний РЧ-оптичний підхід або повністю оптичний підхід.

Перевага гібридного РЧ-оптичного підходу полягає в низькій втраті сигналу через багаторазової повторної генерації радіочастотного сигналу та вимагає меншої кількості оптоволокна. Однак, використання занадто великої кількості волоконно-оптичних передавачів і приймачів збільшує вагу і вартість гібридної системи, а також збільшує електро-магнітне випромінювання.

З іншого боку, повністю оптичний підхід долає всі ці труднощі забезпечення безперервного шляху світла від оптоволоконного передавача до одного або кількох приймачів, підтримуючи потужний оптичний сигнал. Слід відзначити, що повністю оптичний підхід має потенціал для заміни багатоволоконних кабелів шляхом передачі ряду радіочастотних сигналів різної довжини хвилі на одному оптоволоконні одночасно, тим самим зменшуючи вагу. Крім того, повністю оптичні рішення використовують низку пасивних компонентів, таких як суматори потужності, розгалужувачі потужності та демультіплексори довжини хвилі, усі вони є пасивними пристроями та не вимагають джерела живлення. Отже, повністю оптичне

рішення потребує меншої енергії, ніж гібридні радіочастотні оптичні рішення.

Розділ 3

АРХІТЕКТУРАБОРТОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ЛІТАКІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Вступ до розділу 3

Повітряний транспорт є одним із найбезпечніших і найпопулярніших видів транспорту у світі. Літаки прагнуть рухатися швидше, комфортніше, надавати цифрові розважальні послуги. У зв'язку зі швидким розвитком комунікаційних технологій і зростанням цифрового використання в останні роки, очікування пасажирів еволюціонували, підштовхуючи авіакомпанії до надання нових послуг.

Бортова мережева інфраструктура швидко застаріває через значне збільшення швидкості передачі даних. У цьому контексті ідеальна мережева архітектура майбутньої кабіни літака повинна бути однаковою для всіх типів сигналів, протоколів і швидкостей передачі даних. Цього можна досягти шляхом встановлення оптоволоконної інфраструктури [23-25].

Вже кілька років науково-дослідні центри та виробники обладнання для салонів літаків розглядають можливість масового переходу на оптоволоконні системи, як це з'явилося в телекомунікаційних мережах кілька десятиліть тому. Вже відомо, що оптичні волокна мають багато переваг у порівнянні з сучасними мідними лініями зв'язку, а це прокладає шлях до остаточної та стійкої інфраструктури мережі салонів протягом усього терміну служби літака. У цій структурі оптичні мережі та системи мультиплексування з поділом хвиль (WDM) можуть значно покращити конструкцію та продуктивність мереж обміну інформацією в салоні літака. Програма NASA AATT (AdvancedAirTransportation Technologies) зосереджена на волоконному

транспорті ширококутових сигналів для систем авіоніки [26-28]. Проект RONIA (Requirements for Optical Networks In Avionics) визначив технічні вимоги до розробки оптичних мереж, що підтримують широкий спектр авіаційних систем, а також необхідність передачі високої пропускнуої здатності на ряді репрезентативних військових авіаційних платформ [29,30]. У Європі європейська програма FONDA (Future Optical Network Distribution for Aerospace) з 2005 по 2007 рік, а потім європейський проект FP7 DAPHNE (2009-2013) призвели до кращого визначення відповідних оптичних технологій і протоколів, адаптованих до аеронавігаційного середовища [31-33]. Однак шлях до їх масового впровадження все ще довгий, що пов'язано зі специфічними обмеженнями аеронавтики та процесом стандартизації систем літаків. Тим часом, проект DAPHNE чітко описав оптимізовані мережі кабін як такі, що з найбільшою ймовірністю призведуть до значного збільшення продуктивності та ваги. Більш того, вже кілька років авіаційна промисловість переходить на нові енергії руху, такі як водень, що дає надію на значне поліпшення екологічної поведінки літаків. Отже, енергоспоживання та вага систем мають першорядне значення, а оптичні технології можуть забезпечити ефективні рішення.

Серед усіх можливих варіантів волоконно-оптичних ліній походять не від використання багатомодового волокна для зв'язку «точка-точка», а скоріше від інтеграції одномодових волоконних технологій у справжнє оптичне середовище передачі та мережі. Ця опція дозволяє створювати велику різноманітність інноваційних архітектур оптичних мереж, зокрема «точка-багатоточка» на базі пасивної оптичної мережі (PON), продуктивність, довговічність і надійність якої вже доведені [34]. Такі мережі включають повністю оптичні компоненти та пристрої, які легко масштабуються та реконфігуруються (наприклад, мультиплексори довжин хвиль, оптичні мультиплексори додавання/скидання, оптичні перемикачі простору та розгалужувачі). Цей момент має велике значення, оскільки салон і його пасажири можуть розглядатися як невелика мережа доступу з точки

зору послуг потрійної гри в телекомунікаційному сенсі. Оптичний мережевий рівень підтримує гетерогенні швидкості сигналу та протоколи з великого набору джерел даних, з можливістю адресувати ці сигнали та протоколи на канали з високою пропускнуою здатністю, і може впоратися з різними вимогами з точки зору резервування каналу, затримки та безпеки. Рішення оптичної мережі салону має забезпечувати майбутні вдосконалення мережі без необхідності перепідключення всієї інфраструктури літака. В ідеалі оновлення до нових або вдосконалених систем має вимагати лише зміни апаратного забезпечення на кінцевих вузлах.

3.1. Особливості побудови архітектури авіоніки літака

На відміну від федеративних архітектур авіоніки, що використовують функції розподіленої авіоніки, упаковані як автономні одиниці, інтегрована модульна авіоніка (ІМА). Архітектури літаків нового покоління використовують високоцілісне, розділене середовище, яке розміщує кілька функцій авіоніки різної критичності на спільній обчислювальній платформі. Інженери компанії Boeing пішли ще далі і розробили систему CommonCoreSystem (CCS) для моделі 787, подальшу модернізацію, засновану на відкритій технології авіоніки ІМА.

По суті, CCS – це апаратно-програмна платформа, яка надає послуги обчислень, зв'язку та введення-виведення (I/O) для реалізація вбудованих систем реального часу, відомих як розміщені функції.

Кілька розміщених функцій розподіляють ресурси платформи в середовищі віртуальної системи, що забезпечується механізмами розбиття на розділи, що реалізовані як частина дизайну платформи, покладаючись на операційну систему VxWorks 653.

Це середовище розбиття віртуальної системи гарантує що розміщені функції ізольовані одна від одної, тому він підтримує високо критичні важливі додатки, але також і нижчий рівень цілісності додатків.

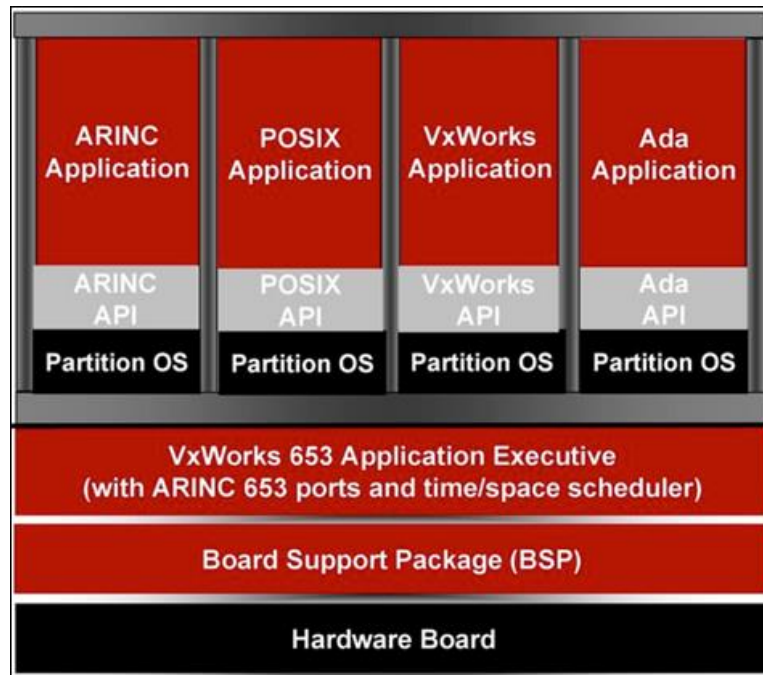


Рис. 3.1.Архітектура VxWorks 653.

В ідеалі додатки не можуть заважати кожному іншому, незалежно від несправностей, що можуть виникнути в розміщених функціях або ресурси платформи, які заздалегідь визначені та повідомлені платформі компоненти за допомогою завантажуваних файлів налаштувань, зазвичай, у форматі XML або пропрієтарні двійкові формати.

У рамках CCS ми можемо знайти такі основні компоненти:

- Модулі загальної обробки (GPM) для підтримки функціональних потреб обробки
- Віддалені концентратори даних (RDC) для підтримки системних аналогових сигналів, аналогових дискретних сигналів і послідовних цифрових інтерфейсів (CAN-шина), ARINC 429і т.д.)
- Повнодуплексний комутований Ethernetавіоніки (ARINC 664 P7) мережа для зв'язку між елементами платформи

Ці елементи можуть бути упаковані як лінійні змінні блоки (LRU) або в модулі, які потім можна згрупувати в кабінети або інтегровані LRU. Як результат, CCS складається з:

- Двох шафів із загальними обчислювальними ресурсами (CCR)

- Загальної мережа передачі даних (CDN)
- Віддалених концентраторів (RDC)

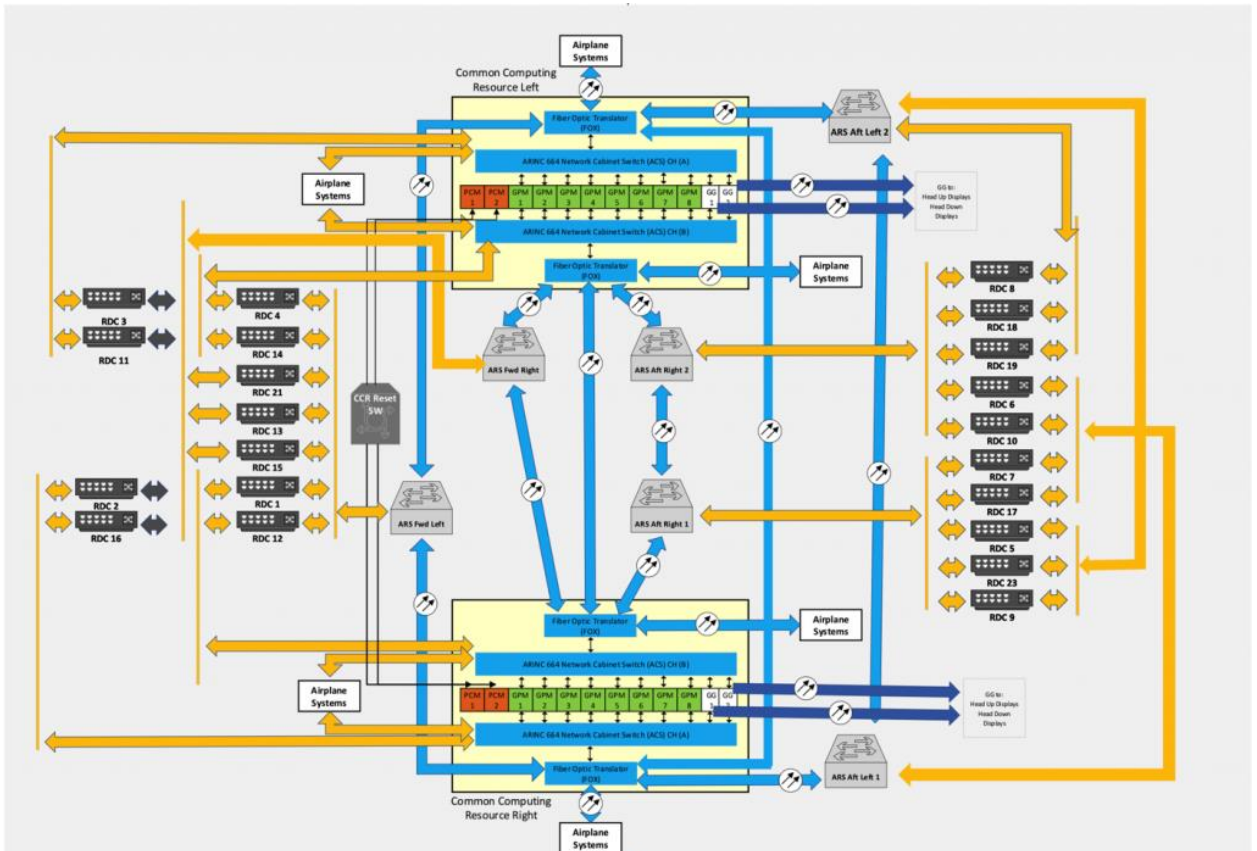


Рис. 3.2. Архітектура CCS



Рис. 3.3. Загальний вид кабінету літака Boeing 787 CCS

Кожна шафа CCR має:

- Два модулі кондиціонування живлення (PCM)
- Вісім модулів загальної обробки (GPM)
- Два комутатори мережевої шафи ARINC 664-P7
- Два волоконно-оптичні модулі-транслятори (FOX)
- Два графічні генератори (частина дисплея) та система оповіщення екіпажу)

Кожен GPM є незалежною обчислювальною платформою, на якій розміщено операційного програмного забезпечення авіаційних систем, що надає розміщеним додаткам розділене середовище на основі стандарту ARINC 653. Кожен модуль GPM має однакове апаратне забезпечення та основну операційну систему.

GPM у цих шафах CCR виконуються розміщені функції, такі як система дистанційного розподілу електроенергії (RPDS), блок керування живленням генератора/шини (GCU/BPCU), автоматичний вимикач індикації та управління, індикація та управління шасі, управління тягою функції та функції управління польотом.

Загальна мережа передачі даних CDN – це мережа Ethernet IEEE 802.3 з високою цілісністю, що використовує IP-адресацію та пов'язані транспортні протоколи (UDP). Як мережа, що сумісна з ARINC 664-P7, також реалізує детерміновані протоколи синхронізації та керування резервуванням. CDN використовує як оптоволоконний кабель, так і мідний дріт та переміщує системну інформацію між різними системами літака, підключеними до нього, безпосередньо або через ACS, FOX або RDC.

CDN складається з розміщеної мережі кінцевої системи (ES) у кожному з'єднувальному кінцевому вузлі та кількох мережевих комутаторах.

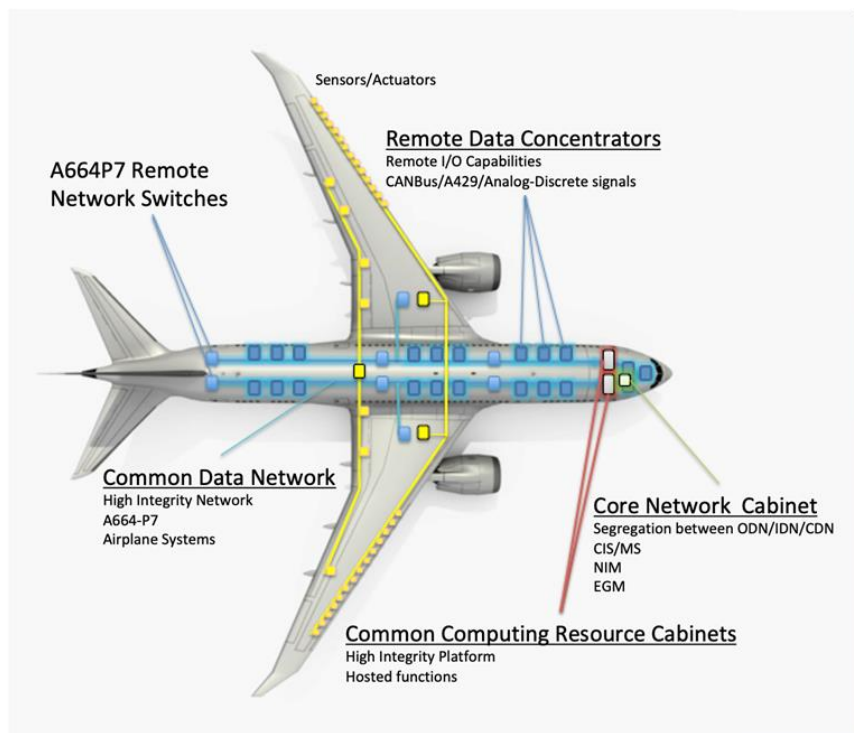


Рис. 3.4. Архітектура мережі літака 787

3.2. Кінцеві системи оптоволоконної мережі

У контексті мережі авіоніки, як визначено в специфікації ARINC 664-P7, вказано, що: основною функцією EndSystem (ES) є надання послуг, що гарантують безпечний і надійний обмін даними з програмним забезпеченням розділу.

По суті, ES бере на себе роль мережевого контролера інтерфейсу (NIC), що здатний підтримувати комунікаційні порти (черга, вибірка або SAP) для повідомлень, написаних і прочитаних декількома розміщеними Додатками. Це виконується шляхом обміну кадрами Ethernet через віртуальний канал (VL), який є концептуальним об'єктом комунікації, що визначає логічне односпрямоване з'єднання від одного джерела до одного або декількох цільових кінцевих систем ES. Об'єкт потік трафіку в VL має форму, що не перевищує налаштовану смугу пропускання AllocationGap (BAG), який являє собою мінімальний інтервал часу між першими бітами двох послідовних кадрів (рис. 3.5).

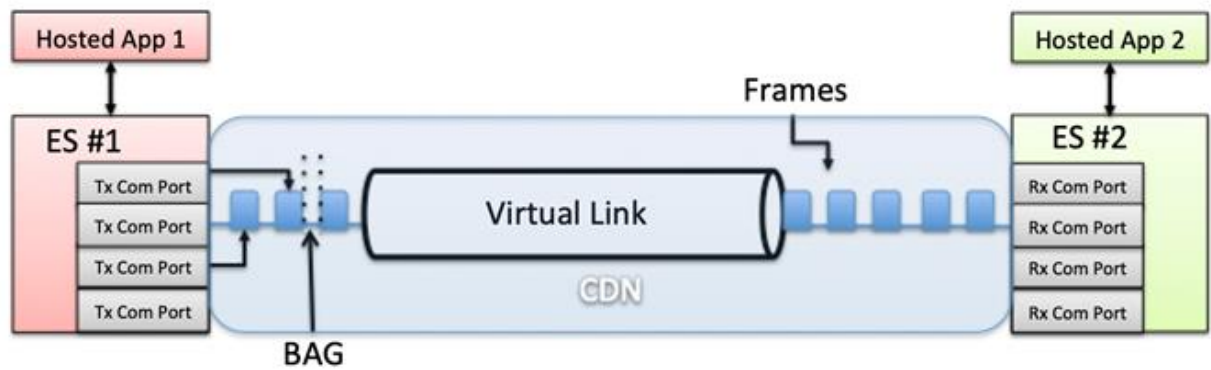


Рис. 3.5. Зв'язок ES в CDN

Кінцева система ES, що працює в CDN (також в комутаторах) – фізично відокремлена від хост-процесора, що взаємодіє через шину PCI (рис. 3.6). З точки зору високого рівня, вона складається з:

- Одного кастомного ASIC
- Двох трансиверів COTS Ethernet PHY
- Двох систем пам'яті послідовної конфігурації
- Пам'яті RAM.

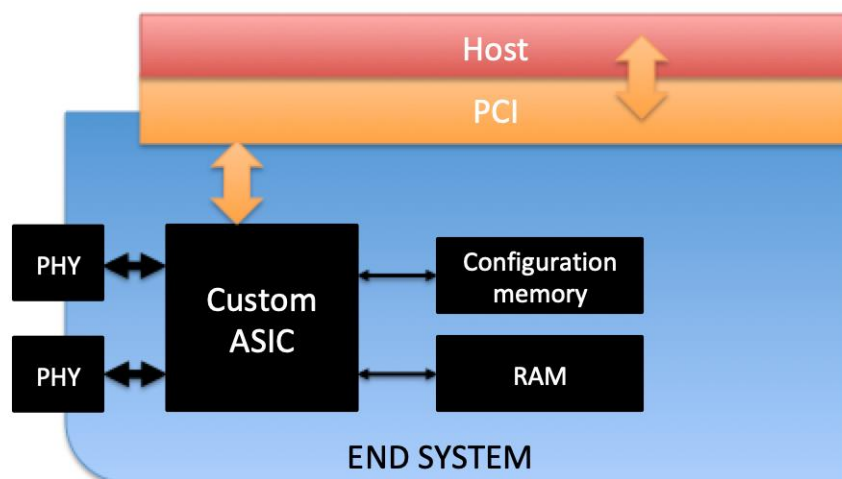


Рис. 3.6. Високорівневий огляд кінцевої системної плати

Кінцеву систему ES можна налаштувати з хоста через фірмовий API. Ці дані конфігурації були раніше згенеровані за допомогою Інструменту DO-178B Level-A (ESBIN), а потім збережені у спеціальному файлі (es_config.bin).

ES в CDN-комутаторі реалізує приблизно ту ж саму функціональність, за винятком деяких операцій адресації та резервування.

У CCS налічується 21 віддалений концентратор RDC.

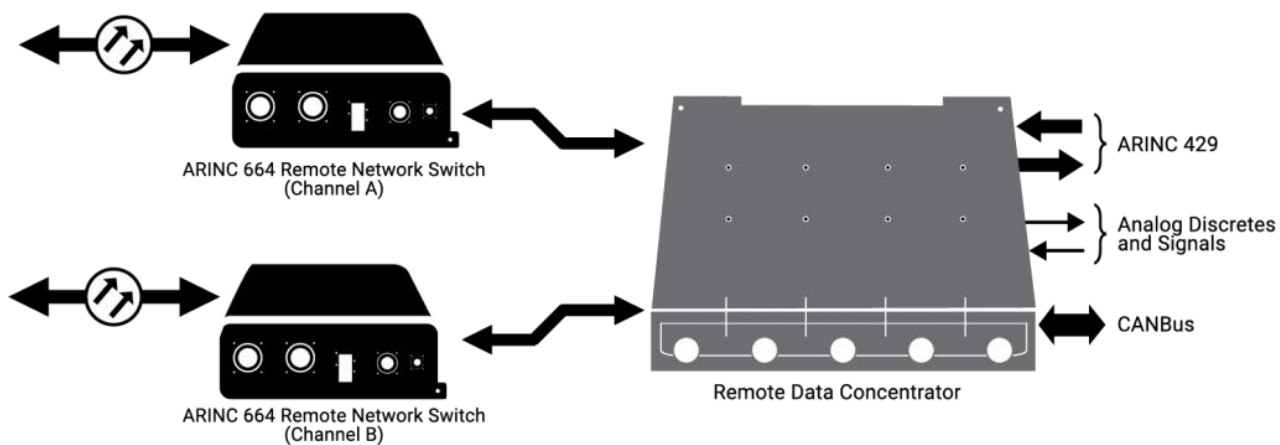


Рис. 3.7. Віддалені концентратори даних

Ці RDC забезпечують інтерфейс між системами літаків які не мають можливості підтримувати ARINC 664-P7 у CDN.

RDC перетворюють ці сигнали в дані ARINC 664 і навпаки, таким чином ефективно діючи як шлюз для різноманітних аналогових пристроїв, такі як датчики або клапани, шини ARINC 429 і підмережі CAN.

З точки зору ARINC 664-P7, ці RDC відображають:

- Аналогові сигнали до параметрів
- ARINC 429 до комунікаційних портів
- CAN-шина як за параметрами, так і за зв'язком портів

В результаті, високорівнева архітектура буде мати вигляд, як показано на рис. 3.8.

Щоб краще проілюструвати це архітектури в цілому, ми можемо спростити одну з розміщених функцій, щоб побачити як всі частини працюють разом.

Програмне забезпечення для управління шасі працює в одному з CCR, розміщеному в розділі GPM. Цей розміщений функціональний розділ отримує дані про підйом/опускання важеля перемикання передач, а також

дані про положення шестерень і дверей коробки передач з одного з 21 RDC через CDN.

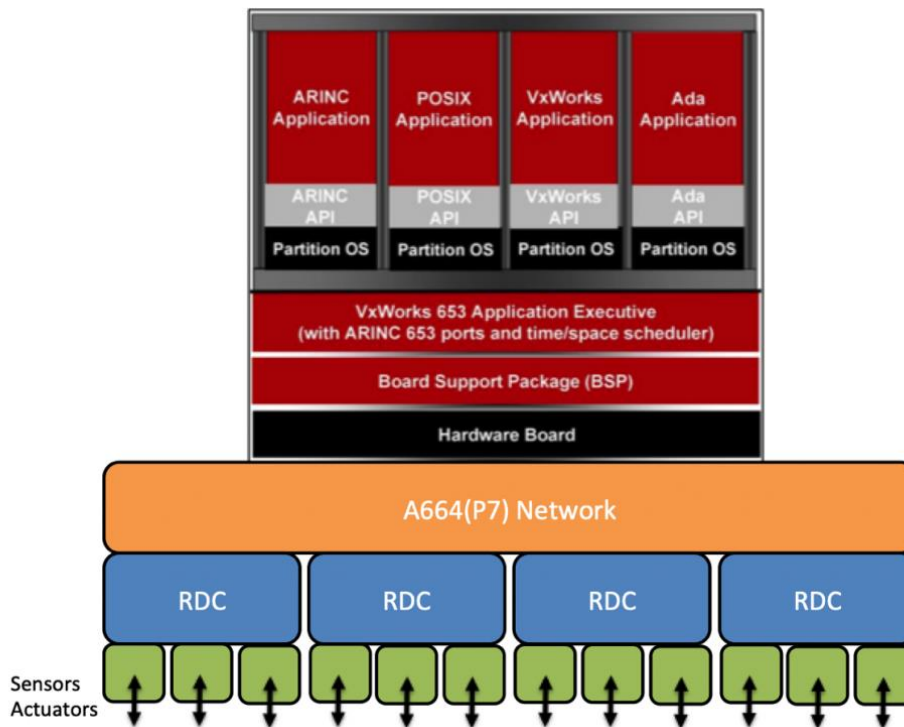


Рис. 3.8. Високорівневий вид апаратної платформи CCS

Потім, залежно від отриманих сигналів, програмне забезпечення управління шасі може видавати команди послідовності передач на відповідний RDC через CDN. Потім RDC може передавати конкретний сигнал тим виконавчим механізмам, які, наприклад, подають напругу на регулюючі клапани для втягування та висування шасі або відкриття та закриття дверей редуктора.

3.3. Побудова широкопугової оптичної мережі літаків

Протягом останнього десятиліття мідні мережі, встановлені в кабінах літаків, виявилися нездатними підтримувати нові технології та послуги протягом усього терміну служби літака. У зв'язку з серйозними обмеженнями та високими витратами на технічне обслуговування в авіаційній галузі також спостерігається значне збільшення ваги літака і, отже, споживання палива

при поточній інфраструктурі салону. Для того, щоб подолати ці проблеми, пропонуючи найкращий компроміс з точки зору гетерогенного транспортування послуг, ми пропонуємо різні архітектури оптичних мереж для майбутніх кабін цивільних літаків, що поєднують мультиплексування з поділом часу від точки до кількох точок через пасивні оптичні мережі з технологією мультиплексування з поділом по довжині хвилі. Ці архітектури пропонують перспективні рішення для комерційних літаків місткістю до 500 місць, дозволяючи при цьому значно знизити експлуатаційні витрати та час на технічне обслуговування/встановлення, таким чином полегшуючи втручання в літак.

Комунікаційна інфраструктура, розгорнута в салоні літака, передбачає взаємозв'язок архітектури систем салону, розважальних систем (IFE: In-FlightEntertainment) і зовнішніх систем зв'язку. Ці різні системи використовують різні типи сигналів і протоколів, які є досить специфічними. Основні шини даних і протоколи, розгорнуті в салоні літака: дискретні, CAN (ControllerAreaNetwork), Ethernet, RF (радіочастота) і RS485. Вони встановлюються між процесинговими центрами трьох згаданих вище систем і вузлами зв'язку, встановленими в салоні. Аналіз даних шин і протоколів, розгорнутих в салоні, також вимагає детального вивчення всього обладнання салону в зв'язку. У зв'язку з цим інвентаризація обладнання кабінного терміналу необхідна для визначення розмірів вимог до інтерфейсу та сигналів, що передаються в мережі. Це дослідження було проведено для двох типів повітряних суден: однопрохідних (S/A) та двопрохідних (T/A).

Поточна архітектура взаємозв'язку в салоні являє собою зіставлення трьох систем, що передають потоки різної природи: зовнішні системи зв'язку, кабінні системи та розважальні системи для транспортування різних потоків даних і протоколів з метою забезпечення мульти-сервісів, розгорнутих в салоні. Ці послуги розгортаються через окремі мережі, використовуючи канали зв'язку «точка-точка» по мідних кабелях. Схема на рис. 3.9 показана

поточна архітектура мережі, яка використовується для з'єднання трьох підсистем кабіни.

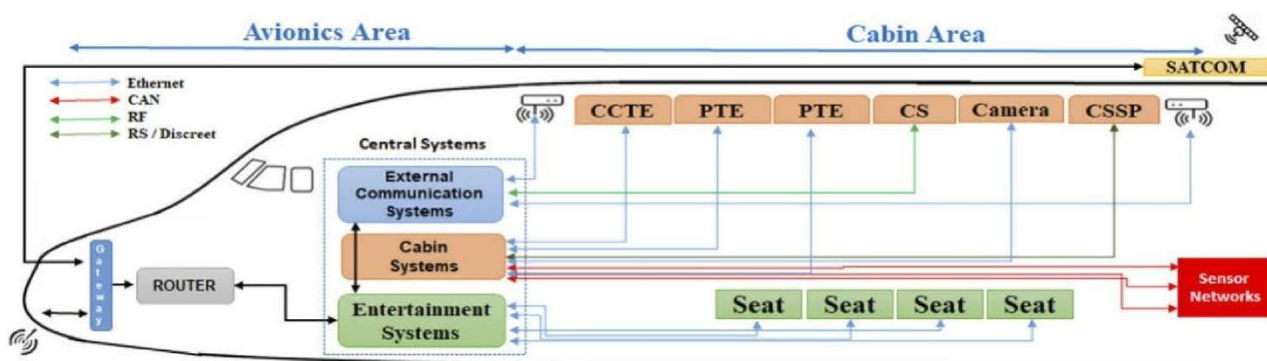


Рис. 3.9. Сучасна мідна архітектура мережі кабіни

Основною метою даної роботи є пропозиція архітектур оптичних мереж для кабіни нового покоління цивільних літаків. Переваги подвійні: перспектива набагато більша пропускна здатність і значно менша вага та займана площа в порівнянні з поточними мідними рішеннями. Ці архітектури, очевидно, повинні враховувати сучасні технології бездротової передачі та нові послуги, а також зростаючі потреби персоналу літака з точки зору відеоспостереження та допомоги пілотуванню за межами літака. Мережева інфраструктура базується на класичній «трирівневій» моделі, що виходить зі сфери телекомунікацій, а саме ядра, розподілу та доступу. Згідно з цією ієрархічною моделлю, трирівнева мережа представлена тут конкретними функціональними одиницями, а саме HUB, NDB (NetworkDistributionBox) і PDB (PassengersDistributionBox). Основний драйвер для цієї нової мережевої архітектури (зображений на рис. 3.10) це обопільність розподілу даних через HUB, встановлений на чолі мережі. HUB обробляє всі типи протоколів/даних, що надходять із центральної системи, перш ніж вони будуть маршрутизовані через унікальну оптичну розподільну мережу. HUB, NDB та PDB оптично послідовно пов'язані між собою та розташовані на певних ділянках. Такий принцип прокладання кабелів значно зменшує кількість каналів, необхідних для з'єднання всіх систем і кінцевого комунікаційного обладнання. Це також гарантує їх надмірність і, отже,

стійкість архітектури до збою зв'язку. Різні потоки даних, що циркулюють у кабіні, виходячи з головки мережі HUB, потім проходять до стелі, де досягають NDB для зв'язку стельових пристроїв (системи кабіни). Потім NDB з'єднуються з PDB на підлозі, живлячи один або кілька рядів сидінь.

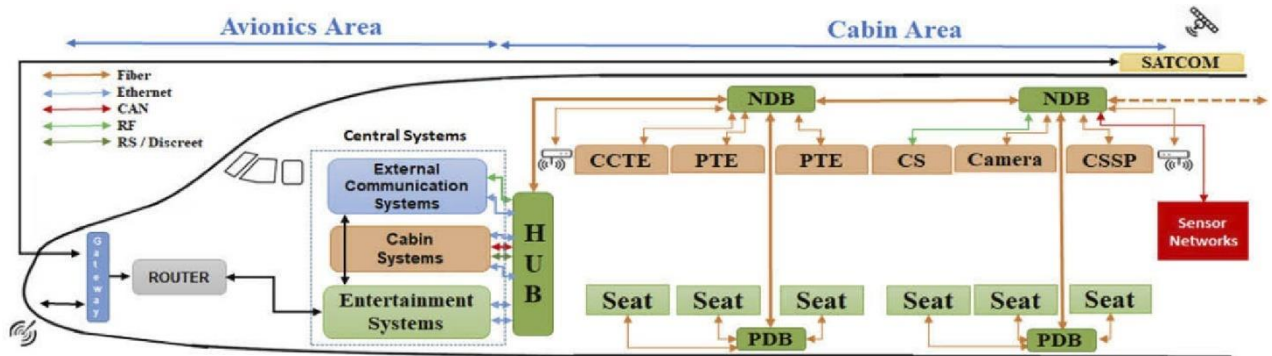


Рис. 3.10. Нова архітектура мережі оптичної кабіни

PDB розташовані близько до сидінь, у найнижчій частині салону, щоб зменшити довжину кабелю доступу, а отже, його складність та вагу. Крім того, ця кабельна інфраструктура може бути додатково оптимізована за рахунок зменшення кількості волокон і в той же час повинна забезпечувати високу пропускну здатність і високу швидкість передачі для створення надшвидкої мережі зв'язку. Цього можна досягти, об'єднавши волоконно-оптичні технології TimeDivisionMultiplexing та WavelengthDivisionMultiplexing, які приносять нашій мережі інші переваги, такі як:

- Прозорість мережевого протоколу – мережі WDM підтримують безліч різних сигналів і протоколів.
- Масштабована мережа з високою пропускну здатністю – мережі WDM можуть підтримувати велику кількість каналів високої пропускну здатності, які можуть бути додані в міру зростання трафіку без будь-яких серйозних змін.
- Гнучкість, безпека та можливість повторного налаштування – WDM зменшує складність підключення фізичного рівня, зменшуючи або усуваючи накладання кабелів, тоді як TDM може динамічно змінювати пропускну

здатність виділеної довжини хвилі, щоб забезпечити високу гнучкість та ефективність передачі сигналу.

Крім того, гнучкість мережі все ще може бути досягнута за допомогою функцій WDM, таких як реконфігуровані оптичні мультиплексори додавання (ROADM).

ROADM як архітектура вузла є ключовим компонентом у цьому контексті. Він дозволяє додавати та скидати канали WDM у точці вузла та може бути віддалено переналаштований для зміни маршрутизації каналів. У нашій архітектурі ROADM встановлюються в лінію зв'язку WDM, щоб створити оптичний транспортний рівень, який є багатоцільовим, автоматизованим, гнучким і легко дистанційно керованим [35]. Ще одним ключовим моментом для економії обладнання є впровадження багатоточкової архітектури (наприклад, PON) скрізь, де це можливо. Таким чином, можна значно скоротити кількість оптичних інтерфейсів. Звичайно, бітрейт роботи вищий, але збільшення енергоспоживання на один інтерфейс є помірним у порівнянні з економією, яку приносить зменшення кількості активних пристроїв. Ця архітектура, зокрема, адаптована до Ethernet-з'єднання пасажирських сидінь для мультимедійного контенту, трафік якого дуже схожий на той, що зустрічається в наземних PON. Нарешті, захисні механізми на фізичному рівні також можуть бути реалізовані за допомогою розмаїття фізичних маршрутів і оптичних перемикачів.

3.4. Конфігурації оптичної мережі

Дотримуючись підходу попереднього підрозділу, ми представимо та опишемо деякі архітектури оптичних мереж, придатних для кабін цивільних літаків. Ці пропозиції повинні враховувати всі обмеження, пов'язані з геометрією і топологією кабіни, кабелями і методами розгортання обладнання, більш суворими екологічними вимогами, ніж ті, які зазвичай

зустрічаються в телекомунікаціях, а також різні типи даних, що передаються в цих мережах.

Відповідно до принципу оптичного транспорту шин даних, мережеві інфраструктури, запропоновані в нашій роботі, повинні гарантувати перетворення низькошвидкісних цифрових RS і дискретних сигналів в Ethernet, а також оптичне транспортування аналогових радіочастотних і CAN-послуг. Як наслідок, кожен HUB і NDB завжди включають ці модулі перетворення, оскільки всі ці протоколи є внутрішньою нативною апаратурою. Крім того, робота над запропонованими архітектурами мотивована наданням нових інфраструктурних послуг для авіакомпаній, які можуть становити великий інтерес, таких як: (1) просте управління мережею, (2) простіша конфігурація салону та (3) швидша установка та/або обслуговування архітектури. Ці нові послуги можуть змінити правила гри, щоб запропонувати архітектуру, сумісну з будь-яким типом літака, будь то виробник або кількість місць. У цій структурі чотири конфігурації архітектур оптичних мереж, адаптованих до кабін цивільних літаків на основі комбінації технологій WDM і PON, описані в наступних підрозділах.

Перша запропонована мережева архітектура (так званий варіант А) заснована на пасивних оптичних мережах «точка-багатоточка» (PON) для транспортування Ethernet. Ця архітектура використовує елементи розщеплення оптичної потужності (відгалужувачі) для підключення NDB до декількох PDB. Будучи пасивними, ці пристрої не живляться від електрики і не містять ніякої електроніки, що є дуже сильною гарантією надійності. Частина «точка-точка» призначена для транспортування CAN/RF/NAS, кожен на спеціальному оптичному волокні, щоб відокремити високошвидкісні шини передачі даних (EthernetBus) від детермінованих шин керування та команд за нижчою швидкістю (наприклад, CAN). Тут зроблено вибір на користь транспортування потоків даних до NDB з різними PONs і, отже, з використанням різних волокон.

На рис. 3.11 показана функціональна структура та розподіл інтерфейсів для HUB, NDB та PDB з такою архітектурою. Тоді для підключення NDB до HUB потрібне одне двонаправлене оптичне волокно (без урахування захисних ланок), і кожен NDB з'єднаний з двома PDB, які самі з'єднані з сидіннями (кожен PDB з'єднаний з 12 місцями). Вибір кількості PDB на NDB і кількості місць на PDB був зроблений після вивчення їх впливу на складність обладнання та прокладання кабелів, які будуть реалізовані в обмеженому просторі, доступному в підлозі салону.

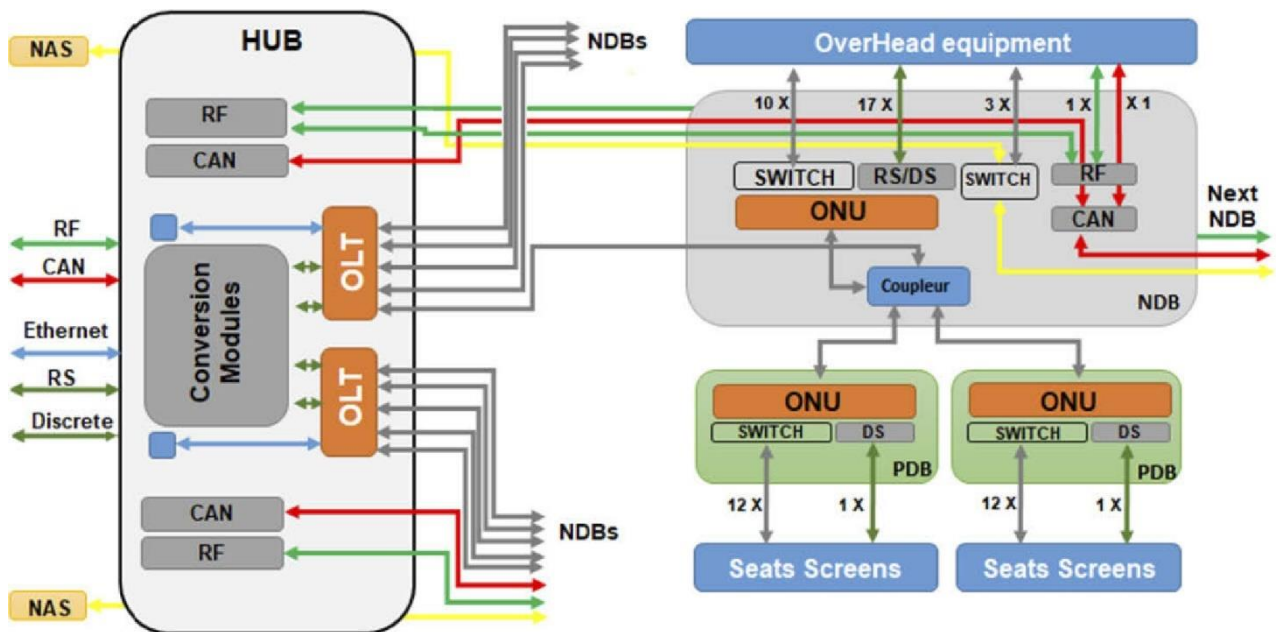


Рис. 3.11. Варіант А: Структурна схема для архітектури PON, що включає HUB, NDB і PDB.

Інтерфейс оптичного лінійного терміналу (OLT) PON на стороні мережі розміщується на концентраторі, а клієнтські інтерфейси оптичного мережевого блоку (ONU) — на NDB і PDB. Один ONU на NDB для стельового обладнання салону та один ONU на PDB для підключення сидінь. Слід зазначити, що ONU інтегрує концентратор трафіку Ethernet, що дозволяє мультиплексувати потоки на лінії OLT-ONU. Їх характеристики бітрейту розраховуються відповідно до потреб різного підключеного обладнання та параметрів розподілу трафіку.

3.5. PON + WDM-двоволоконна архітектура

Наступна пропозиція (варіант Б) спрямована на мінімізацію кількості волокон і інтерфейсів підключення, розгорнутих за допомогою мультиплексування з поділом по довжині хвилі. Ця архітектура розділена на дві різні підмережі. Як і варіант А, деталь «точка-багатоточка» транспортує потоки даних до NDB за допомогою різних PONs за допомогою спеціальних оптичних волокон. Потім використовується WDM-канал для транспортування RF/CAN/NAS на одному оптичному волокні, але з певним оптичним каналом (довжиною хвилі) для кожної послуги. На рис. 3.12 показана функціональна структура та розподіл інтерфейсів для HUB, NDB та PDB для цієї архітектури.

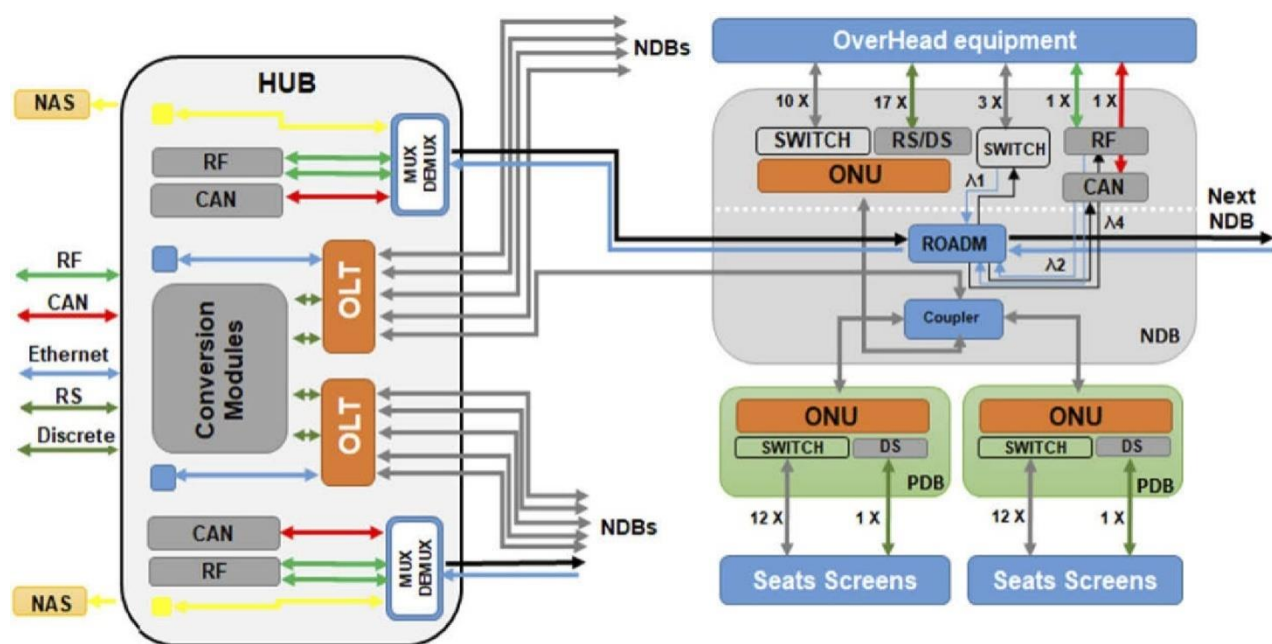


Рис. 3.12. Варіант Б. Структурна схема для архітектури PON + WDM-Dual-Fiber, включаючи HUB, NDB і PDB

Інтерфейс OLT (тобто мережевий) PON, а також два оптичні MUX/DEMUX (4 канали) розташовані в HUB. Інтерфейси ONU розміщені на NDB і PDB. Один ROADM використовується на кожному NDB для спрямування трафіку, що надходить від HUB мультиплексуєючої частини,

тоді як оптичний відгалужувач відокремлює або збирає оптичний сигнал PON. Трафік переміщується до NDB, в якому ROADM керує трьома каналами додавання/скидання довжини хвилі: один для NAS, другий для CAN і третій для RF. Аналогічно до частини PON, одне волокно на NDB проходить через муфту для поділу/групування потоків на три частини: одна ONU на NDB для стельового обладнання kabіни та одна ONU на PDB для підключення комплекту з 12 сидінь.

3.6. Двохволоконна архітектура PON/WDM

Третій варіант (варіант С) спрямований на мультиплексування всіх сигналів PON на одному волокні, щоб ще більше зменшити загальну кількість використовуваних волокон. Ця схема заснована на оптичній архітектурі «точка-багатоточка» пасивних мереж PON з WDM, використовуючи по одному оптичному волокну для кожного напрямку передачі. Таким чином, тут робиться вибір транспортувати потоки до різних NDB за допомогою різних PON, але з одним і тим же оптичним волокном. На рис. 3.13 показана функціональна структура та розподіл інтерфейсів для HUB, NDB та PDB з такою архітектурою.

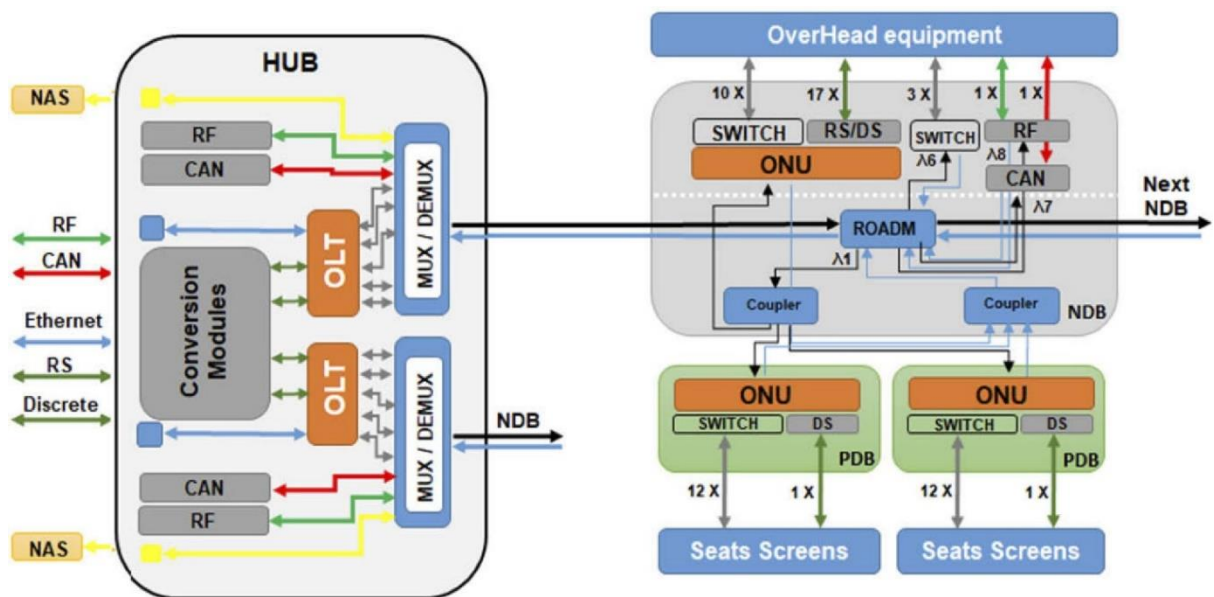


Рис. 3.13. Варіант С: Структурна схема для архітектури PON/WDM Dual-Fiber, включаючи HUB, NDB і PDB.

Інтерфейс OLT PON, а також два MUX/DEMUX розміщені в HUB. Вісім довжин хвиль проходять через один MUX, щоб перегрупувати їх в одне вихідне волокно для кожної сторони салону і для одного напрямку передачі. Інтерфейси ONU розміщені на NDB і PDB. Кожен NDB має ROADM і два зчеплення для маршрутизації трафіку, що надходить з HUB.

На рівні NDB ROADM використовується для спрямування чотирьох оптичних каналів, що надходять від концентратора, до відповідного місцевого обладнання:

- Одна довжина хвилі, виділена для кожного PON (λ_1 на рис. 3.13) подається на пасивну муфту для живлення трьох ONU. Два з них розміщуються в двох місцевих PDB (один PDB, що з'єднує 12 місць), а третій розміщується в NDB для підключення верхнього обладнання кабіни.
- Три довжини хвиль каналу (λ_6, λ_7 і λ_8 на рис. 3.13) використовуються для NAS, CAN і радіочастотного транспорту відповідно.

3.7. Архітектура WDM

Ця архітектура (варіант D) спрямована на просторове розділення оптичної інфраструктури на дві окремі мережі: ODN (OverheadDistributionNetwork) і SDN (SeatDistributionNetwork) на двох різних фізичних носіях для полегшення управління різними сигналами, що циркулюють в салоні. Ця архітектура заснована на WDM з двома оптичними волокнами для кожного напрямку передачі. На рис. 3.14 показана відповідна функціональна структура та розподіл інтерфейсів для HUB, NDB та PDB. За цієї опції в HUB розміщуються чотири комутатори та чотири 8-канальні MUX/DEMUX.

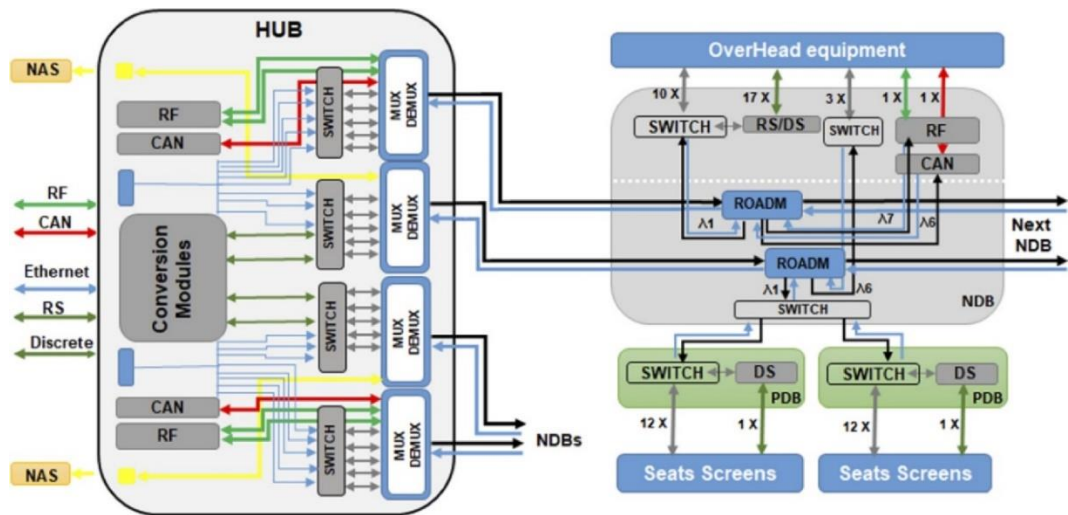


Рис. 3.14. Варіант D: Структурна схема для архітектури WDM, включаючи HUB, NDB і PDB

Два ROADM для кожного NDB спрямовують трафік, що надходить від HUB, а комутатор Ethernet ділиться або перекомпонує сигнали від або до двох PDB. Тут робиться вибір на користь транспортування потоків до різного пункту призначення NDB на двох різних волокнах. Одне оптичне волокно транспортує потоки до обладнання, CAN і RF. Інше волокно призначене для транспортування даних до PDB та частини NAS (камери та відеопроєктори).

Отже надалі переходимо до порівняльного дослідження продуктивності різних запропонованих конфігурацій з використанням набору критеріїв.

3.8. Аналіз параметрів мережі

У цій частині проводиться порівняльне дослідження різних варіантів на основі розмірних параметрів, що включають топологію та складність архітектури. Основні критерії порівняння цих архітектур перераховані нижче.

Кількість волокон, що використовуються на одну архітектуру, є важливим критерієм в авіаційній галузі для визначення типу, діаметра і ваги кабелів. Підрахунок залучених ресурсів може бути здійснений за допомогою архітектурних схем, представлених вище. Результати, показані на рис. 3.15 підтверджують, що гібридна архітектура PON/WDM використовує

найменшу кількість оптоволокна, тоді як чиста архітектура PON споживає найбільше.

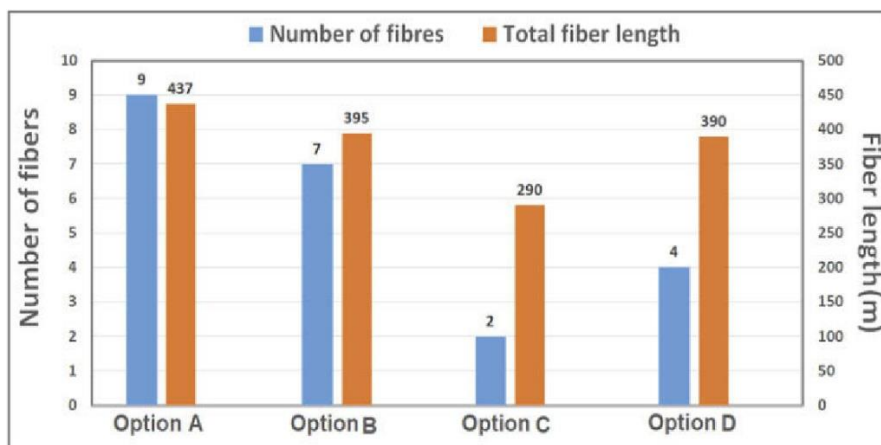


Рис. 3.15. Кількість волокон на шляху - Загальна довжина волокна, що використовується для різних архітектур

Потім була зроблена оцінка довжини оптоволокна на основі набору критеріїв, пов'язаних з конструкцією кабіни, кабельною трасою і розмірами однопрохідної кабіни на 240 місць довжиною 30 метрів, шириною 6 метрів і висотою 3 метри, обраної для нашого дослідження. На рис. 3.15 показана та ж класифікація, якщо ми обчислимо загальну довжину оптоволокна, яка використовується на відповідну архітектуру, робить гібридну архітектуру PON/WDM найкращим кандидатом для зменшення розміру та площі оптичного кабелю.

Висновки до розділу 3

Інтерес переходу від мідних кабелів до оптичних мереж у кабінах цивільних літаків з метою забезпечення високопродуктивної, гнучкої, безпечної та перспективної інфраструктури, що відповідає як екологічним вимогам, так і авіаційним стандартам. Ми почали наше дослідження з визначення різних сервісів і протоколів, що використовуються в салоні літака, і різних обмежень для розвитку цієї мережі. Потім ми представили панель загальних архітектурних варіантів з використанням WDM і систем point-to-multipoint, які є особливо ефективними в оптичній сфері. Потім ми

провели порівняння продуктивності на основі статичних параметрів, щоб вибрати найбільш перспективні архітектури.

В якості першого кроку до переходу до майбутніх рішень ми оцінили різні конфігурації системи з точки зору якості сигналу за допомогою чисельного моделювання оптичної передачі в попередньо вибраних архітектурах. Порівняльне дослідження показало, що жодна з архітектурних схем не випереджає інші з чисто технічної точки зору. Навпаки, кожне рішення має переваги перед іншими, якщо ми прийнемо більш різноманітний набір критеріїв. Однак поєднання технічних обмежень авіаційної промисловості та багатокритеріального аналізу, призвело до вибору двох гібридних архітектур (PON/WDM та PON + WDM).

Розділ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Вступ до розділу 4

При реалізації запропонованих рішень у попередньому розділі не була розроблена якісна оцінка продуктивності з точки зору високошвидкісної трансмісії. Дійсно, оптичні мережі нового покоління повинні мати можливість підтримувати поточні та майбутні послуги зі швидкістю передачі даних 10 Гбіт/с і вище. Ці бітрейти недоступні для сучасних технологій на основі міді навіть на коротких відстанях у салоні. Метою цього розділу є оцінка якості оптичної передачі різних запропонованих мережевих архітектур, а точніше двох.

Чисельне моделювання дозволяє реалістично будувати та тестувати різні середовища завдяки використанню фізичних моделей різних оптичних компонентів, що використовуються (волокна, лазери, фільтри, MUX/DMUX,

ROADM, фотодетектори). Ще однією перевагою чисельного моделювання є можливість побудови складних систем, що включають велику кількість ланок і компонентів (кілька сотень), без необхідності вдаватися до реалізації громіздких і дорогих прототипів. Для цього використовується платформа цифрового фотонного моделювання VPI TransmissionMaker [36].

Для проведення дослідження оптичного розгалуження і моделювання процесів в демультиплексорі WDM скористаємося програмою для систем автоматичного проектування (САПР) VeamPROP.

4.1. Особливості моделювання волоконно-оптичних систем

Вибір точних моделей фізичних компонентів для моделювання є ключовим елементом для побудови та тестування різних мережевих каналів. Одним з найважливіших компонентів є лазерне джерело, яке має бути адаптоване до передачі WDM по одномодових волокнах, що вимагає використання DFB-лазерів [35-36]. Економічно ефективна схема прямої модуляції моделюється за допомогою моделі VPI, яка легко налаштовується за допомогою даних вимірювань, зроблених на реальних лазерах. Бітрейт встановлений на рівні 10 Гбіт/с із середньою потужністю, що передається 1 мВт при еталонній температурі 25°C. На іншому кінці ланцюга модель приймача включає лавинний фотодіод (APD) [36] з чутливістю 0,8 А/Вт і $5,10^{-12}$ Спектральна щільність теплового шуму А/√Гц. Цей модуль може працювати як з одномодовими, так і з багатомодовими оптичними сигналами, а також використовуватися для моделювання систем CWDM. Його можна описати на основі заздалегідь визначеної чутливості, лавинного множення, темної течії та шуму. Крім того, враховується пропускна

здатність приймача і температурна залежність за допомогою еквівалентної RC-схеми.

Часове вікно моделювання налаштовано на генерацію 2048 псевдовипадкових бітових послідовностей зі швидкістю 10 Гбіт/с із смугою пропускання моделювання 160 ГГц. У цьому моделюванні ми розглядаємо 8 оптичних каналів стандарту CWDM (Coarse WDM) з довжинами хвиль від 1470 нм до 1610 нм, використовуючи неохолоджувані лазери, які споживають менше енергії та дешевші, ніж їх аналоги DWDM (Dense WDM) [37-39]. Для реалізації симуляцій ми будемо всю структуру кожної архітектури, включаючи всі ланки та компоненти, за допомогою реалістичних фізичних моделей. Кожен окремий компонент розміщується в потрібному місці в салоні.

Роз'єми моделюються ідеальними атенюаторами, в той час як компоненти мережі, що фільтрують довжину хвилі, такі як MUX/DEMUX і ROADM, описуються підсистемами VPI (галактиками) за допомогою оптичних фільтрів, що налаштовуються, суматорів/розгалужувачів потужності та атенюаторів. На рис. 4.1 показана загальна структура ROADM, встановленого в лінію з двоволокнистою ланкою WDM, в той час як на рис. 4.2 показаний ескіз конструкції ROADM, реалізований в VPI.

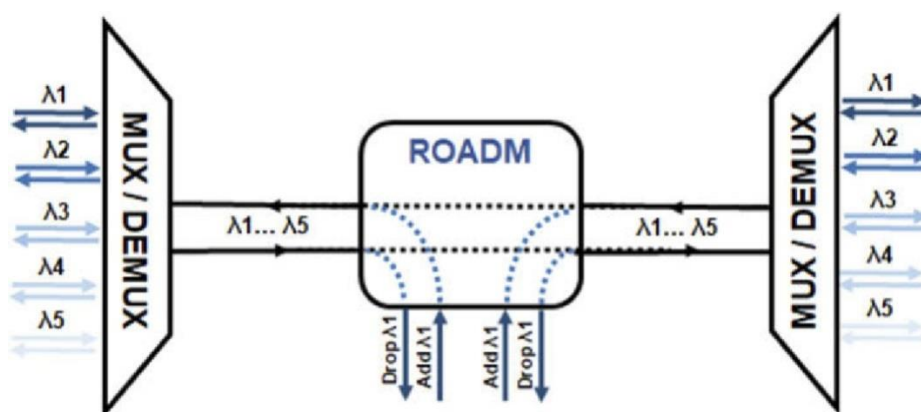


Рис. 4.1. Загальна конструкція двоволоконної лінії WDM з використанням ROADM з 1-канальним додаванням/скиданням.

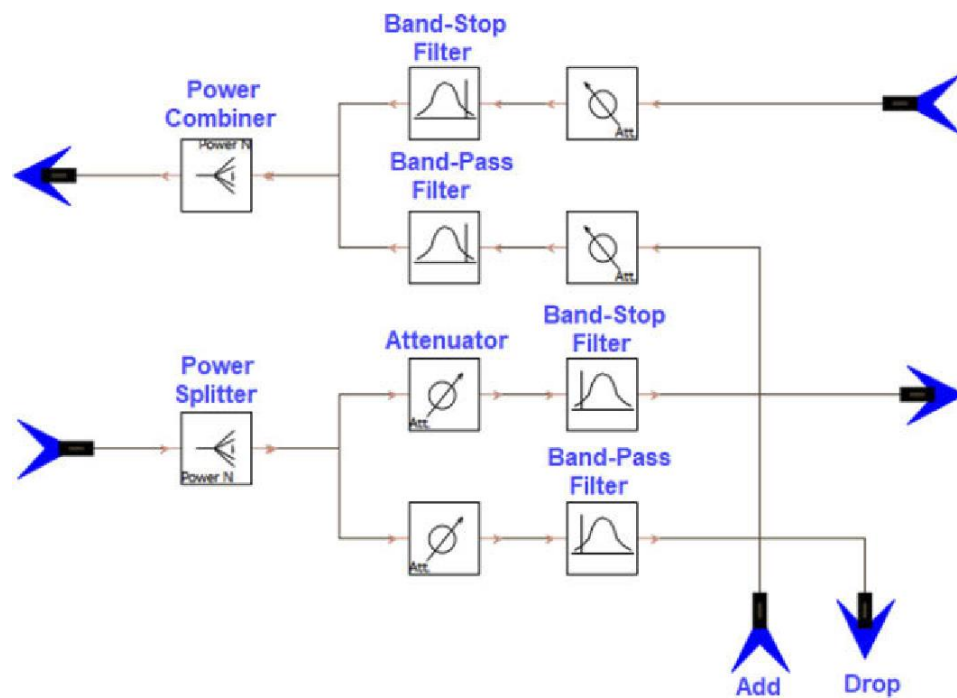


Рис. 4.2. Ескіз конструкції ROADM VPI з одноканальним додатком/скиданням, використовуючи двонаправлену архітектуру трансляції та вибору

Ця базова одноканальна структура додавання/скидання може бути легко розширена до багатоканальної у спосіб, який можна переналаштувати. Ця класична конструкція ROADM з використанням оптичних фільтрів за схемою «трансляція та вибір» дозволяє нам ефективно реалізовувати специфічні шаблони довжин хвиль компонентів CWDM (наприклад, кілька сотень ГГц смуги пропускання), забезпечуючи при цьому низькі втрати при низьких витратах. Крім того, гнучкість визначення параметрів, що забезпечується цією «розділеною» структурою, дозволяє ефективно контролювати зміни фізичних параметрів відповідно до умов навколишнього середовища. Цей критерій має вирішальне значення в авіаційній сфері.

Автоматизоване збирання та реконфігурація цих модулів досягається за допомогою скриптів, розроблених на Python. Профіль оптичного фільтра можна визначити або аналітично з набору широко використовуваних фільтрів, або за допомогою імпортного файлу експериментальних вимірювань на реальних фільтрах. Ми використовуємо тут аналітичний

метод у першому підході, але щоб наблизитися до реальних умов і додати правдоподібності змодельованим результатам, ми використовуємо надгаусові фігури третього порядку шириною 400 ГГц (FWHM). В якості моделі волокна ми використовуємо VPI «Універсальний модуль волокна». Ця комплексна модель включає як лінійні, так і нелінійні ефекти: модальну та хроматичну дисперсію, стимульоване та спонтанне комбінаційне розсіювання та нелінійність Керра. У векторному режимі вона включає PMD і поляризаційну залежність нелінійних ефектів. Коротка відстань і помірна оптична потужність салону літака дозволяють нам деактивувати ці нерелевантні фізичні параметри, щоб прискорити моделювання.

У сучасному контексті прозорих оптичних ліній, що реалізують каскадування потенційно великої кількості компонентів, вивчення діаграми очей при прийомі є першим кроком у перевірці якості цифрового зв'язку. Діаграма очей являє собою кумулятивний результат отриманої форми сигналу в одиничному інтервалі. Він показує, як отриманий сигнал коливається на приймачі, залежно від спотворень, спричинених різними фізичними ефектами, такими як втрата потужності, хроматична дисперсія, перехресні перешкоди каналу та тепловий або дробовий шум. Таким чином, продуктивність високошвидкісного каналу графічно оцінюється на діаграмі очей за допомогою основних характеристичних параметрів, які можна безпосередньо спостерігати на виявленому струмі, включаючи середні значення «0» і «1» і дисперсію (позначаються відповідно $i_0, i_1, \sigma_{02}, \sigma_{12}$), що вказує висоту/ширину ока, тремтіння та відсоток перетину. Моделювання двоволоконної архітектури PON/WDM представлено на рис. 4.3, для формату модуляції ООК з бітрейтом 10 Гбіт/с.

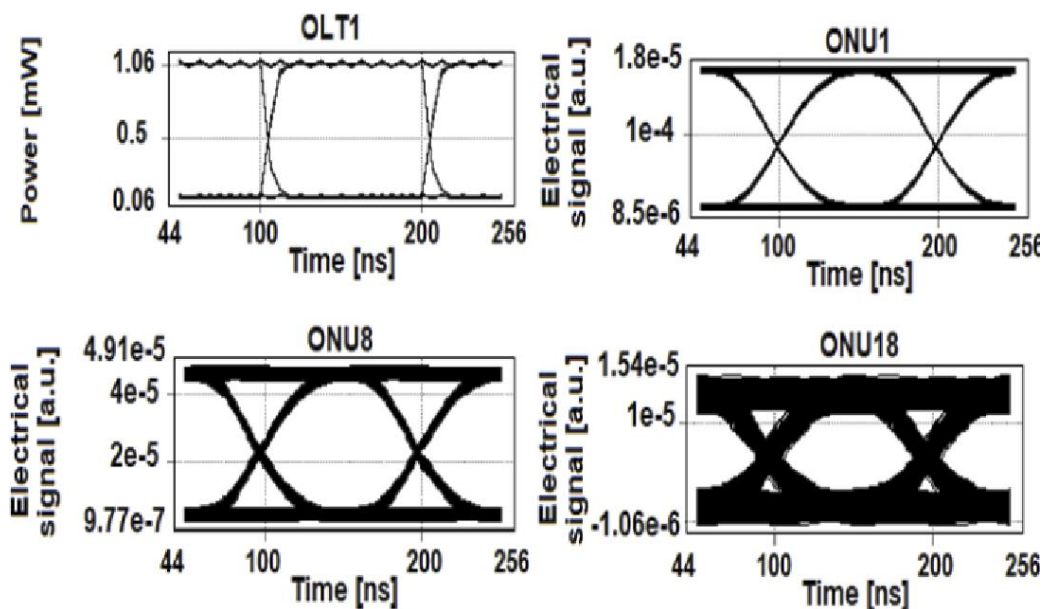


Рис. 4.3. Оптичний сигнал, що випромінюється OLT1 - Електричні сигнали, отримані відповідно ONU 1, 8 і 18 архітектури PON/WDM, при температурі 25 °С.

Моделювання діаграми очей здійснюється в обох напрямках передачі між HUB і PDB. На діаграмах очей показані оптичні та електричні сигнали низхідної передачі (від HUB до PDB) для різних місць розташування приймача в салоні: від найкоротшої ланки (ONU1) до найдовшої ланки (ONU18) при температурі 25°C. Діаграми на рис. 3.18 досить відкриті, щоб забезпечити правильне рішення для приймача. Таким чином, це свідчить про дуже низький рівень бітових помилок, як ми побачимо в наступному підрозділі. На другому етапі ми підвищуємо температуру корпусу лазера-передавача на 10 °С і активуємо шум відносної інтенсивності (RIN) до 130 дБ/Гц, відповідно до його моделі еволюції як функції температури. Збільшуємо спектральну щільність теплового шуму приймача до середньоквадратичного значення шумового струму $15,10^{-12} \text{ A}/\sqrt{\text{Гц}}$. На рис. 4.4 представлені результати моделювання.

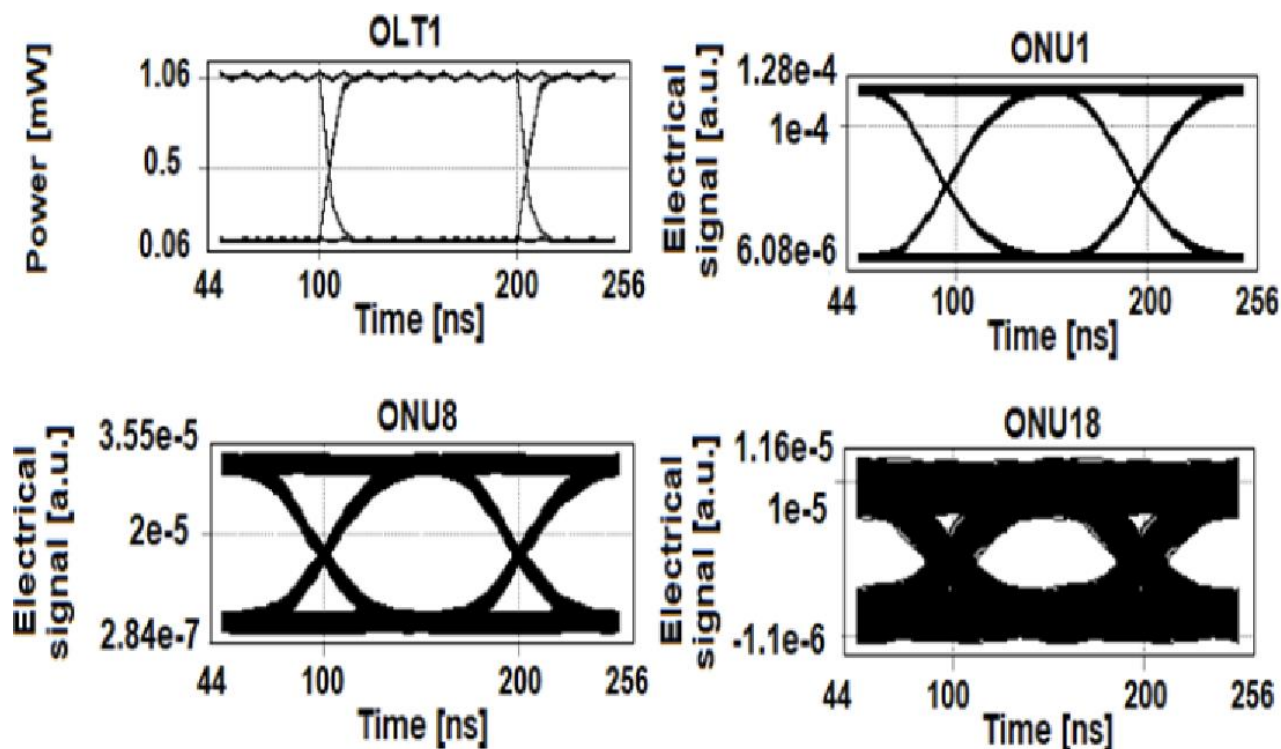


Рис. 4.4. Оптичний сигнал, що випромінюється OLT1 - Електричні сигнали, отримані відповідно ONU 1, 8 і 18 архітектури PON/WDM, при температурі 35 °С.

Як і очікувалося, відбувається поступова деградація діаграм (зі збільшенням довжини ланок), але вони залишаються досить відкритими, щоб припустити, що початкові бітові послідовності будуть належним чином оброблені приймачем. Цей висновок, звичайно, справедливий лише для розглянутої температури (35 °С), але він, як правило, показує, що: (і) рішення PON/WDM є правдоподібною архітектурою з точки зору якості передачі і заслуговує на подальше вивчення, і кожна з його складових ланок у літаку може бути перевірена окремо шляхом моделювання, піддаючись можливим коливанням температури. На наступному етапі це дозволить нам удосконалити необхідні технології компонентів і характеристики під час експериментальних випробувань.

Такі симуляції можуть бути розширені для оцінки двох обраних архітектур (PON/WDM і PON + WDM) зі значеннями температури від -40°C до +85°C, щоб відповідати екологічним стандартам в авіаційному світі. Ця

варіація впливає на частоту лазера передавача, а також на спектральну щільність потужності шуму. Однак для того, щоб виконати більш ретельний аналіз продуктивності наших архітектур, необхідно перейти до критерію вимірювання, який є більш точним, ніж простий огляд діаграми очей. Тому ми розглянемо частоту бітових помилок на етапі прийому.

4.2.Оцінка швидкості бітової помилки в залежності від температурних параметрів

Щоб зробити об'єктивне вимірювання якості каналу, ми обчислимо частоту бітових помилок на стороні прийому, використовуючи спеціальний модуль VPI. Поєднуючи стохастичний та детермінований підходи, цей модуль оцінює ймовірність помилки за $(i_0, i_1, \sigma_0^2, \sigma_1^2)$ статистика, витягнута з діаграми очей. У даному простому випадку модуляції ООК і припущення рівноймовірних символів і статистики гаусового шуму, BER витягується з розрахунку коефіцієнта Q, де $Q = (i_1 i_0) / (\sigma_1 + \sigma_0)$. Це дає можливість оцінювати дуже низькі BER ($< 10^{-6}$), навіть маючи лише кілька тисяч переданих бітів. Оцінка BER може бути виконана на основі статистики Гаусса або Хі-квадрата, залежно від наявності чи відсутності оптичного біт-шуму. Тепловий шум після виявлення, дробовий шум і міжсимвольні перешкоди (ISI) також можуть бути враховані в модулі. Для цих вимірювань BER було вирішено зосередитися на відповідному діапазоні температур, щоб охарактеризувати системи в авіаційній промисловості. Таким чином, моделювання було проведено для температури в діапазоні від -40 °C до 85 °C, і ми вирішили представити результати стохастичної оцінки, оскільки це призводить до тих самих результатів, що й детермінований підхід. Для підвищення точності оцінки BER часове вікно моделювання збільшено до 8192 псевдовипадкової бітової послідовності ООК при збереженні того ж бітрейту та пропускну здатності. Останнім часом використовують в основному звичайні сигнали ввімкнення-вимкнення (ООК), які передають

інформацію по амплітуді або без повернення до нуля (NRZ), або з поверненням до нуля (RZ). Оскільки кожне моделювання вимагає великих обчислювальних витрат, ми не проводили тести для кожного HUB-NDB5 з'єднання ($1 \leq i \leq 5$) двох архітектур, але ми зосередилися на зв'язку з найгіршим випадком втрат (HUB-NDB5), зі змінюванням температури в межах цільового діапазону.

На рис. 4.5 показані результати розрахунку BER для кожного кроку температури для лазерів і фотодіодів, для ланки HUB-NDB5 в салоні.

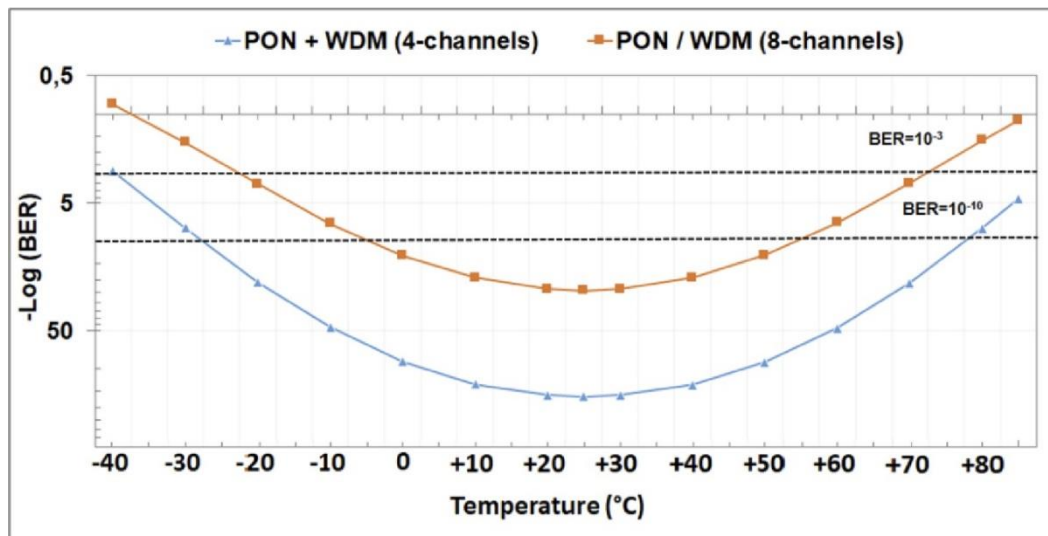


Рис. 4.5. Оцінка якості зв'язку (HUB-NDB5): зміна BER в залежності від температури

Можна помітити, що дві криві майже паралельні і далекі одна від одної в змодельованому діапазоні температур від $[-40^{\circ}\text{C}$ до $+85^{\circ}\text{C}$]. Таку різницю в умовах можна пояснити тим, що ці дві архітектури пропонують однакові послуги, але з двома різними оптичними інфраструктурами. Архітектура PON + WDM використовує 4 мультиплексованих канали, в той час як архітектура PON/WDM використовує 8 каналів і включає більше вузлів і пасивних компонентів. Це призводить до більш складної архітектури, яка представляє більш високе ослаблення потужності для цього змодельованого зв'язку. Спостерігаємо більш виражену деградацію сигналів для найбільш обмеженої архітектури, особливо для найдовших зв'язків, коли

застосовуються більші коливання температури. Дійсно, дрейф довжин хвиль каналу через коливання температури може спричинити потенційні втрати потужності, коли канали наближаються до країв смуги пропускання оптичних фільтрів.

З цих кривих також можна визначити другий результат: використання прямої корекції помилок (FEC) на приймачі розширює діапазон робочих температур для цих двох конфігурацій архітектури. Якщо FEC не використовується, максимально допустимий BER при швидкості 10 Гбіт/с становить 10^{-10} і, таким чином, архітектура PON + WDM життєздатна при $-27,5$ °C і $77,5$ °C, тоді як архітектура PON/WDM працює належним чином при -5 °C і $+55$ °C. У разі, коли ми використовуємо ПЕК на приймачі, максимально допустимий BER збільшується до 10^{-3} , збільшуючи робочий діапазон архітектури PON + WDM до діапазону від -40 °C до $+85$ °C, а архітектури PON/WDM до діапазону $[-22,5$ °C, $+72,5$ °C]. Використання FEC дозволяє отримати $12,5$ °C у напрямку «холодного» діапазону та $7,5$ °C у «гарячому» діапазоні для робочої температури архітектури PON + WDM. Однак для архітектури PON/WDM «холодний» діапазон був збільшений на $17,5$ °C, а «гарячий» – на $22,5$ °C. Тому тут є реальний інтерес для підвищення надійності інфраструктури.

Отже, використання симулятора оптичної передачі для побудови реалістичних моделей двох мережевих архітектур (PON + WDM і PON/WDM), дозволяє нам перевірити їх доказ концепції в контексті оптичних каналів зв'язку 10 Гбіт/с. Це, перш за все, справедливо в нормальному робочому середовищі ($t = 25$ °C), але також і в тому випадку, якщо мережа піддається температурним збуренням, що впливає на фізичні характеристики різних використовуваних компонентів. Тепер лише залишається доопрацьовувати моделі та фізичні параметри компонентів.

4.3. Моделювання розповсюдження сигналів в оптичному середовищі з використанням САПР BeamPROP

Одним з найважливіших пристроїв, що відносяться до пасивних комонтів ВОЛЗ, є оптичний розгалуджувач (coupler, splitter). Розгалуджувачі широко використовуються при побудові розподільних волоконно-коаксіальних кабелів, а також в проектах оптичних мереж зв'язку (all-optical networks - AON) і при застосуванні технологій WDM і DWDM. При цьому ці мережі без застосування розгалуджувачів коштують значно дорожче.

Оптичний розгалуджувач є в загальному випадку багатополісним пристроєм, в якому випромінювання, яке передається на частину вхідних оптичних полюсів, розподіляється між рештою його полюсів.

Розрізняють направлені і двонаправлені розгалуджувачі, а також розгалуджувачі, що чутливі до довжини хвилі. В двонаправленому розгалуджувачі кожний полюс може працювати або на прийом сигналу, або на передачу, або здійснювати прийом і передачу одночасно, так що групи приймальних і передаючих полюсів можуть мінятися місцями у функціональному значенні.

Розгалуджувач можна охарактеризувати таким чином:

- максимальні втрати, що вносяться, на вихідному полюсі;
- неоднорідність (різниця між максимальним і мінімальним значенням коефіцієнта передачі);
- мінімальне значення коефіцієнта спрямованості;
- мінімальне значення втрат на зворотному розсіянні .

Повні надмірні втрати визначаються як:

$$\alpha_{\text{exc}}(i) = -\lg\left(\sum_j P_{i,j} / P_i\right) \text{ дБ}$$

де знаменник дробу під логарифмом відповідає вхідному сигналу на вхідному полюсі i , а чисельник сумарному корисному вихідному сигналу. Цей параметр – загальна характеристика роботи розгалуджувач.

Робочий діапазон довжин хвиль (passband) – діапазон довжин хвиль, в межах якого визначена робота розгалуджувача. Чим ширше діапазон, тим менше залежність втрат розгалуджувача, що вносяться від довжини хвилі. Розгалуджувачі, мають великий робочий діапазон довжин хвиль, називаються ахроматичними (achromatic). Лазери без охолодження і светоізлучаючі діоди вимагають смуги пропускання ± 35 нм в границях несучої довжини хвилі. Для підтримки такого діапазону оптичний розгалуджувач повинен бути ахроматичним.

Втрати на розгалуженні (splittingloss) – це втрати, зв'язані з тим, що потужність природним чином розподіляється між вихідними полюсами. Для ідеального розгалуження ($1 \times n$) з n вихідними полюсами, в припущенні рівності взаємної рівності потужностей між ними всіма вихідними портами, втрати на розгалуженні визначаються співвідношенням

$$a_{sl} = -10 \lg(1/n)$$

Це – мінімальне значення, властиве ідеальному розгалуженню з симетричними вихідними полюсами. Так, для розгалуження 4x4 втрати = 6.02 дБ.

Співвідношення розгалуження (splittingratio) описує, яким чином світло розподіляється між вихідними полюсами. Ця характеристика, властива оптичним розгалужувачам, може бути виражена як у вигляді набору коефіцієнтів передачі по вихідних полюсах (окремий випадок матриці втрат), так і у вигляді процентної пропорції потужностей по вихідних полюсах, де за 100% прийнята сумарна вихідна потужність.

По своїй конструкції розгалуджувачі діляться, в основному, на дві групи - бічні, яких випромінювання подається через бічну поверхню і торцеві.

З розгалуджувачами торцевого типу найбільш поширені такі, в яких торці вихідних хвилеводів закріплюються механічним способом, або заливаються краплею клею. Змінюючи взаємне положення торців хвилеводів і підбираючи їх поперечний перетин можна змінювати в широких межах відношення потужностей в різних вихідних каналах. Як приклад розглянемо найбільш поширений розгалуджувач торцевого типу

Зовнішній вигляд такого розгалуджувач у форматі основної програми САПР BeamPROP показаний на рис. 4.6.

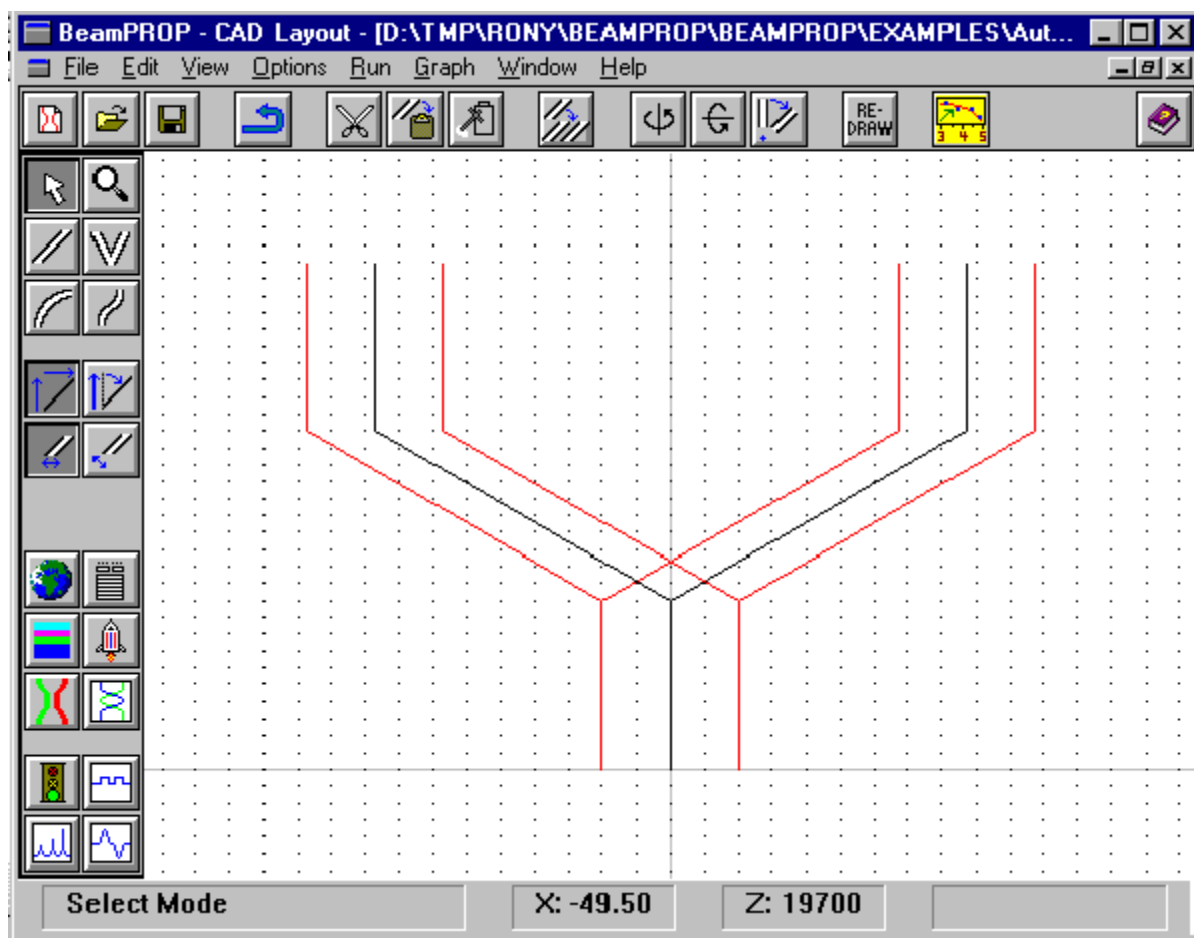


Рис.4.6. Оптичний розгалуджувач у форматі САПР

Досліджуємо оптичний розгалуджувач з такими характеристиками:

- показник заломлення оболочкі – 1,4537;
- показник заломлення серцевини – 1,4685;
- різниця показників заломлення – 0,0148;
- ширина серцевини – 50 мкм;

- введене випромінювання – Гауссівське;
- профіль показника заломлення - .

При зварці розгалуджувача можна контролювати кут під яким зварюються волокна. Дослідимо, як залежить розподіл потужності випромінювання на гілках розгалуджувача залежить від кута зварювання. Графіки приведені на рис. 4.7.

Як видно на малюнках, при куті зварювання рівному 0.15° розгалуджувач майже ідеально ділить вхідне випромінювання порівну між вихідними торцями розгалуджувача. При куті рівному 0.5° теж відбувається розподіл вхідного випромінювання. Втрати при цьому тільки починаються виявлятися. При куті зварювання рівному 2° з'являються втрати на розгалуджувачі, але вони не значні. При куті рівному 4° видно, що з'являються неоднорідності в розподілі поля всередині світловоду. Так само тут значно сильніше виявляється витік випромінювання з розгалуджувача.

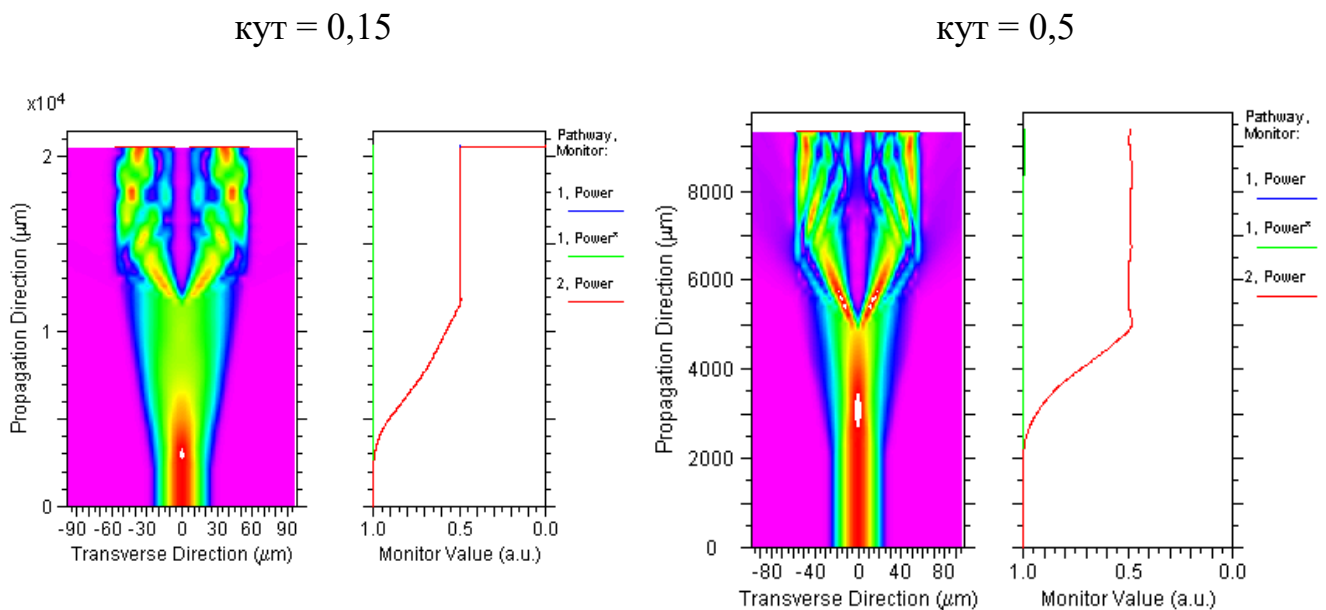


Рис. 4.7. Залежність пропускання розгалуджувача від кутів зварювання

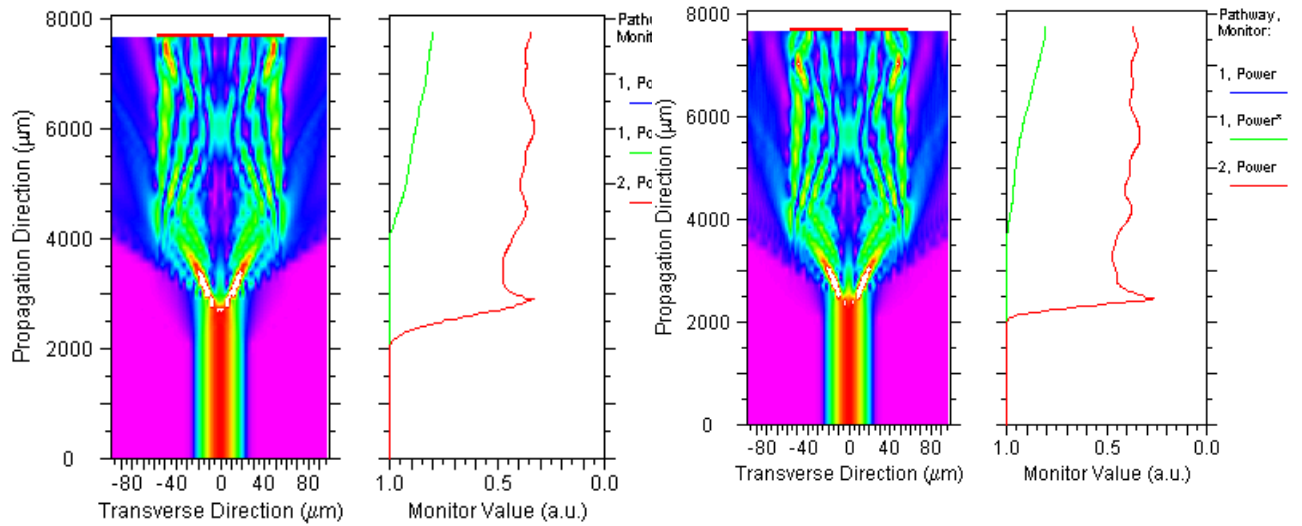
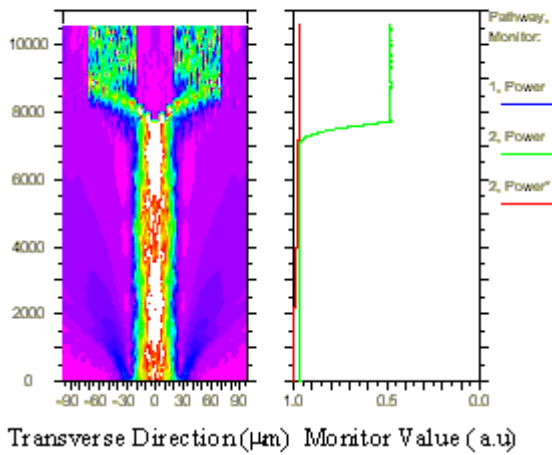


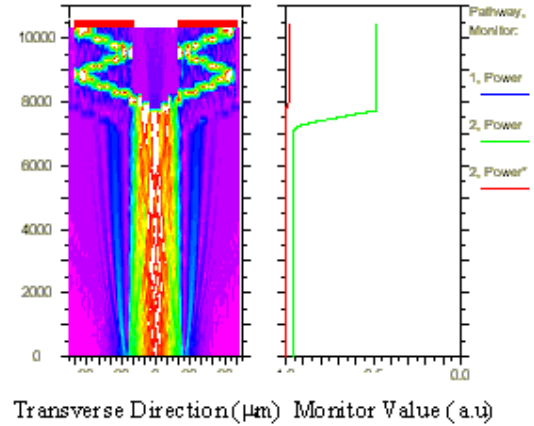
Рис. 4.7. Залежність пропускання розгалужувача від кутів зварювання

Довжина хвилі = 0,1 мкм

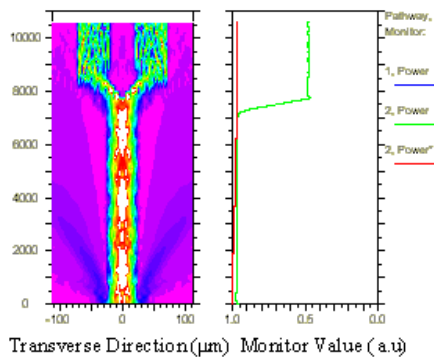
Довжина хвилі = 0,85 мкм



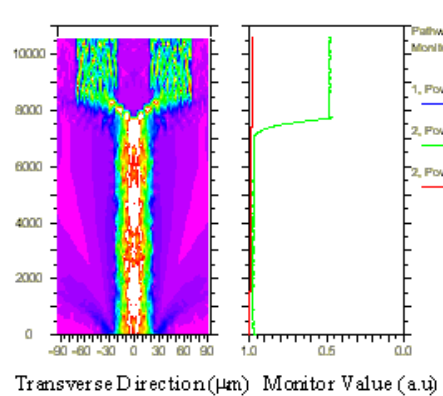
Довжина хвилі = 1,3 мкм



Довжина хвилі = 1,55 мкм



Довжина хвилі = 3.5 мкм



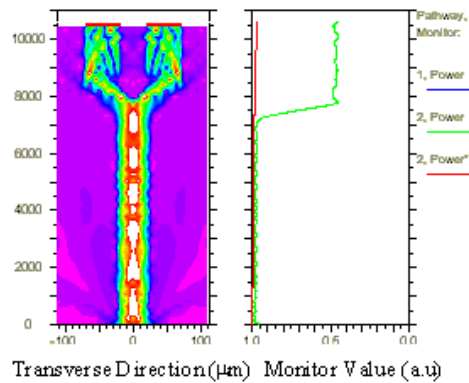


Рис.4.8. Залежність пропускання розгалуджувача від довжини хвиль

Досліджуємо розгалуджувач на різних довжинах хвиль. На рис. 4.8 приведені результати дослідження залежності пропускання розгалуджувача від довжини хвилі випромінювання. Як видно на приведених рисунках, даний розгалуджувач досить стійкий до зміни робочої довжини хвилі в широких межах. В області довжин хвиль на яких працюють сучасні системи зв'язку цей розгалуджувач працюватиме коректно.

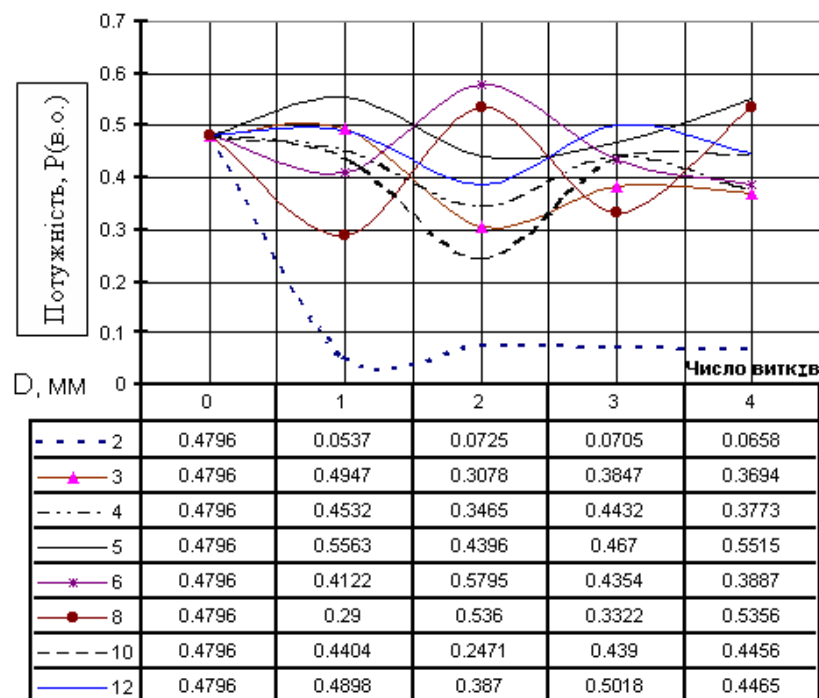


Рис. 4.8. Залежність впливу вигинань на потужність випромінювання на одній з гілок розгалуджень

Досліджуємо вплив вигинань на роботу розгалуджувача. Результати такого моделювання приведені на рис. 4.9.

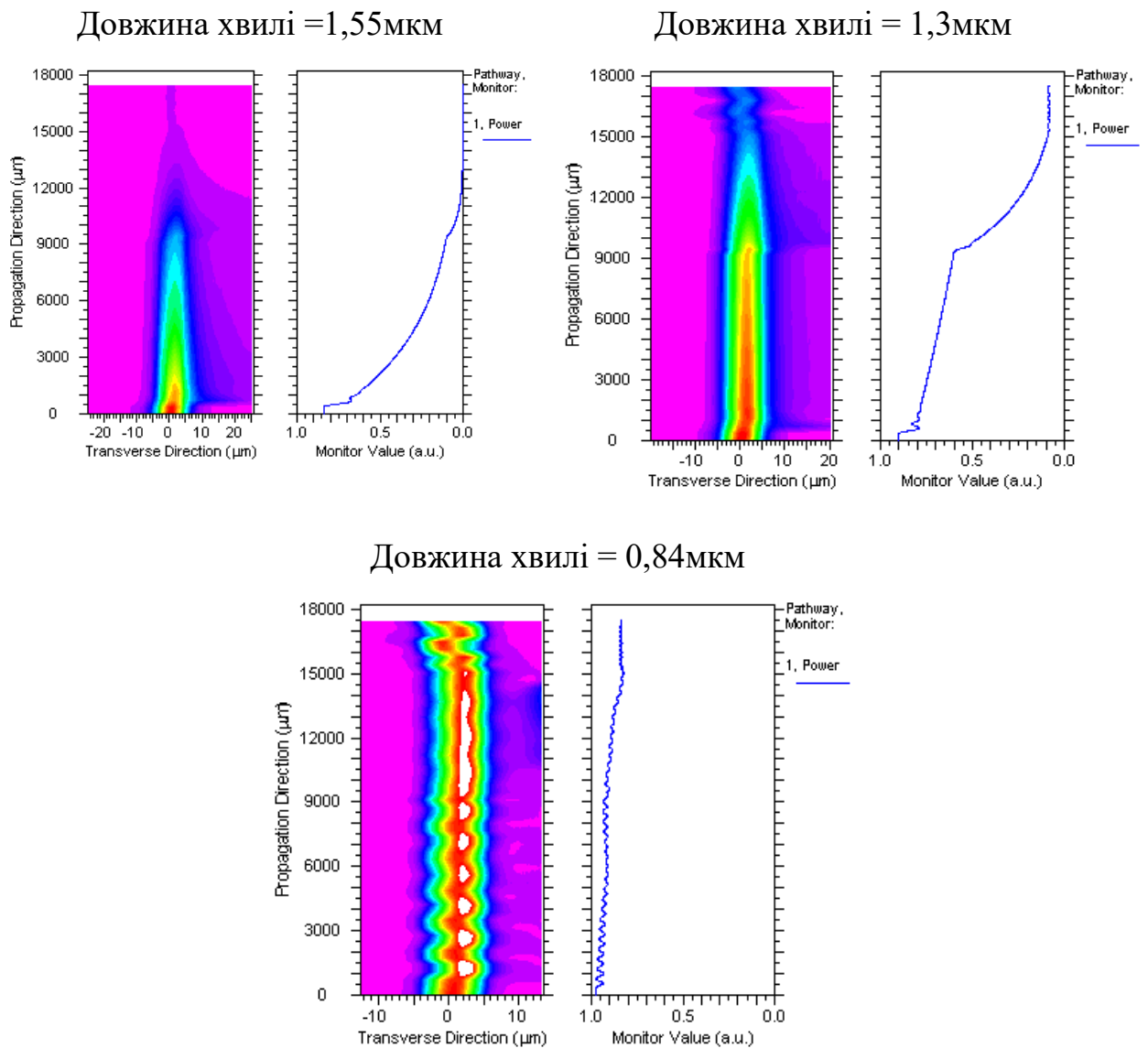


Рис. 4.9. Демультіплексор (0,84/1,3/1,55 мкм)

Як видно на графіках, потужність випромінювання на гілках розгалуджувача дуже залежить від вигинів і при щонайменшій зміні може сильно змінитися. Це відбувається через те, що досліджуване волокно багатомодове. При вигинах і взагалі в розгалуджувачі завжди відбувається селекція мод. Тому число мод, що потрапляють на одну гілку розгалуджувача може різко змінитися при щонайменшому зсуві його з місця.

Із рис. 4.9 видно яким чином відбувається розділення різних довжин хвиль. При моделюванні застосовувалися дані одномодового волокна.

На початку волокно згинається на радіус $r = 8$ мм при цьому проходить хвиля $\lambda = 1,55$ мкм. При вигинанні $r = 6$ мм витікає хвиля $\lambda = 1,3$ мкм. Хвиля з довжиною хвилі $\lambda = 0,84$ мкм виходить з торця волокна.

Висновки до розділу 4

Моделювання показало однакову продуктивність в нормальних умовах експлуатації з хорошою якістю сигналу при прийомі для обох архітектур. Ці результати відкривають шлях для майбутніх експериментів над цими двома архітектурами, з тестуванням комерційних телекомунікаційних компонентів для перевірки фрагментів мережі. Таким чином, фізична інтеграція та характеристика ROADMs, яка може бути реалізована з будь-яким типом архітектури, буде ключовим моментом. У більш загальному плані, ця робота буде заснована на подальших оптимізаційних дослідженнях, які можуть привести до гібридних конфігурацій оптимальних архітектур для проектування мережі салонів для будь-якого типу літака.

Незважаючи на те, що це початкове дослідження висвітлило оптичні архітектури з помірними бюджетами потужності, необхідно провести подальшу роботу, щоб розглянути більш гнучкі архітектури, але вимагають бюджету потужності вище 25 дБ. Цей випадок непростий в обробці і не гарантує збільшення бітрейта понад 10 Гбіт/с без будь-якої регенерації або оптичного посилення. Тому будуть проведені удосконалення та оптимізаційні дослідження для цих конфігурацій архітектури, щоб значно скоротити бюджет на електроенергію і, таким чином, досягти більш високих показників. У цьому контексті також будуть оцінені формати модуляції з вищою спектральною ефективністю. Великі кабіни літаків з великою кількістю точок з'єднання, ймовірно, підтримуватимуть більш високий порядок просторового та спектрального поділу мережі. Шлях до збільшення бітрейту та пропускної здатності все ще потребує уточнення, щоб забезпечити справжню довгострокову стійкість оптичних інфраструктур для

салонів літаків. За допомогою VeamPROP можна моделювати різні оптичні пристрої.

Список використаних джерел

1. Конституція України.
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» от 25.06.1991 г.
3. ДСТУ 245-25.4-80. Основное положение управления охороною большого середовища и использования природных ресурсов.
4. ДСТУ 17.00.01-76. Система стандартов в сфере охраны природы и пополнения запасов природных ресурсов.
5. ГОСТ 17.2.1.01-76. Охрана природы. Атмосфера. Классификация википедии на складе.
6. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допускаются ровни на рабочих местах и мероприятиях до проведения контроля.
7. ГОСТ 2787-75. Металлические черные вторичные. Общие технические условия.
8. ГОСТ 1639-78. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия.
9. ГОСТ 1939-71. Отходы черных металлов и металлоизделий. Технические условия.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pakmehr, N. Fitzgerald, G. Kiwada, J. D. Paduano, E. M. Feron, Al. Behbahani, “Distributed Modeling and Control of Turbofan Systems,” AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Aug. 2009.

2. M. Pakmehr, M. Mounier, N. Fitzgerald, G. Kiwada, J. D. Paduano, E. M. Feron, Al. Behbahani, "Distributed Control of Turbofan Engines," 45th AIAA Joint Propulsion Conference, Aug. 2009.
3. A. Garg, R. I. Linda and T. Chowdhury, "Application of fiber optics in aircraft control system & its development," 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), Coimbatore, India, 2014, pp. 1-5.
4. J. Rhea, "Flyby Light," Air Force Magazine, Mar. 1988, pp. 98-103.
5. <https://interactive.aviationtoday.com/growth-of-ifec-in-aircraft-to-drive-industry-demand-for-new-ethernet-fiber-optics-wire-and-cable-technologies/>
6. J. R. Todd, J.A. Hay, T. Dinh, "Integrating fly-by-light/power-by-wire flight control systems on transport aircraft," 12th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference (DASC), Oct. 1993, pp.457-462.
7. J. R. Todd, "Fly-by-light flight control system development for transport aircraft," 15th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference (DASC), Oct. 1996, pp.153-158.
8. S. F. Habiby and M. J. Hackert, "Ronia results: WDM-based optical networks in aircraft applications," in Proc. IEEE AVFOP'08, San Diego, CA, Sep. 2008, pp. 71-72.
9. S. F. Habiby, and R. Vaidyanathan, "WDM optical backbone networks in aircraft applications: Networking challenges and standards progress," In Proceedings of IEEE MILCOM'09, Boston, MA, Oct. 2009, pp. 1-6.
10. S. F. Habiby, and R. Dutt, "Optical network architecture, technology and component challenges in aircraft network applications," Proceedings of IEEE AVFOP'09, San Antonio, TX, Sep. 2009, pp. 62-63.
11. R. Wang, R. J. Black, B. Moslehi, A. R. Behbahani, and B. Mukherjee, "Optical Control Network for Avionics Applications Using a WDM Packet Ring," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 50, No. 1, Jan. 2014, pp. 637 - 648.

12. A. S. Glista, M. W. Beranek, "Wavelength Division Multiplexed (WDM) Optical Technology Solutions for Next Generation Aerospace Networks", 22nd Digital Avionics Systems Conference, 2003.
13. W.P. Krug, "WDM for Platforms: From Systems Architectures to Systems-on-Chips", IEEE Conference Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006
14. D. Halski, "Fly-by-light flight control systems," *Aerospace Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 11–18, 1996.
15. M. Pakmehr, M. Dhingra, N. Fitzgerald, J. Paduano, M. Wolf, E. Feron, A. Behbahani, "Distributed Architectures Integrated with High-Temperature Electronics for Engine Monitoring and Control," 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, San Diego, CA, Aug. 2011.
16. C.A. Bedoya, "Fly-by-Light Advanced Systems Hardware (FLASH) program", "Fly-by-Light: Technology Transfer," *Proc. SPIE*, vol. 2467, pp. 2–13, 1995.
17. M.W. Beranek, E.Y. Chan, H.E. Hager, Q.N. Le, and J.S. Wilgus, "Emerging opportunities for applying COTS optoelectronics in avionics fiber-optic networks," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 22, no. 8, pp. 439–451, 1999.
18. A.G. Lubowe, T.P. Million, E.G. Sayegh, and F. Baumann, "Multifiber optical connectors for avionics," *Proc. SPIE*, vol. 2840, pp. 14–22, 1996.
19. E.Y. Chan, M.W. Beranek, K.W. Davido, H.E. Hager, C.S. Hong, R.L. St. Pierre, "Challenges for developing low-cost avionics/aerospace-grade optoelectronic modules," *Proc. Electronic Components & Technology Conference*, pp. 1122–1129, 1996.
20. J. Zhang, "Optical fiber data bus modulation techniques for military avionics," *IEEE Aerospace & Electronic Systems Mag.*, vol. 14, no. 4, pp. 31–37, 1999.
21. G.L. Nelson, N. M. Rao, J.A. Krawczak, and R.C. Stevens, "Design process for a photonic network for military platforms," *Proc. SPIE*, vol. 3541, pp. 179–190, 1999.
22. E.M. Drogin, and A.M. Leopardi, "High speed data link concepts for military aircraft,"

National Aerospace Electronics Conference, Dayton, OH, USA, pp. 136–143, July 13-17, 1998.

23. The International Air Transport Association, “Traveler Numbers Reach New Heights”, IATA World Air Transport Statistics Released, (IATA, 2018), pr. 51.

24. D. E. Anderson and M. W. Beranek, “777 Optical LAN Technology Review,” in 1998 Proceedings. 48th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No. 98CH36206), (IEEE, 1998), pp. 386–390.

25. D. Martinec, “Challenges to the Air Transport Industry for Implementing Fiber Optics,” in IEEE Conference Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006, (IEEE, 2006), pp. 1–2.

26. S. F. Habiby and R. Vaidyanathan, “WDM optical backbone networks in aircraft applications: Networking challenges and standards progress,” in MILCOM 2009-2009 IEEE Military Communications Conference, (IEEE, 2009), pp. 1–6.

27. M. F. Alam, M. Atiqzaman, B. B. Duncan, H. Nguyen, and R. Kunath, “On-Board Fiber-Optic Network Architectures for Radar and Avionics Signal Distribution,” Tech. rep., NASA/TM-2000–209776 (2000).

28. M. F. Alam, M. Atiqzaman, B. D. Duncan, H. Nguyen, and R. Kunath, “Fibre-optic network architectures for on-board digital avionics signal distribution,” *Int. J. Commun. Syst.* **15**(2-3), 175–190 (2002).

29. S. Habiby and M. Hackert, “Motivation for WDM-based optical networks in aircraft application,” in SAE WDM LAN Task Group Meeting, (2007).

30. S. F. Habiby and M. J. Hackert, “RONIA results: WDM-based optical networks in aircraft applications,” in 2008 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, (IEEE, 2008), pp. 71–72.

31. G. Proudley, N. Brownjohn, J. Baptista, A. Bacou, H. Salgado, A. Clausen, P. Deimel, M. Farries, S. Gauchy, I. Kopacek, A. Lee, B. Napier, M. Traversone, J. Vincent, and A. Zimmermann, “Developing aircraft photonic networks—an overview of the European DAPHNE project,” in 2011 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, (IEEE, 2011), pp. 1–2.

32. A. Lee and S. Rayner, “Avionic architectures incorporating optical fibre technology,” in IEEE Conference Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006, (IEEE, 2006), pp. 10–11.

33. H. J. White, N. Brownjohn, J. Baptista, V. Foucal, H. Salgado, A. Clausen, T. Pistner, M. Farries, S. Gauchy, I. Kopacek, A. Lee, B. Napier, M. Traversone, J. Vincent, and A. Zimmermann, “Developing aircraft photonic networks for airplane systems,” in Photonic Applications for Aerospace, Commercial, and Harsh Environments IV, (International Society for Optics and Photonics, 2013), p. 87200 V.

34. A. Ragheb and H. Fathallah, “Performance analysis of next generation-PON (NG-PON) architectures,” in 8th International Conference on High-Capacity Optical Networks and Emerging Technologies, (IEEE, 2011), pp. 339–345.

35. K. Ennsner, T. Rogowski, P. Ghelfi, F. Cugini, and P. Castoldi, “Reconfigurable add/drop multiplexer design to implement flexibility in optical networks,” in 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, vol. 3 (IEEE, 2006), pp. 74–77.

36. Y. Tian, J. Wei, M. Jiang, L. Zhang, F. Zhang, Q. Sui, and W. Sun, “Drive design and performance test of a tunable DFB laser,” in 2017 Chinese Automation Congress (CAC), (IEEE, 2017), pp. 4024–4027.

37. H. Y. Xie, J. Li, J. N. Gan, P. Shen, Y. W. Huang, L. Huang, W. R. Zhang, and W. Wang, “Complex-coupled wavelength-selectable DFB laser source for coarse WDM,” in 2008 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, (IEEE, 2008), pp. 1013–1016.

38. Y. Guand F. Choa, “Lowbias, lownoisesingle-avalanche-stageAPDs,” inThe 16th AnnualMeetingofthe IEEE LasersandElectro-OpticsSociety, 2003. LEOS 2003., vol. 2 (IEEE, 2003), pp. 1001–1002.

39. H. White, M. Watson, G. Proudley, A. Proudfoot, and N. Aldridge, “CWDM foraerospaceapplications-temperaturetestingof COTS technologies,” in 2007 IEEE Avionics, Fiber-OpticsandPhotonicsTechnologyConference, (IEEE, 2007), pp. 38–39.