การวางตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิตต่อวินาที

นายวิทวัส วรภมร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Optimum Placement of Duplex Optical Amplifier for 10 Gb/s Ethernet Link

Mr. Vittavat Vorapamorn

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวางตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิตต่อวินาที
โดย	นายวิทวัส วรภมร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัศวกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทวัส วรภมร : การวางตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิตต่อวินาที . (Optimum Placement of Duplex Optical Amplifier for 10 Gb/s Ethernet Link) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดลองวางตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตอัตราบิต 10 Gb/s ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่ซี (1530 - 1565 nm) ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ae ซึ่งมีจุดมุ่งหมายคือการขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงระหว่างมอดูลรับส่งทั่วไปภายในโครงข่ายรวมกลุ่ม ด้วยการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางภายในลิงก์ที่ตำแหน่งต่างกันเช่น ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์, หลังตัวส่งแสง และก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง โดยพิจารณาสมการงบกำลังกับงบเวลาขาขึ้นเพื่อคำนวณข้อจำกัดกำลังในลิงก์และโครมาติกดิสเพอร์ชันที่ส่งผลต่อการถ่างออกของสัญญาณข้อมูล จากนั้นวิเคราะห์ไดอะแกรมระดับพบว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ (50%) หรือตำแหน่งตั้งแต่ 30% ถึง 70% ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุดในลิงก์เป็นตำแหน่งเหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาแผนภาพรูปตากับอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-9} และ 10^{-12} แบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 กรณีคือ (1) ผลกระทบจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ และ (2) การเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชันส่งผลต่อลิงก์มากที่สุดแต่สามารถลดปัญหาด้วยการใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน เช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนจากการใช้อีดีเอฟเอสามารถลดด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm ส่วนตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุดและตำแหน่ง 30% ถึง 70% จะมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตของอีดีเอฟเอ 2 ประเภทคือ อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางแบบทั่วไปกับอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว ซึ่งอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีการเปลี่ยนแปลงกำลังน้อยที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตได้ระยะทางสูงสุด 80 km (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km) และ 120 km (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km) ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

CHULALONGKORN UNIVERSITY

6070312021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Duplex Optical Amplifiers, Erbium-Doped Fiber Amplifier, Burst-Mode EDFA, Ethernet Link, Aggregation Network, Extended Distance, 5G Network

Vittavat Vorapamorn : Optimum Placement of Duplex Optical Amplifier for 10 Gb/s Ethernet Link. Advisor: Assoc. Prof. Duang-rudee Worasucheep, Ph.D.

This thesis shows experimental placements of duplex optical amplifiers for 10 Gb/s ethernet link in C-band wavelength (1530 - 1565 nm) based on IEEE 802.3ae standard. Its purpose is to extend the maximum link distance between typical optical transceivers in aggregation networks by inserting duplex Conventional-Erbium Doped-Fiber Amplifier (duplex C-EDFA) at different locations, such as in-line, booster and pre-amplifier. Both power budget and rise-time budget equations are considered to calculate the link limitation due to optical power and pulse broadening caused by Chromatic Dispersion (CD). Based on, level diagrams, the optimum placement is found to be in-line amplifier at mid-span (50%), or 30% to 70% of maximum Standard Single-Mode Fiber (SSMF). Moreover, the eye-diagram and Bit Error Rate (BER) at 10^{-9} & 10^{-12} are analyzed in 2 cases: (1) effects of a link's components and (2) duplex C-EDFA placements. According to experimental results, CD has the most effect on the link. The Dispersion Compensation Fiber (DCF) and 1-nm Tunable Optical Band-Pass Filter (TOBPF) can reduce CD effect and EDFA noises respectively. 50% in-line amplifier shows the best BER, and the 30% to 70% position has similar BERs. Furthermore, the power variations of ethernet packets when using 2 types of EDFA, Burst-Mode EDFA show that has the lowest power variation than duplex C-EDFA. Finally, this thesis can achieve the data transmission over 80 km (80 km SSMF & 10 km DCF) and 120 km (120 km SSMF & 15 km DCF) by using duplex C-EDFA with 1-nm TOBPF.

Field of Study:	Electrical Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2020	Advisor's Signature .....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สำหรับความช่วยเหลือ การให้ข้อเสนอแนะ สร้างแรงกระตุ้นในการทำงานวิจัย การให้คำปรึกษาเป็นอย่างดียิ่งตลอดมา รวมจนถึงหลักการข้อคิดและประสบการณ์ในการดำเนินชีวิต นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. สุวิทย์ นาคพีระยุทธ อาจารย์ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา แนะแนวทางการทำงานวิจัย ถ่ายทอดองค์ความรู้ทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติ รวมไปถึงแนวคิดที่นำไปประยุกต์สำหรับงานวิจัย

ขอบพระคุณคณาจารย์กรรมการสอบและอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ได้มอบความรู้ ชี้ปัญหา เพื่อนำมาประยุกต์ใช้แก้ไขในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ Dr. Naoya Wada ซึ่งเป็น Director General ของ Network System Research Institute ภายใต้ National Institute of Information and Communications Technology of Japan (NICT) ผู้ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนวความคิดและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย รวมจนถึงสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่าง ๆ เป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ Mr. Hiroyuki Sumimoto จาก NICT ประเทศญี่ปุ่น สำหรับคำแนะนำและสนับสนุนข้อมูลที่จำเป็นด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในห้อง NICT Asia Center ทุกท่านที่ให้ความสนับสนุนในการทำงานวิจัยภายในห้องปฏิบัติการ NICT

ขอขอบพระคุณ Dr. Ray Man จากบริษัท Amonics ฮ่องกง ซึ่งเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนตัวขยายแสงสื่อสารสองทางและ Mr. Masaru Fukumitsu จากบริษัท Optoquest ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นผู้ประกอบรวมชิ้นส่วนตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เช่นเดียวกัน อีกทั้งสนับสนุนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาประกอบภายในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท โทเทิ่ล แอ็คเซ็ส คอมมูนิเคชั่น จำกัดมหาชน (DTAC) ที่ให้ความร่วมมือทำงานวิจัยร่วม โดยอนุญาตให้เข้าเยี่ยมชมห้องอุปกรณ์สำหรับการสื่อสารที่ใช้งาน ณ ปัจจุบันและได้มอบประเด็นปัญหาเพื่อนำมาวิจัย จึงทำให้เกิดแนวความคิดสำหรับหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ขัติยา ไกรกาญจน์ ผู้ซึ่งให้งบทุนสนับสนุนงานวิจัย เพื่อนำไปจัดซื้อบอร์ดประเมินผลและมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า สำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษา และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ศึกษาวิจัยเป็นอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

วิทวัส วรภมร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 การทบทวนวรรณกรรม 6

1.3 วัตถุประสงค์ 8

1.4 เป้าหมายและขอบเขตงานวิจัย 9

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 9

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9

1.7 ประมวลผลวิทยานิพนธ์ 10

บทที่ 2 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในลิงก์ 11

2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในลิงก์ 12

2.1.1 บอร์ดประเมินผล (Evaluation Board) และมอดูลรับส่ง (Transceiver modules). 12

2.1.1.1 มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพี (XFP Transceiver module) 13

2.1.1.2 มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัส (SFP+ Transceiver module) 13

2.1.1.3 องค์ประกอบภายในมอดูลรับส่ง 14

2.1.2 เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF) 16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3 ตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA) 16
2.1.4 ตัวไหลเวียนแสง (Optical Circulator) 17
2.2 อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์ 17
2.2.1 ตัวขยายแสง (Optical Amplifier) 17
2.2.1.1 อีดีเอฟเอแบบทั่วไป (Conventional EDFA, C-EDFA) 18
2.2.1.2 อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว (Burst-Mode EDFA, BM-EDFA) 19
2.2.2 ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF) 21
2.2.3 เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion Compensating Fiber, DCF) 22
2.3 เครื่องมือวัดทดสอบ 23
2.3.1 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT) 23
2.3.2 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter) 23
2.3.3 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 24
2.3.4 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA) 24
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 25
3.1 พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ (EDFA Parameters) 25
3.1.1 ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range) 25
3.1.2 อัตราขยาย (Gain, G) 26
3.1.3 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF) 26
3.2 สมการงบกำลัง (Power budget equation) 28
3.3 สมการงบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation) 29
3.4 สัญญาณรบกวน (Noise) ภายในลิงก์ 30
3.4.1 สัญญาณรบกวนจากภายในตัวตรวจจับแสง 30
3.4.1.1 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise) 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.1.2 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise) 30
3.4.1.3 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise) 31
3.4.2 สัญญาณรบกวนจากตัวขยายแสง 31
3.4.2.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากอีดีเอฟเอ 32
3.4.2.2 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Signal-ASE Noise) 32
3.4.2.3 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (ASE-ASE Noise) 32
3.5 ไดอะแกรมระดับ (Level Diagram) 32
3.5.1 กำลังสัญญาณ (Signal Power) 32
3.5.2 สัญญาณรบกวนเอเอสอี 33
3.5.3 สัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวน (Optical Signal-to-Noise, OSNR) 33
3.6 แผนภาพรูปตา (Eye-diagram) 34
3.7 อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) 34
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 36
4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ (EDFA Parameters Analysis) 36
4.1.1 การวิเคราะห์ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Wavelength Range Analysis) 36
4.1.2 การวิเคราะห์อัตราขยาย (Gain Analysis) 38
4.1.3 การวิเคราะห์ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure Analysis) 39
4.2 การวิเคราะห์งบกำลัง (Power Budget Analysis) 40
4.2.1 งบกำลังกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 กิโลเมตร 40
4.2.2 งบกำลังกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร 42
4.3 การวิเคราะห์งบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Analysis) 44
4.4 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน (Noise Analysis) 50

4.4.1 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei 51
4.4.2 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network 53
4.4.3 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 56
4.5 การวิเคราะห์ไดอะแกรมระดับและการวางตำแหน่งที่เหมาะสม (Level Diagram and Optimum Placement Analysis) 58
4.6 การวิเคราะห์แผนภาพรูปตา (Eye-diagram Analysis) 61
4.6.1 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง 61
4.6.2 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ 64
4.6.3 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง 66
4.6.4 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งเหมาะที่สุด 69
4.7 การวิเคราะห์อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Analysis) 72
4.7.1 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณสูงสุด 80 กิโลเมตร เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei 72
4.7.2 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณสูงสุด 120 กิโลเมตร 76
4.7.2.1 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network 78
4.7.2.2 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 81
4.8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต (Analysis of Power Variations on Ethernet Packets) 83
4.8.1 กรณีตามช่วงเวลาการใช้งานอีเทอร์เน็ต 84
4.8.1.1 ช่วงเวลาชั่วโมงทำงาน (Work Hour) 84
4.8.1.2 ช่วงเวลาพักผ่อน (Rest Hour) 85
4.8.2 กรณีตามขนาดการส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ต 87
4.8.2.1 ส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตขนาดสั้น (Short Ethernet Packets) 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.8.2.2 ส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตขนาดยาว (Long Ethernet Packets)..... 88
บทที่ 5 บทสรุป..... 90
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 90
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ..... 93
ภาคผนวก..... 97
บรรณานุกรม..... 143
ประวัติผู้เขียน..... 149

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบมาตรฐาน IEEE 2

ตารางที่ 4.1 งบกำลังของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei 41

ตารางที่ 4.2 งบกำลังของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network 42

ตารางที่ 4.3 งบกำลังของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 43

ตารางที่ 4.4 งบเวลาขาขึ้นของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งแตกต่างกัน 49

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวน เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei 51

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่มีตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น 52

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์ 52

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 นาโนเมตร ในลิงก์ 53

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวน เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network 54

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ที่มีตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี 55

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์ 55

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 นาโนเมตร ในลิงก์ 56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวน เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 56

ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์ 57

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 นาโนเมตร ในลิงก์ 57

ตารางที่ 4.16 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง 63

ตารางที่ 4.17 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ 65

ตารางที่ 4.18 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง 68

ตารางที่ 4.19 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งเหมาะที่สุด 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพรวมโครงข่าย 1

รูปที่ 1.2 ลิงก์อีเทอร์เน็ตสำหรับรับส่งสัญญาณระยะทางไกลเมื่อแทรกตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง .. 5

รูปที่ 2.1 แผนภาพบล็อกการทดลองพร้อมด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการทดลอง 11

รูปที่ 2.2 แผนภาพบล็อกการทดลองพร้อมด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบส่งสัญญาณสื่อสารสองทาง 12

รูปที่ 2.3 บอร์ดประเมินผลสำหรับ (ซ้าย) เอกซ์เอฟพี และ (ขวา) เอสเอฟพีพลัส 13

รูปที่ 2.4 มอดูลรับส่ง (a) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei 14

รูปที่ 2.5 ทั้งสามกระบวนการของเลเซอร์ 14

รูปที่ 2.6 โพรไฟล์สเปกตรัมของมอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 15

รูปที่ 2.7 การทำงานของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบจำกัด 16

รูปที่ 2.8 เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 16

รูปที่ 2.9 ตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest 17

รูปที่ 2.10 ตัวไหลเวียนแสงที่ใช้งานของบริษัท Agiltron 17

รูปที่ 2.11 อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง และแผนภาพบล็อกขององค์ประกอบภายใน 18

รูปที่ 2.12 อีดีเอฟเอทั่วไปของบริษัท Viavi รุ่น mEDFA-A1 19

รูปที่ 2.13 อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วของบริษัท Amonics รุ่น AEDFA-PKT-DWDM-15-B-SC 19

รูปที่ 2.14 ทิศทางการปั๊มแสงภายในอีดีเอฟเอ 20

รูปที่ 2.15 การประยุกต์ใช้งานโดยการวางตำแหน่งตัวขยายแสงที่จุดต่าง ๆ 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.16 ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท Optoquest รุ่น WTFA-1580-1-S/S 22
รูปที่ 2.17 เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 22
รูปที่ 2.18 เครื่องวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Anritsu รุ่น MP2100A 23
รูปที่ 2.19 (ซ้าย) มิเตอร์วัดกำลังแสง และ (ขวา) ตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็น 23
รูปที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D 24
รูปที่ 2.21 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัลของบริษัท Agilent รุ่น DCA-J 86100C 24
รูปที่ 3.1 ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานของอีดีเอฟเอ ระหว่าง 1530 ถึง 1565 นาโนเมตร 25
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับกำลังแสงขาเข้า 26
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับตัวเลขสัญญาณรบกวน 27
รูปที่ 3.4 โพรไฟล์สเปกตรัม (a) ก่อนเข้าตัวขยายแสง และ (b) หลังผ่านตัวขยายแสง 27
รูปที่ 3.5 การคำนวณสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวน 33
รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมระดับเมื่อแทรกอีดีเอฟเอ 33
รูปที่ 3.7 แผนภาพรูปตาทั่วไป 34
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับคิวแฟคเตอร์ 35
รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกการวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอ 36
รูปที่ 4.2 โพรไฟล์สเปกตรัมของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง (ซ้าย) ลิงก์ขาขึ้น และ (ขวา) ลิงก์ขาลง เมื่อกระแสปั๊มต่างกัน 37
รูปที่ 4.3 โพรไฟล์สเปกตรัมของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว เมื่อกระแสปั๊มต่างกัน 37
รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดอัตราขยายของอีดีเอฟเอ 38
รูปที่ 4.5 อัตราขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอที่กระแสปั๊มต่างกัน: (a) อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง และ (b) อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว 38
รูปที่ 4.6 แผนภาพบล็อกการทดลองวางอีดีเอฟเอในลิงก์อีเทอร์เน็ตระยะทางสูงสุด 80 กิโลเมตร ... 40
รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกการทดลองวางอีดีเอฟเอในลิงก์อีเทอร์เน็ตระยะทางสูงสุด 120 กิโลเมตร. 42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.8 แผนภาพรูปตา เมื่อวัดค่าผลรวมเวลาขาขึ้นของมอดูลรับส่ง: (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar45

รูปที่ 4.9 ค่าความกว้างสเปกตรัมแสงของมอดูลรับส่ง: (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar..... 46

รูปที่ 4.10 ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานที่ความยาวคลื่นใช้งาน: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar..... 47

รูปที่ 4.11 ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นใช้งาน: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar..... 48

รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมระดับเมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งต่างกัน กรณีขยายระยะทางส่งสัญญาณได้สูงสุด 80 กิโลเมตร..... 58

รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมระดับเมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งต่างกัน กรณีขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลได้สูงสุด 120 กิโลเมตร เมื่อใช้มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับ (b) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar..... 59

รูปที่ 4.14 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด (a) 80 กิโลเมตร และ (b) 120 กิโลเมตร..... 62

รูปที่ 4.15 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด (a) 80 กิโลเมตร และ (b) 120 กิโลเมตร..... 64

รูปที่ 4.16 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด (a) 80 กิโลเมตร และ (b) 120 กิโลเมตร..... 67

รูปที่ 4.17 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งเหมาะที่สุด: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร..... 69

รูปที่ 4.18 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิต กรณีวางอีดีเอฟเอที่ตำแหน่ง: (a) หลังตัวส่งแสง, (b) กึ่งกลางลิงก์ และ (c) ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 80 กิโลเมตร 73

รูปที่ 4.19 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 80 กิโลเมตร 74

รูปที่ 4.20 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอ สำหรับมอดูลรับส่ง เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 80 กิโลเมตร 75

รูปที่ 4.21 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิต กรณีวางอีดีเอฟเอที่ตำแหน่ง: (a) หลังตัวส่งแสง, (b) กึ่งกลางลิงก์, (c) ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และ (d) ตำแหน่งเหมาะที่สุด สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร 77

รูปที่ 4.22 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร 78

รูปที่ 4.23 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอ สำหรับมอดูลรับส่ง เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร..... 79

รูปที่ 4.24 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ สำหรับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร..... 81

รูปที่ 4.25 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอ สำหรับมอดูลรับส่ง เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร..... 82

รูปที่ 4.26 แผนภาพบล็อกการทดลองวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต 84

รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีระยะห่างระหว่างแพ็กเกตน้อย: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 85

รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีระยะห่างระหว่างแพ็กเกตมาก: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 86

รูปที่ 4.29 แผนภาพสำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต 86

รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีแพ็กเกตขนาดสั้น: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีแพ็กเกตขนาดยาว: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar 89

รูปที่ 5.1 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Agilent 94

รูปที่ 5.2 แผนภาพรูปตาจากปัญหาสัญญาณไฟฟ้าทางเวลาระหว่างเครื่องวัดไม่สัมพันธ์กัน 94

รูปที่ 5.3 ปัญหาความแตกต่างระหว่างขนาดแกนตรงส่วนจุดเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันและเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 95

รูปที่ 5.4 บอร์ดประเมินผลของบริษัท Timbercon 95

รูปที่ 5.5 ปัญหาความร้อนภายในมอดูลรับส่ง 96

รูปที่ 5.6 ปัญหาคราบฝุ่นกับสิ่งสกปรกภายในหัวเชื่อมต่อของมอดูลรับส่งและเส้นใยนำแสง 96

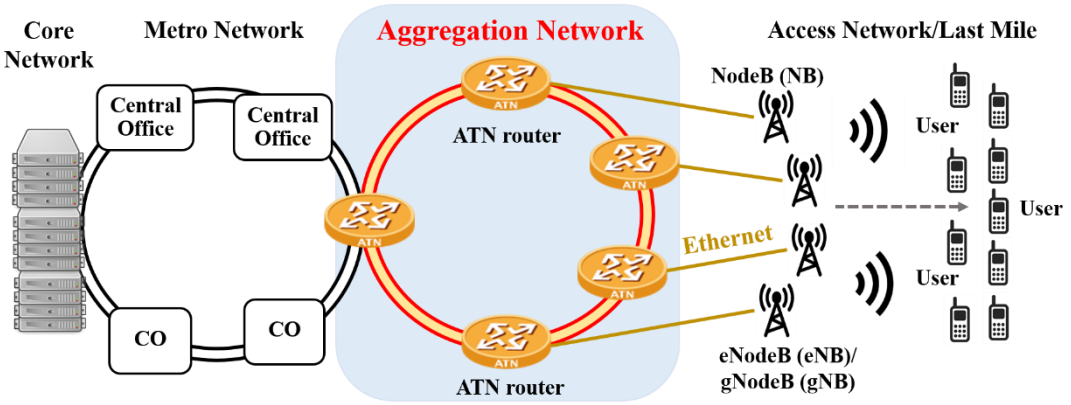
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบสื่อสารในปัจจุบันมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากจำนวนการใช้ข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตของผู้ใช้บริการ (Users) มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยอาทิเช่น คอมพิวเตอร์, แท็บเล็ต (Tablet) และสมาร์ทโฟน (Smartphone) จึงทำให้ผู้ให้บริการเครือข่าย (Service provider) จำเป็นต้องเพิ่มจุดให้บริการเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มระยะทางระหว่างจุดให้บริการสัญญาณ เพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้บริการได้อย่างทั่วถึง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาลิงก์อีเทอร์เน็ต (Ethernet link) สำหรับรองรับโครงข่าย 4จี-แอลทีอี (4^{th} Generation Long Term Evolution, 4G-LTE) ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันและโครงข่าย 5จี (5^{th} Generation, 5G) [1] หรือ ไอเอ็มที-2020 (International Mobile Telecommunication for 2020, IMT-2020) [2] ที่มีความต้องการหลักได้แก่ อัตราบิตที่สูงขึ้น (high bit rate) ตั้งแต่ 10 Gb/s จนถึง 20 Gb/s, การเชื่อมต่อขนาดใหญ่ (massive connection) ที่สามารถรองรับ 10^6 อุปกรณ์ต่อพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร และเวลาแฝงต่ำ (low latency) ประมาณ 1 ms โดยลิงก์ที่ต้องการศึกษาจะติดตั้งระหว่างเราต์เตอร์เอทีเอ็น (ATN router) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เข้าถึงบริการหลากหลาย (multi-service access equipment) ของบริษัท Huawei ภายในโครงข่ายรวมกลุ่ม (Aggregation Network) และกระจายอยู่ตามขอบของโครงข่ายเมโทร (Metropolitan network) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมต่อสัญญาณข้อมูลจากโครงข่ายแกนหลัก (Core network) ผ่านโครงข่ายเมโทรตลอดจนถึงโครงข่ายเข้าถึง (Access Network) เพื่อรับส่งสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต (Bit rate) 10 Gb/s ในช่วงความยาวคลื่น 1550 nm ไปยังจุดกระจายสัญญาณ NodeB (NB), eNodeB (eNB) และ gNodeB (gNB) ณ สถานีฐาน (base station) แก่ผู้ใช้บริการดังรูป 1.1 ที่แสดงภาพรวมของโครงข่ายทั้งหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.1 ภาพรวมโครงข่าย[3]

ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ใช้สื่อสารในยุคกิกะบิตอีเทอร์เน็ต (Gigabit Ethernet) จะมีข้อกำหนดในการส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตตามมาตรฐาน Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ซึ่งได้พัฒนาต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีมาตรฐานสำคัญที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจดังตาราง 1.1 เปรียบเทียบ 5 มาตรฐานดังนี้

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบมาตรฐาน IEEE

มาตรฐาน	ชื่อ	อัตราบิต (Gb/s)	ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน	ระยะทางสูงสุด
IEEE 802.3ah	GbE	1.25	1260 - 1360 nm	10 km
IEEE 802.3ae	10 GbE	9.95328/10.3125	1530 - 1565 nm	40 km
IEEE 802.3cc	25 GbE	25.78125	1295 – 1325 nm	40 km
IEEE 802.3bm	40 GbE	10.3125 x 4	1264.5 – 1277.5 nm 1284.5 – 1297.5 nm 1304.5 - 1317.5 nm 1324.5 – 1337.5 nm	40 km
IEEE 802.3ba	100 GbE	25.78125 x 4	1294.53 – 1296.59 nm 1299.02 – 1301.09 nm 1303.54 – 1305.63 nm 1308.09– 1310.19 nm	40 km

จากตารางที่ 1.1 แสดงมาตรฐาน IEEE 802.3ah [4] สำหรับอีเทอร์เน็ต 1 กิกะบิต (1 Gb/s Ethernet, GbE) มีอัตราบิตข้อมูล 1.25 Gb/s ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ (Original Band, O-band) ตั้งแต่ 1260 nm ถึง 1360 nm สำหรับ 1000BASE-LX10 จะสามารถส่งสัญญาณแสงได้ระยะทางสูงสุด 10 km

มาตรฐาน IEEE 802.3ae [5] สำหรับอีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต (10 Gb/s Ethernet, 10 GbE) มีอัตราบิตข้อมูล 9.95328/10.3125 Gb/s ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่ซี (Conventional / Central Band, C-band) ตั้งแต่ 1530 nm ถึง 1565 nm สำหรับ 10GBASE-EW/ER จะสามารถส่งสัญญาณแสงได้ระยะทางสูงสุด 40 km

มาตรฐาน IEEE 802.3cc [6] สำหรับอีเทอร์เน็ต 25 กิกะบิต (25 Gb/s Ethernet, 25 GbE) มีอัตราบิตข้อมูล 25.78125 Gb/s ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอตั้งแต่ 1295 nm ถึง 1325 nm สำหรับ 25GBASE-ER จะสามารถส่งสัญญาณแสงได้ระยะทางสูงสุด 40 km

มาตรฐาน IEEE 802.3bm [7] สำหรับอีเทอร์เน็ต 40 กิกะบิต (40 Gb/s Ethernet, 40 GbE) มีอัตราบิตข้อมูล 10.3125 Gb/s จำนวน 4 ช่อง ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ได้แก่ 1264.5 nm ถึง 1277.5 nm, 1284.5 nm ถึง 1297.5 nm, 1304.5 nm ถึง 1317.5 nm และ 1324.5 nm ถึง 1337.5 nm สำหรับ 40GBASE-ER4 จะสามารถส่งสัญญาณแสงได้ระยะทางสูงสุด 40 km

มาตรฐาน IEEE 802.3ba [8] สำหรับอีเทอร์เน็ต 100 กิกะบิต (100 Gb/s Ethernet, 100 GbE) มีอัตราบิตข้อมูลที่ 25.78125 Gb/s จำนวน 4 ช่อง ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ ได้แก่ 1294.53 nm ถึง 1296.59 nm, 1299.02 nm ถึง 1301.09 nm, 1303.54 nm ถึง 1305.63 nm และ 1308.09 nm ถึง 1310.69 nm สำหรับ 100GBASE-ER4 จะสามารถส่งสัญญาณแสงได้ระยะทางสูงสุด 40 km

จากมาตรฐานที่กล่าวมาข้างต้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้มาตรฐาน IEEE 802.3ae สำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิตในการศึกษาทดลอง เนื่องจากลิงก์ที่เชื่อมต่อในโครงข่ายส่วนใหญ่จะใช้อีเทอร์เน็ตโปรโตคอล (Ethernet Protocols) อัตราบิต 10 Gb/s ซึ่งตรงกับความต้องการของโครงข่าย 5จี ด้านอัตราบิตและจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่มีภายในห้องปฏิบัติการวิจัย เป็นเหตุให้ต้องเลือกใช้มอดูลรับส่งอัตราบิต 10 กิกะบิตที่มี 2 รูปแบบคือ (1) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพี (10 Gigabit Small Form-factor Pluggable, XFP Transceiver module) และ (2) มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัส (Small Form-factor Pluggable, SFP+ Transceiver module) เป็นมอดูลรับส่งเอสเอฟพีรูปแบบพิเศษที่สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลแสงอัตราบิต 10 กิกะบิต สำหรับมอดูลรับส่งรูปแบบเอกซ์เอฟพีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei [9] และมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network [10] ส่วนมอดูลรับส่งรูปแบบเอสเอฟพีพลัสที่ใช้คือ มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar [11] โดยมอดูลรับส่งทั้งสามมอดูลสามารถรองรับสัญญาณข้อมูลแสงที่อัตราบิต 9.95 Gb/s ถึง 11.1 Gb/s ในช่วงความยาวคลื่น 1550 nm ทำให้มอดูลรับส่งที่เลือกใช้รองรับมาตรฐาน IEEE 802.3ae สำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจลิงก์อีเทอร์เน็ตสำหรับเขตพื้นที่ห่างไกลจากเมืองหลวง เช่น เขตพื้นที่ชานเมือง, เขตพื้นที่ชนบท และเขตพื้นที่ชายแดนประเทศ เป็นต้น ซึ่งมีแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารและการขยายตัวของผู้ใช้บริการที่เพิ่มมากขึ้นในบริเวณดังกล่าว ทำให้จำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีให้ครอบคลุมเท่าทันกับเขตพื้นที่เมืองหลวงมากขึ้น แต่เนื่องด้วยแต่ละพื้นที่ประกอบไปด้วยหมู่บ้านที่อยู่อาศัยกระจัดกระจายเป็นบริเวณกว้างมีระยะห่างที่แตกต่างกัน จึงมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับแต่ละหมู่บ้านไม่เท่ากัน เป็นเหตุให้ผู้ใช้บริการที่อยู่ห่างไกลไม่สามารถรับสัญญาณได้ เพื่อให้สามารถเข้าถึงผู้ใช้บริการได้ ผู้ให้บริการจำเป็นต้องเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐาน ด้วยการเพิ่มการติดตั้งเราต์เตอร์ระหว่างสถานีฐานเพียงเพื่อใช้เป็นตัวทวนสัญญาณ (repeater) หรือการเปลี่ยนมอดูลรับส่งสัญญาณแสงพร้อมทั้งช่องเสียบมอดูลที่รองรับได้ ทำให้ผู้ให้บริการต้องเพิ่มต้นทุนสำหรับการติดตั้งใหม่ และในบางบริเวณที่มีระยะห่างไกลเกินกว่า

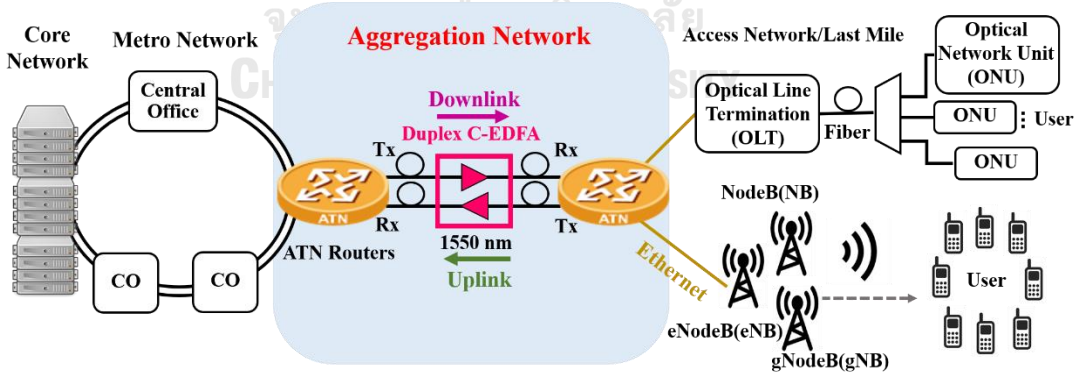
ข้อกำหนดของอุปกรณ์ (Specification) จะไม่สามารถรับสัญญาณได้เช่นเดิม ซึ่งลิงก์รับส่งสัญญาณแสงมีระยะทางส่งสัญญาณเป็นไปตามมาตรฐานด้านงบกำลัง (Power Budget) เมื่อต้องการระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลขึ้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มงบกำลังภายในลิงก์ โดยวิธีเพิ่มงบกำลังจะมีหลากหลายวิธี แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจศึกษาวิธีเพิ่มงบกำลังด้วยการใช้ตัวขยายแสง (Optical Amplifier) มาแทรกในลิงก์อีเทอร์เน็ต

ตัวขยายแสงเป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถเพิ่มงบกำลังได้ โดยตัวขยายแสงเป็นที่รู้จักและนิยมใช้งานอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งการประยุกต์ใช้งานตัวขยายแสงให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับข้อจำกัดและความต้องการของลิงก์ที่ตรงตามคุณสมบัติของตัวขยายแสงแต่ละชนิด สำหรับตัวขยายแสงสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ (1) อีดีเอฟเอ (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) เป็นตัวขยายแสงชนิดที่มีกำลังแสงจากปั๊มเลเซอร์ (Pump laser) อยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 980 nm และ 1480 nm ทำให้สามารถขยายสัญญาณแสงเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นแถบความถี่ซีตั้งแต่ช่วง 1530 nm ถึง 1565 nm ได้สูงมาก นอกจากนี้จะไม่ได้รับผลกระทบจากโพลาไรเซชัน (Polarization Independent) ด้วยการใช้ตัวกลางแอ็กทิฟ (Active medium) เป็นเส้นใยนำแสงเจือสารด้วยธาตุเออร์เบียม (Erbium, Er), (2) เอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) เป็นตัวขยายแสงที่ขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่เจือเข้าไปโครงสร้าง จึงทำให้สามารถขยายได้ทุกช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่แถบความถี่โอ 1280 nm จนถึงยู (U-Band) 1650 nm แต่มีข้อเสียคือได้รับผลกระทบจากโพลาไรเซชัน จึงต้องปรับแกนโพลาไรเซชันก่อน เพื่อให้ได้รับอัตราขยายที่เหมาะสม และ (3) ตัวขยายแสงรามาน (Raman Optical Amplifier) เป็นตัวขยายแสงที่ขึ้นกับผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear effect) ของการกระเจิงรามานกระตุ้น (Stimulated Raman Scattering, SRS) สามารถทำงานได้ตั้งแต่ช่วงความคลื่น 1260 nm จนถึง 1650 nm โดยกำลังแสงจากปั๊มเลเซอร์ช่วงความยาวคลื่น 1400 nm ถึง 1500 nm จะสามารถขยายสัญญาณแสงในช่วงความยาวคลื่นแถบความถี่ซีตั้งแต่ 1530 nm จนถึงแอล (L-Band) 1625 nm ได้กำลังแสงสูงมาก แต่ข้อเสียคือจำเป็นต้องออกแบบลิงก์ที่ทำให้การกระเจิงรามานกระตุ้นทำงานได้ตรงจุดที่ต้องการและมีระยะทางที่เหมาะสมกับอัตราขยาย มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนขึ้นในลิงก์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจศึกษาเฉพาะตัวขยายแสงชนิดอีดีเอฟเอ เนื่องจากตัวขยายแสงชนิดนี้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการเพิ่มงบกำลังในลิงก์ที่ช่วงความยาวคลื่นแถบความถี่ซีตั้งแต่ 1530 nm ถึง 1565 nm สอดคล้องตามมาตรฐาน IEEE 802.3ae สำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต

ประเภทของอีดีเอฟเอสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทได้แก่ (1) แบบทั่วไป (Conventional EDFA, C-EDFA) ในกรณีนี้คือตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (Duplex Optical Amplifier) ของบริษัท Optoquest ที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจศึกษา และ (2) แบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว (Burst-Mode EDFA, BM-EDFA) ในกรณีนี้คือของบริษัท Amonics โดยแต่ละประเภทจะมีข้อ

ได้เปรียบเสียเปรียบที่แตกต่างกันตามการใช้งานภายในลิงค์ จึงเป็นที่มาของการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต (Ethernet Packets) ตามช่วงเวลาการใช้งานและขนาดการส่งข้อมูลที่ส่งภายในลิงค์ระหว่างอีดีเอฟเอ 2 ประเภทนี้ เมื่อแทรกภายในลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต

จากที่กล่าวมาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจนำตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตแทรกระหว่างเราต์เตอร์เอทีเอ็น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในลิงก์ดังรูป 1.2 ที่แสดงถึงตำแหน่งการวางตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตภายในโครงข่ายรวมกลุ่ม เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวางและการเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณแสงในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF) โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน *ITU-T G.652* [12] *ลักษณะของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวและเคเบิล (Characteristics of a single-mode optical fibre and cable)* ที่เชื่อมต่อระหว่างเราต์เตอร์เอทีเอ็นให้มีระยะทางรับส่งสัญญาณไกลขึ้นเกินกว่ามาตรฐาน IEEE 802.3ae สำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต ที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s สำหรับอุปกรณ์มอดูลรับส่งที่ติดตั้งอยู่ เพื่อให้สามารถรับส่งสัญญาณไปถึงสถานีฐานที่อยู่ไกลได้โดยไม่ต้องติดตั้งเราต์เตอร์เอทีเอ็นเพิ่มเพียงเพื่อใช้เป็นตัวทวนสัญญาณ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลกระทบต่อลิงก์กับอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว โดยใช้ตัวชี้วัดคือการเปลี่ยนแปลงกำลังของแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต (Power Variations on Ethernet Packets) และนำเสนอค่าพารามิเตอร์ตัวชี้วัดว่าตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสามารถเพิ่มสมรรถนะให้ลิงก์ได้แก่ การวิเคราะห์งบกำลัง (Power Budget) เพื่อคำนวณระยะทางที่สามารถขยายได้สูงสุด, การวิเคราะห์งบเวลาขาขึ้น (Rise-time Budget), อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนทางแสง (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR), การวิเคราะห์แผนภาพรูปตา (Eye-diagram) และค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)



รูปที่ 1.2 ลิงก์อีเทอร์เน็ตสำหรับรับส่งสัญญาณระยะทางไกลเมื่อแทรกตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง

1.2 การทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อนี้ จะเน้นในส่วนของงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่มีความเกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ เพื่อนำมาศึกษาและประกอบการวิเคราะห์สำหรับผลการทดลอง ดังนี้

1. ในปี 1991 [13] กลุ่มวิจัย Center for Broadband Telecommunications ประเทศเดนมาร์ก ได้วิเคราะห์แบบจำลองคำนวณการวางตำแหน่งของอีดีเอฟเอ โดยการวางอีดีเอฟเอที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (In-line Amplifier) ควรวางที่ตำแหน่ง 0.4 - 0.6 ของระยะทางหลังตัวส่งแสงจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตของระบบดีที่สุด ซึ่งในขณะที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง (Booster) จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีก็ต่อเมื่ออีดีเอฟเอมีกำลังปั๊มสูงและไม่ใช้ตัวกรองแสง แต่ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (Pre-Amplifier) ให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่สุดเมื่อเทียบกับสองตำแหน่งแรก ซึ่งตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดก็ต่อเมื่ออีดีเอฟเอทำงานด้วยวิธีปั๊มสวนทางกับสัญญาณขาเข้า (counter propagating pump) โดยวิธีเพิ่มสมรรถนะที่แนะนำคือ ควรขยับเส้นใยนำแสงแอ็กทิฟ (active fiber) ให้ห่างจากภาครับ (Receiver) ตามกำลังปั๊มของอีดีเอฟเอ เช่น ถ้าอีดีเอฟเอมีกำลังปั๊ม 20 mW ควรขยับห่างจากภาครับประมาณ 20 km และใช้ตัวกรองแสง (optical Filter) สำหรับกรองสัญญาณรบกวน ถ้าอีดีเอฟเอมีกำลังปั๊มสูงควรจะใช้ตัวกรองแสงที่มีช่วงแคบเช่นกัน

2. ในปี 1995 [14] กลุ่มวิจัย AT&T Bell Laboratories ได้ทดลองส่งสัญญาณแสงแบบสวนกันสองทิศทาง (Bidirectional) ที่อัตราบิต 10 Gb/s ด้วยตัวไหลเวียนแสง (Optical Circulator) ได้ระยะทางทั้งหมด 120 km โดยใช้อีดีเอฟเอจำนวนสองตัวในลิงก์ซึ่งอยู่ในตำแหน่งหลังตัวส่งแสงและก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง ได้เสนอการวางเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion Compensating Fiber, DCF) ในตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์สำหรับลิงก์ที่มีการส่งสัญญาณสวนทางกันทำให้สามารถแก้ปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion) ได้ทั้งลิงก์ขาขึ้นและขาลงไปพร้อมกัน ยิ่งไปกว่านั้นจะสามารถลดผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นภายในลิงก์ที่มีการส่งสัญญาณแสงกำลังสูงได้ นอกจากนี้จะพบปัญหาผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นคือ การกระเจิงบริลลูอิน (Brillouin Scattering) จากอีดีเอฟเอที่วางตำแหน่งหลังตัวส่งแสง และการกระเจิงกลับเรเลห์ (Rayleigh back-scattered, RB) จากการส่งสัญญาณอีกช่องทางสวนกัน จึงลดผลกระทบจากการกระเจิงบริลลูอินด้วยสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือนรูปไซน์ (sinusoidal dithering signal) 10 MHz เสริมบนการกล้ำสัญญาณเลเซอร์ (laser modulation) และใช้เกรตติงเส้นใยนำแสงแบบสะท้อน (reflection fiber grating) ร่วมกับตัวกรองแสงกำลังสูญเสียต่ำ (low loss filter) ที่แทรกก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (Photodetector) จะทำให้ลดได้ทั้งผลกระทบจากการกระเจิงกลับเรเลห์ และสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission, ASE noise) จากอีดีเอฟเอ

3. ในปี 2007 [15] กลุ่มวิจัย NICT ประเทศญี่ปุ่นร่วมกับบริษัท Amonics จากฮ่องกง ได้วิจัยเกี่ยวกับอีดีเอฟเอประเภทใหม่ที่สามารถลดผลกระทบของอัตราขยายชั่วครู่ (Gain transient) ในระบบการสวิตช์แพ็กเกตแสง (Optical Packet Switching, OPS) โดยออกแบบอีดีเอฟเอให้ใช้เส้นใยนำแสงที่เจือสารด้วยธาตุเออร์เบียม (Erbium Doped Fiber, EDF) ที่เพิ่มพื้นที่แอ็กทิฟ (active area) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.3 μm ซึ่งกว้างกว่าขนาดที่อีดีเอฟเอทั่วไปใช้

4. ถัดมาในปี 2009 [16] กลุ่มวิจัย NICT ประเทศญี่ปุ่นร่วมกับบริษัท Amonics จากฮ่องกง ได้วิจัยกรณีศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอัตราขยายชั่วครู่ จากอีดีเอฟเอแต่ละประเภทรวมถึงอีดีเอฟเอที่ได้วิจัยพัฒนาขึ้นจากปี 2007 ด้วย ซึ่งพบว่าปัจจัยจาก (1) จำนวนของอีดีเอฟเอภายในลิงก์, (2) กำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ, (3) อัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) ของตัวส่งสัญญาณแสงหรือประเภทของตัวส่งสัญญาณแสง และ (4) ความหนาแน่นของทราฟฟิก (traffic density) คือผลรวมระยะเวลาของแพ็กเกตทั้งหมดในหนึ่งวินาที ทั้ง 4 ปัจจัยส่งผลต่ออัตราขยายชั่วครู่ โดยเฉพาะความหนาแน่นของทราฟฟิกเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด ยิ่งมีความหนาแน่นของทราฟฟิกน้อยจะทำให้อัตราขยายชั่วครู่แย่ลง จึงเป็นเหตุให้เน้นการพัฒนาอีดีเอฟเอต้นแบบเป็นประเภทแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว

5. ปี 2010 [17] กลุ่มวิจัย NICT ประเทศญี่ปุ่นร่วมกับบริษัท Amonics จากฮ่องกงได้พัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการขยายแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว ในชื่ออีดีเอฟเอลดผลชั่วครู่ (Transient-Suppressed EDFA, TS-EDFA) ซึ่งเป็นอีดีเอฟเอที่ใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ สามารถติดตั้งได้ทุกส่วนภายในโครงข่ายสวิตช์แพ็กเกตแสง (Optical Packet Switch Network) และเหมาะสำหรับระบบดับเบิลยูดีเอ็ม (Wavelength Division Multiplexing, WDM) เนื่องจากระบบดับเบิลยูดีเอ็มมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของทราฟฟิกสูง นอกจากนี้ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการนำอีดีเอฟเอลดผลชั่วครู่มาทำงานร่วมกับวิธีวนซ้ำป้อนกลับทางแสง (Optical feedback loop) ทำให้เกิดสมรรถภาพสูงสำหรับการขยายแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว

6. ในปี 2018 [18] กลุ่มวิจัย NICT ได้ทดลองและเปรียบเทียบผลกระทบจากลิงก์ล้มเหลวในโครงข่ายโดยใช้อีดีเอฟเอสองประเภทคือแบบทั่วไปและแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว โดยปกติโครงข่ายมีอีดีเอฟเอแบบทั่วไปกระจายตามลิงก์ต่าง ๆ เมื่อบางลิงก์หลุดการเชื่อมต่อจะทำให้กำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอลดลง ส่งผลให้เกิดอัตราขยายชั่วครู่หลังผ่านอีดีเอฟเอและทำให้กำลังแสงในลิงก์ผันผวน โดยกระบวนการกลับสู่ภาวะปกติจะใช้เวลานาน ซึ่งในกรณีนี้ได้จำลองเหตุการณ์ลิงก์ล้มเหลว 55% จากทั้งหมด เมื่อใช้อีดีเอฟเอแบบทั่วไปจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังแสง (Variation of power) ในลิงก์ประมาณ 7.5 dB แต่เมื่อใช้อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงประมาณ 0.3 dB สรุปได้ว่าอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วสามารถลดผลกระทบของอัตราขยายชั่วครู่ได้ดีกว่าแบบทั่วไป

จากบทความที่ (1) บรรยายถึงตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอ ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับหัวข้อที่วิทยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาโดยนำมาช่วยวิเคราะห์การวางตำแหน่งอีดีเอฟเอในลิงก์ได้ แต่มีข้อแตกต่างที่เป็นการจำลองคำนวณตามทฤษฎีเท่านั้นไม่ได้มีการเปรียบเทียบผลการทดลองจริง บทความที่ (2) จะมีส่วนที่คล้ายคลึงคือ ด้านระยะทางที่สามารถส่งได้ไกลที่สุดและการใช้ตัวไหลเวียนแสง สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ส่งสัญญาณสื่อสารสองทางในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ยังได้เสนอข้อได้เปรียบจากการใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน ณ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว และชี้ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากการวางอีดีเอฟเอที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสงพร้อมวิธีแก้ไข ทำให้มีส่วนช่วยในการวิเคราะห์กรณีวางอีดีเอฟเอหลังตัวส่งแสงที่วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาด้วย แต่มีข้อแตกต่างคือวิทยานิพนธ์นี้จะใช้อีดีเอฟเอเพียงหนึ่งตัวสำหรับเฉพาะลิงก์ขาขึ้นและขาลง ในบทความที่ (3) เป็นบทความที่ค้นพบรูปแบบเพื่อนำมาพัฒนาอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการศึกษาเช่นเดียวกัน สำหรับบทความที่ (4) และ (5) เป็นบทความที่กล่าวถึงการพัฒนาอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว รวมไปถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบจึงทำให้มีส่วนช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก และสุดท้ายบทความที่ (6) เป็นบทความที่นำอีดีเอฟเอทั้งสองประเภททดลองในโครงข่าย ซึ่งทำให้เห็นผลกระทบของอีดีเอฟเอต่อกำลังแสงภายในโครงข่ายที่ชัดเจน แต่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำอีดีเอฟเอทดลองเพียงลิงก์เดียวจึงเป็นระดับที่เล็กกว่าโครงข่าย

จากบทความที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จะสรุปได้ว่าทุกบทความที่ได้ทบทวนวรรณกรรมมีความเกี่ยวข้องกับหัวข้อต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ อาทิเช่น การเลือกใช้อุปกรณ์ภายในลิงก์, ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลิงก์ และการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในลิงก์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและประกอบลิงก์อีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s ให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้ระยะทางไกล เมื่อแทรกตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ)
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการใช้งานอีดีเอฟเอ 2 ประเภทคือ แบบทั่วไป (Conventional) และวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว (Burst-Mode) ว่ามีผลต่อรูปแบบคลื่น (Waveform) ของสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s อย่างไร
3. เพื่อวัดและวิเคราะห์หาตำแหน่งวางตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ) ภายในลิงก์อีเทอร์เน็ตที่เหมาะสม เช่น กึ่งกลางลิงก์ (In-line), หลังตัวส่งแสง (Booster) และก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (Pre-amplifier)

1.4 เป้าหมายและขอบเขตงานวิจัย

1. ประกอบลิงก์อีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s ตามมาตรฐาน IEEE802.3ae สำหรับอีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต ที่ช่วงความยาวคลื่น 1550 nm เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้ระยะทางไกลกว่าระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงสูงสุดของอุปกรณ์
2. วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ) ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range), อัตราขยาย (Gain) และตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure)
3. วัดและวิเคราะห์สมรรถนะของลิงก์เมื่อแทรกตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ) โดยวัดแผนภาพรูปตา (Eye-diagram) และวิเคราะห์ที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-9}
4 วัดและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต (Power Variations on Ethernet Packets) ของอีดีเอฟเอทั้งสองประเภทคือ แบบทั่วไป (Conventional) และแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว (Burst-Mode)

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์และเครื่องมือวัด
3. คำนวณไดอะแกรมระดับกำลังแสง (Level diagram) เมื่อวางตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยเขียนโปรแกรม MATLAB
4. วัดทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ)
5. ประกอบลิงก์อีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s ตามมาตรฐาน IEEE802.3ae สำหรับอีเทอร์เน็ต 10 กิกะบิต และแทรกตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ) ในลิงก์ เพื่อวัดทดสอบผลของตำแหน่งที่วางตัวขยายแสงสื่อสารสองทาง (อีดีเอฟเอ)
6. วัดทดสอบและวิเคราะห์ผลต่อรูปแบบคลื่นของสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s ของอีดีเอฟเอทั้งสองประเภท
7. วัดทดสอบค่าอัตราความผิดพลาดบิตและวิเคราะห์แผนภาพรูปตา ของสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s ในกรณีต่าง ๆ และสรุปผลการทดลอง
8. เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาวางแผนและวิเคราะห์ผลการทดลองตามทฤษฎีได้
2. สามารถประกอบและเข้าใจลิงก์อีเทอร์เน็ตตามมาตรฐาน IEEE802.3ae ได้
3. สามารถวัดและวิเคราะห์ข้อกำหนดคุณลักษณะ (Specifications) ของอีดีเอฟเอที่ใช้งาน

4. สามารถเปรียบเทียบผลของการใช้อีดีเอฟเอแต่ละประเภทต่อรูปแบบคลื่นของสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตความเร็ว 9.95328/10.3125 Gb/s ได้
5. สามารถวัดและวิเคราะห์สมรรถนะของลิงก์เมื่อแทรกอีดีเอฟเอได้

1.7 ประมวลผลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: บทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงการศึกษามาตรฐานและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ยิ่งไปกว่านั้นบทนี้จะประกอบไปด้วยวัตถุประสงค์, เป้าหมายและขอบเขตงานวิจัย, ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในลิงก์: บทนี้จะมีเนื้อหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในลิงก์ทั้งหมดสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยประกอบด้วยหลักการทำงานของอุปกรณ์, โครงสร้างภายในอุปกรณ์และการใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งจะแบ่งตามประเภทของอุปกรณ์ได้แก่ อุปกรณ์พื้นฐานภายในลิงก์, อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์ และเครื่องมือวัดทดสอบ

บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง: บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยอธิบายสมการและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลิงก์ได้แก่ พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ, สมการงบกำลัง, สมการงบเวลาขาขึ้น, สัญญาณรบกวนภายในลิงก์, แผนภาพรูปตา, อัตราความผิดพลาดบิต และไดอะแกรมระดับ เพื่อนำไปออกแบบการทดลองและประเมินสมรรถนะของลิงก์ในบทถัดไป

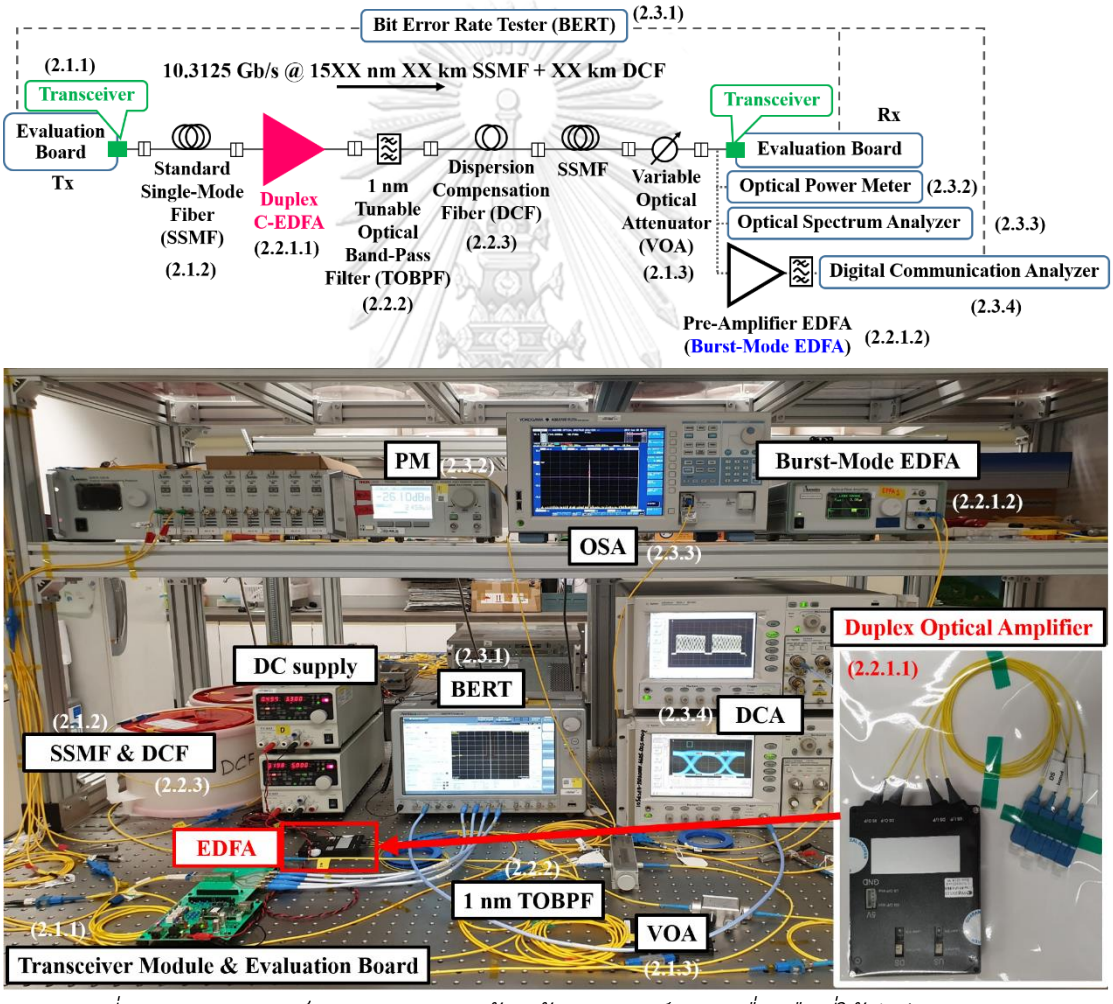
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง: บทนี้จะมีเนื้อหาเกี่ยวการทดลองและผลการทดลองที่ได้ออกแบบมาจากบทหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ โดยประกอบด้วย การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ, งบกำลัง, งบเวลาขาขึ้น, สัญญาณรบกวน, แผนภาพรูปตา, อัตราความผิดพลาดบิต, ไดอะแกรมระดับ และการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต

บทที่ 5 บทสรุป: บทนี้จะสรุปประเด็นสำคัญทั้งหมดสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งกล่าวถึงปัญหาที่พบ และให้ข้อเสนอแนะเมื่อทำการทดลอง เพื่อนำไปประยุกต์และแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ภายในลิงก์อีเทอร์เน็ต

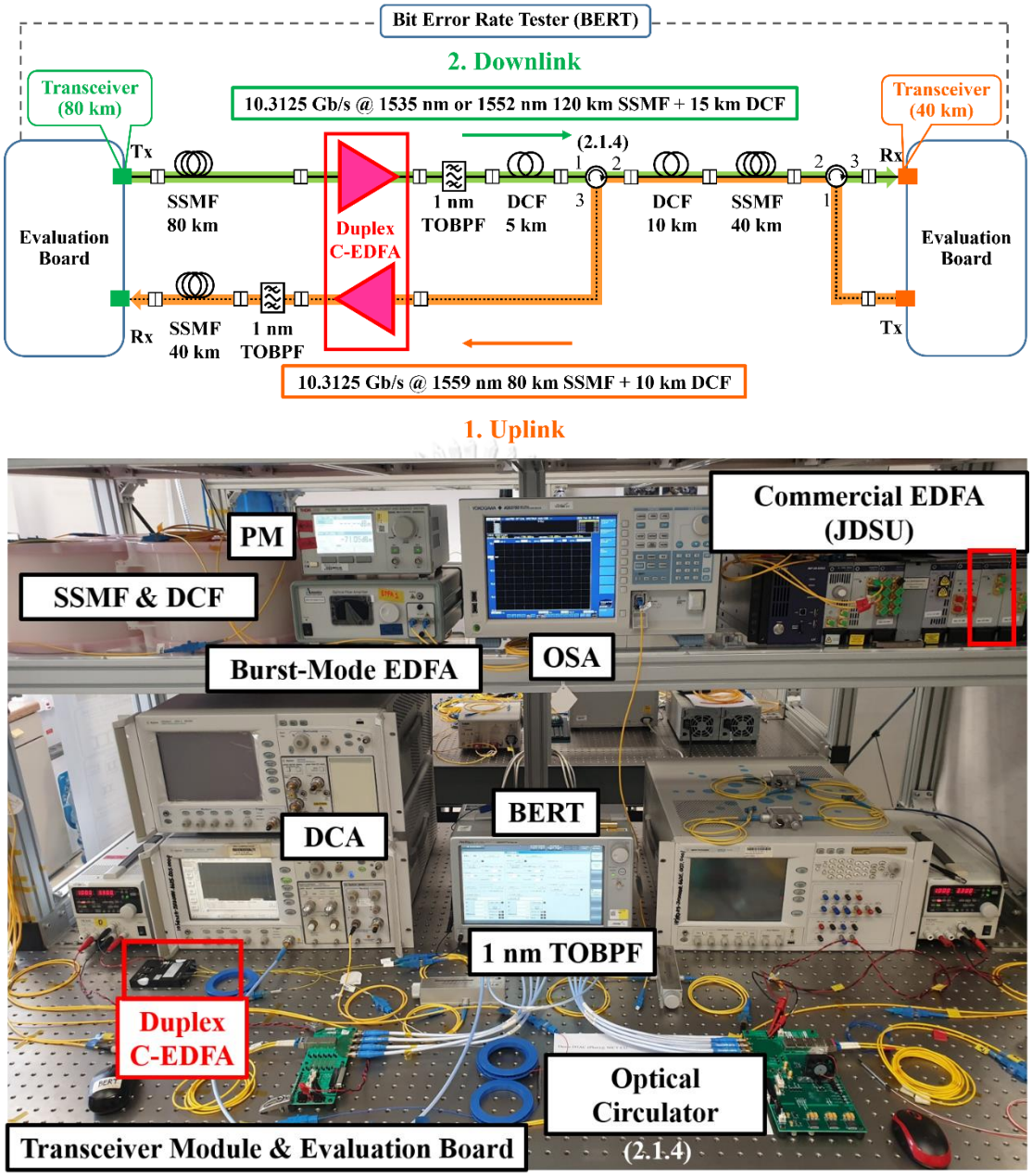
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในลิงก์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในลิงก์รูปที่ 2.1 กับ 2.2 แสดงแผนภาพบล็อกการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยในบทนี้จะบรรยายเรียงจากฝั่งภาคส่งจนถึงภาครับจวบจนองค์ประกอบภายในอุปกรณ์ตามลำดับ ประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลักดังนี้ (2.1) อุปกรณ์พื้นฐานในลิงก์, (2.2) อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์ และ (2.3) เครื่องมือวัดทดสอบ สำหรับตัวเลขในวงเล็บกำกับอยู่ข้างแต่ละอุปกรณ์ในแผนภาพรูปที่ 2.1 กับ 2.2 เป็นหมายเลขแสดงหัวข้อย่อย เพื่อความสะดวกในการอ่านรายละเอียดของอุปกรณ์นั้น ๆ



รูปที่ 2.1 แผนภาพบล็อกการทดลองพร้อมด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการทดลอง



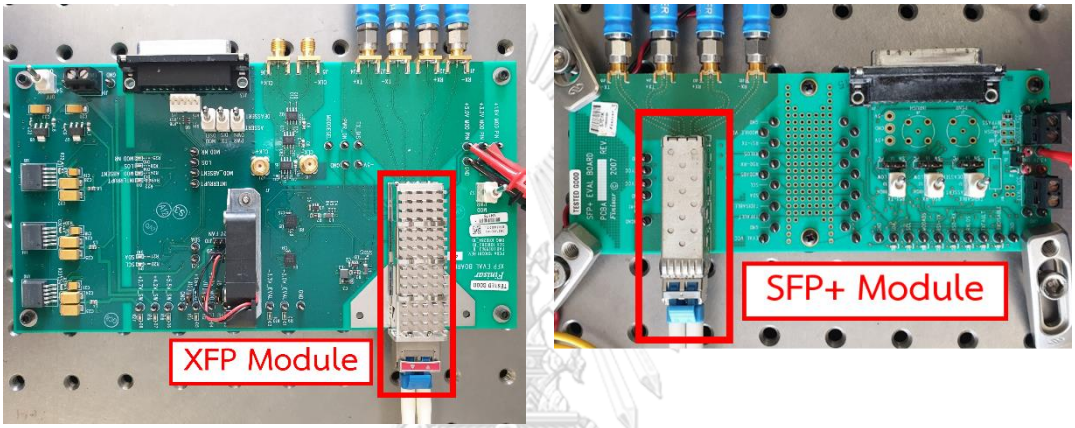
รูปที่ 2.2 แผนภาพบล็อกการทดลองพร้อมด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบส่งสัญญาณสื่อสารสองทาง

2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในลิงก์

2.1.1 บอร์ดประเมินผล (Evaluation Board) และมอดูลรับส่ง (Transceiver modules)

เครื่องเราต์เตอร์เอทีเอ็นที่ติดตั้งในสำนักงานจะมีช่องเสียบสำหรับมอดูลรับส่งทั้งสองรูปแบบ คือ (1) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพี และ (2) มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัส อยู่บริเวณหน้าเครื่องสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s ระหว่างกัน ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะจำลองเราต์เตอร์

เอทีเอ็นด้วยการใช้บอร์ดประเมินผล โดยจะต้องเสียบมอดูลรับส่งทั้งสองรูปแบบเข้ากับหัวต่อ 30 pin ของบอร์ดประเมินผลบริษัท Finisar สำหรับเอกซ์เอฟพี [19] และเอสเอฟพีพลัส [20] ดังรูปที่ 2.3 จากนั้นใช้สายเคเบิลร่วมแกน (Coaxial cable) 4 เส้น เชื่อมต่อสัญญาณข้อมูลเชิงไฟฟ้าทั้งขาเข้าและขาออกไปยังเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต สำหรับวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตและแผนภาพรูปตาเชิงไฟฟ้า (Electrical Eye-diagram) นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply Voltage) ที่ป้อนเข้าบอร์ดประเมินผลสำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีคือ +3.3 V และ +5 V ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าบอร์ดประเมินผลสำหรับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสคือ +3.3 V เพื่อเริ่มการทำงานบอร์ดประเมินผลและมอดูลรับส่ง



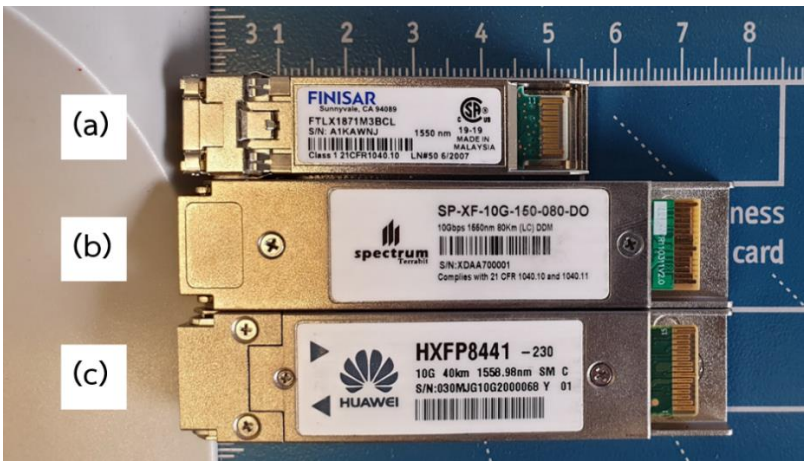
รูปที่ 2.3 บอร์ดประเมินผลสำหรับ (ซ้าย) เอกซ์เอฟพี และ (ขวา) เอสเอฟพีพลัส

2.1.1.1 มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพี (XFP Transceiver module)

วิทยานิพนธ์นี้ใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network [10] และบริษัท Huawei [9] อย่างละ 1 มอดูล ดังในรูปที่ 2.4 (b) และ (c) ตามลำดับ ซึ่งมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei จะมีช่วงความยาวคลื่นทำงานประมาณ 1529.55 nm ถึง 1560.61 nm สามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานได้ระยะสูงสุด 40 km ส่วนมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network มีช่วงความยาวคลื่นทำงานประมาณ 1530 nm ถึง 1565 nm และส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานได้ระยะสูงสุด 80 km

2.1.1.2 มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัส (SFP+ Transceiver module)

มีคุณสมบัติที่เหมือนกับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีแต่จะสังเกตได้ว่ามอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสมีขนาดเล็กกว่าและใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่ามอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพี สำหรับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสจะใช้ของบริษัท Finisar [11] ดังในรูป 2.4 (a) มีช่วงความยาวคลื่นทำงานประมาณ 1530 nm ถึง 1565 nm และส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานได้ระยะสูงสุด 80 km



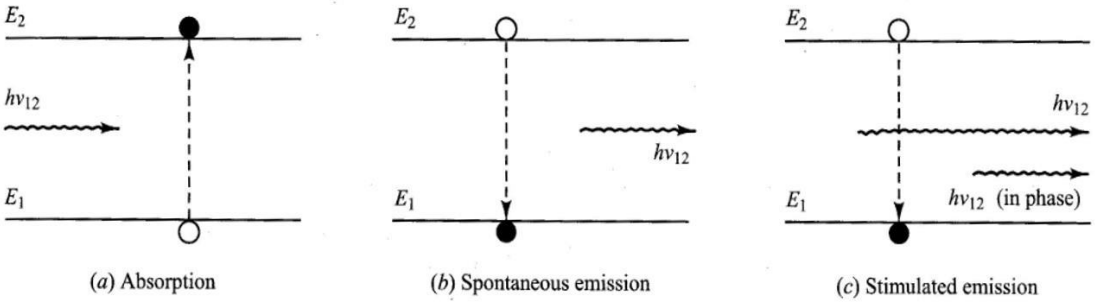
รูปที่ 2.4 มอดูลรับส่ง (a) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei

2.1.1.3 องค์ประกอบภายในมอดูลรับส่ง

โดยองค์ประกอบหลักภายในมอดูลรับส่งทั้งสองรูปแบบจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ (1) เลเซอร์ (Laser) เป็นตัวสร้างสัญญาณแสง และ (2) ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เพื่อรับสัญญาณแสงภายในลิงก์ ดังนี้

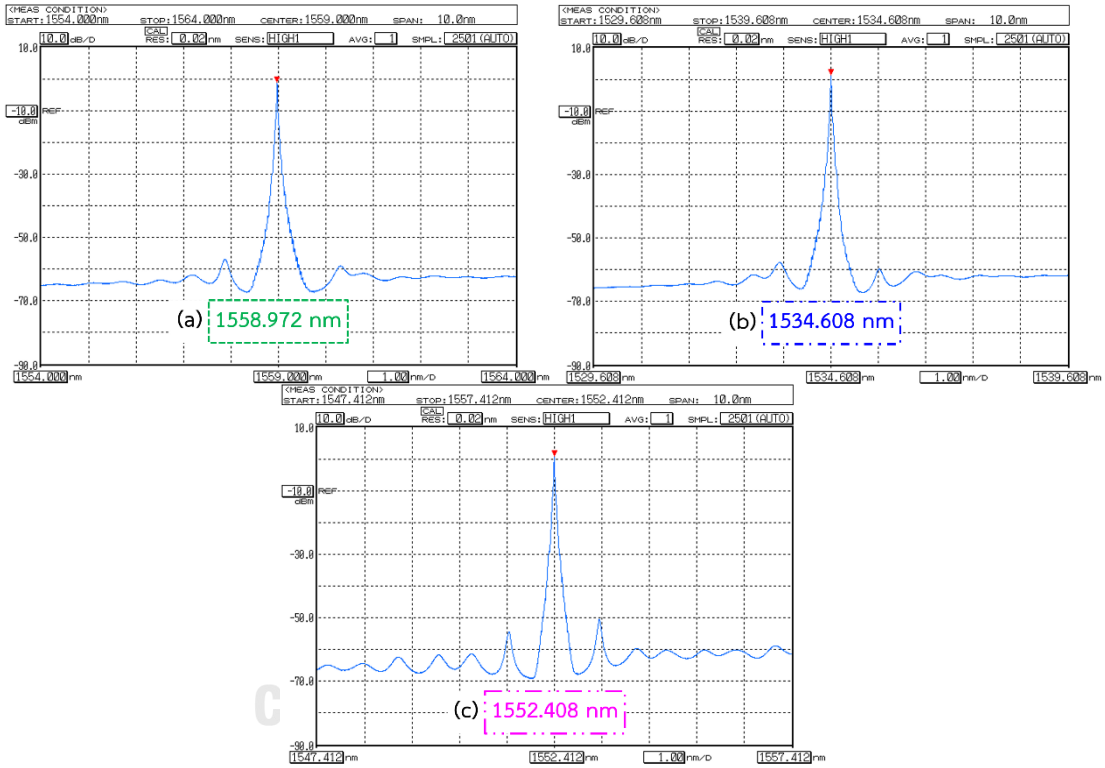
(1) เลเซอร์ (Laser)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของมอดูลรับส่ง ทำหน้าที่สร้างสัญญาณข้อมูลแสงซึ่งมีความกว้างสเปกตรัม (Spectrum Width) แคบมาก ซึ่งเลเซอร์มีกระบวนการทั้งหมด 3 กระบวนการคือ (1) กระบวนการดูดกลืน (Absorption) เป็นกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนจากสถานะพื้น (Ground State) ขึ้นไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) โดยการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a), (2) กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดเอง (Spontaneous Emission) เกิดจากสภาวะที่อิเล็กตรอนไม่สมดุล ทำให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยพลังงานออกมาดังรูป 2.5 (b) และ (3) กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) เกิดจากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นโดยโฟตอนให้ปลดปล่อยพลังงานออกมามีค่าพลังงานเท่ากับโฟตอนตัวแรก ดังรูป 2.5 (c) ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ทั้งสามกระบวนการของเลเซอร์[21]

เลเซอร์ที่ใช้งานในลิงก์มีหลายประเภท แต่มอดูลรับส่งในวิทยานิพนธ์นี้ทั้งสามมอดูลจะใช้เลเซอร์แบบตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML) ประกอบด้วย เลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed Feed-Back Laser, DFB Laser) และ ตัวกล้ำสัญญาณแสงแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) โดยจะสามารถวัดโพรไฟล์สเปกตรัม (Spectrum Profile) ของมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ได้ค่ายอดความยาวคลื่นประมาณ 1559 nm, 1535 nm และ 1552 nm ดังรูปที่ 2.6 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 โพรไฟล์สเปกตรัมของมอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

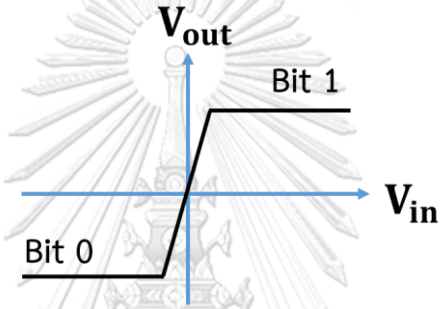
(2) ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)

ตัวตรวจจับแสงที่ใช้ในมอดูลรับส่งทั้งสองรูปแบบ ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณข้อมูลแสงเพื่อแปลงเป็นสัญญาณข้อมูลไฟฟ้า จะแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น (*pin* photodetector) เป็นตัวตรวจจับแสงสารกึ่งตัวนำที่มีความซับซ้อนน้อย ซึ่งใช้งานในมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่นำมาทดลอง โดยมีค่าความไวแสง (Sensitivity) สูงประมาณ -16 dBm และมีสัญญาณรบกวนภายในเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

2. ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี (Avalanche Photo Diode, APD) เป็นตัวตรวจจับแสงสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ซึ่งมีค่าความไวแสงต่ำประมาณ -24 dBm เมื่อเทียบกับชนิดพีไอเอ็น ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณแสงที่มีค่ากำลังแสงต่ำกว่าได้ แต่จะมีสัญญาณรบกวนภายในเกิดขึ้นมากกว่าชนิดพีไอเอ็น

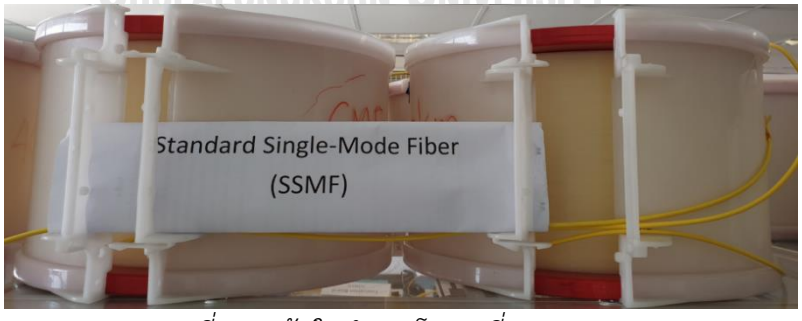
นอกจากนี้ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่นิยมใช้ภายในมอดูลรับส่งทั่วไปคือ ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบจำกัด (Limiting Amplifier, LA) จะมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 2.7 เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) ไม่ว่าจะมีขนาดผลต่างระหว่างบิต 0 และ 1 มากน้อยเพียงใด สัญญาณขาออก (V_{out}) จะได้รับการขยายให้มีค่าคงที่เท่ากัน



รูปที่ 2.7 การทำงานของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบจำกัด[22]

2.1.2 เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF)

เป็นเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวที่อ้างอิงมาตรฐาน ITU-T G.652 [12] ดังรูป 2.8 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ประมาณ 0.2 dB/km ที่ช่วงความยาวคลื่น 1530 nm ถึง 1565 nm ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทดลองรับส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวระยะทางรวมอย่างน้อย 80 km ขึ้นไป



รูปที่ 2.8 เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน

2.1.3 ตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA)

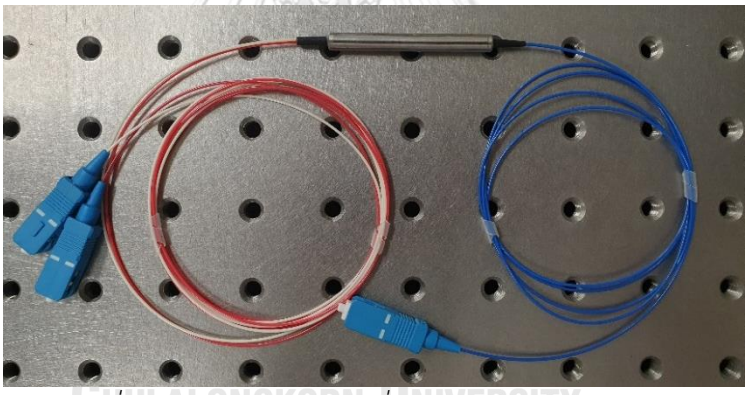
เป็นอุปกรณ์ไว้ปรับลดกำลังแสงไม่ให้มีค่าสูงเกินไปจนสร้างความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ตัวถัดไปในลิงก์ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นของ

บริษัท Optoquest [23] เพื่อปรับลดกำลังแสงขาเข้าภาครับของมอดูลรับส่งและเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล เมื่อวัดทดสอบค่าความผิดพลาดบิตและแผนภาพรูปตา

รูปที่ 2.9 ตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest

2.1.4 ตัวไหลเวียนแสง (Optical Circulator)

เป็นอุปกรณ์กำหนดทิศทางการส่งสัญญาณแสงภายในลิงก์ มีลักษณะดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นตัวไหลเวียนแสงของบริษัท Agiltron [24] เนื่องจากภายในลิงก์จำเป็นต้องส่งสัญญาณแสงสื่อสารสองทาง แต่อุปกรณ์ที่ใช้งานมีจำนวนจำกัด จึงจำเป็นต้องใช้เพื่อกำหนดทิศทางการส่งสัญญาณแสงแบบสองทิศทางผ่านอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานร่วมกันได้



รูปที่ 2.10 ตัวไหลเวียนแสงที่ใช้งานของบริษัท Agiltron

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์

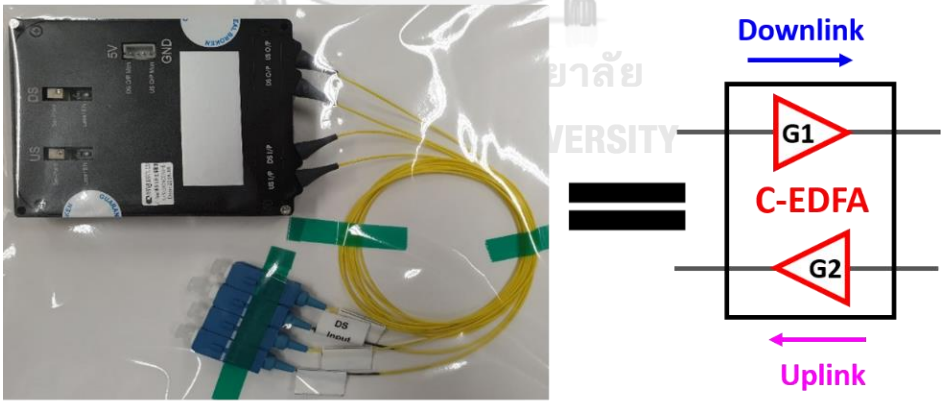
2.2.1 ตัวขยายแสง (Optical Amplifier)

ตัวขยายแสงที่นิยมใช้งานสำหรับการส่งสัญญาณข้อมูลระยะทางไกลโดยทั่วไปจะมี 3 ชนิด ได้แก่ (1) อีดีเอฟเอ (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) , (2) เอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) และ (3) ตัวขยายแสงรามาน (Raman Optical Amplifier) ดังที่กล่าวในบทนำ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทดลองด้วยมอดูลรับส่ง 2 รูปแบบที่ทำงานในช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการศึกษาเฉพาะอีดีเอฟเอ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบทั่วไป (Conventional) และ แบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว (Burst-Mode) โดยประเภทแรกนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบทั่วไปอาทิเช่น ระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่มีช่องสัญญาณแสงจำนวนมาก

และส่งกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเออย่างต่อเนื่องด้วยกำลังเกือบคงที่ หรือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังภายในระบบต่ำ ในทางตรงข้ามประเภทที่สองถูกพัฒนามาเพื่อใช้กับระบบที่มีปัญหาการเปลี่ยนแปลงกำลังภายในระบบสูงคือ ระบบการสวิตช์แพ็กเกตแสง (Optical Packet Switching) ที่มีกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอตามกำลังบนแพ็กเกตที่ส่งภายในระบบ ทำให้มีกำลังแกว่งค่ามากและขาดตอนเป็นช่วง ๆ แต่เมื่อสังเกตกำลังแสงขาออกจากอีดีเอฟเอประเภทที่สองจะพบว่ามีกำลังการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้สามารถลดจำนวนการเกิดข้อมูลผิดพลาดขึ้นในแพ็กเกตได้ สำหรับอีดีเอฟเอแต่ละประเภทที่ใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้ จะมีคุณลักษณะและข้อได้เปรียบซึ่งจะบรรยายในหัวข้อย่อยถัดไปดังนี้

2.2.1.1 อีดีเอฟเอแบบทั่วไป (Conventional EDFA, C-EDFA)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวขยายแสงที่ได้รับมาจากบริษัท Optoquest โดยต่อจากนี้ไปจะเรียกชื่อตามป้ายของกล่องว่า อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง (Duplex Conventional-EDFA, Duplex C-EDFA) ดังลักษณะในรูปที่ 2.11 สามารถขยายสัญญาณข้อมูลแสงได้ทุกค่าอัตราบิต แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s มีช่วงความยาวคลื่นการทำงาน 1530 nm ถึง 1562 nm และมีข้อได้เปรียบดังนี้ เป็นมอดูลขนาดเล็ก, กำลังแสงขาออกอิ่มตัวสูง (High saturation output power), อัตราขยายสูง (High gain), มีความเสถียรสูง (High stability) และสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise) นอกจากนี้จะใช้อีดีเอฟเอทั่วไปของบริษัท Viavi รุ่น mEDFA-A1 [25] ดังรูป 2.12 ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.8 เท่านั้น เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอีดีเอฟเอต่างบริษัท

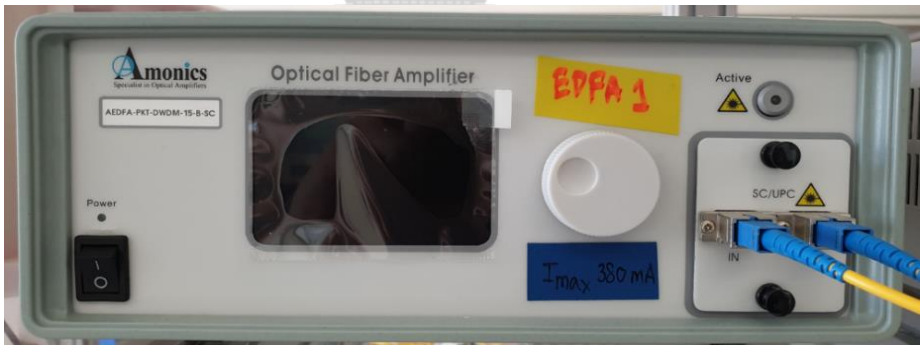


รูปที่ 2.11 อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง และแผนภาพบล็อกขององค์ประกอบภายใน

รูปที่ 2.12 อีดีเอฟเอทั่วไปของบริษัท Viavi รุ่น mEDFA-A1

2.2.1.2 อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว (Burst-Mode EDFA, BM-EDFA)

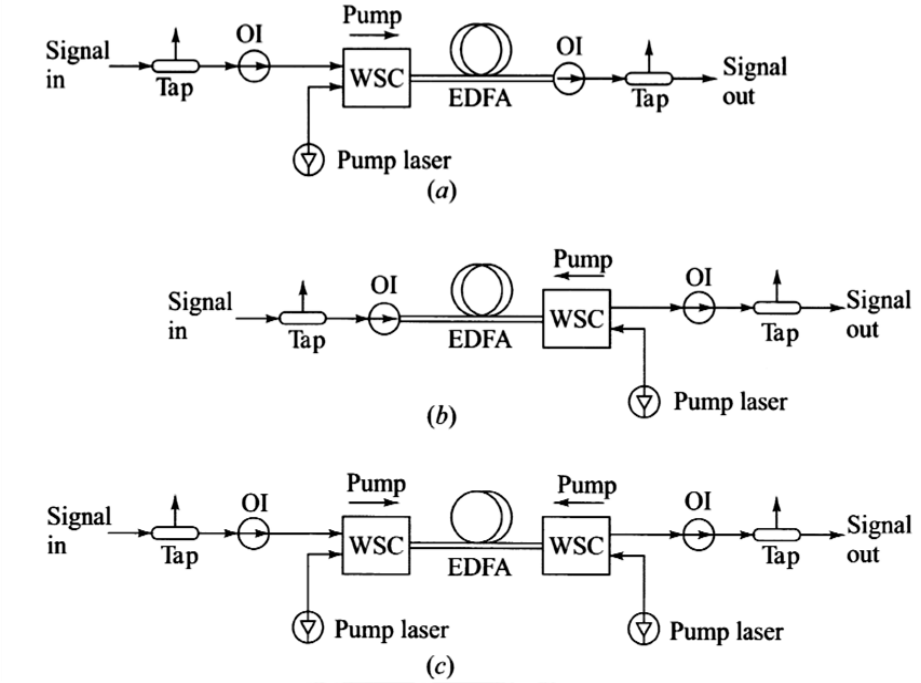
สำหรับอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วจะใช้ของบริษัท Amonics รุ่น (Model) AEDFA-PKT-DWDM-15-B-SC [26] ดังลักษณะในรูปที่ 2.13 สามารถขยายสัญญาณข้อมูลแสงได้ทุกค่าอัตราบิตเช่นเดียวกับแบบทั่วไป โดยเฉพาะในวิทยานิพนธ์นี้คือ อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s มีช่วงความยาวคลื่นการทำงาน 1537.37 nm ถึง 1561.62 nm และมีข้อได้เปรียบดังนี้ การออกแบบได้รับสิทธิบัตร (Patented design), ตัวเลขสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise figure), สามารถลดผลชั่วครู่ (Transient suppressed), พื้นที่ฐานเครื่องมีขนาดเล็ก (Small foot print) และอัตราขยายสูง ลำดับถัดไปจะบรรยายถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในอีดีเอฟเอ



รูปที่ 2.13 อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วของบริษัท Amonics รุ่น AEDFA-PKT-DWDM-15-B-SC

ภายในอีดีเอฟเอประกอบด้วย (1) ปั๊มเลเซอร์ (Pump laser) ที่ป้อนกำลังแสงความยาวคลื่น 980 nm หรือ 1480 nm เข้าไปยัง (2) ตัวคู่ต่อเลือกความยาวคลื่น (Wavelength Selective Coupler, WSC) เป็นตัวรวมสัญญาณแสงขาเข้ากับแสงที่มาจากปั๊มเลเซอร์ เพื่อส่งไปหา (3) เส้นใยนำแสงเจือสารด้วยธาตุเออร์เบียม (Erbium, Er) ใช้เป็นตัวกลางแอ็กทิฟ (Active medium) ซึ่งจะทำงานโดยอิเล็กตรอนของธาตุเออร์เบียมถูกกระตุ้นจากเลเซอร์ปั๊มอย่างต่อเนื่องทำให้เปลี่ยนระดับชั้นพลังงานขึ้นไประดับสูงขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนลดระดับลงมาอยู่ชั้นเดิมจึงปลดปล่อยพลังงานออกมากลายเป็นสัญญาณแสงขาออกที่มีกำลังสูงขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm

สำหรับทิศทางการปั๊มของอีดีเอฟเอจะมีอยู่ 3 รูปแบบได้แก่ (1) การปั๊มร่วมทิศทาง (Co-directional pumping), (2) การปั๊มย้อนกลับ (Counter-directional pumping) และ (3) การปั๊มสองทาง (Dual pumping) แสดงดังรูป 2.14 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 ทิศทางการปั๊มแสงภายในอีดีเอฟเอ[21]

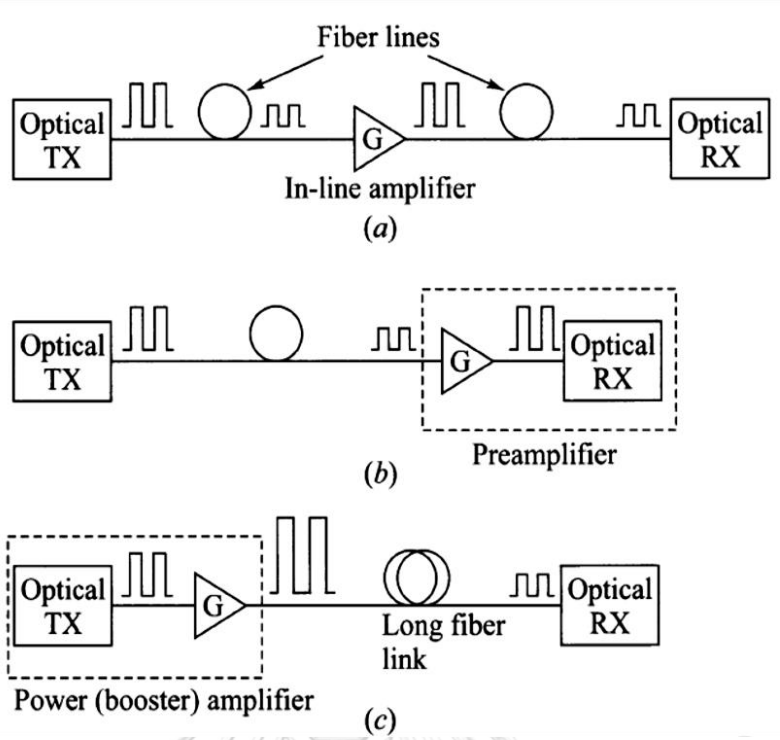
การประยุกต์ใช้งานของอีดีเอฟเอจะแบ่งตามตำแหน่งการวางในลิงก์ โดยแบ่งเป็น 3 ตำแหน่ง ดังรูป 2.15 (a), (b) และ (c) ตามลำดับคือ

(a) ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ (In-line amplifier) มีหน้าที่คล้ายตัวทวนสัญญาณ โดยในตำแหน่งนี้จะไม่ถูกจำกัดด้วยผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion) แต่ถูกจำกัดด้วยผลกระทบของการลดทอนในเส้นใยนำแสง (Fiber Attenuation) จึงทำให้เป็นตำแหน่งที่วางอีดีเอฟเอ เพื่อชดเชยกำลังสูญเสียหรือเพิ่มงบกำลังในลิงก์

(b) ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (Pre-amplifier) เป็นตำแหน่งเพื่อขยายกำลังสัญญาณแสงขาเข้าก่อนตัวตรวจจับแสงที่มีกำลังแสงต่ำกว่าระดับความไวแสงของตัวตรวจจับแสง ให้มีกำลังแสงสูงจนทำให้ตัวตรวจจับแสงสามารถตรวจจับสัญญาณที่ส่งมาได้ ดังนั้นตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่วางอีดีเอฟเอเพื่อเพิ่มความไวแสงของภาครับสัญญาณแสง

(c) ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง (Power/Booster amplifier) เป็นตำแหน่งเพื่อเพิ่มกำลังแสงของตัวส่งแสง ทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงระยะไกลตั้งแต่ 10 km เป็นต้นไป ขึ้นอยู่กับอัตราขยายของอีดีเอฟเอและการสูญเสียในเส้นใยนำแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



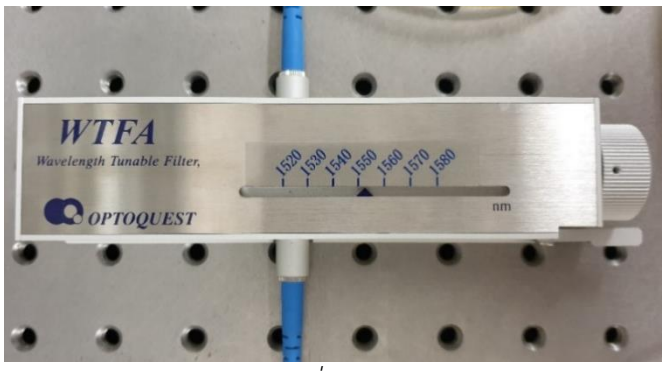
รูปที่ 2.15 การประยุกต์ใช้งานโดยการวางตำแหน่งตัวขยายแสงที่จุดต่าง ๆ[21]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้เน้นศึกษาตำแหน่งการวางที่เหมาะสมสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตแบบสื่อสารสองทาง เนื่องด้วยแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอมีปัจจัยที่แตกต่างกัน จึงเป็นเหตุเพื่อหาตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอที่ทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้ระยะทางไกลเกินกว่ามาตรฐาน และมีคุณภาพของสัญญาณข้อมูลแสงที่ดีหรือมีอัตราความผิดพลาดบิตต่ำตามมาตรฐานกำหนดไว้ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักสำคัญของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2.2 ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF)

เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นจากอีดีเอฟเอที่ใช้ภายในลิงก์ ซึ่งสร้างสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission, ASE noise) ออกมากับสัญญาณแสงที่ได้รับการขยาย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จำเป็นต้องนำตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มาแทรกในตำแหน่งหลังจากอีดีเอฟเอ เพื่อกรองสัญญาณข้อมูลแสงที่ต้องการ ณ ช่วงความถี่แสงที่ใช้งานในลิงก์ โดยจากรูปที่ 2.16 แสดงตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท Optoquest รุ่น WTFA-1580-1-S/S [27] เป็นอุปกรณ์รูปแบบปรับเลื่อนเลือกช่วงความยาวคลื่นแสงใช้งานตั้งแต่ 1520 nm จนถึง 1580 nm จะมีความกว้างสเปกตรัมแสงประมาณ 1 nm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.16 ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท Optoquest รุ่น WTFA-1580-1-S/S

2.2.3 เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion Compensating Fiber, DCF)

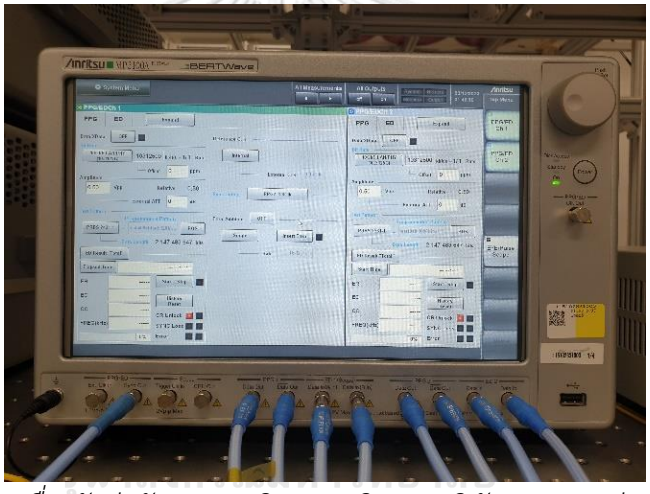
เป็นเส้นใยนำแสงที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชัน ภายในลิงก์มีลักษณะดังรูปที่ 2.17 จะมีค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นค่าติดลบมาก ๆ ตั้งแต่ -100 ps/(nm.km) ถึง -200 ps/(nm.km) ในช่วงความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งจะสามารถนำมาชดเชยกับค่าบวกของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวที่ประมาณ 10 ps/(nm.km) ถึง 20 ps/(nm.km) ดังจะกล่าววิธีการคำนวณในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3 สมการงบเวลาขาขึ้น จึงเป็นเหตุให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันมาแทรกภายในลิงก์ เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของงบเวลาขาขึ้น อันเนื่องมาจากผลการสะสมของค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันในลิงก์เมื่อต้องส่งสัญญาณข้อมูลแสงระยะทางไกล อีกข้อมูลเพิ่มเติมคือ เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนประมาณ 0.4 dB/km สำหรับคำนวณในสมการงบกำลังหัวข้อ 3.2 ต่อไป

รูปที่ 2.17 เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน

2.3 เครื่องมือวัดทดสอบ

2.3.1 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT)

ทำหน้าที่วัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตและแผนภาพรูปตาเชิงไฟฟ้าด้วยการส่ง-รับข้อมูลเชิงไฟฟ้าอาทิเช่น สัญญาณนาฬิกา (Clock Signal, CLK) และสัญญาณข้อมูล (Data Signal) เพื่อประสานเวลา (Synchronized) กับเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลสำหรับวัดแผนภาพรูปตาเชิงแสงและประสานเวลาภายในเครื่องสำหรับวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งตรวจนับจำนวนบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นในสัญญาณข้อมูลขาเข้ามาเทียบกับสัญญาณข้อมูลที่ส่งออกไป โดยเครื่องวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท Anritsu รุ่น MP2100A [28] แสดงดังรูปที่ 2.18 นอกจากนี้เครื่องนี้ยังสามารถวัดแผนภาพรูปตาเชิงไฟฟ้าด้วยสโคปวัดตาเชิงไฟฟ้า (Electrical Eye-scope) ยิ่งไปกว่านั้นเครื่องนี้สามารถส่งและรับข้อมูลได้สองช่องสัญญาณ (Channel) พร้อมกัน



รูปที่ 2.18 เครื่องวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Anritsu รุ่น MP2100A

CHULALONGKORN UNIVERSITY

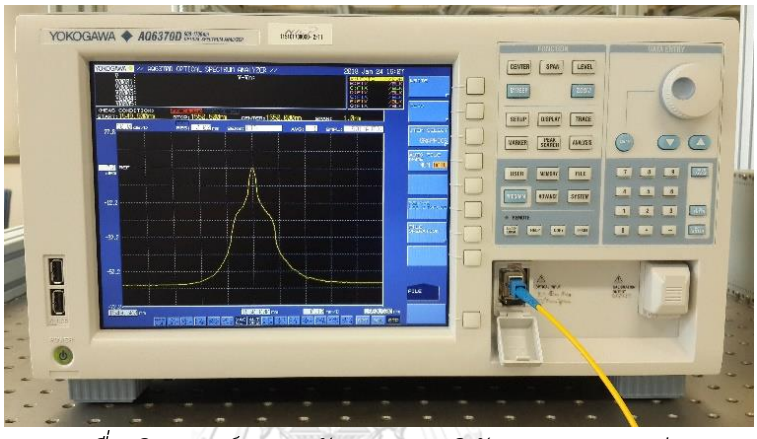
2.3.2 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter)

ทำหน้าที่วัดกำลังแสงภายในลิงก์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ซ้าย) คือมิเตอร์วัดกำลังแสงของบริษัท Thorlab รุ่น PM320E [29] โดยเครื่องนี้สามารถวัดช่วงความยาวคลื่นแสงเฉพาะที่ต้องการได้ ซึ่งเครื่องนี้จะใช้ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นรุ่น S155C ที่ต่ออยู่ด้านหลังเครื่องดังรูป 2.18 (ขวา) ในการตรวจจับสัญญาณแสง

รูปที่ 2.19 (ซ้าย) มิเตอร์วัดกำลังแสง และ (ขวา) ตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็น

2.3.3 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA)

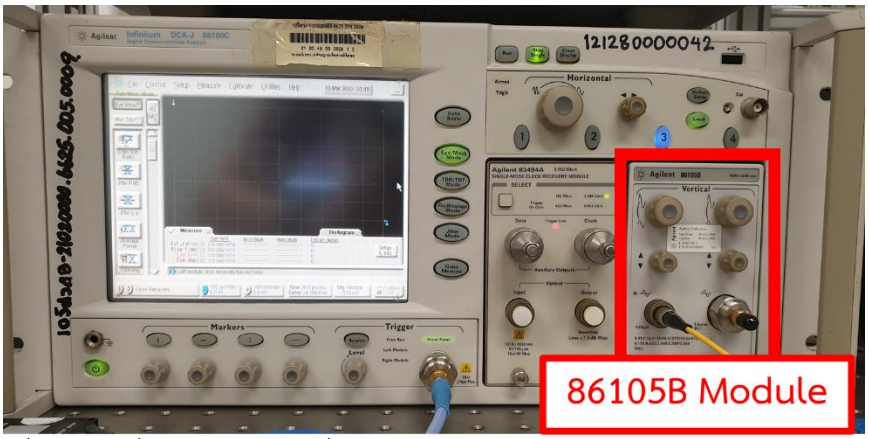
ทำหน้าที่วัดกำลังแสงภายในลิงก์แสดงเป็นโพรไฟล์สเปกตรัม จากรูป 2.20 คือเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D [30] โดยเครื่องจะสแกนวัดกำลังแสงของแต่ละจุดความยาวคลื่นและนำมาต่อกัน จึงทำให้มองเห็นเป็นเส้นสเปกตรัมของสัญญาณข้อมูลแสง ภายในเครื่องมีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงชนิดแคบ (Narrow Optical Bandpass Filter) หรือที่เรียกว่า Resolution Bandwidth โดยมีค่าให้เลือกได้แก่ 0.02 nm, 0.05 nm และ 0.1 nm เป็นต้น ทำให้สามารถวัดสเปกตรัมได้ละเอียด



รูปที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D

2.3.4 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA)

ทำหน้าที่วัดแผนภาพรูปตา ซึ่งจะสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้หลายค่าเช่น ช่วงเวลาขาขึ้นกับขาลง, อัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER), การสั่นไหวของตา (Eye jitter) และความกว้าง/สูงของตา (Eye Width/Height) เป็นต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ประเมินคุณภาพของสัญญาณข้อมูลภายในลิงก์ โดยในรูปที่ 2.21 คือเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัลของบริษัท Agilent รุ่น DCA-J 86100C [31] ในงานนี้ที่ใช้งานเฉพาะมอดูล 86105B 15 GHz optical/ 20 GHz electrical module [32] สำหรับรับสัญญาณข้อมูลแสงและไฟฟ้า



รูปที่ 2.21 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัลของบริษัท Agilent รุ่น DCA-J 86100C

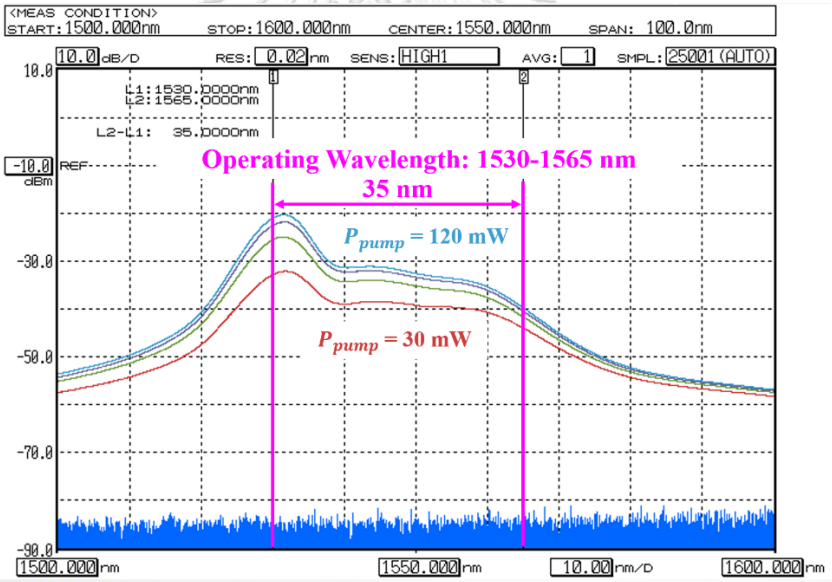
บทที่ 3
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 7 หัวข้อหลักดังนี้ (3.1) พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ, (3.2) สมการงบกำลัง, (3.3) สมการงบเวลาขาขึ้น, (3.4) สัญญาณรบกวนภายในลิงก์, (3.5) ไดอะแกรมระดับ, (3.6) แผนภาพรูปตา และ (3.7) อัตราความผิดพลาดบิต

3.1 พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ (EDFA Parameters)

3.1.1 ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range)

เป็นช่วงความยาวคลื่นที่อีดีเอฟเอสามารถขยายกำลังแสงขาเข้า ซึ่งขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตจะกำหนด โดยการทดสอบวัดช่วงความยาวคลื่นจะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง วัดสเปกตรัมแสงขาออกจากอีดีเอฟเอเมื่อไม่มีแสงขาเข้า จะได้ดังรูป 3.1 ที่แสดงช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอทั่วไปอยู่ระหว่าง 1530 nm ถึง 1565 nm เมื่อใช้กำลังปั๊มที่แตกต่างกัน



Specifications

	C-Band Mini EDFA
Saturation Output Power (at 0 dBm input signal)	Typ. +13dBm, Min. +12dBm
Small Signal Gain	Min. 28dB input signal at -30dBm, 1550nm
Noise Figure (at -3dBm input signal)	Max. 5.5dB
Operating Wavelength	1530 – 1565nm

รูปที่ 3.1 ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานของอีดีเอฟเอ ระหว่าง 1530 ถึง 1565 นาโนเมตร[33]

3.1.2 อัตราขยาย (Gain, G)

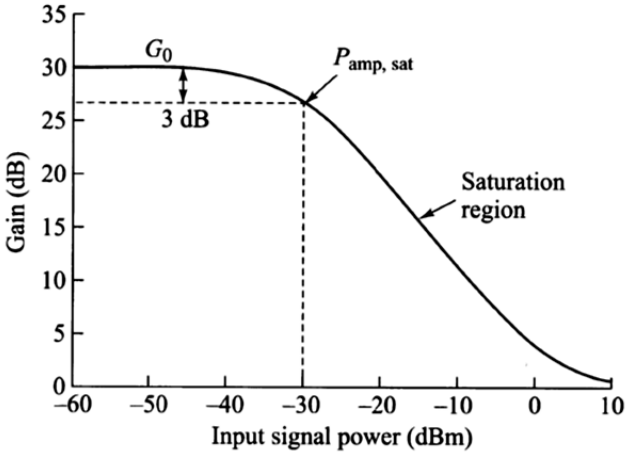
คือผลต่างระหว่างกำลังแสงขาเข้า P_{in} กับกำลังแสงขาออก P_{out} ในหน่วย dB ดังสมการ (3.1) [21]

$$G = P_{out_dBm} - P_{in_dBm} \tag{3.1}$$

โดยที่ P_{in_dBm} คือ กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง (dBm)

P_{out_dBm} คือ กำลังแสงขาออกตัวขยายแสง (dBm)

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับกำลังแสงขาเข้าจะเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับกำลังแสงขาเข้า[21]

3.1.3 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF)

ตัวเลขสัญญาณรบกวน โดยนิยามคือสัดส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ที่ตำแหน่งขาเข้าและขาออกจากตัวขยายแสงดังสมการที่ (3.2) [21] ยิ่งตัวเลขนี้มีค่าน้อย ยิ่งดี บ่งชี้ว่าตัวขยายแสงบวกเพิ่มสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission, ASE) ที่น้อยกว่า

$$NF = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} \tag{3.2}$$

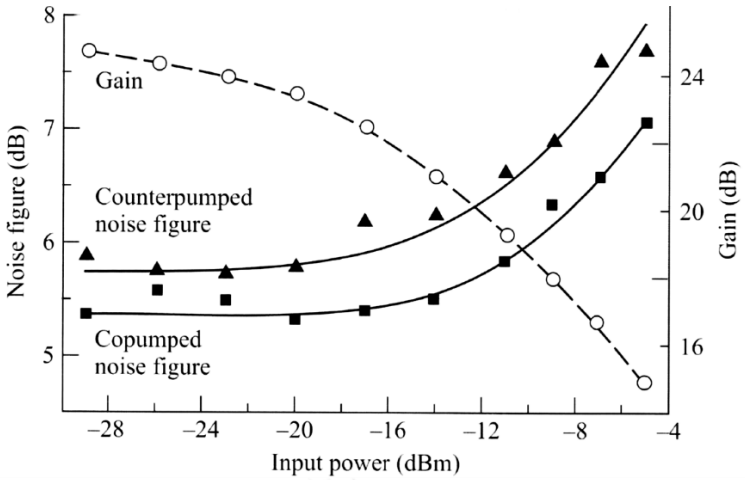
โดยที่ NF คือ ตัวเลขสัญญาณรบกวน (เท่า)

SNR_{input} คือ สัดส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณรบกวนขาเข้า (เท่า)

SNR_{output} คือ สัดส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณรบกวนขาออก (เท่า)

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับตัวเลขสัญญาณรบกวน จะเป็นดังรูปที่ 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับตัวเลขสัญญาณรบกวน[21]

สมการดังกล่าวต้องใช้ตัวตรวจจับแสงแปลงสัญญาณข้อมูลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้ววัดสัดส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณรบกวนทั้งก่อนเข้าและออกจากตัวขยายแสง แต่ในทางปฏิบัติเมื่อวัดสัดส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณรบกวน จากแผนภาพรูปตาจะคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนอื่นร่วมด้วยดังเช่น สัญญาณรบกวนจากความร้อนของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ต่อหลังจากตัวตรวจจับแสง จึงนำตัวแปรจากรูปที่ 3.4 มาแทนค่าในสมการ (3.3) [34]

$$NF = 10log_{10}\left(\frac{2\rho_{total}}{Ghv} + \frac{1}{G} - \frac{2\rho_{SSE}}{hv}\right) \quad (3.3)$$

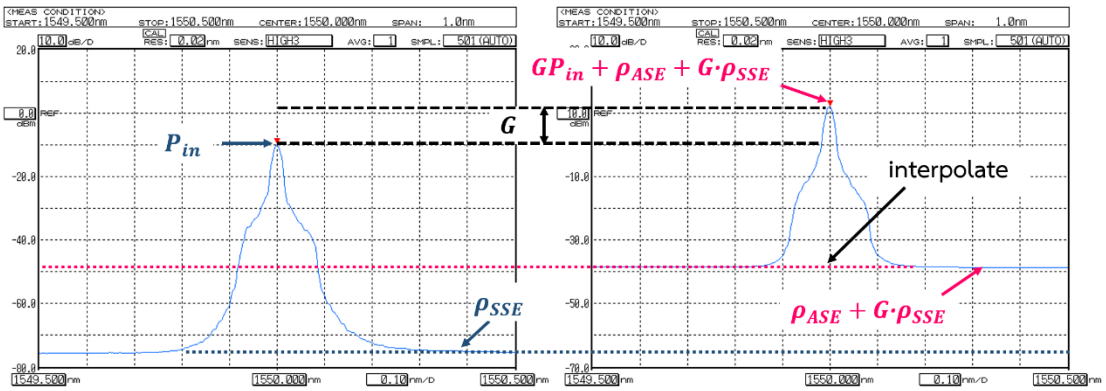
โดยที่ NF คือ ตัวเลขสัญญาณรบกวน (dB)

ρ_{total} คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีทั้งหมด (W/Hz)

ρ_{SSE} คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอสเอสอี (Source Spontaneous Emission, SSE) (W/Hz)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) เท่ากับ 6.625 x 10^{-34} J·s

v คือ ความถี่ของสัญญาณแสง (Hz) (= ความเร็วแสงหารด้วยความยาวคลื่น)



รูปที่ 3.4 โพรไฟล์สเปกตรัม (a) ก่อนเข้าตัวขยายแสง และ (b) หลังผ่านตัวขยายแสง

เนื่องจากบางสมการต้องการใช้ค่าแบนด์วิดท์แสงในการคำนวณ แต่เมื่อทำการทดลองค่าที่ได้จากเครื่องวัดจะเป็นค่าความละเอียดแบนด์วิดท์แสง (Resolution Bandwidth) จึงจำเป็นต้องใช้สมการเปลี่ยนค่าความละเอียดแบนด์วิดท์แสงเป็นค่าแบนด์วิดท์แสงดังสมการ (3.4) [21]

$$|B_o| = \left(\frac{c}{\lambda^2}\right)|\Delta\lambda| \tag{3.4}$$

โดยที่ B_o คือ แบนด์วิดท์แสง (Hz)

c คือ ค่าความเร็วแสง เท่ากับ 3 x 10^8 m/s

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (m)

$\Delta\lambda$ คือ ความละเอียดแบนด์วิดท์แสง (m)

3.2 สมการงบกำลัง (Power budget equation)

สมการงบกำลังใช้วิเคราะห์กำลังแสงของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบรวมภายในลิงก์ เพื่อใช้ในการออกแบบลิงก์อีเทอร์เน็ตซึ่งมีความสำคัญมาก เนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ภาคส่งที่มีกำลังแสงส่งออกจากเลเซอร์และภาครับที่สามารถตรวจจับกำลังแสงต่ำสุดได้จำกัดที่ค่าหนึ่ง อีกทั้งต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการลดทอนในเส้นใยนำแสงและกำลังสูญเสียแทรก (Insertion Loss, IL) ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในลิงก์ดังสมการ (3.5) [21] โดยรวมทั้งกำลังสูญเสียจากหัวต่อ (Connector Loss) และจุดเชื่อมต่อ (Splice Loss)

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นที่การส่งสัญญาณแสงในลิงก์ให้ได้ระยะทางไกล จึงจำเป็นต้องเพิ่มตัวขยายแสงเข้ามาซึ่งมีอัตราขยาย (Gain) ช่วยเพิ่มงบกำลังในลิงก์ โดยงบกำลังสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.6) [21]

$$IL = P_{in} - P_{out} \tag{3.5}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ IL คือ กำลังสูญเสียแทรกของอุปกรณ์ (dB)

P_{in} คือ กำลังแสงขาเข้าอุปกรณ์ (dBm)

P_{out} คือ กำลังแสงขาออกอุปกรณ์ (dBm)

$$P_T = P_S - P_R + G = \alpha L + \sum IL + margin \tag{3.6}$$

โดยที่ P_T คือ งบกำลังทั้งหมดของโครงข่าย (dB)

P_S คือ กำลังแสงส่งออกจากเลเซอร์ (dBm)

P_R คือ กำลังแสงต่ำสุดที่ตรวจจับแสงได้ (dBm)

G คือ อัตราขยาย (Gain) ของตัวขยายแสง (dB)

α คือ การลดทอนของเส้นใยนำแสง (dB/km)

L คือ ระยะทางของเส้นใยนำแสง (km)

$margin$ คือ กำลังเผื่อของระบบ (dB)

3.3 สมการงบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation)

สมการงบเวลาขาขึ้นจะใช้หาค่าการถ่างออกของพัลส์ข้อมูลอันเนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบการรับ-ส่งสัญญาณแสง สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.7) [21]

$$t_{sys} = \sqrt{\sum_i t_i^2} = \sqrt{t_{Tx}^2 + t_{Rx}^2 + t_{CD}^2} \tag{3.7}$$

โดยที่ t_{sys} คือ เวลาขาขึ้นของทั้งระบบ (คิดที่ 10% - 90% ของเวลาขาขึ้น) (s)

t_i คือ เวลาขาขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ (s) ซึ่งในกรณีนี้สนใจที่ 3 อุปกรณ์หลัก ดังนี้

t_{Tx} คือ เวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสง

t_{Rx} คือ เวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง ซึ่งใช้ตัวกรองผ่านต่ำด้วยแบนด์วิดท์ B_{Rx} (Hz) ดังสมการ (3.8) [21]

$$t_{Rx} = \frac{0.35}{B_{Rx}} \tag{3.8}$$

t_{CD} คือ เวลาสัญญาณแสงถ่างออกที่เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวอันเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD) ซึ่งประมาณได้จากสมการ (3.9) [21] ในหน่วย ps

$$t_{CD} \approx |D_{SSMF}L_{SSMF} + D_{DCF}L_{DCF}|\sigma_\lambda \tag{3.9}$$

โดยที่ D_{SSMF} และ D_{DCF} คือ ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของ SSMF และ DCF ตามลำดับ (ps/(nm·km))

L_{SSMF} และ L_{DCF} คือ ระยะทางของเส้นใยนำแสง SSMF และ DCF ตามลำดับ (km)

σ_λ คือ ความกว้างสเปกตรัมแสง (nm)

ปกติการส่งสัญญาณแสงนิยมใช้รูปแบบไม่กลับคืนศูนย์ (Non-Return-to-Zero, NRZ) ดังนั้นเวลาขาขึ้นของทั้งระบบที่ได้จากสมการ (3.7) ควรไม่เกิน 70% ของคาบบิต T_b ดังสมการ (3.10) [21] ซึ่งคาบบิตคือส่วนกลับของอัตราบิตข้อมูล $T_b = 1/R_b$ เพื่อมิให้พัลส์แสงถ่างออกมากเกินไปยังบิตข้อมูลข้างเคียงจนเกิดบิตผิดพลาด

$$t_{sys}R_b < 0.7 \tag{3.10}$$

การออกแบบลิงก์ระยะทางไกลจะมีข้อจำกัดจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน จึงพิจารณาเงื่อนไขของงบเวลาขาขึ้นตามสมการ (3.11) [21] ควบคู่กับงบกำลังดังสมการ (3.6) ด้วยเสมอ

$$t_{10\%-90\%} = 1.25\ t_{20\%-80\%} \tag{3.11}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4 สัญญาณรบกวน (Noise) ภายในลิงก์

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการใช้งานตัวขยายแสงและตัวตรวจจับแสง จึงเป็นที่มาการกล่าวถึงการคำนวณสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ตามที่จะบรรยายดังต่อไปนี้

3.4.1 สัญญาณรบกวนจากภายในตัวตรวจจับแสง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้มอดูลรับส่ง 3 มอดูล โดยภาครับของแต่ละมอดูลจะใช้งานตัวตรวจจับแสงต่างชนิดกันคือ ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นกับเอพีดี จึงทำให้ต้องคำนวณสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในมอดูลรับส่งดังนี้

3.4.1.1 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือสัญญาณรบกวนชอท (Shot noise) เกิดจากโฟตอนเดินทางมากระทบตัวตรวจจับแสงไม่พร้อมกัน ทำให้ตัวตรวจจับแสงแปลงโฟตอนเป็นกระแสโฟโต (Photo Current) โดยขึ้นกับช่วงเวลาที่โฟตอนมาถึงจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนควอนตัม สามารถคำนวณดังสมการ (3.12) [21]

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\mathcal{R}P_{Rx}B_eM^2F(M) \tag{3.12}$$

โดยที่ σ_{shot}^2 คือ สัญญาณรบกวนควอนตัม (A^2)

q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน เท่ากับ 1.60218×10^{-19} C

$\mathcal{R}$ คือ ค่าการตอบสนอง (Responsivity) (A/W)

P_{Rx} คือ กำลังที่ได้รับ (Received Power) (W)

B_e คือ แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า (Electrical Bandwidth) (Hz)

M คือ แฟคเตอร์การคูณ (Multiplication Factor)

$F(M)$ คือ แฟคเตอร์สัญญาณรบกวนส่วนเกิน (Excess Noise Factor)

สำหรับตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นมีค่า M และ $F(M)$ เท่ากับ 1 ส่วนตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดีจะมีค่าการตอบสนอง ($\mathcal{R}_{APD}$) ดังสมการ (3.13) [21]

$$\mathcal{R}_{APD} = \mathcal{R}M \tag{3.13}$$

3.4.1.2 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise)

สัญญาณรบกวนกระแสมืดเกิดจากกระแสที่ยังคงไหลผ่านวงจรไบแอส (Bias Circuit) ภายในอุปกรณ์ ขณะที่ไม่มีสัญญาณแสงมาตกกระทบตัวตรวจจับแสง ทำให้มีสัญญาณรบกวนภายในอุปกรณ์ตลอดเวลา สามารถคำนวณดังสมการ (3.14) [21]

$$\sigma_D^2 = 2qI_DM^2F(M)B_e \tag{3.14}$$

โดยที่ σ_D^2 คือ สัญญาณรบกวนกระแสมืด (A^2)

I_D คือ กระแสมืด (Dark Current) (A)

3.4.1.3 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise)

สัญญาณรบกวนจากความร้อน มาจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานโหลดภายในวงจรไฟฟ้าของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าและตัวตรวจจับแสงจึงทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการ (3.15) [21]

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} B_e \tag{3.15}$$

โดยที่ σ_T^2 คือ สัญญาณรบกวนจากความร้อน (A^2)

k_B คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzmann's Constant) เท่ากับ 1.38054×10^{-23} J/K

T คือ อุณหภูมิ (Temperature) (K)

R_L คือ ความต้านทานโหลด (Load Resistance) (Ω)

3.4.2 สัญญาณรบกวนจากตัวขยายแสง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ตัวขยายแสงเป็นอีดีเอฟเอซึ่งพบสัญญาณรบกวนเอเอสอี มาจากการปลดปล่อยแบบเกิดเองภายในตัวขยายแสง โดยสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีสามารถคำนวณหาค่ากำลังความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Power Spectral Density of the ASE noise) ได้ดังสมการ (3.16) [21]

$$S_{ASE}(f) = hvn_{sp}[G(f) - 1] = \frac{P_{ASE}}{B_{o\,Res}} \tag{3.16}$$

โดยที่ S_{ASE} คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (W/Hz)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) เท่ากับ 6.625×10^{-34} J·s

n_{sp} คือ แฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission-Factor)

G คือ อัตราขยายของตัวขยายแสง (เท่า)

P_{ASE} คือ กำลังสัญญาณรบกวนเอเอสอี (W)

$B_{o\,Res}$ คือ แบนด์วิดท์แสงของเครื่องวัด (Hz)

สำหรับแฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง คำนวณจากสมการ (3.17) [21] ซึ่งในกรณีอุดมคติมีค่าเท่ากับ 1 แต่โดยปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 4

$$n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \tag{3.17}$$

โดยที่ n_1 คือ ประชากรอะตอมมิคที่สถานะพื้น (Atomic Population for Ground State)

n_2 คือ ประชากรอะตอมมิคที่สถานะกระตุ้น (Atomic Population for Excited State)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.2.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากอีดีเอฟเอ

สัญญาณรบกวนควอนตัมที่เกิดขึ้นเป็นเช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสง แต่ในลิงก์ใช้อีดีเอฟเอ จึงทำให้มีผลของสัญญาณรบกวนเอเอสอีเพิ่มขึ้นมาด้วย สามารถคำนวณดังสมการ (3.18) [21]

$$\sigma^2_{shot\ EDFA} = \sigma^2_{shot-s} + \sigma^2_{shot-ASE} = 2q\mathcal{R}GP_{s,in}B_e + 2q\mathcal{R}S_{ASE}B_oB_e \quad (3.18)$$

โดยที่ $\sigma^2_{shot\ EDFA}$ คือ สัญญาณรบกวนควอนตัมจากอีดีเอฟเอ (A^2)

σ^2_{shot-s} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณ (A^2)

$\sigma^2_{shot-ASE}$ คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)

$P_{s,in}$ คือ กำลังสัญญาณแสงขาเข้าตัวขยายแสง (W)

3.4.2.2 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Signal-ASE Noise)

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี เกิดจากสัญญาณแสงที่ผ่านตัวขยายแสงไปบีต (beat) กับสัญญาณรบกวนเอเอสอี จะคำนวณได้ดังสมการ (3.19) [21]

$$\sigma^2_{s-ASE} = 4(\mathcal{R}GP_{s,in})(\mathcal{R}S_{ASE}B_e) \quad (3.19)$$

โดยที่ σ^2_{s-ASE} คือ สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)

3.4.2.3 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (ASE-ASE Noise)

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี เกิดจากสัญญาณรบกวนเอเอสอีบีตกันเอง จะคำนวณได้ดังสมการ (3.20) [21]

$$\sigma^2_{ASE-ASE} = \mathcal{R}^2S^2_{ASE}(2B_o - B_e)B_e \quad (3.20)$$

โดยที่ $\sigma^2_{ASE-ASE}$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5 ไดอะแกรมระดับ (Level Diagram)

แสดงระดับกำลังแสงของสัญญาณข้อมูลเทียบกับระยะทางสูงสุดของที่สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้ โดยหัวข้อนี้ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์หลักคือ

3.5.1 กำลังสัญญาณ (Signal Power)

คือกำลังแสงขาออกจากตัวส่งสัญญาณแสงที่ถูกลดทอนกำลังไปในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานและเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน ดังสมการ (3.21) [21]

$$P_{Link} = P_{Signal} + G - \alpha_{SSMF}L_{SSMF} - \alpha_{DCF}L_{DCF} \quad (3.21)$$

โดยที่ P_{Link} คือ กำลังสัญญาณแสงในลิงก์ (dB)

P_{Signal} คือ กำลังสัญญาณแสงขาออกจากตัวส่ง (dBm)

3.5.2 สัญญาณรบกวนเอเอสอี

สัญญาณรบกวนเอเอสอีที่มาจากอีดีเอฟเอดังสมการ (3.16)

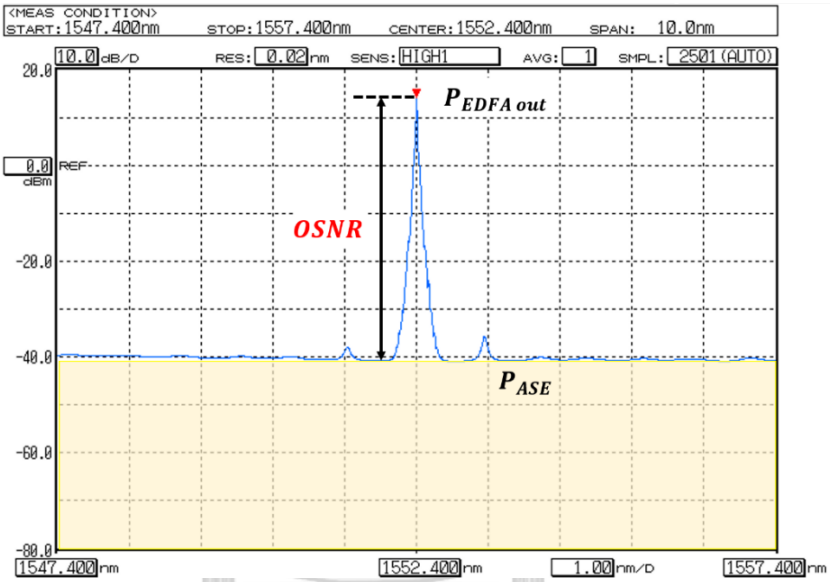
3.5.3 สัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวน (Optical Signal-to-Noise, OSNR)

เป็นสัดส่วนระหว่างกำลังสัญญาณแสงขาออกอีดีเอฟเอ $P_{EDFA\ out}$ (dBm) กับกำลังสัญญาณรบกวนเอเอสอี P_{ASE} (dBm) สามารถคำนวณดังสมการ (3.22) [21]

$$OSNR = P_{EDFA\ out,dBm} - P_{ASE,dBm} \tag{3.22}$$

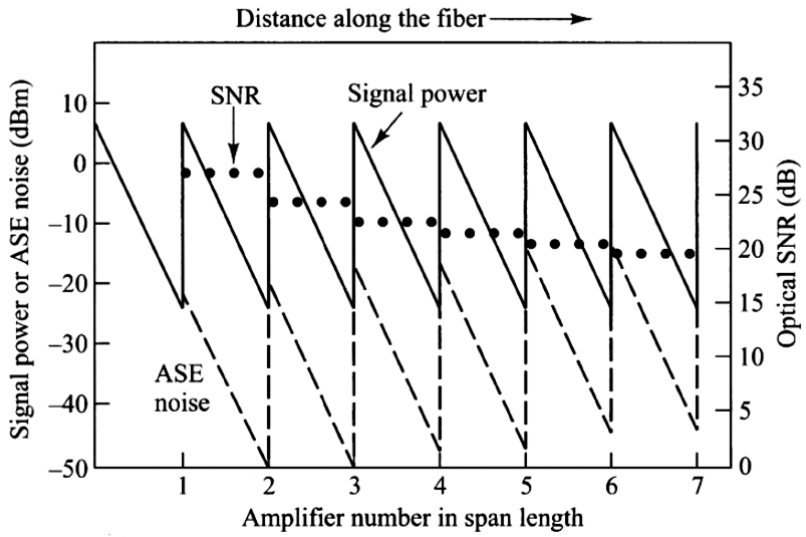
โดยที่ $OSNR$ คือ สัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวน (dB)

$P_{EDFA\ out}$ คือ กำลังสัญญาณแสงขาออกอีดีเอฟเอ (dBm)



รูปที่ 3.5 การคำนวณสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวน

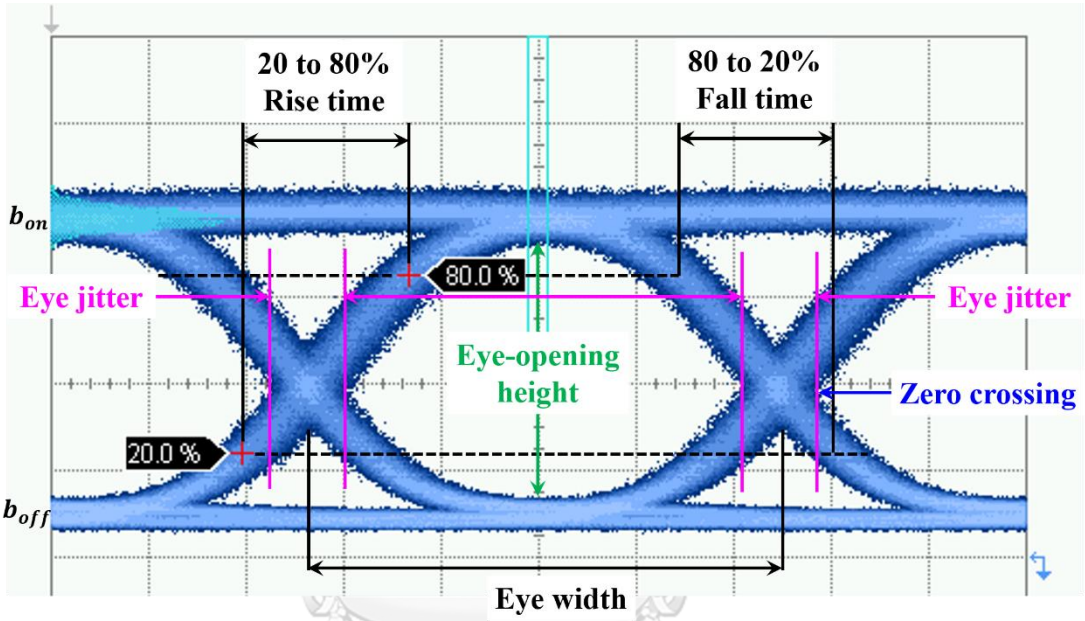
จากทั้งสามพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำมาวาดกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมระดับเมื่อแทรกอีดีเอฟเอ[21]

3.6 แผนภาพรูปตา (Eye-diagram)

เป็นหนึ่งในวิธีประเมินคุณภาพของสัญญาณภายในลิงก์ซึ่งมีลักษณะคล้ายตาของมนุษย์ สามารถทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล โดยการวัดแผนภาพรูปตาจะทดสอบในเชิงเวลา ขอบเขตบนและล่างจะพิจารณาจากระดับของบิต 1 และ 0 ที่แสดงโดย b_{on} และ b_{off} ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.7 นอกจากนี้แผนภาพรูปตายังสามารถแสดงผลการบิดเบี้ยวของรูปแบบคลื่น (waveform distortion), ช่วงเวลาขาขึ้น-เวลาขาลงของระบบ และการสั่นไหวของเวลา (timing jitter) ได้



รูปที่ 3.7 แผนภาพรูปตาทั่วไป

จากรูปที่ 3.7 ความกว้างของแผนภาพรูปตาจะแสดงช่วงเวลาที่สามารถรับสัญญาณได้โดยไม่มีผลความผิดพลาดจากสัญญาณก่อนหน้าหรือเรียกกว่า การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference, ISI) และความสูงของแผนภาพรูปตาจะแสดงความแตกต่างของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เมื่อวัดแผนภาพรูปตาควรให้แผนภาพรูปตาเปิดกว้างที่สุด เพื่อให้ระดับสัญญาณของบิต 1 และ 0 แยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.7 อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)

อัตราความผิดพลาดบิตเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของสัญญาณที่ส่งในลิงก์โดยวัดจากภาครับ อ่านได้จากเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT) โดยตรง หรือคำนวณจากแผนภาพรูปตาโดยใช้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 และ 1 ที่วัดได้ มาคำนวณค่าคิวแฟคเตอร์ (Q-factor) จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างคิวแฟคเตอร์กับอัตราความผิดพลาดบิตได้ดังสมการ (3.23) และ (3.24) [21] นอกจากนี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูป 3.8 [21]

$$Q = \frac{b_1 - b_o}{\sigma_1 + \sigma_o} = \frac{2\sqrt{2}OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \tag{3.23}$$

โดยที่ Q คือ คิวแฟคเตอร์

b_1 คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของบิต 1 (V)

b_o คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของบิต 0 (V)

σ_1 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 (V)

σ_o คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 (V)

$$BER = aP_1(V_{th}) + bP_0(V_{th}) = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{1}{Q}\exp(\frac{-Q^2}{2}) \tag{3.24}$$

โดยที่ BER คือ อัตราความผิดพลาดบิต

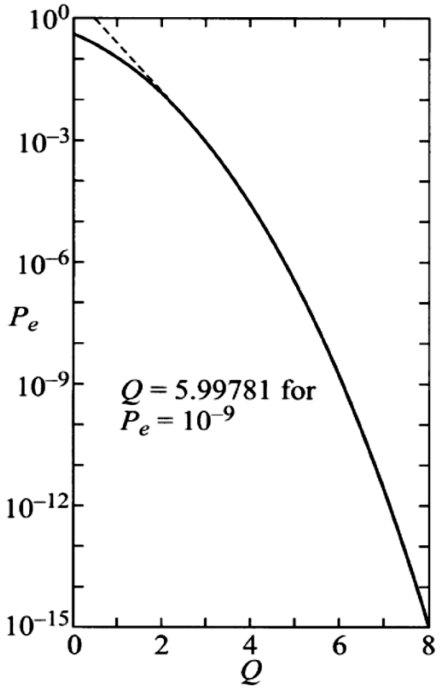
a คือ ความน่าจะเป็นที่บิต 1 เกิดขึ้น ซึ่งในกรณีนี้เท่ากับ 0.5

b คือ ความน่าจะเป็นที่บิต 0 เกิดขึ้น ซึ่งในกรณีนี้เท่ากับ 0.5

$P_1(V_{th})$ คือ ความน่าจะเป็นที่บิต 1 จะผิดพลาด

$P_0(V_{th})$ คือ ความน่าจะเป็นที่บิต 0 จะผิดพลาด

V_{th} คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าขีดแบ่ง (V)



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับคิวแฟคเตอร์[21]

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

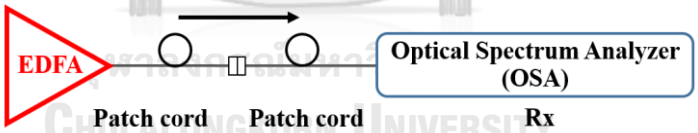
บทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองรวมถึงการวิเคราะห์ผล ซึ่งหัวข้อจะจัดเรียงอ้างอิงตามบทที่ 3 โดยมีหัวข้อหลักดังนี้ (4.1) การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ, (4.2) การวิเคราะห์งบกำลัง, (4.3) การวิเคราะห์งบเวลาขาขึ้น, (4.4) การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน, (4.5) การวิเคราะห์ไดอะแกรมระดับและหาตำแหน่งที่เหมาะสม, (4.6) การวิเคราะห์แผนภาพรูปตา, (4.7) การวิเคราะห์อัตราความผิดพลาดบิต และ (4.8) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต

4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอ (EDFA Parameters Analysis)

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอเพื่อทำให้ทราบคุณลักษณะของอีดีเอฟเอที่นำมาแทรกภายในลิงก์อีเทอร์เน็ต โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ดังนี้ (1) ช่วงความคลื่นใช้งาน, (2) อัตราขยาย และ (3) ตัวเลขสัญญาณรบกวน ดังหัวข้อบรรยายลำดับถัดไป

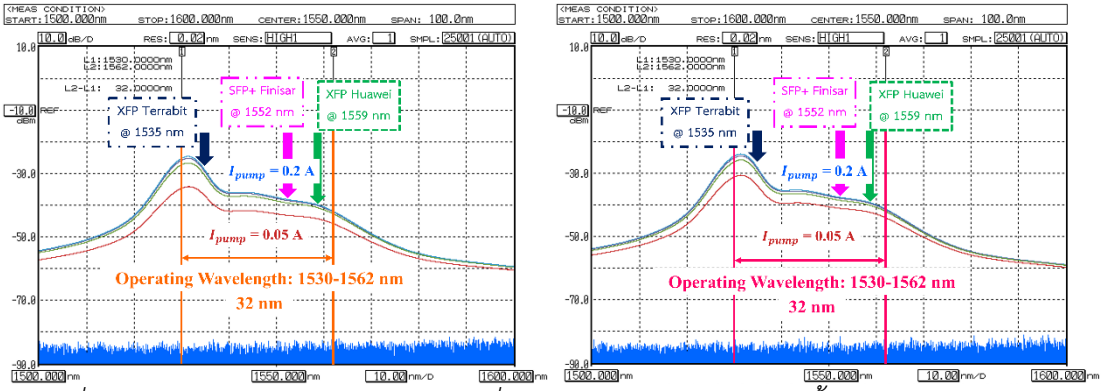
4.1.1 การวิเคราะห์ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Wavelength Range Analysis)

การวิเคราะห์ช่วงความยาวคลื่นใช้งานทำให้ทราบช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับแทรกอีดีเอฟเอภายในลิงก์ โดยทดลองวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอดังรูป 4.1 ที่แสดงแผนภาพบล็อกการวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งานเมื่อไม่มีแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ จากนั้นใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA) อ่านค่ากำลังแสงขาออกจากอีดีเอฟเอ เพื่อบันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลองในลำดับถัดไป



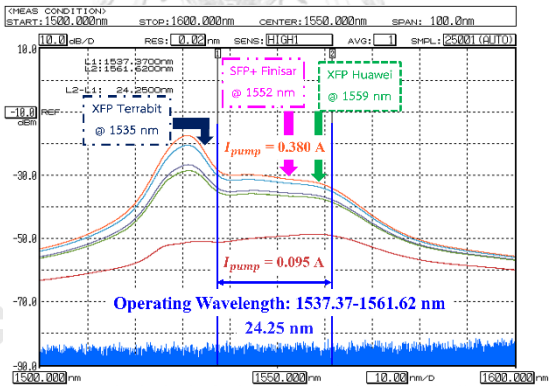
รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกการวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอ

จากผลการทดลองของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางด้วยกระแสปั๊มต่างกัน 4 ค่าโดยประมาณดังนี้ 0.05 A (เส้นต่ำสุด), 0.10 A, 0.15 A และ 0.20 A (เส้นสูงสุด) ที่กระแสปั๊มสูงสุดช่วงลิงก์ขาขึ้น (Uplink) แสดงดังรูปที่ 4.2 (ซ้าย) ใช้กระแสปั๊ม 0.195 A และช่วงลิงก์ขาลง (Downlink) ดังรูปที่ 4.2 (ขวา) ใช้ 0.197 A โดยอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางทั้งฝั่งลิงก์ขาขึ้นและขาลงมีช่วงความยาวคลื่นใช้งานที่ระบุตามแผ่นข้อกำหนด (Specification sheet) คือ 1530 nm จนถึง 1562 nm หรือมีช่วงความยาวคลื่นใช้งานกว้างประมาณ 32 nm จึงทำให้สามารถรองรับการใช้งานมอดูลรับส่งทั้งสามมอดูลที่นำมาทดลองภายในลิงก์ได้



รูปที่ 4.2 โพรไฟล์สเปกตรัมของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง (ซ้าย) ลิงก์ขาขึ้น และ (ขวา) ลิงก์ขาลง เมื่อกระแสปั๊มต่างกัน

ส่วนผลการทดลองของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วที่กระแสปั๊มต่างกัน 5 ค่าดังนี้ 0.095 A (เส้นต่ำสุด), 0.175 A, 0.190 A, 0.285 A และ 0.380 A (เส้นสูงสุด) ดังรูปที่ 4.3 โดยมีช่วงความยาวคลื่นใช้งานคือ 1537.37 nm จนถึง 1561.62 nm หรือมีช่วงความยาวคลื่นใช้งานกว้างประมาณ 24.25 nm ซึ่งเป็นช่วงที่ระบุไว้ในแผ่นข้อกำหนดของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว [26] ที่จะสามารถควบคุมอัตราขยายให้เสถียรได้เท่านั้น เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งที่มีความยาวคลื่นใช้งานเกินช่วงที่กำหนด อาจจะทำให้เกิดกำลังขยายและสัญญาณรบกวนมากกว่าปกติ

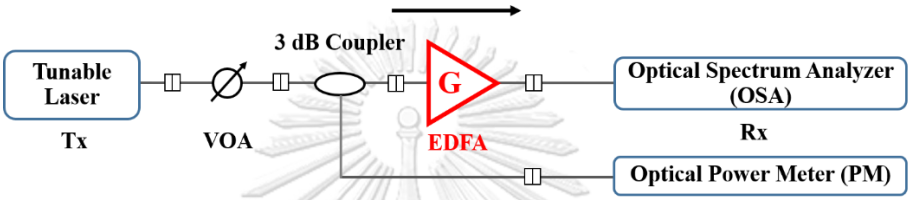


รูปที่ 4.3 โพรไฟล์สเปกตรัมของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว เมื่อกระแสปั๊มต่างกัน

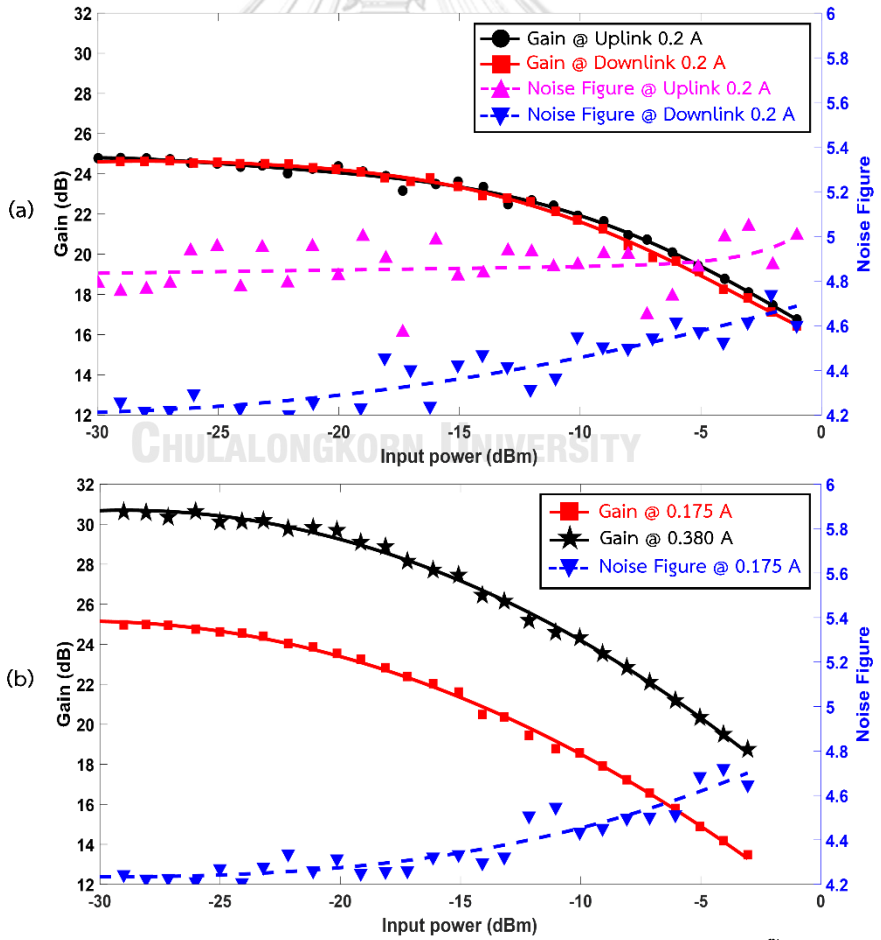
จากผลการทดลองวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอทั้งสองประเภท สรุปได้ว่าอีดีเอฟเอทั้งสองประเภทให้โพรไฟล์สเปกตรัมแสงที่เหมือนกัน ณ ค่าปั๊มระดับกลาง แต่ช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วจะมีช่วงที่กำหนดแคบกว่า เนื่องจากสนใจเฉพาะช่วงแบนราบเท่านั้น จึงทำให้อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีกำลังขยายที่ใกล้เคียงกันจะเหมาะกับระบบสวิตช์แพ็กเกตภายในช่วงความยาวคลื่นใช้งานที่มีความผันผวนของกำลังแสงสูง แต่ในทางกลับกันอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจะเหมาะสมกับระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่มีกำลังแสงใกล้เคียงกัน เนื่องจากระบบดับเบิลยูดีเอ็มจะกำหนดช่วงความยาวคลื่นใช้งานจำเพาะหรือเป็นกริด (grid) ซึ่งจะมีความยาวคลื่นที่หลากหลาย ทำให้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นใช้งานได้มากกว่า

4.1.2 การวิเคราะห์อัตราขยาย (Gain Analysis)

การวิเคราะห์อัตราขยายทำให้ทราบถึงขีดจำกัดการขยายกำลังแสงของอีดีเอฟเอ โดยทดลองตามแผนภาพบล็อกรูป 4.4 ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ด้วยอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่กระแสปั๊มประมาณ 0.2 A (กระแสปั๊มช่วงขาขึ้นและขาลงใช้ประมาณ 0.195 A และ 0.197 A ตามลำดับ) ส่วนอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วที่กระแสปั๊ม 0.175 A และ 0.380 A ซึ่งอ่านค่าผลต่างระหว่างยอดกำลังแสงของสเปกตรัมขาออกกับขาเข้าด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง จะได้ค่าอัตราขยายดังสมการ (3.1) จากนั้นค่อย ๆ ปรับกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอด้วยตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและกำลังแสงขาเข้าเป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดอัตราขยายของอีดีเอฟเอ



รูปที่ 4.5 อัตราขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอที่กระแสปั๊มต่างกัน: (a) อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง และ (b) อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว

จากรูป 4.5 แสดงผลการทดลองของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางและอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว มีอัตราขยายสูงสุดประมาณ 24.5 dB, 24.5 dBและ 31 dB ที่กระแสปั๊ม 0.200 A, 0.175 A และ 0.380 A ตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราขยายสูงสุดเท่ากัน อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วจะใช้กระแสปั๊มน้อยกว่าอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับกำลังแสงขาเข้าคือ อัตราขยายจะมากก็ต่อเมื่อกำลังแสงขาเข้าน้อย จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการเปรียบเทียบอีดีเอฟเอสองประเภทนี้ จึงจงใจลดค่ากระแสปั๊มของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วเพื่อให้ได้อัตราขยายสูงสุดใกล้เคียงกันเมื่อทดลองแทรกอีดีเอฟเอทีละตัวในลิงก์อีเทอร์เน็ต

4.1.3 การวิเคราะห์ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure Analysis)

การวิเคราะห์ตัวเลขสัญญาณรบกวน ทำให้ทราบถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอีดีเอฟเอซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณแสงภายในลิงก์ โดยการหาตัวเลขสัญญาณรบกวนในทางปฏิบัติเมื่อวัดสัดส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูล และสัญญาณรบกวนจากแผนภาพรูปตาจะคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนอื่นร่วมด้วยเช่น สัญญาณรบกวนจากความร้อนหรือจากตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ต่อหลังตัวตรวจจับแสง จึงทำให้ตัวเลขสัญญาณรบกวนสามารถทดสอบพร้อมกับอัตราขยายดังรูปที่ 4.4 เช่นกันด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขสัญญาณรบกวนกับกำลังขาเข้าโดยมีค่าอัตราขยายร่วมด้วย เพื่อสะท้อนว่าตัวเลขสัญญาณรบกวนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราขยายลดลงตามแผ่นข้อกำหนดได้ระบุกำลังแสงขาเข้าสำหรับอ่านค่าตัวเลขสัญญาณรบกวน ซึ่งตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางกับอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 4.6 dB อยู่ที่ -3 dBm จึงคาดการณ์ว่าเมื่อทดลองรับ-ส่งสัญญาณข้อมูลแสงจะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ใกล้เคียงเช่นกัน และผลการทดลองรูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการนำค่าพารามิเตอร์มาแทนในสมการ (3.3) เพื่อคำนวณหาตัวเลขสัญญาณรบกวน

ดังนั้นตำแหน่งวางอีดีเอฟเอในลิงก์จะส่งผลกระทบต่อค่าอัตราขยายและค่าตัวเลขสัญญาณรบกวน ตัวอย่างเช่น ถ้าแทรกที่ระยะสั้นมากเมื่อมีกำลังแสงขาเข้าสูง จะได้อัตราขยายต่ำแต่ตัวเลขสัญญาณรบกวนสูง และส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณข้อมูลแสงแย่ลง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการคำนวณและแสดงผลแบบไดอะแกรมระดับ

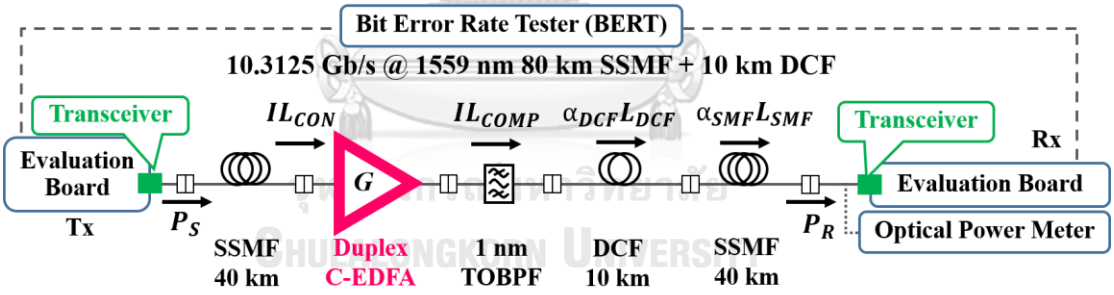
จากที่กล่าวมาในหัวข้อนี้ทำให้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญแล้ว หัวข้อถัดไปจะเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อออกแบบลิงก์อีเทอร์เน็ตตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

4.2 การวิเคราะห์งบกำลัง (Power Budget Analysis)

การวิเคราะห์งบกำลังในหัวข้อนี้เพื่อทำให้ทราบถึงขีดจำกัดของลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ออกแบบมาด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางวาง ณ ตำแหน่งแตกต่างกันเช่น หลังตัวส่งแสง, กึ่งกลางลิงก์ และก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง โดยจะพิจารณาศึกษาตามการขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้สูงสุดเป็น 2 กรณีคือ (1) กรณีขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 กิโลเมตร (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 80 กิโลเมตรร่วมกับชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 กิโลเมตร) และ (2) กรณีเพิ่มระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 120 กิโลเมตรร่วมกับชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 กิโลเมตร) ดังที่จะบรรยายลำดับถัดไป

4.2.1 งบกำลังกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 กิโลเมตร

หัวข้อนี้จะใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่ระบุระยะทางส่งสัญญาณแสงได้สูงสุด 40 km จึงจำเป็นต้องวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์อีเทอร์เน็ต ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงภายในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานจาก 40 km เป็น 80 km โดยต้องเพิ่มเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km เพื่อแก้ปัญหาการสะสมค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันในลิงก์ ซึ่งการออกแบบลิงก์อย่างง่ายสามารถออกแบบตามแผนภาพบล็อกการทดลองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพบล็อกการทดลองวางอีดีเอฟเอในลิงก์อีเทอร์เน็ตระยะทางสูงสุด 80 กิโลเมตร

นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดภายในลิงก์ที่ได้จากการทดลองวัดค่าและแผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะ มาคำนวณงบกำลังดังสมการ (3.5) และ (3.6) จะได้ผลการคำนวณดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 งบกำลังของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei

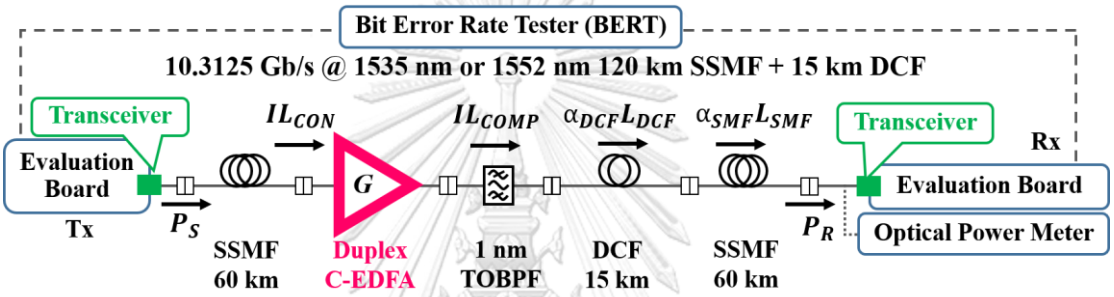
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp
P_S (dBm)	กำลังแสงขาออกจากเอกซ์เอฟพี	−2		
P_R (dBm)	กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวตรวจจับแสงรับได้	−16		
G (dB)	อัตราขยายของอีดีเอฟเอ	16.5	20	24
งบกำลังทั้งหมด (dB)		**30.5**	**34**	**38**
$\alpha_{SSMF}L_{SSMF}$ (dB)	การลดทอนในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน	16 (α_{SSMF} = 0.2 dB/km, L_{SSMF} = 80 km)		
$\alpha_{DCF}L_{DCF}$ (dB)	การลดทอนในเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน	4 (α_{DCF} = 0.4 dB/km, L_{DCF} = 10 km)		
IL_{COMP} (dB)	กำลังสูญเสียแทรกในอุปกรณ์ (IL_{TOBPF}+$IL_{Circulator}$)	3.35		
IL_{CON} (dB)	กำลังสูญเสียแทรกในหัวต่อและจุดเชื่อมต่อ	3.2		
$margin$ (dB)	กำลังเผื่อของระบบ	6		
กำลังสูญเสียทั้งหมด (dB)		**32.55**		

จากตารางที่ 4.1 พบว่างบกำลังทั้งหมดของตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางกึ่งกลางลิงก์และก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงมีค่ามากกว่าผลรวมกำลังสูญเสียทั้งหมด โดยผลต่างระหว่างงบกำลังทั้งหมดกับกำลังสูญเสียทั้งหมดเท่ากับ 1.45 dB และ 5.45 dB ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อนำอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางวาง ณ สองตำแหน่งนี้ จะทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านลิงก์ที่ขยายได้ระยะทางสูงสุด 80 km แต่ในทางตรงข้ามสำหรับการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง มีค่างบกำลังทั้งหมดน้อยกว่ากำลังสูญเสียทั้งหมด ซึ่งจะเพียงพอต่อการส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้ก็ต่อเมื่อลดกำลังเผื่อของระบบลงจาก 6 dB เหลือ 3 dB จึงทำให้ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางนี้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านลิงก์ที่ขยายได้ระยะทางสูงสุด 80 km เช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.2 งบกำลังกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร

หัวข้อนี้ต้องการขยายระยะทางให้ไกลมากกว่าหัวข้อ 4.2.1 จำเป็นต้องเพิ่มงบกำลังในสมการ (3.6) ด้วยการเปลี่ยนใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีเป็นของบริษัท Terrabit Network หรือมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ระบุระยะทางส่งสัญญาณแสงได้สูงสุด 80 km โดยมีกำลังแสงขาออกสูงกว่าและตัวตรวจจับแสงสามารถรับกำลังแสงได้ต่ำกว่ามอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ทำให้สามารถขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงภายในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานจาก 80 km เป็น 120 km เป็นเหตุให้ต้องเพิ่มระยะทางของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันเช่นกันจาก 10 km เป็น 15 km เพื่อแก้ปัญหาการสะสมค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันในลิงก์ที่เพิ่มขึ้น ดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูป 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกการทดลองวางอีดีเอฟเอในลิงก์อีเทอร์เน็ตระยะทางสูงสุด 120 กิโลเมตร

เฉกเช่นกับหัวข้อ 4.2.1 นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดภายในลิงก์ มาคำนวณงบกำลังจะได้ผลการคำนวณดังตาราง 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 งบกำลังของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
P_S (dBm)	0			
P_R (dBm)	-24			
G (dB)	16	26	32	28
งบกำลังทั้งหมด (dB)	**40**	**50**	**56**	**52**
$\alpha_{SSMF}L_{SSMF}$ (dB)	24 (α_{SSMF} = 0.2 dB/km, L_{SSMF} = 120 km)			
$\alpha_{DCF}L_{DCF}$ (dB)	6 (α_{DCF} = 0.4 dB/km, L_{DCF} = 15 km)			
IL_{COMP} (dB)	3.35			
IL_{CON} (dB)	5.4			
$margin$ (dB)	6			
กำลังสูญเสียทั้งหมด (dB)	**44.75**			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการคำนวณงบกำลังในตาราง 4.2 เป็นไปในทางเดียวกันกับตาราง 4.1 คือทุกตำแหน่งที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางยกเว้นตำแหน่งหลังตัวส่งแสง มีค่างบกำลังทั้งหมดมากกว่ากำลังสูญเสียทั้งหมด แต่เมื่อเปลี่ยนใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีเป็นของบริษัท Terrabit Network จะทำให้งบกำลังทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากหัวข้อ 4.2.1 มากกว่า 10 dB รวมกับอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ เนื่องจากอัตราขยายสูงสุดทดสอบที่ความยาวคลื่นใช้งาน 1550 nm แต่มอดูลรับส่งมีความยาวคลื่นใช้งานที่ 1535 nm ซึ่งอยู่ในส่วนยอดโพรไฟล์สเปกตรัมของอัตราขยายอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงทำให้มีค่าอัตราขยายสูงกว่าอัตราขยายสูงสุด ทำให้ผลต่างระหว่างงบกำลังทั้งหมดกับกำลังสูญเสียทั้งหมดเรียงตามตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์, ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และตำแหน่งเหมาะที่สุดเท่ากับ 5.25 dB, 11.25 dB และ 7.25 dB ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งที่ได้กล่าวมาสามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านลิงก์ได้ระยะทางสูงสุด 120 km ส่วนตำแหน่งหลังตัวส่งแสงจำเป็นต้องลดกำลังเผื่อของระบบลงจาก 6 dB เหลือ 1 dB จึงจะส่งสัญญาณผ่านลิงก์ได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.3 งบกำลังของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
P_S (dBm)	0			
P_R (dBm)	-24			
G (dB)	16	22.5	24.5	23
งบกำลังทั้งหมด (dB)	**40**	**46.5**	**48.5**	**47**
$\alpha_{SSMF}L_{SSMF}$ (dB)	24 (α_{SSMF} = 0.2 dB/km, L_{SSMF} = 120 km)			
$\alpha_{DCF}L_{DCF}$ (dB)	6 (α_{DCF} = 0.4 dB/km, L_{DCF} = 15 km)			
IL_{COMP} (dB)	3.35			
IL_{CON} (dB)	5.4			
$margin$ (dB)	6			
กำลังสูญเสียทั้งหมด (dB)	**44.75**			

ในทำนองเดียวกันกับตาราง 4.2 ทำให้ผลการคำนวณงบกำลังจากตาราง 4.3 มีความคล้ายคลึงกับตาราง 4.2 แต่จะมีอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ต่างกัน เนื่องจากความยาวคลื่นใช้งานของแต่ละมอดูลรับส่งที่ใช้แตกต่างกัน โดยมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar มีความยาวคลื่นใช้งานที่ 1552 nm ซึ่งใกล้เคียงกับความยาวคลื่นใช้งานที่ทดสอบอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง เป็นเหตุให้อัตราขยายในตาราง 4.3 มีค่าไม่เกินอัตราขยายสูงสุด นอกจากนี้ผลต่างระหว่างงบกำลังทั้งหมดกับกำลังสูญเสียทั้งหมดเรียงตามตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอ ณ ตำแหน่ง

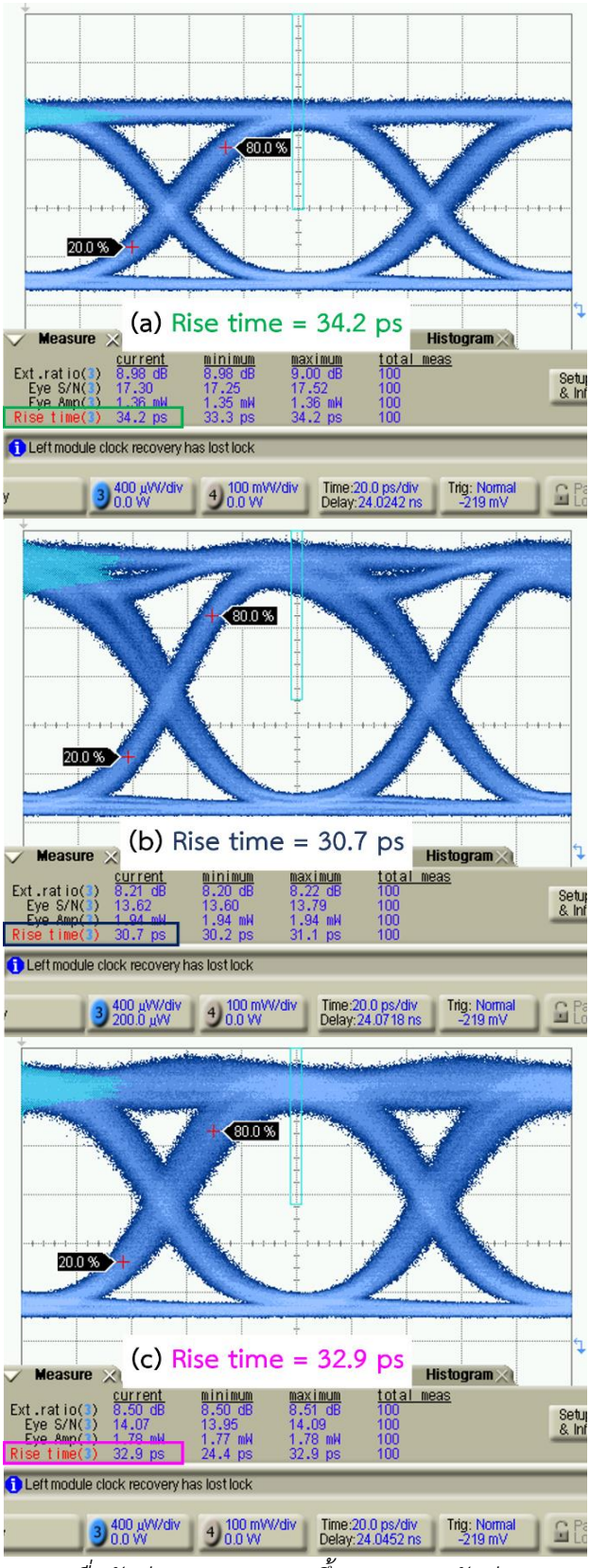
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กึ่งกลางลิงก์, ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และตำแหน่งเหมาะที่สุดเท่ากับ 1.75 dB, 3.75 dB และ 2.25 dB ตามลำดับ แสดงว่าสามารถส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านลิงก์ได้ระยะทางสูงสุด 120 km ส่วนตำแหน่งหลังตัวส่งแสงจำเป็นต้องลดกำลังเผื่อของระบบลงจาก 6 dB เหลือ 1 dB จึงจะส่งสัญญาณผ่านลิงก์ได้เช่นเดียวกัน

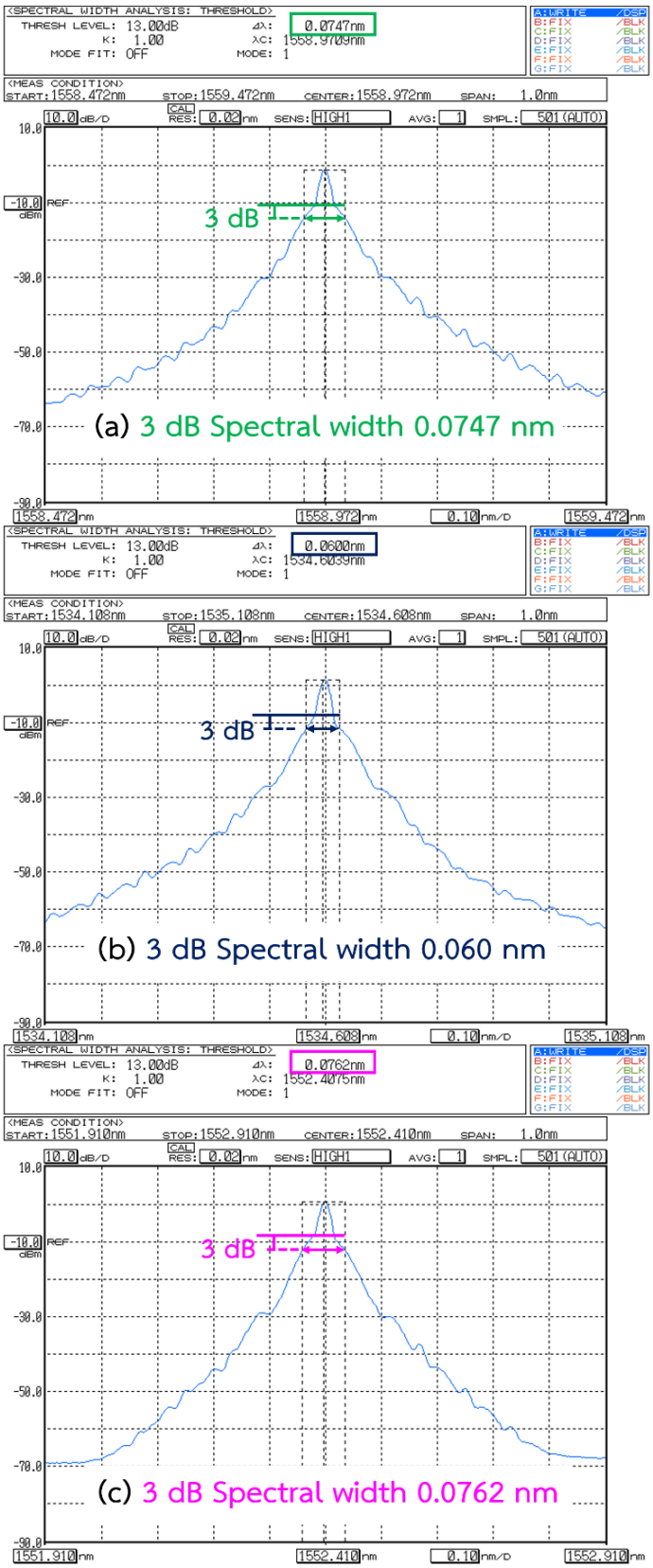
จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 สรุปได้ว่าอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่องบกำลังทั้งหมดภายในลิงก์ หากไม่ได้ใช้อีดีเอฟเอจะทำให้งบกำลังทั้งหมดน้อยกว่ากำลังสูญเสียทั้งหมดภายในลิงก์ นอกจากนี้เมื่อออกแบบลิงก์ที่ตำแหน่งการวางของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางทุกตำแหน่งยกเว้นตำแหน่งหลังตัวส่งแสงที่จำเป็นต้องลดกำลังเผื่อของระบบลง จะสามารถขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานได้ระยะตามที่ต้องการ สำหรับตำแหน่งการวางเหมาะที่สุดจะอภิปรายในหัวข้อ 4.5 ดังนั้นหัวใจสำคัญของการขยายระยะทางส่งสัญญาณภายในลิงก์อีเทอร์เน็ตสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การใช้งานอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางและการวางตำแหน่งอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงเป็นเหตุให้หัวข้อถัดไปจะวิเคราะห์เกี่ยวกับงบเวลาขาขึ้นของลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ได้ออกแบบมา เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 9.95328/10.3125 Gb/s จะสามารถส่งผ่านลิงก์ที่ออกแบบได้

4.3 การวิเคราะห์งบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Analysis)

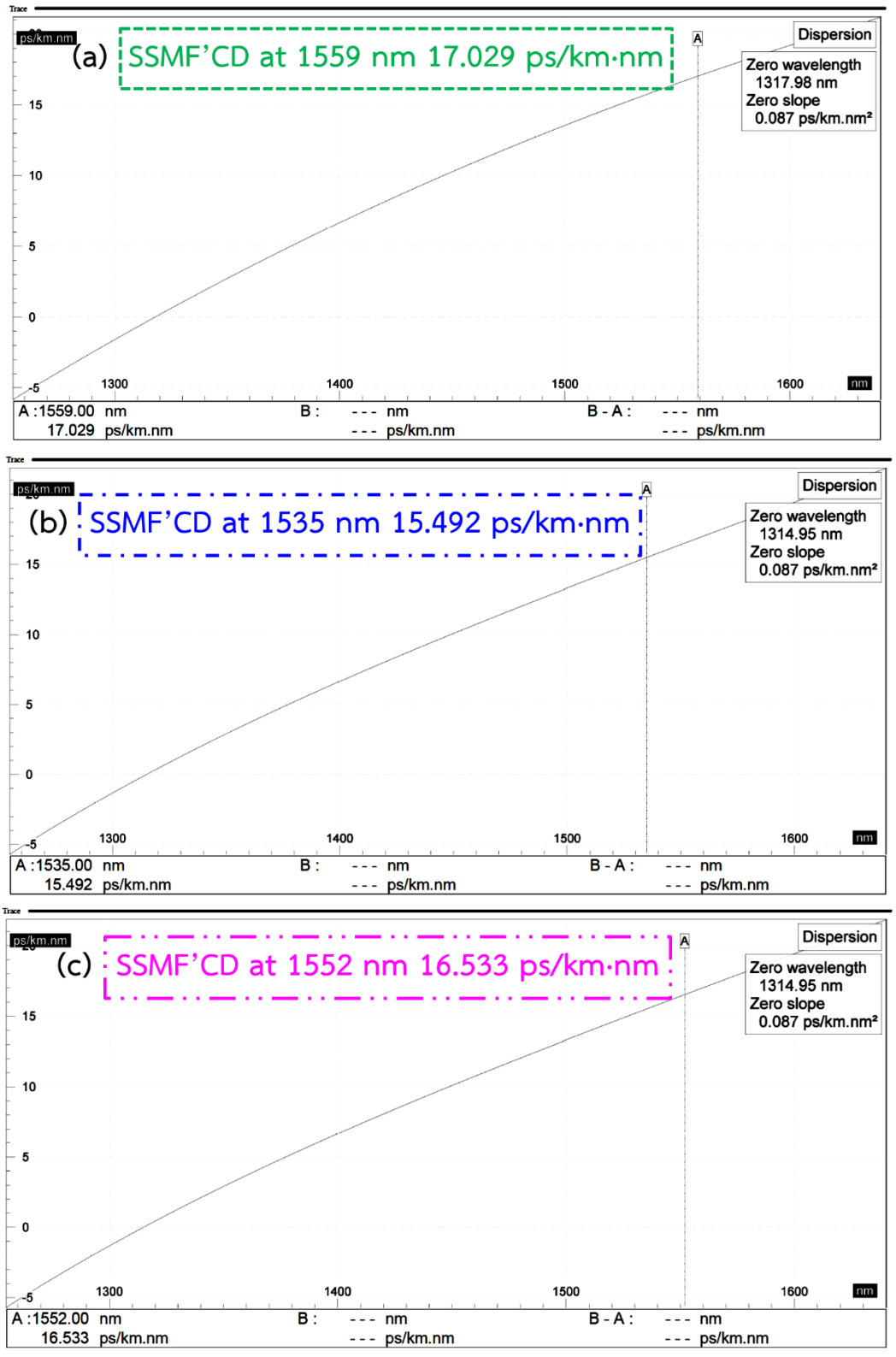
การวิเคราะห์งบเวลาขาขึ้นจะทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของลิงก์อีเทอร์เน็ตเมื่อขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงภายในลิงก์ โดยค่าพารามิเตอร์หลักที่จำเป็นต้องทราบเพื่อนำมาวิเคราะห์งบเวลาขาขึ้นได้แก่ ค่าเวลาขาขึ้น, ความกว้างสเปกตรัมแสง และโครมาติกดิสเพอร์ชัน สำหรับเวลาขาขึ้นของมอดูลรับส่งที่ประกอบด้วยตัวส่งแสงกับตัวรับแสง สามารถอ่านค่าผลรวมเวลาขาขึ้นได้จากแผนภาพรูปตาด้วยเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลดังรูป 4.8 ที่แสดงแผนภาพรูปตาพร้อมทั้งค่าผลรวมเวลาขาขึ้น ณ ตำแหน่ง 20% - 80% ของมอดูลรับส่งแต่ละมอดูลที่ใช้งาน ส่วนค่าความกว้างสเปกตรัมแสงสามารถวัดค่าด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงดังรูป 4.9 ที่แสดงการวัดความกว้างสเปกตรัมแสงห่างจากค่ายอดสเปกตรัมแสงจริงประมาณ 3 dB นอกจากนี้ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานและเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันจะอ่านค่าจากเครื่อง MTS-8000 ของบริษัท Viavi [35] ที่สามารถอ่านได้หลายค่าพารามิเตอร์ขึ้นกับมอดูลที่ใช้งานเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ในเส้นใยนำแสง, โครมาติกดิสเพอร์ชัน และโพรไฟล์สเปกตรัม เป็นต้น ซึ่งจะได้ผลการวัดค่าดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานและเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน ณ ความยาวคลื่นที่ใช้งานตามลำดับ



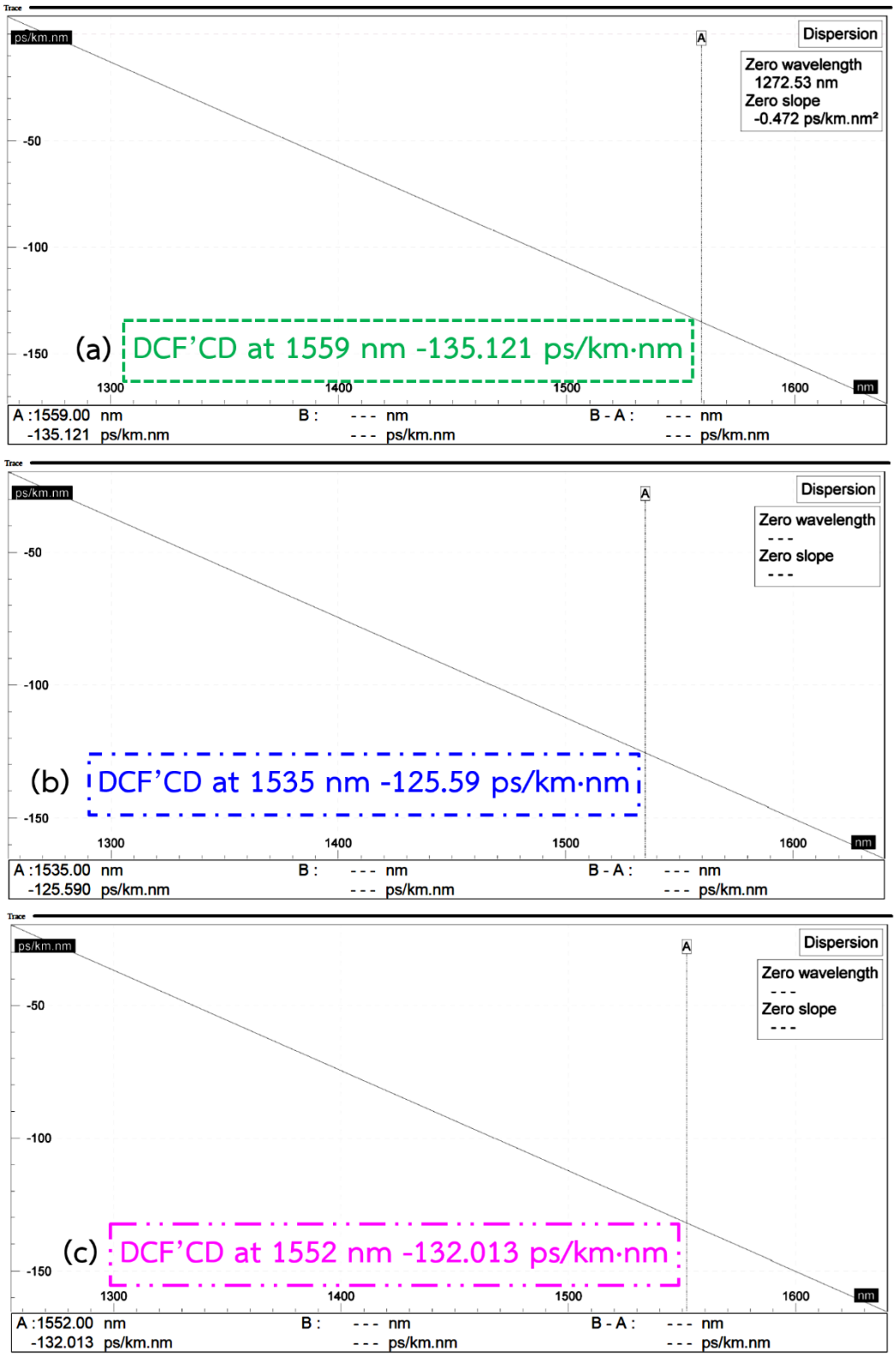
รูปที่ 4.8 แผนภาพรูปตา เมื่อวัดค่าผลรวมเวลาขาขึ้นของมอดูลรับส่ง: (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar



รูปที่ 4.9 ค่าความกว้างสเปกตรัมแสงของมอดูลรับส่ง: (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar



รูปที่ 4.10 ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานที่ความยาวคลื่นใช้งาน: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar



รูปที่ 4.11 ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นใช้งาน: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

ค่าผลรวมเวลาขาขึ้นที่อ่านได้จะเป็นค่า ณ ตำแหน่ง 20% - 80% ดังรูป 4.8 ทำให้เมื่อนำมาคำนวณงบเวลาขาขึ้นจึงต้องแปลงให้อยู่ ณ ตำแหน่ง 10% - 90% แทนในสมการ (3.11)

$$t_{10\%-90\%\,(Huawei)} = 1.25\left(\sqrt{t_{Tx}^2 + t_{Rx}^2}\right) = 1.25(34.2) = 42.75\,ps$$

$$t_{10\%-90\%\,(Terrabit)} = 1.25\left(\sqrt{t_{Tx}^2 + t_{Rx}^2}\right) = 1.25(30.7) = 38.375\,ps$$

$$t_{10\%-90\%\,(Finisar)} = 1.25\left(\sqrt{t_{Tx}^2 + t_{Rx}^2}\right) = 1.25(32.9) = 41.125\,ps$$

จากนั้นผลการวัดค่าในรูป 4.9, 4.10 และ 4.11 โดยแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาคำนวณงบเวลาขาขึ้นของลิงก์ตามสมการ (3.7), (3.9) และ (3.10) จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 งบเวลาขาขึ้นของลิงก์เมื่อใช้มอดูลรับส่งแตกต่างกัน

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	Huawei XFP @1559nm	Terrabit XFP @1535nm	Finisar SFP+ @1552nm
$\sqrt{t_{Tx}^2 + t_{Rx}^2}$	เวลาขาขึ้นของมอดูลรับส่ง (ps)	42.75	38.375	41.125
D_{SSMF}	โครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (ps/(nm·km))	17.029	15.492	16.533
L_{SSMF}	ระยะทางของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (km)	80	120	120
D_{DCF}	โครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน (ps/(nm·km))	-135.121	-125.59	-132.013
L_{DCF}	ระยะทางของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน (km)	10	15	15
σ_λ	ความกว้างสเปกตรัมแสง (nm)	0.0747	0.060	0.0762
t_{CD}	เวลาสัญญาณแสงถ่างออกเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (ps)	0.829	1.489	0.287
t_{SYS}	เวลาขาขึ้นของทั้งระบบ (ps)	42.758	38.403	41.126
R_b	อัตราบิตข้อมูลแสง (Gb/s)	10.3125		
$t_{SYS}R_b$	< 0.7	0.44	0.396	0.424

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการคำนวณตารางที่ 4.4 พบว่าผลรวมเวลาขาขึ้น ณ ตำแหน่ง 10% - 90% ของมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, บริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เท่ากับ 42.75 ps, 38.375 ps และ 41.125 ps ตามลำดับ จากนั้นผลคำนวณเวลาสัญญาณถ่างออกตามสมการ (3.9) เท่ากับ 0.829 ps, 1.489 ps และ 0.287 ps เรียงตามลำดับข้างต้น ถัดมานำค่าพารามิเตอร์ที่ได้แทนในสมการ (3.7) จะได้เวลาขาขึ้นของทั้งระบบเท่ากับ 42.758 ps, 38.403 ps และ 41.126 ps ตามลำดับ เมื่อนำสมการ (3.10) มาพิจารณากับเวลาขาขึ้นของทั้งระบบที่ได้จะพบว่าเวลาขาขึ้นทั้งระบบของทั้งสามมอดูลรับส่งมีค่าน้อยกว่า 70% (< 0.7) ของคาบบิตตามเงื่อนไข จึงทำให้ทั้งสามมอดูลรับส่งที่ใช้งานสามารถส่งและรับสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 10.3125 Gb/s ผ่านลิงก์ที่ออกแบบด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางขยายได้ระยะทางสูงสุดเท่ากับ 80 km และ 120 km ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดผลกระทบจากการถ่างออกของสัญญาณข้อมูลแสง เนื่องจากเมื่อคำนวณเวลาสัญญาณถ่างออกที่ระยะทางต่าง ๆ ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นค่าติดลบ นำมาชดเชยกับค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานที่เป็นค่าบวก ทำให้เวลาสัญญาณถ่างออกมีค่าเหลือเพียงเล็กน้อย จากนั้นเมื่อคำนวณเวลาขาขึ้นของทั้งระบบจะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเวลาขาขึ้นของระบบมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากผลรวมเวลาขาขึ้นของมอดูลรับส่ง จึงเป็นเหตุให้วิทยานิพนธ์นี้ใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน เพื่อเพิ่มสมรรถนะแก่ลิงค์โดยการลดผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันอันเนื่องมาจากการส่งสัญญาณข้อมูลแสงระยะทางไกล ที่ส่งผลกระทบต่อการถ่างออกของสัญญาณข้อมูลแสงภายในลิงก์ นอกจากนี้เมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์ทางไฟฟ้าภายในลิงก์โดยเฉพาะตัวตรวจจับแสงและอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงทำให้เป็นที่มาของการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในหัวข้อถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน (Noise Analysis)

การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทำให้ทราบถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณข้อมูลแสงภายในลิงก์ โดยหัวข้อนี้จะแบ่งพิจารณาตามมอดูลรับส่งที่ใช้งานเป็น 3 หัวข้อย่อยดังนี้ (1) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (2) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (3) มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar จากหัวข้อย่อยที่กล่าวมาจะมีเนื้อหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนที่เกิดภายในตัวตรวจจับแสงกับจากการใช้งานอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในแต่ละตำแหน่งประกอบด้วย ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์, หลังตัวส่งแสง, ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และตำแหน่งเหมาะสมที่สุด ดังที่จะบรรยายต่อไปนี้

4.4.1 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei

มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ในส่วนภาครับมีการใช้ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวน เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp
B_o (Hz)	แบนด์วิดท์แสง	123.4×10^{9}		
$B_{o\,Res}$ (Hz)	แบนด์วิดท์แสงของเครื่องวัด	2.47×10^{9}		
P_{ASE} (W)	กำลังสัญญาณรบกวนเอเอสอี	3.15×10^{-6}	4.99×10^{-6}	1.26×10^{-5}
S_{ASE} (W/Hz)	ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี	2.55×10^{-17}	4.05×10^{-17}	1.02×10^{-16}
h (J·s)	ค่าคงที่ของพลังค์	6.625×10^{-34}		
G (เท่า)	อัตราขยายของตัวขยายแสง	44.67	100	251.19
q (C)	ค่าประจุอิเล็กตรอน	1.6×10^{-19}		
$\mathcal{R}_{pin}$ (A/W)	ค่าการตอบสนอง	0.95 [21], [36]		
I_{D_pin} (A)	กระแสมืด	2×10^{-9} [21]		
M	แฟคเตอร์การคูณ (Multiplication Factor)	1 [21]		
$F(M)$	แฟคเตอร์สัญญาณรบกวนส่วนเกิน (Excess Noise Factor)	1 [21]		
P_{Rx_pin} (W)	กำลังที่ได้รับ (Received Power)	$10^{-1.6} \times 10^{-3}$		
$P_{s,in}$ (W)	กำลังสัญญาณขาเข้าตัวขยายแสง	0.851×10^{-3}	0.138×10^{-3}	0.023×10^{-3}
B_{e_pin} (Hz)	แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า	2×10^{9} [21], [36]		
k_B (J/K)	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์	1.38×10^{-23}		
T (K)	อุณหภูมิ	300		
R_L (Ω)	ความต้านทานโหลด	50 [36]		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.5 มาคำนวณในสมการตั้งแต่ (3.12) ถึง (3.20) ทำให้ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ซึ่งแสดงผลการคำนวณสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น, สัญญาณรบกวนเมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง และสัญญาณรบกวนเมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่มีตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ผลการคำนวณสัญญาณรบกวน
$\sigma^2_{Q_pin}$	สัญญาณรบกวนควอนตัมของตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น (A^2)	1.527×10^{-14}
$\sigma^2_{D_pin}$	สัญญาณรบกวนกระแสมืดของตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น (A^2)	1.28×10^{-18}
$\sigma^2_{T_pin}$	สัญญาณรบกวนจากความร้อนของตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น (A^2)	6.624×10^{-13}

จากตารางที่ 4.6 พบว่าได้สัญญาณรบกวนควอนตัม, สัญญาณรบกวนกระแสมืด และสัญญาณรบกวนจากความร้อนของตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นมีค่าประมาณ 1.527×10^{-14} A^2, 1.28×10^{-18} A^2 และ 6.624×10^{-13} A^2 ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณรบกวนจากความร้อนมีค่ามากที่สุด นอกจากนี้สัญญาณรบกวนกระแสมืดจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนควอนตัมและสัญญาณรบกวนจากความร้อน จึงทำให้เมื่อใช้งานตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นจะมีสัญญาณรบกวนจากความร้อนที่ส่งผลกระทบมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp
$\sigma^2_{shot\ EDFA}$	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากอีดีเอฟเอ (A^2)	2.32×10^{-11}	8.49×10^{-12}	3.74×10^{-12}
σ^2_{s-ASE}	สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)	7.01×10^{-9}	4.04×10^{-9}	4.23×10^{-9}
$\sigma^2_{ASE-ASE}$	สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)	9.3×10^{-12}	2.34×10^{-11}	1.47×10^{-10}

จากตารางที่ 4.7 เมื่อเพิ่มการใช้งานอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง พบว่าสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าสูงสุดเทียบกับสัญญาณรบกวนควอนตัมและสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี จึงทำให้สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีเป็นสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบมากที่สุด นอกจากนี้ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่มีผลกระทบของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากอีดีเอฟเอและสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีมากที่สุดคือ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง ส่วนตำแหน่งที่มีผลกระทบของสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีมากที่สุดคือ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 นาโนเมตร ในลิงก์

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp
$\sigma^2_{shot\ EDFA}$	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากอีดีเอฟเอ (A^2)	2.31×10^{-11}	8.39×10^{-12}	3.5×10^{-12}
σ^2_{s-ASE}	สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)	3.51×10^{-9}	2.02×10^{-9}	2.12×10^{-9}
$\sigma^2_{ASE-ASE}$	สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)	7.24×10^{-14}	1.82×10^{-13}	1.15×10^{-12}

ผลการคำนวณในตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนทั้งสามมีค่าลดลงจากตารางที่ 4.7 ซึ่งสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งแต่กำลังไม่เปลี่ยนแปลง และโดยเฉพาะสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่มีค่าลดลงอย่างเด่นชัด ส่วนผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ยังคงเหมือนกับสัญญาณรบกวนเมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network

มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ในส่วนภาครับจะใช้ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณสัญญาณรบกวนดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวน เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
B_o (Hz)	127.3×10^{9}			
$B_{o\ Res}$ (Hz)	2.55×10^{9}			
P_{ASE} (W)	3.14×10^{-6}	2.49×10^{-5}	9.93×10^{-5}	3.14×10^{-5}
S_{ASE} (W/Hz)	2.47×10^{-17}	1.96×10^{-16}	7.8×10^{-16}	2.47×10^{-16}
h (J·s)	6.625×10^{-34}			
G (เท่า)	39.81	398.11	1584.89	630.96
q (C)	1.6×10^{-19}			
$\mathcal{R}$ (A/W)	0.85 [37]			
I_D (A)	25×10^{-9} [21], [37]			
M	10 [21]			
$F(M)$	$10^{0.7}$ [21]			
P_{Rx_APD} (W)	$10^{-2.4} \times 10^{-3}$			
$P_{s,in}$ (W)	1.413×10^{-3}	0.055×10^{-3}	5.01×10^{-6}	0.035×10^{-3}
B_e (Hz)	8×10^{9} [37]			
k_B (J/K)	1.38×10^{-23}			
T (K)	300			
R_L (Ω)	50 [37]			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.9 มาคำนวณในสมการตั้งแต่ (3.12) ถึง (3.20) เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 ทำให้ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ โดยในหัวข้อนี้จะเพิ่มผลการคำนวณสัญญาณรบกวนกรณีตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางเหมาะที่สุด

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ที่มีตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ผลการคำนวณสัญญาณรบกวน
$\sigma^2_{Q_APD}$	สัญญาณรบกวนควอนตัมของตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี (A^2)	4.342×10^{-11}
$\sigma^2_{D_APD}$	สัญญาณรบกวนกระแสมืดของตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี (A^2)	3.208×10^{-14}
$\sigma^2_{T_APD}$	สัญญาณรบกวนจากความร้อนของตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี (A^2)	2.65×10^{-12}

จากผลการคำนวณตารางที่ 4.10 พบว่าสัญญาณรบกวนควอนตัมมีค่ามากที่สุด ต่างจากตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นในหัวข้อ 4.4.1 ที่มีสัญญาณรบกวนจากความร้อนสูงสุด จึงทำให้เมื่อใช้งานตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดีจะมีสัญญาณรบกวนควอนตัมส่งผลกระทบมากที่สุด

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
$\sigma^2_{shot\ EDFA}$ (A^2)	1.226×10^{-9}	4.979×10^{-10}	2.421×10^{-10}	5.036×10^{-10}
σ^2_{s-ASE} (A^2)	3.217×10^{-6}	1.252×10^{-5}	1.437×10^{-5}	1.576×10^{-5}
$\sigma^2_{ASE-ASE}$ (A^2)	2.878×10^{-9}	2.878×10^{-7}	2.878×10^{-6}	4.561×10^{-7}

จากตารางที่ 4.11 พบว่าสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอียังคงมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 นอกจากนี้ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่มีสัญญาณรบกวนควอนตัมมากที่สุดคือ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง ส่วนตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีจะมีค่าใกล้เคียงกัน 3 ตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์, ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และตำแหน่งเหมาะที่สุด เนื่องจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network มีความยาวคลื่นใช้งานที่ 1535 nm ซึ่งอยู่ในส่วนยอดของอัตราขยายอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง เป็นเหตุให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางมีค่ามากกว่าปกติ ยิ่งไปกว่านั้นตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีมากที่สุดคือ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 นาโนเมตร ในลิงก์

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
$\sigma^2_{shot\ EDFA}$ (A^2)	6.118×10^{-10}	4.765×10^{-10}	1.742×10^{-10}	4.766×10^{-10}
σ^2_{s-ASE} (A^2)	1.612×10^{-6}	7.897×10^{-6}	9.067×10^{-6}	9.9414×10^{-6}
$\sigma^2_{ASE-ASE}$ (A^2)	2.192×10^{-11}	3.474×10^{-9}	3.474×10^{-8}	5.506×10^{-9}

ผลการคำนวณตารางที่ 4.12 เป็นเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 ตารางที่ 4.8 คือเมื่อเพิ่มตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm สัญญาณรบกวนทั้งสามมีค่าลดลงโดยเฉพาะสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่ลดลงอย่างชัดเจน และผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ยังคงเหมือนกับสัญญาณรบกวนเมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางเช่นกัน

4.4.3 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เป็นเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4.2 จึงทำให้สามารถใช้ค่าพารามิเตอร์บางส่วนร่วมกันได้ ซึ่งจะมีค่าสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวนดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับคำนวณสัญญาณรบกวน เมื่อใช้มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
B_o (Hz)	124.5×10^9			
$B_{o\ Res}$ (Hz)	2.49×10^9			
P_{ASE} (W)	2.5×10^{-6}	1.05×10^{-5}	1.26×10^{-5}	1.09×10^{-5}
S_{ASE} (W/Hz)	2.01×10^{-17}	8.39×10^{-17}	1.01×10^{-16}	8.79×10^{-17}
G (เท่า)	39.81	177.83	281.84	199.53
$\mathcal{R}$ (A/W)	0.85 [37]			
I_D (A)	25×10^{-9} [21], [37]			
$M, F(M)$	10, $10^{0.7}$ [21]			
P_{Rx_APD} (W)	$10^{-2.4} \times 10^{-3}$			
$P_{s,in}$ (W)	1.189×10^{-3}	0.051×10^{-3}	4.37×10^{-6}	0.032×10^{-3}
B_e (Hz)	8×10^9 [37]			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนภายในตัวตรวจจับแสงที่ได้จะมีค่าเหมือนกับตารางที่ 4.10 เนื่องจากใช้ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดีเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
$\sigma^2_{shot\ EDFA}$ (A^2)	1.044×10^{-9}	2.054×10^{-10}	3.78×10^{-11}	1.461×10^{-10}
σ^2_{s-ASE} (A^2)	2.804×10^{-6}	1.69×10^{-6}	3.612×10^{-7}	1.472×10^{-6}
$\sigma^2_{ASE-ASE}$ (A^2)	2.959×10^{-9}	2.959×10^{-8}	7.432×10^{-8}	4.689×10^{-8}

จากตารางที่ 4.14 จะมีผลการคำนวณทำนองเดียวกันกับตารางที่ 4.7 ในหัวข้อ 4.4.1 เนื่องจากมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar มีความยาวคลื่นใช้งานใกล้เคียงกับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ซึ่งอยู่ในช่วงแบนราบของอัตราขยายอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ชนิดตัวตรวจจับแสงที่ใช้ต่างกัน จึงทำให้มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar จะมีสัญญาณรบกวนมากกว่า

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณสัญญาณรบกวนจากมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 นาโนเมตร ในลิงก์

พารามิเตอร์	Booster	In-line	Pre-amp	Optimum
$\sigma^2_{shot\ EDFA}$ (A^2)	1.042×10^{-9}	1.986×10^{-10}	2.699×10^{-11}	1.375×10^{-10}
σ^2_{s-ASE} (A^2)	1.405×10^{-6}	1.066×10^{-6}	2.2792×10^{-7}	9.285×10^{-7}
$\sigma^2_{ASE-ASE}$ (A^2)	2.247×10^{-11}	3.561×10^{-10}	8.944×10^{-10}	5.644×10^{-10}

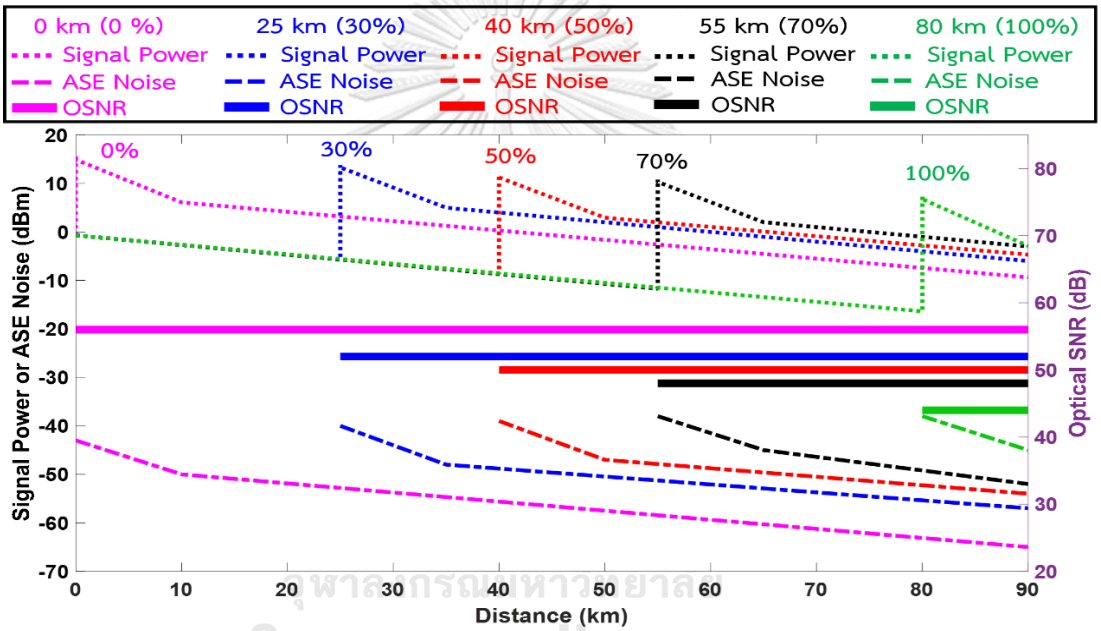
ผลการคำนวณตารางที่ 4.15 จะให้ผลที่คล้ายคลึงกับตารางที่ 4.8 ในหัวข้อ 4.4.1 และตารางที่ 4.12 ในหัวข้อ 4.4.2 จึงเป็นการพิสูจน์ว่าสัญญาณรบกวนจากอีดีเอฟเอจะสามารถถูกลดด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm

จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่า ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นมีสัญญาณรบกวนภายในที่น้อยกว่าชนิดเอพีดี นอกจากนี้สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีจะส่งผลกระทบมากที่สุดเมื่อใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ส่วนตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงเป็นเหตุให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm พร้อมกับอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจะนำไปใช้วิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5 การวิเคราะห์ไดอะแกรมระดับและการวางตำแหน่งที่เหมาะสม (Level Diagram and Optimum Placement Analysis)

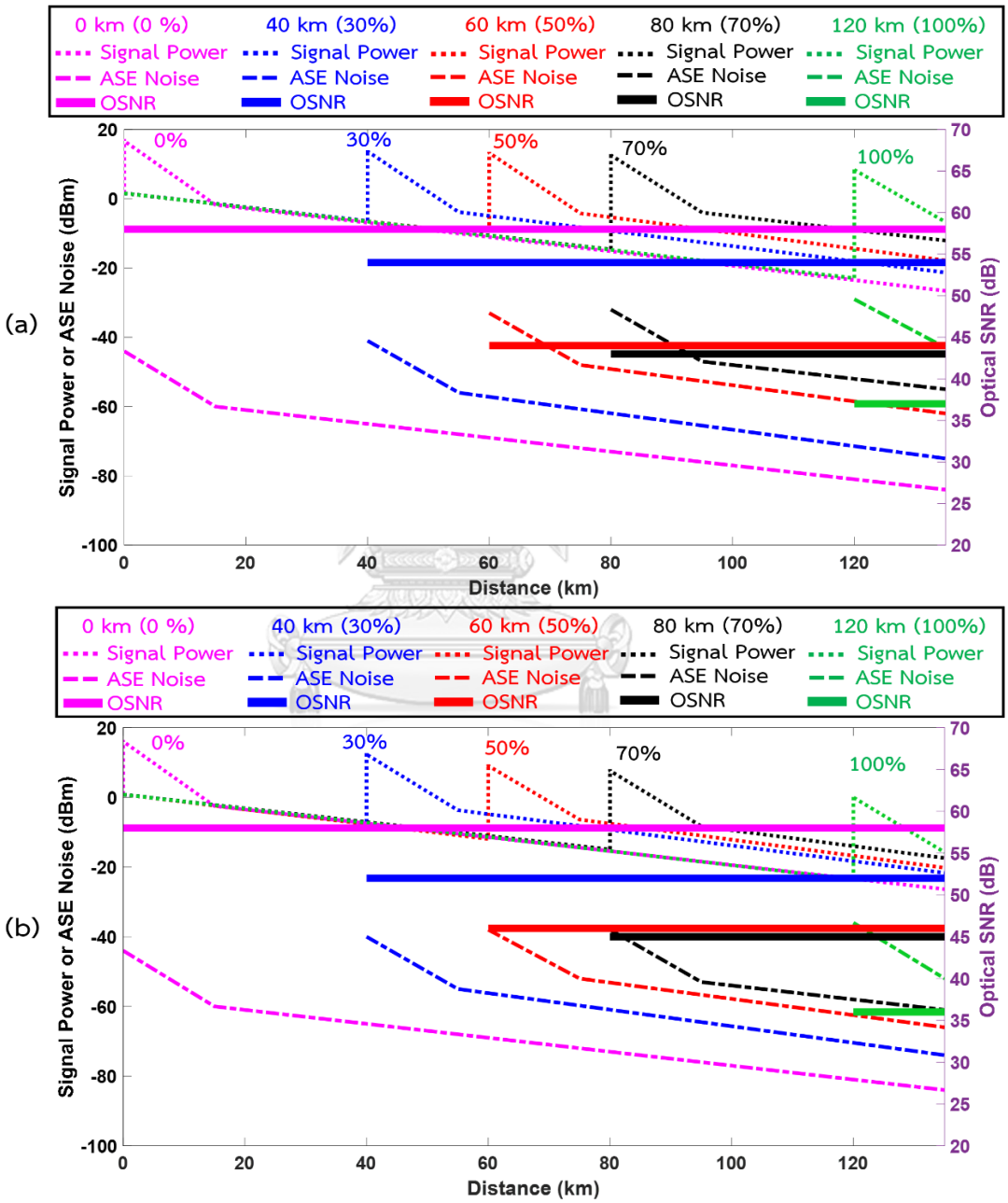
การวิเคราะห์ไดอะแกรมระดับสามารถทำได้ด้วยการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณทั้งสามพารามิเตอร์ด้วยค่าจากตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 และจากการทดลอง โดยใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีบริษัท Huawei, มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ตามลำดับ ซึ่งจากผลการคำนวณไดอะแกรมระดับเมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง (0%), ก่อนหน้ากึ่งกลางลิงก์ (30%), กึ่งกลางลิงก์ (50%), หลังกึ่งกลางลิงก์ (70%) และก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (100%) ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุด จะได้เป็นดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมระดับเมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งต่างกัน กรณีขยายระยะทางส่งสัญญาณได้สูงสุด 80 กิโลเมตร

จากรูป 4.12 แสดงไดอะแกรมระดับเมื่อใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีบริษัท Huawei ที่ส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้ระยะทางสูงสุด 40 km หลังจากใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางทำให้สามารถขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้สูงสุดเป็น 80 km เนื่องจากแกนนอนรวมความยาวของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจึงทำให้ค่าสูงสุดมากกว่าความยาวลิงก์ (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km กับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km) ซึ่งมีตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ 0 km (0%), 25 km (30%), 40 km (50%), 55 km (70%) และ 80 km (100%) ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน จะพบผลกระทบจากการลดทอนในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานและเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน ทำให้กำลังสัญญาณแสงจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น แต่ด้วยค่าความชันต่างกันตามค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

นอกจากนี้ในลิงก์ใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับค่าได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm ร่วมด้วยทำให้สัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เป็นเหตุให้สัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ 0 km (0%), 25 km (30%), 40 km (50%), 55 km (70%) และ 80 km (100%) มีค่าสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนประมาณ 56 dB, 52 dB, 50 dB, 48 dB และ 44 dB ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมระดับเมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งต่างกัน กรณีขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลได้สูงสุด 120 กิโลเมตร เมื่อใช้มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับ (b) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

ไดอะแกรมระดับรูปที่ 4.13 มีผลเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.12 ซึ่งแบ่งตามมอดูลรับส่งที่ใช้คือ (a) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับ (b) มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar โดยสามารถขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงได้สูงสุดเป็น 120 km (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km กับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไดอะแกรมรูปที่ 4.13 (a) กับ (b) จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ 0 km (0%), 40 km (30%), 60 km (50%), 80 km (70%) และ 120 km (100%) มีค่าสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนประมาณ (a) 58 dB, 54 dB, 44 dB, 43 dB และ 37 dB กับ (b) 58 dB, 52 dB, 46 dB, 45 dB และ 36 dB ตามลำดับ

จากที่บรรยายมาทั้งหมดพบว่าค่าสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนในทุกตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอมีค่ามากกว่า 24 dB ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนปกติของมอดูลรับส่ง ยิ่งไปกว่านั้นเป็นการพิสูจน์ในหัวข้อ 4.4 ตามที่อ้างอิง [21] กล่าวไว้ว่าค่าสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า 15 dB ทำให้สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีเป็นสัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบมากที่สุด นอกจากนี้พิจารณาจากงบกำลังและสัญญาณรบกวนได้ว่าตำแหน่งหลังตัวส่งแสงจะมีงบกำลังเพียงพอก็ต่อเมื่อต้องลดกำลังเผื่อของระบบ และตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงจะมีสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่มากกว่าตำแหน่งอื่นทำให้มีค่าสัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด เป็นเหตุให้ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์เป็นตำแหน่งเหมาะสมที่สุดสำหรับการขยายระยะทางส่งสัญญาณในลิงก์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการขยายระยะทางส่งสัญญาณไปยังพื้นที่ห่างไกล ทำให้มีปัญหาในบางพื้นที่จะไม่สามารถติดตั้งอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ได้ จึงจำเป็นต้องหาตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ให้สมรรถนะใกล้เคียงกับตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มากที่สุด เมื่อพิจารณาจากไดอะแกรมระดับพบว่าตำแหน่ง 30% กับ 70% ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกับกึ่งกลางลิงก์ (50%) ยิ่งไปกว่านั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองสถานการณ์ที่มอดูลรับส่งในสถานีฐานแต่ละพื้นที่จะมีระยะทางไม่เท่ากัน โดยนำลิงก์ทดลองทั้งสองที่สามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุด 80 km กับ 120 km มาประยุกต์ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ออกแบบมาเพื่อขยายกำลังสัญญาณแบบสื่อสารสองทาง พิจารณาจากไดอะแกรมระดับจะเห็นว่าตำแหน่ง 80 km (70%) จาก 120 km ของลิงก์ขาลง มีค่าใกล้เคียงกับกึ่งกลางลิงก์และจะตรงกับตำแหน่ง 40 km (50%) จาก 80 km ของลิงก์ขาขึ้นทดลองที่เป็นตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ จึงเป็นที่มาของการทดลองตำแหน่งเหมาะที่สุดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์หรือตำแหน่งตั้งแต่ 30% จนถึง 70% ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุดเป็นตำแหน่งเหมาะสมที่สุด ส่วนการทดลองตำแหน่งเหมาะที่สุดจะวิเคราะห์สมรรถนะในหัวข้อถัดไป

4.6 การวิเคราะห์แผนภาพรูปตา (Eye-diagram Analysis)

การวิเคราะห์แผนภาพรูปตาเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสัญญาณข้อมูลแสงหลังจากผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในลิงก์ เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถประเมินคุณภาพของสัญญาณข้อมูลแสงภายในลิงก์ได้ ซึ่งแผนภาพรูปตาจะอ่านค่าได้จากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA) หัวข้อนี้จะแบ่งการศึกษาเป็น 4 หัวข้อย่อยตามตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางได้แก่ แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่ง (1) หลังตัวส่งแสง, (2) กึ่งกลางลิงก์, (3) ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และ (4) เหมาะที่สุด โดยเนื้อหาจะพิจารณาตามการขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงไกลสุดที่ได้จากการวิเคราะห์งบกำลังในหัวข้อ 4.2 คือ ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 กิโลเมตร (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 80 กิโลเมตรกับชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 กิโลเมตร) และลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 120 กิโลเมตรกับชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 กิโลเมตร) ดังที่จะบรรยายต่อไปนี้

4.6.1 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง

หัวข้อนี้จะพิจารณาแผนภาพรูปตาที่จุดต่าง ๆ ภายในลิงก์เมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง โดยการทดลองมี 2 กรณีตามระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลที่ขยายได้สูงสุดตามการคำนวณงบกำลังในหัวข้อ 4.2 คือ 80 km และ 120 km ซึ่งกรณีแรกจะใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ส่วนกรณีสองจะใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ทำให้สามารถทำการทดลองวัดแผนภาพรูปตาได้ดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูปที่ 4.14 แสดงจุดอ่านค่าเรียงตามตัวอักษร A ถึง E ได้แก่

จุด A: หลังออกจากตัวส่งแสง

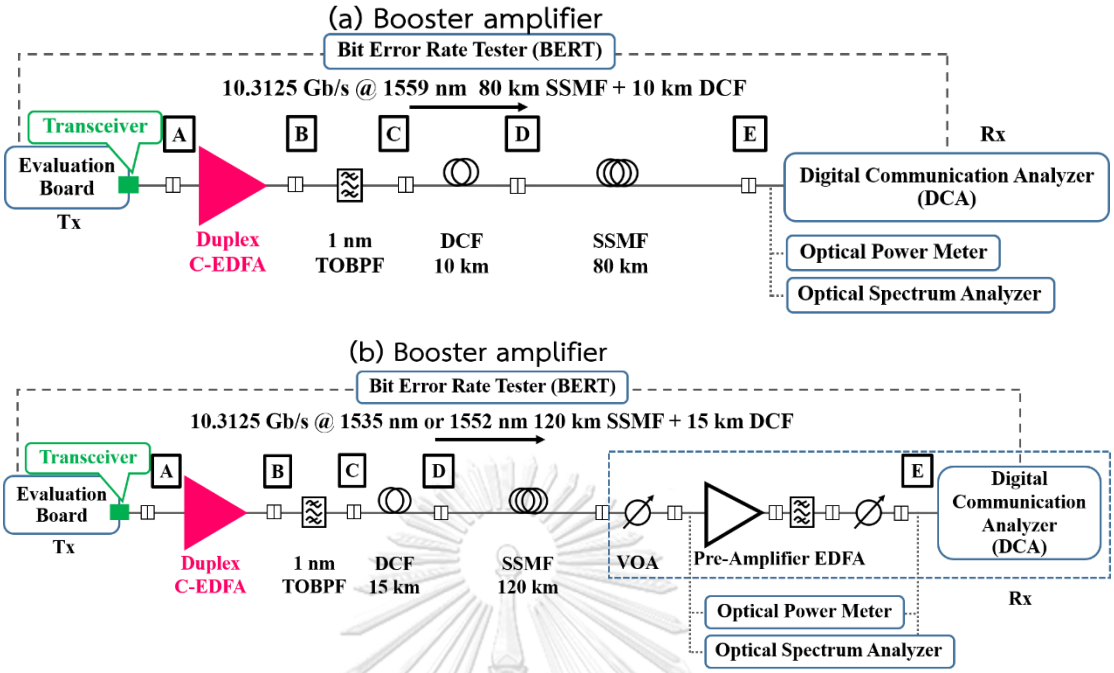
จุด B: หลังออกจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

จุด C: หลังจากผ่านตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้

จุด D: หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน

จุด E: ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



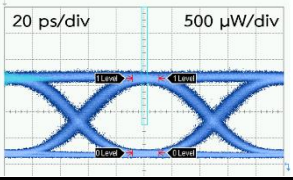
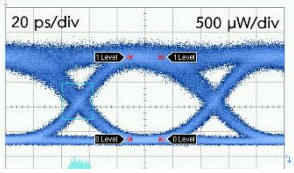
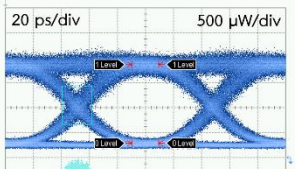
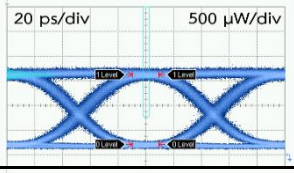
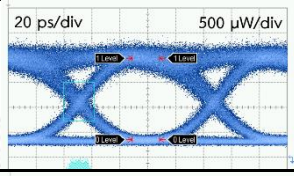
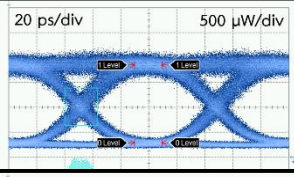
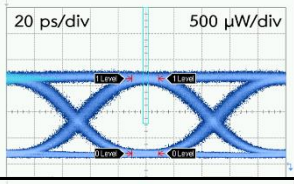
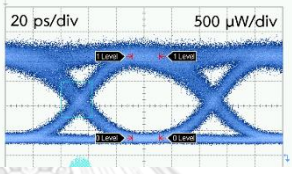
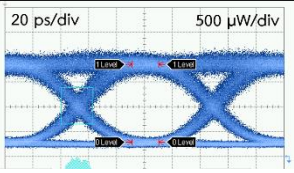
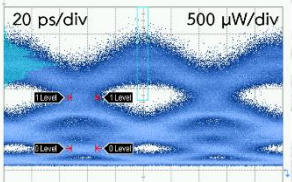
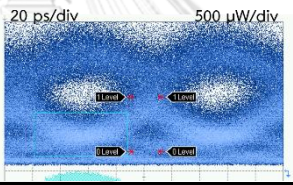
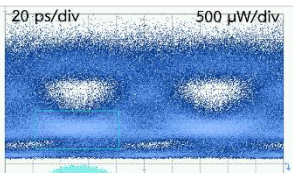
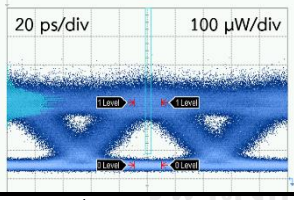
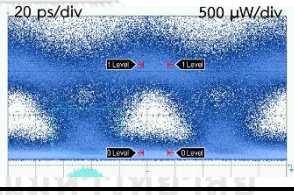
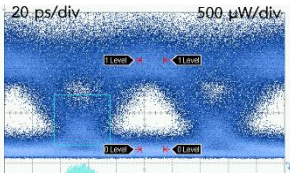
รูปที่ 4.14 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด (a) 80 กิโลเมตร และ (b) 120 กิโลเมตร

จากรูปที่ 4.14 เมื่อทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแสง 10.3125 Gb/s นำผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลมาจัดเรียงดังตารางที่ 4.16 เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในลำดับถัดไป

นอกจากนี้รูป 4.14 (b) จำเป็นต้องใช้อีดีเอฟเออีกตัวช่วยขยายกำลังสัญญาณแสงก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงเพื่อเพิ่มความไวแสงของตัวตรวจจับแสง เนื่องจากกำลังสัญญาณข้อมูลแสงที่ทดลองมีกำลังต่ำเกินกว่าค่าความไวแสงของเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล และนำตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มาช่วยลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีจากอีดีเอฟเอที่นำมาขยาย ทำให้ผลการทดลองที่อ่านค่าได้เสมือนกับสัญญาณข้อมูลแสงก่อนได้รับการขยายกำลังสัญญาณ เป็นเหตุให้กรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร (มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar) จะมีขนาดแผนภาพรูปตาที่ใช้สเกลเท่ากันหมดทุกจุด (500 μW/div) ส่วนกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 กิโลเมตร (มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei) จะใช้สเกลจริงที่อ่านได้จากการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.16 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งหลังตัวส่งแสง

ตำแหน่ง	Huawei XFP @ 1559 nm	Terrabit Network XFP @ 1535 nm	Finisar SFP+ @ 1552 nm
A			
B			
C			
D			
E			

จากตารางที่ 4.16 แสดงแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางหลังตัวส่งแสงของทั้งสามมอดูลรับส่งที่ทดลองพบว่า

จุด A ไป B: รูปตาจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจากอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง แต่รูปตาที่แสดงในตารางมีขนาดเท่ากัน เนื่องจากกำลังแสงขาเข้าเกินขีดจำกัดของเครื่องมือวัด จึงจำเป็นต้องปรับลดกำลังแสงที่เข้าเครื่องมือวัดให้มีค่าเท่ากับกำลังแสงขาออกจากมอดูลรับส่ง นอกจากนี้รูปตาจะได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางด้วยเช่นกัน ทำให้เส้นของบิต 1 มีความหนาขึ้นเล็กน้อย

จุด B ไป C: สัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดขึ้นถูกลดลงด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm ทำให้รูปตามีลักษณะคล้ายจุด A

จุด C ไป D: เกิดผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear effect) จากเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน ต้นเหตุมาจากกำลังแสงขาเข้าที่ได้รับการขยายด้วยอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางมี

กำลังสูงมาก และส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันที่มีขนาดแกนเล็ก ทำให้ลักษณะของรูปตาเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนไม่สามารถอ่านค่าได้

จุด D ไป E: แม้ว่ามีการชดเชยโครมาติกดิสเพอร์ชันเกิดขึ้น แต่อัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางไม่มากพอ พร้อมกับมีผลกระทบจากการลดทอนและผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นยังคงเหลืออยู่ ทำให้มีขนาดกำลังลดลงและเกิดการถ่างออกของสัญญาณ รูปตาจึงมีลักษณะตาเปิดกว้างไม่สูงมาก

4.6.2 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์

หัวข้อนี้จะพิจารณาแผนภาพรูปตาที่จุดต่าง ๆ ภายในลิงก์เมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ ทำให้การทดลองวัดแผนภาพรูปตามีความคล้ายคลึงกับหัวข้อ 4.6.1 แต่เปลี่ยนจุดอ่านค่าดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูปที่ 4.15 แสดงจุดอ่านค่าเรียงตามตัวอักษร A ถึง F ได้แก่

จุด A: หลังออกจากตัวส่งแสง

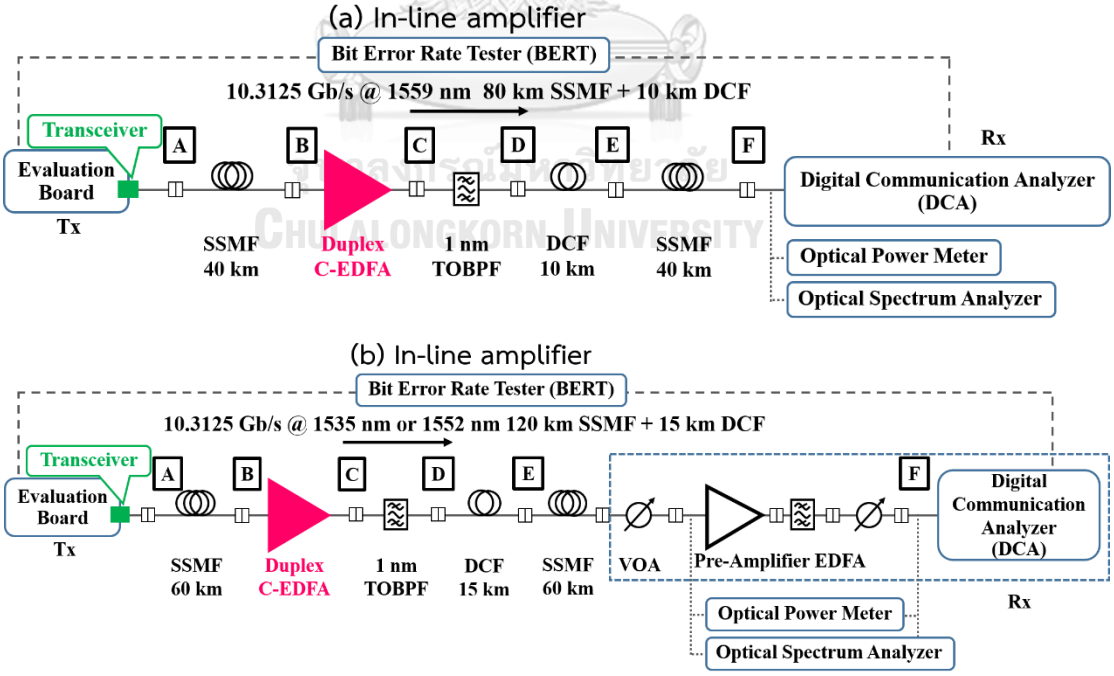
จุด B: หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน

จุด C: หลังออกจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

จุด D: หลังจากผ่านตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้

จุด E: หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน

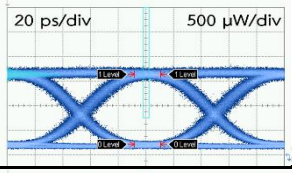
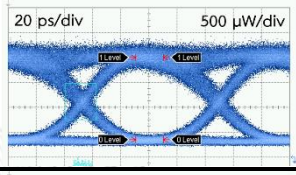
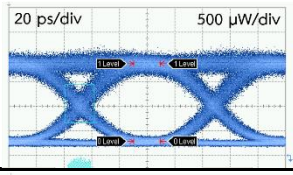
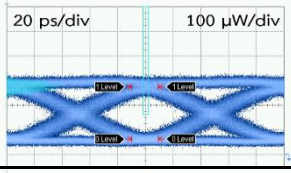
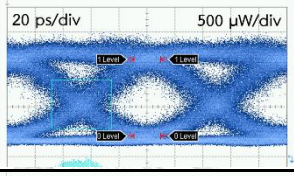
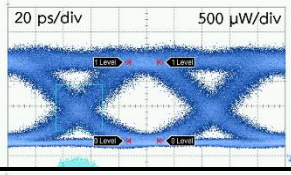
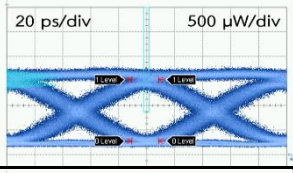
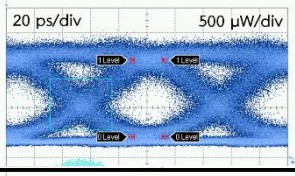
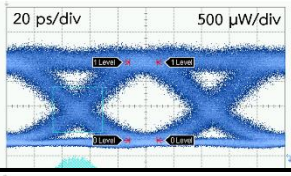
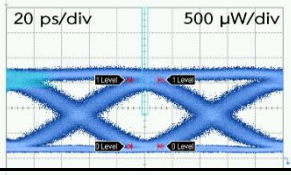
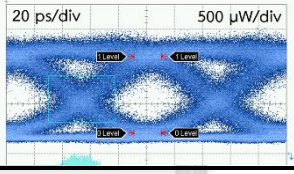
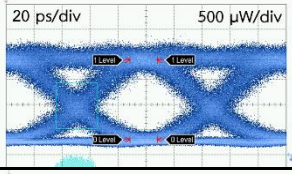
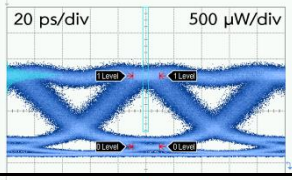
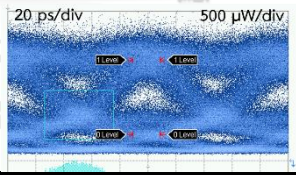
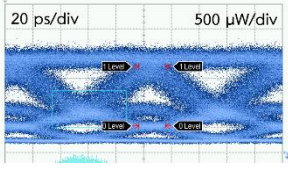
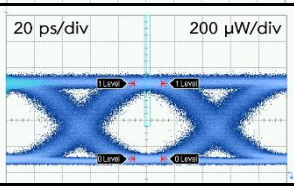
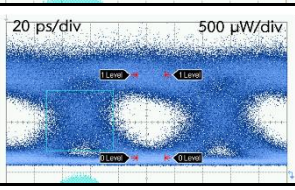
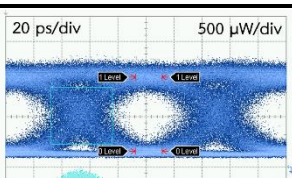
จุด F: ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 4.15 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด (a) 80 กิโลเมตร และ (b) 120 กิโลเมตร

เมื่อทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแสง 10.3125 Gb/s ตามรูป 4.15 นำผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลมาจัดเรียงดังตารางที่ 4.17 และแผนภาพรูปตาที่ได้จะมีสเกลที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.6.1 ที่ได้อธิบายไว้ทั้งหมด

ตารางที่ 4.17 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์

ตำแหน่ง	Huawei XFP @ 1559 nm	Terrabit Network XFP @ 1535 nm	Finisar SFP+ @ 1552 nm
A			
B			
C			
D			
E			
F			

จากตารางที่ 4.17 แสดงแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางกึ่งกลางลิงก์ของทั้งสามมอดูลรับส่งที่ทดลองพบว่า

จุด A ไป B: เกิดการถ่างออกของสัญญาณอันเนื่องมาจากผลกระทบโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยนำแสง ทำให้ตามีความหนาเอียงขึ้นและมีขนาดกำลังสัญญาณข้อมูลแสงลดลง เนื่องจากผลกระทบของการลดทอนในเส้นใยนำแสง

จุด B ไป C: ลักษณะรูปตามีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมและเส้นบิต 1 มีความหนาขึ้นเล็กน้อย เป็นผลจากการขยายกำลังแสงด้วยอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงทำให้สัญญาณข้อมูลได้รับการขยายพร้อมกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

จุด C ไป D: ความหนาเส้นบิต 1 ในรูปตาจะมีขนาดลดลง เนื่องจากสัญญาณรบกวนเอเอสอีได้รับการกรองออกบางส่วน

จุด D ไป E: รูปร่างของตาจะเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลมาจากการชดเชยโครมาติกดิสเพอร์ชันที่มากเกินไป (Over Compensation) ของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน สำหรับเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานทั้งหมด

จุด E ไป F: ลักษณะรูปตาจะกลับมาเปิดกว้างขึ้น แต่มีขนาดกำลังสัญญาณข้อมูลที่ลดลงและมีการสั่นไหว (jitter) ของตาเพิ่มขึ้น เพราะว่ามีผลกระทบของการลดทอนในเส้นใยนำแสงเช่นเดียวกับจุด A ไป B และมีการชดเชยโครมาติกดิสเพอร์ชันที่มากกว่าจุด E

<u>หมายเหตุ</u> *รูปผลการทดลองจากทั้งสามมอดูลรับส่งที่จุด A กับ จุด F มีลักษณะรูปตาไม่ใกล้เคียงกันเนื่องจากปัญหาการประสานเวลา (Synchronized) ระหว่างเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตกับเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล โดยจะกล่าวถึงปัญหาที่พบในบท 5 หัวข้อ 5.2*

4.6.3 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

หัวข้อนี้จะพิจารณาแผนภาพรูปตาที่จุดต่าง ๆ ภายในลิงก์เมื่อวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง ทำให้การทดลองวัดแผนภาพรูปตามีความคล้ายคลึงกับหัวข้อ 4.6.1 เช่นกัน แต่เปลี่ยนจุดอ่านค่าดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูปที่ 4.16 แสดงจุดอ่านค่าเรียงตามตัวอักษร A ถึง E ได้แก่

จุด A: หลังออกจากตัวส่งแสง

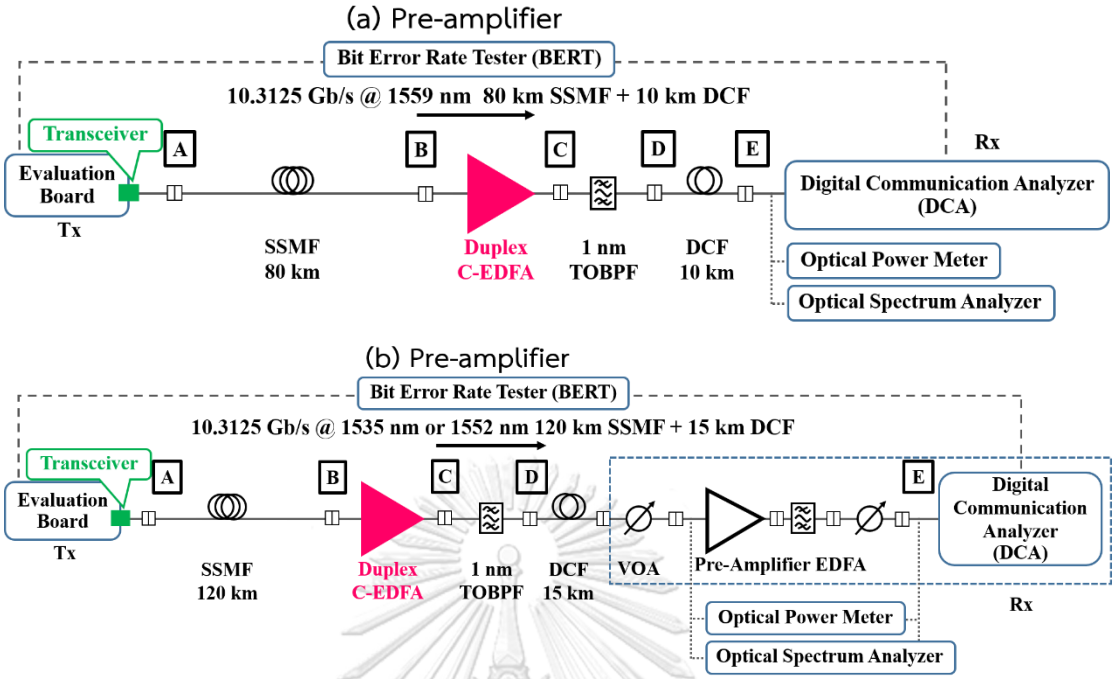
จุด B: หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน

จุด C: หลังออกจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

จุด D: หลังจากผ่านตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้

จุด E: ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

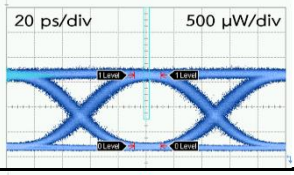
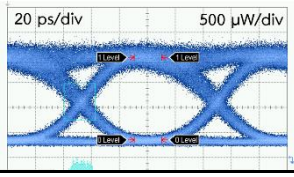
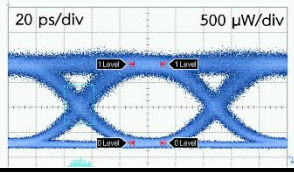
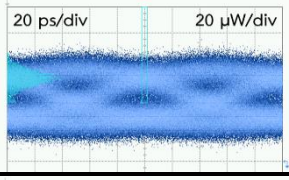
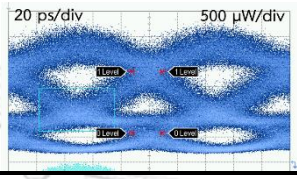
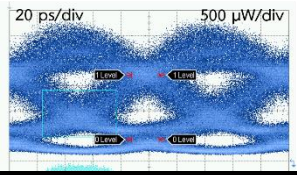
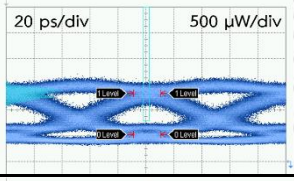
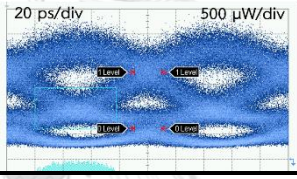
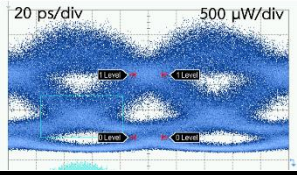
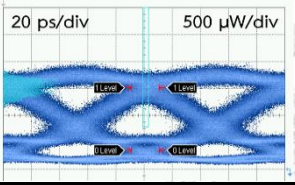
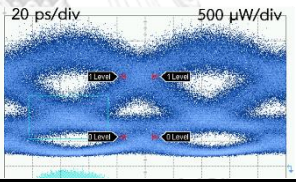
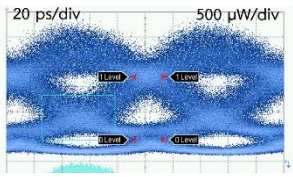
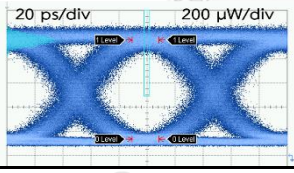
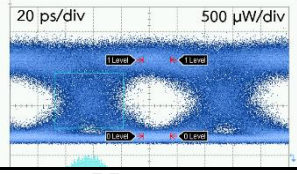
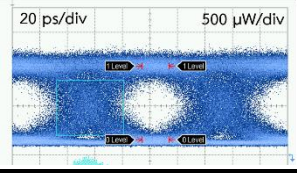


รูปที่ 4.16 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด (a) 80 กิโลเมตร และ (b) 120 กิโลเมตร

เมื่อทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแสง 10.3125 Gb/s ตามรูป 4.16 นำผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลมาจัดเรียงดังตารางที่ 4.18 และแผนภาพรูปตาที่ได้จะมีสเกลที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.6.1 ที่ได้อธิบายไว้ทั้งหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.18 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

ตำแหน่ง	Huawei XFP @ 1559 nm	Terrabit Network XFP @ 1535 nm	Finisar SFP+ @ 1552 nm
A			
B			
C			
D			
E			

จากตารางที่ 4.18 แสดงแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงของทั้งสามมอดูลรับส่งที่ทดลองพบว่า

จุด A ไป B: สำหรับกรณีแรก (มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei) จะไม่สามารถวัดตาได้อันเนื่องมาจากผลกระทบที่มากเกินจากการลดทอนและโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยนำแสง 80 km ทำให้เกิดการถ่างออกของสัญญาณและรูปตามีขนาดเล็ก ส่วนกรณีที่สอง (มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar) รูปตาจะเกิดการถ่างออกของสัญญาณและมีขนาดเล็กลงจนค่าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งได้รับผลกระทบจากการลดทอนและโครมาติกดิสเพอร์ชันมากในเส้นใยนำแสงที่ยาวกว่าถึง 120 km

จุด B ไป C: กำลังสัญญาณข้อมูลแสงได้รับการขยายจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงทำให้สามารถสังเกตรูเปิดของรูปตาเป็นสามเหลี่ยมได้ โดยมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเอเอสอีร่วมด้วย

จุด C ไป D: ผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีถูกลดลงบ้าง แต่ผลกระทบจากการลดทอนและโครมาติกดิสเพอร์ชันยังคงอยู่ ทำให้รูปตามีลักษณะคงเดิมคล้ายจุด B

จุด D ไป E: สัญญาณข้อมูลได้รับการชดเชยโครมาติกดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมกับระยะทางส่งสัญญาณ ทำให้ลักษณะรูปตาเปิดกว้างขึ้นเป็นวงกลมใกล้เคียงกับจุด A เช่นเดียวกับการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ แต่จะมีขนาดกำลังสัญญาณแสงและมีการสั่นไหว (jitter) ของตาที่มากกว่า

4.6.4 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งเหมาะที่สุด

หัวข้อนี้จะเหมือนกันกับหัวข้อ 4.6.2 แต่เนื่องจากปัญหาไม่สามารถติดตั้ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์และลิงก์ใช้งานจริงเป็นรูปแบบสื่อสารสองทางที่ใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางขยายสัญญาณ จึงจำเป็นต้องแสดงแผนภาพรูปตาเพื่อพิสูจน์ว่าผลการทดลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ ซึ่งมีการพิจารณาแผนภาพรูปตาที่จุดต่าง ๆ เหมือนกับหัวข้อ 4.6.2 ดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูปที่ 4.17 แสดงจุดอ่านค่าเรียงตามตัวอักษร A ถึง F ได้แก่

จุด A: หลังออกจากตัวส่งแสง

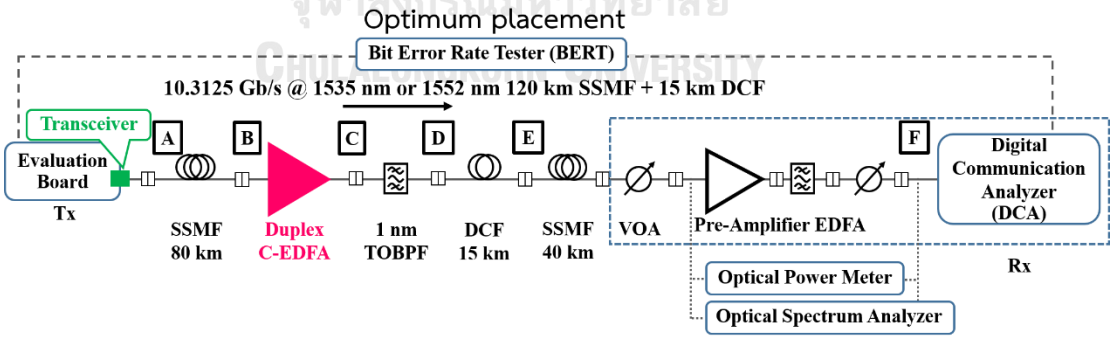
จุด B: หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน

จุด C: หลังออกจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

จุด D: หลังจากผ่านตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้

จุด E: หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน

จุด F: ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

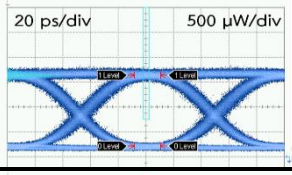
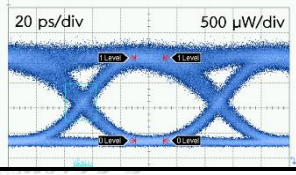
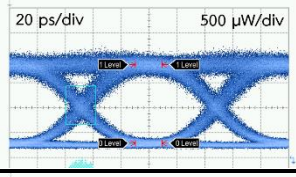
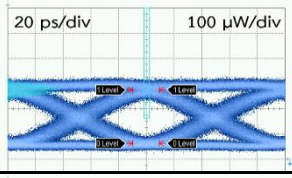
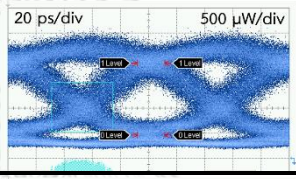
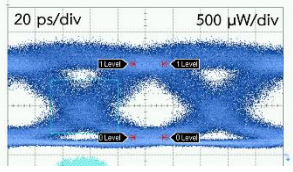
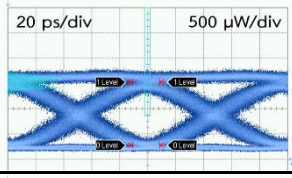
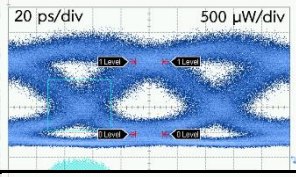
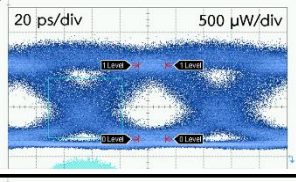
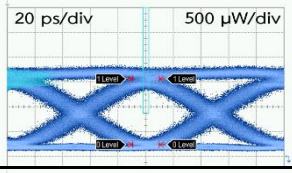
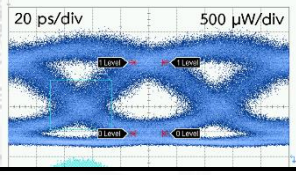
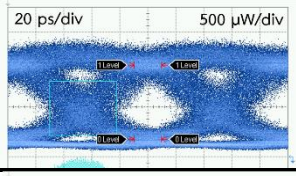
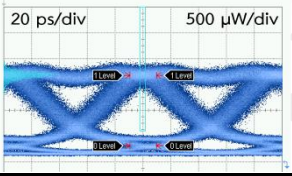
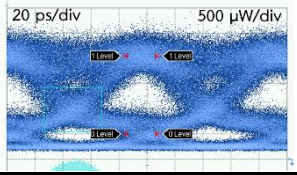
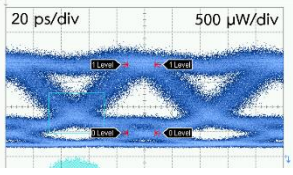
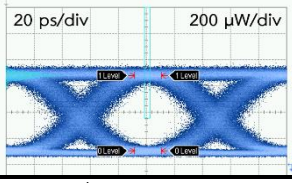
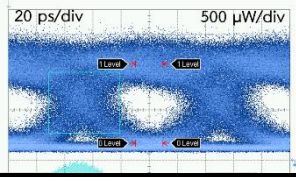
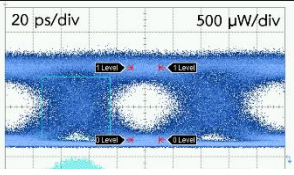


รูปที่ 4.17 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดแผนภาพรูปตา ณ ตำแหน่งเหมาะที่สุด: ลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร

จากรูป 4.17 มีแผนภาพบล็อกการทดลองสำหรับลิงก์ขาลงกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 km กรณีเดียวเท่านั้น เป็นเหตุจากลิงก์ขาขึ้นกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 km มีตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง

เหมาะที่สุดที่ 40 km (50%) ซึ่งก็คือตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ ทำให้สามารถใช้แผนภาพบล็อกการทดลองรูปที่ 4.15 (a) ร่วมกันได้ และแผนภาพรูปตาที่ได้จะมีสเกลที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.6.1 ที่ได้อธิบายไว้ทั้งหมด

ตารางที่ 4.19 แผนภาพรูปตาของการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งเหมาะที่สุด

ตำแหน่ง	Huawei XFP @ 1559 nm	Terrabit Network XFP @ 1535 nm	Finisar SFP+ @ 1552 nm
A			
B			
C			
D			
E			
F			

จากตารางที่ 4.19 พบว่าจะได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับตาราง 4.17 เช่นกัน โดยมีความใกล้เคียงกับตำแหน่งที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางกึ่งกลางลิงก์ดังนี้

จุด A ไป B: จะได้รับผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันและการลดทอนในเส้นใยนำแสง ทำให้รูปตามีขนาดลดลงและเกิดการถ่างออกของสัญญาณมากกว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ เนื่องจากผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทางไกลกว่าจาก 60 km เป็น 80 km

จุด B ไป C: สัญญาณรบกวนเอเอสอีเพิ่มขึ้นจากอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ซึ่งมีค่าอัตราขยายมากกว่าหัวข้อ 4.6.2 จึงทำให้ความหนาเส้นบิต 1 ของรูปตามีความหนาขึ้นมากกว่าเล็กน้อย

จุด C ไป D: สัญญาณรบกวนเอเอสอีจะถูกลดลงด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm เช่นเดียวกัน จึงทำให้ความหนาเส้นบิต 1 ของรูปตามีขนาดลดลง

จุด D ไป E: ได้รับการชดเชยโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นสัดส่วนที่ดีกว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์แต่ก็ยังมากเกินไป (Over Compensation) จึงทำให้รูปตาเปิดกว้างกว่าเล็กน้อย

จุด E ไป F: ได้รับผลกระทบจากการลดทอนในเส้นใยนำแสงน้อยกว่าและมีการชดเชยโครมาติกดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมมากขึ้น ทำให้รูปตากลับมามีลักษณะเปิดกว้างเช่นเดียวกัน

<u>หมายเหตุ</u> *รูปผลการทดลองจากทั้งสามมอดูลรับส่งที่จุด A กับ จุด F มีลักษณะรูปตาไม่ใกล้เคียงกันเนื่องจากปัญหาการประสานเวลา (Synchronized) ระหว่างเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตกับเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล โดยจะกล่าวถึงปัญหาที่พบในบท 5 หัวข้อ 5.2*

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะสามารถสรุปแยกเป็น 2 ประเด็นคือ ปัจจัยจากอุปกรณ์ที่ใช้ส่งผลกระทบต่อลักษณะของรูปตากับตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางภายในลิงก์ โดยประเด็นแรกปัจจัยจากอุปกรณ์ที่ใช้จะได้ว่า เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวทำให้มีผลกระทบจากการลดทอนและโครมาติกดิสเพอร์ชัน แต่ผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันจะสามารถชดเชยด้วยการใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน และการลดทอนจะแก้ไขด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมทั้งตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ เนื่องจากตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้สามารถลดสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อีดีเอฟเอขยายกำลังสัญญาณข้อมูลแสงเพื่อชดเชยกำลังสูญเสียจากการลดทอน จึงเป็นที่มาของการเลือกใช้อุปกรณ์ภายในลิงก์สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนประเด็นที่สองตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางภายในลิงก์สังเกตได้จากแผนภาพรูปตาที่บันทึกไว้แต่ละตำแหน่ง ซึ่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์จะมีแผนภาพรูปตาดีที่สุด รองลงมาเป็นตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และตำแหน่งหลังตัวส่งแสงมีแผนภาพรูปตาแย่ที่สุด นอกจากนี้การวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับหัวข้อ 4.6 เป็นตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ แต่ในหัวข้อ 4.6.4 แผนภาพรูปตามีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีกึ่งกลางลิงก์มากกว่าก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงเล็กน้อย เป็นเหตุให้จำเป็นต้องวิเคราะห์สมรรถนะของลิงก์เมื่อมีผลกระทบจากอุปกรณ์และการเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางดังหัวข้อที่จะกล่าวในลำดับถัดไป

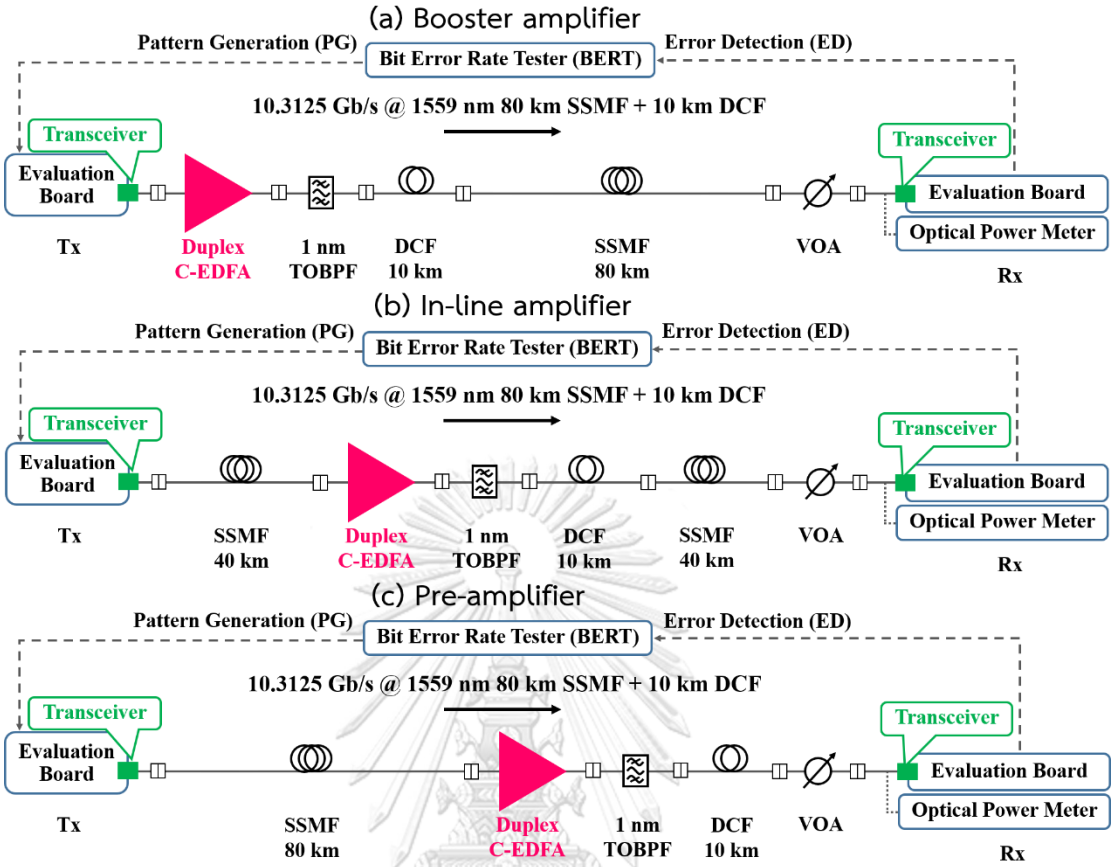
4.7 การวิเคราะห์อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Analysis)

การวิเคราะห์อัตราความผิดพลาดบิตในหัวข้อนี้เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของลิงก์ ซึ่งจะพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-9} และ 10^{-12} ทดสอบด้วยเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต โดยหัวข้อนี้จะแบ่งเป็น 2 หัวข้อย่อยเหมือนดังหัวข้อ 4.6 เช่นกันคือ (1) กรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 80 กิโลเมตร (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 80 กิโลเมตรและชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 กิโลเมตร) กับ (2) กรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลสูงสุด 120 กิโลเมตร (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 120 กิโลเมตรและชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 กิโลเมตร) สำหรับเนื้อหาในหัวข้อย่อยจะแสดงการวิเคราะห์สมรรถนะของลิงก์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แยกเป็น 2 ส่วนคือ อัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์และจากการวางตำแหน่งอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางภายในลิงก์ ดังที่จะบรรยายต่อไปนี้

4.7.1 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณสูงสุด 80 กิโลเมตร เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei

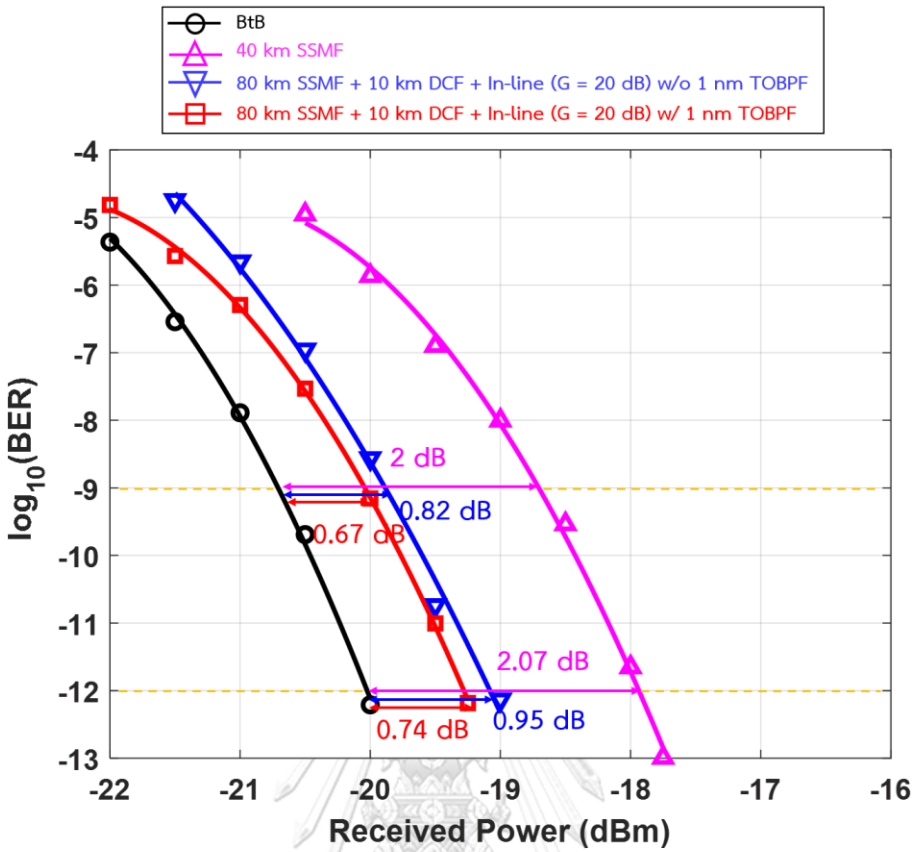
เหมือนดังหัวข้อ 4.6.1 หัวข้อย่อยนี้จะใช้มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei เช่นกัน ซึ่งการทดลองในส่วนแรกจะประกอบด้วยกรณี (1) ส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเอง (Back to Back, BtB), (2) ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 40 กิโลเมตร (40 km SSMF), (3) ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 กิโลเมตร ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 กิโลเมตร ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 20 dB ซึ่งปราศจากตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm (80 km SSMF + 10 km DCF + In-line G = 20 dB w/o 1 nm TOBPF) และ (4) ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 กิโลเมตร ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 กิโลเมตร ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 20 dB พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm (80 km SSMF + 10 km DCF + In-line G = 20 dB w/ 1 nm TOBPF)

ส่วนที่สองจะประกอบด้วยกรณี (1) ส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเอง, (2) ผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งหลังตัวส่งแสง (80 km SSMF + 10 km DCF + 16.5 dB Gain@0 km w/ 1 nm TOBPF), (3) ผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (80 km SSMF + 10 km DCF + 24 dB Gain@80 km w/ 1 nm TOBPF) และ (4) ผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ (80 km SSMF + 10 km DCF + 20 dB Gain @40 km w/ 1 nm TOBPF) ซึ่งจะสามารถทดลองดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิต กรณีวางอีดีเอฟเอที่ตำแหน่ง: (a) หลังตัวส่งแสง, (b) กึ่งกลางลิงก์ และ (c) ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพี ของบริษัท Huawei ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 80 กิโลเมตร

เมื่อทดลองดังแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.18 นำค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่อ่านได้จากเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต มาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงที่รับกับอัตราความผิดพลาดบิต จึงทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ของอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์และการเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอภายในลิงก์ดังรูป 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ ซึ่งจะพิจารณาจากผลต่างระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีศึกษาที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-9} และ 10^{-12} เรียกว่าค่าโทษกำลัง (power penalty) โดยค่าโทษกำลังเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของลิงก์ เพื่อแสดงความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อลิงก์



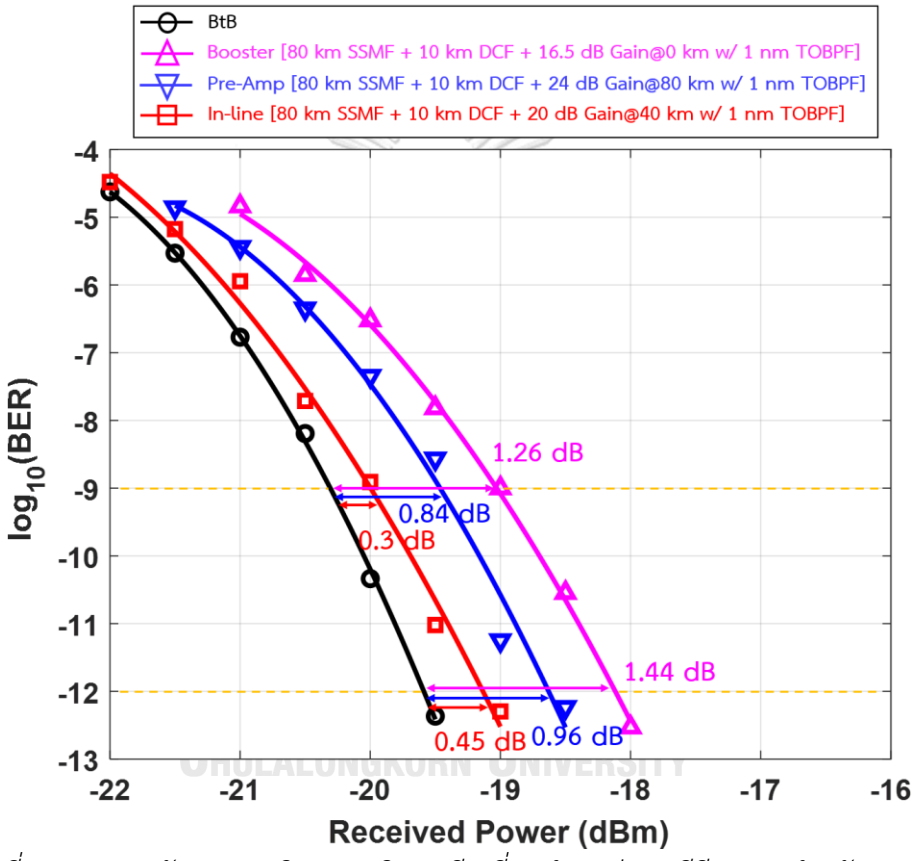
รูปที่ 4.19 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 80 กิโลเมตร

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} พบว่าผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าโทษกำลังประมาณ 2 dB และ 2.07 dB ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเอง (BtB) กับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 40 km (40 km SSMF)

ถัดมาผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีถูกลดลงด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm ค่าโทษกำลังลดลงประมาณ (0.82 - 0.67 =) 0.15 dB และ (0.95 - 0.74 =) 0.21 dB ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาจากกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 20 dB ซึ่งปราศจากตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm (80 km SSMF + 10 km DCF + In-line G = 20 dB w/o 1 nm TOBPF) เปรียบเทียบกับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 20 dB พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm (80 km SSMF + 10 km DCF + In-line G = 20 dB w/ 1 nm TOBPF)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

นอกจากนี้พิจารณากรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 20 dB พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm มีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.67 dB และ 0.74 dB ตามลำดับ เพื่อแสดงว่ามอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei สามารถรองรับลิงก์ที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ได้ โดยมีค่าโทษกำลังไม่เกินจากขีดจำกัดของอุปกรณ์ตามแผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะได้ระบุไว้ 2 dB



รูปที่ 4.20 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอ สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 80 กิโลเมตร

จากกราฟรูปที่ 4.20 แสดงค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} พบว่าตำแหน่งหลังตัวส่งแสงมีค่าโทษกำลังประมาณ 1.26 dB และ 1.44 dB ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งหลังตัวส่งแสง (80 km SSMF + 10 km DCF + 16.5 dB Gain@0 km w/ 1 nm TOBPF)

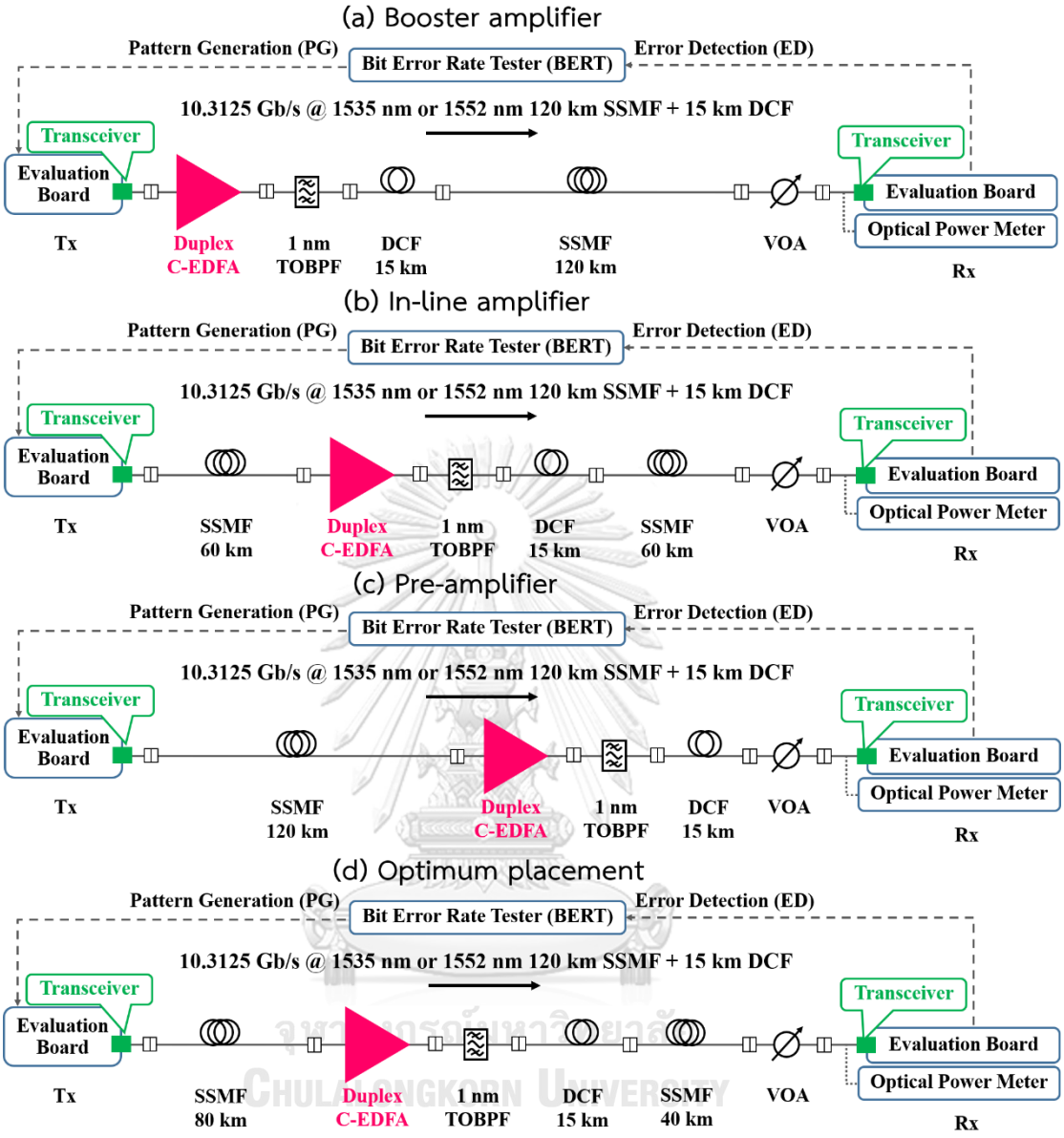
ถัดมาพิจารณากรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง (80 km SSMF + 10 km DCF + 24 dB Gain@80 km w/ 1 nm TOBPF) จะได้ตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.84 dB และ 0.96 dB ตามลำดับ

นอกจากนี้พิจารณากรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ (80 km SSMF + 10 km DCF + 20 dB Gain@40 km w/ 1 nm TOBPF) ซึ่งตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.30 dB และ 0.45 dB จึงสรุปได้ว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบค่าโทษกำลังกับอีกสองตำแหน่งที่เหลือ โดยค่าโทษกำลังของทั้งสามตำแหน่งยังคงไม่เกินขีดจำกัดตามแผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของมอดูลรับส่งแสงที่ใช้งานได้ระบุไว้ 2 dB

4.7.2 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณสูงสุด 120 กิโลเมตร

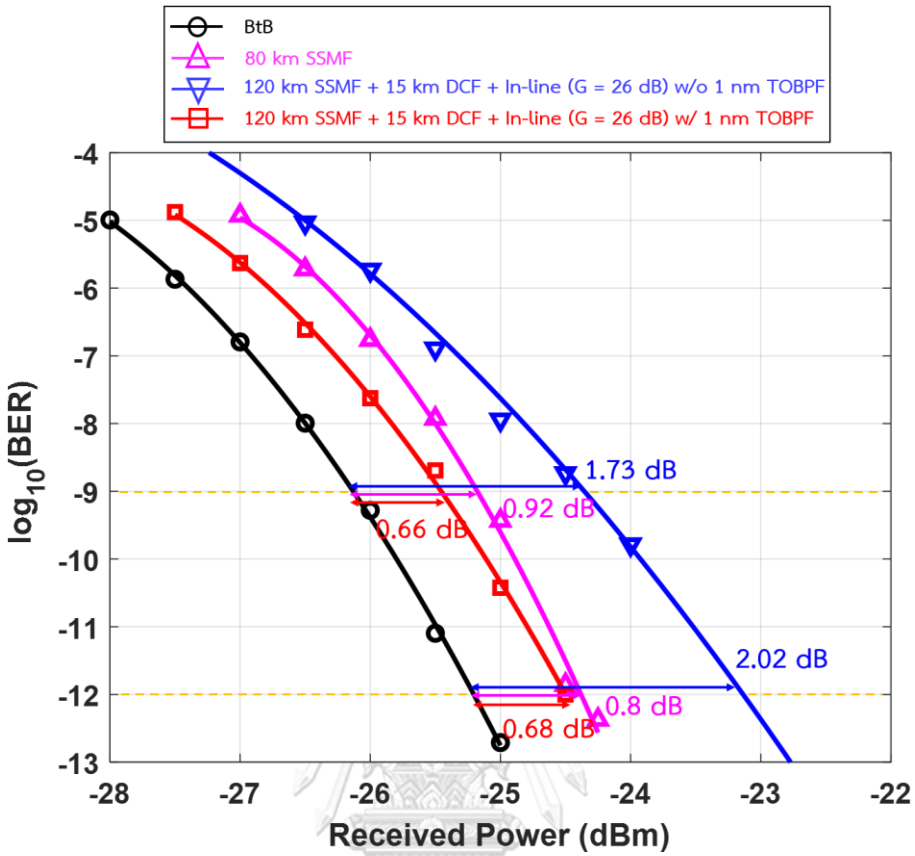
เฉกเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.6.2 ที่แบ่งเป็น 2 หัวข้อย่อยตามมอดูลรับส่งใช้งานได้แก่ มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network กับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar โดยพิจารณาเหมือนหัวข้อ 4.7.1 การทดลองส่วนแรกจะเพิ่มระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานเป็น 80 กิโลเมตร (80 km SSMF) นอกจากนี้จะเปลี่ยนระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุดเป็น 120 กิโลเมตร ร่วมกับเพิ่มระยะเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันขึ้นเป็น 15 กิโลเมตร ซึ่งอัตราขยายจะขึ้นกับมอดูลรับส่งที่ใช้ดังตาราง 4.2 และ 4.3 ยิ่งไปกว่านั้นส่วนที่สองสามารถทดลองดังแผนภาพบล็อกการทดลองรูป 4.21 ที่เพิ่มกรณีผ่านลิงก์เมื่อวางอีดีเอฟเอตำแหน่งเหมาะที่สุด ทำให้จะได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.21 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิต กรณีวางอีดีเอฟเอที่ตำแหน่ง: (a) หลังตัวส่งแสง, (b) กึ่งกลางลิงก์, (c) ก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง และ (d) ตำแหน่งเหมาะที่สุด สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร

4.7.2.1 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network



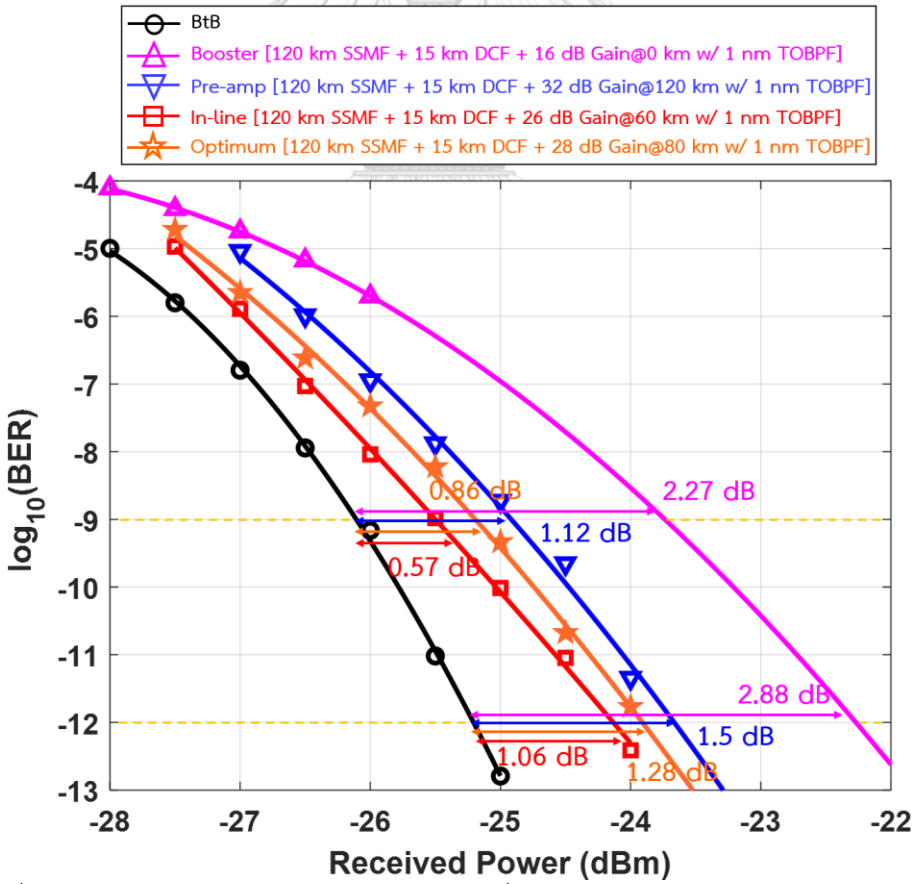
รูปที่ 4.22 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร

จากรูปที่ 4.22 แสดงค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} พบว่าผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าโทษกำลังประมาณ 0.92 dB และ 0.8 dB ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเอง (BtB) กับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km (80 km SSMF)

ถัดมาพิจารณาจากกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 26 dB ซึ่งปราศจากตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm (120 km SSMF + 15 km DCF + In-line G = 26 dB w/o 1 nm TOBPF) เปรียบเทียบกับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 26 dB พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm (120 km SSMF + 15 km DCF + In-line G = 26 dB w/ 1 nm TOBPF) ซึ่งผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีถูกลดลงด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง

1 nm ค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ลดลงประมาณ (1.73 – 0.66 =) 1.07 dB และ (2.02 – 0.68 =) 1.34 dB ตามลำดับ ซึ่งค่าโทษกำลังลดลงอย่างมากอันเนื่องมาจากมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network มีความยาวคลื่นใช้งานอยู่ในส่วนยอดโพรไฟล์สเปกตรัมของอัตราขยายอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงทำให้มีค่าอัตราขยายและสัญญาณรบกวนเอเอสอีสูงกว่าปกติ เมื่อใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm จะทำให้สัญญาณรบกวนเอเอสลดลงมากกว่าปกติเช่นกัน

นอกจากนี้พิจารณาระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 26 dB พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm มีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.66 dB และ 0.68 dB ตามลำดับ เพื่อแสดงว่ามอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network สามารถรองรับลิงก์ที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ได้ โดยมีค่าโทษกำลังไม่เกินจากขีดจำกัดของอุปกรณ์ตามแผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะได้ระบุไว้ 3 dB



รูปที่ 4.23 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอ สำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร

ในส่วนการทดลองที่สองพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตจากกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอได้ผลดังรูปที่ 4.23 พบว่าค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ของตำแหน่งหลังตัวส่งแสงมีค่าประมาณ 2.27 dB และ 2.88 dB ตามลำดับ เมื่อพิจารณากรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งหลังตัวส่งแสง โดยสาเหตุที่ตำแหน่งหลังตัวส่งแสงมีค่าโทษกำลังสูงมากเนื่องจากผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันดังในหัวข้อ 4.6 ยิ่งไปกว่านั้นอ้างอิง [21] ได้บรรยายไว้ว่าตำแหน่งหลังตัวส่งแสงจะมีค่าโทษกำลังสูงจากผลกระทบการกระเจิงบริลลูอินกระตุ้น (Stimulated Brillouin Scattering) ด้วยเช่นกัน อันเนื่องมาจากกำลังแสงขาออกจากมอดูลรับส่งมีกำลังสูงประมาณ 1 dBm รวมกับอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางประมาณ 16 dB จึงมีกำลังแสงสูงเกินขีดจำกัดของกำลังแสงภายในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานที่มาตรฐาน ITU-T G.652 [12] กำหนดไว้ไม่เกิน 17 dBm

ถัดมาค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ของตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงมีค่าประมาณ 1.12 dB และ 1.5 dB ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง

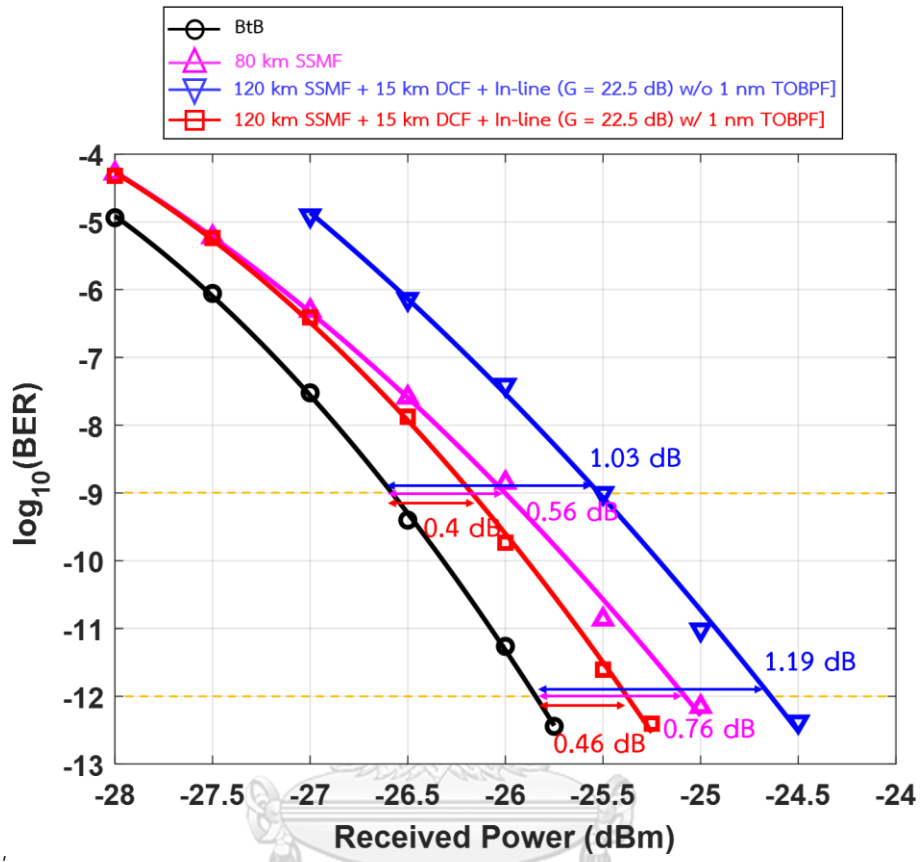
เมื่อเปรียบเทียบกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ มีค่าโทษกำลังน้อยสุดที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.57 dB และ 1.06 dB ตามลำดับ นอกจากนี้เปรียบเทียบกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งเหมาะที่สุด มีค่าโทษกำลังประมาณ 0.86 dB และ 1.28 dB ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโทษกำลังของตำแหน่งอื่น ๆ โดยค่าโทษกำลังทุกตำแหน่งยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของมอดูลรับส่งที่ใช้งานได้ระบุไว้เช่นกัน ส่วนตำแหน่งเหมาะที่สุดจะมีค่าความผิดพลาดบิตอยู่ระหว่างตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงและกึ่งกลางลิงก์ทำให้มีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับสองตำแหน่งนี้ ซึ่งจะสามารถใช้งานทดแทนกันได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>หมายเหตุ</u> *จากกราฟผลการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิตในหัวข้อ 4.7.1, 4.7.2.1 และหัวข้อถัดไป 4.7.2.2 จะมีค่าโทษกำลังระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm และกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านลิงก์ที่วางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ เป็นการเปรียบเทียบเงื่อนไขเดียวกันแต่มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิตจะใช้เวลานานทำให้มอดูลรับส่งที่ใช้มีความร้อนเกิดขึ้น จึงส่งผลให้กำลังแสง*

ไม่เสถียร เป็นเหตุให้ต้องแก้ปัญหาด้วยการทดลองทีละส่วน ทำให้สามารถนำมาเปรียบเทียบเฉพาะส่วนเดียวกันเท่านั้น

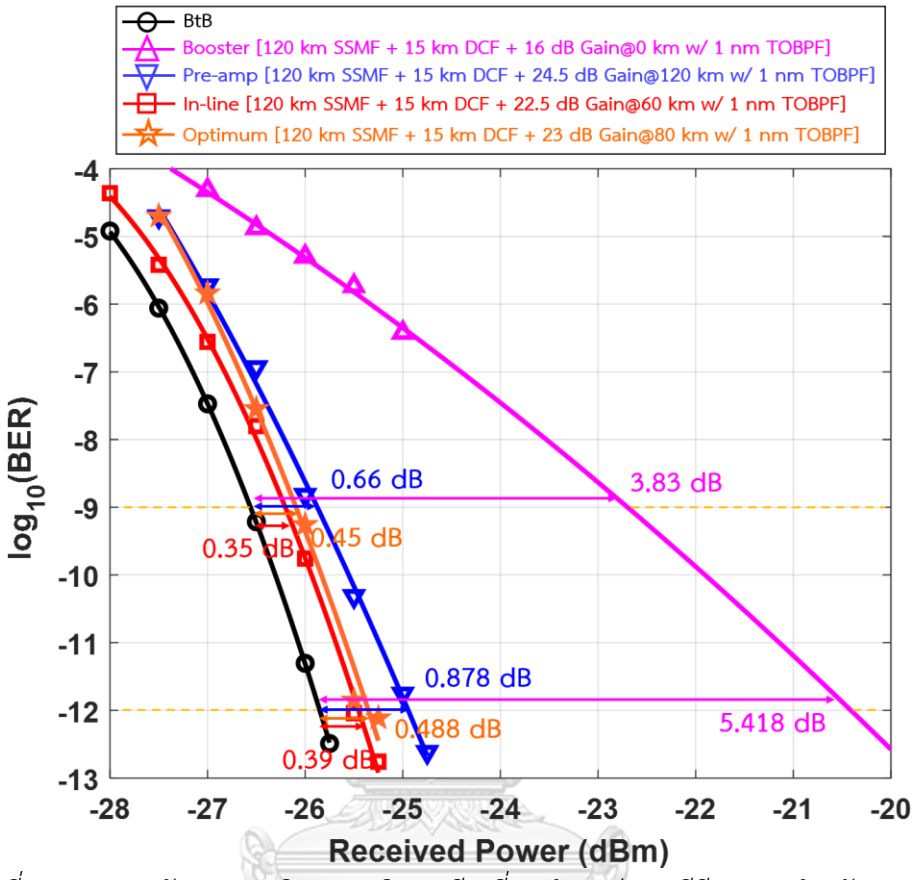
4.7.2.2 เมื่อใช้งานมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar



รูปที่ 4.24 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ สำหรับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร

ทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 4.7.2.1 ทำให้ได้ว่าจากรูป 4.24 จะพบผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.56 dB และ 0.76 dB ตามลำดับ ถัดมาผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีถูกลดลงด้วยการใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm มีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ลดลงประมาณ (1.03 – 0.4 =) 0.63 dB และ (1.19 – 0.46 =) 0.73 dB ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระหว่างกรณีส่งสัญญาณข้อมูลไปหาตัวเองกับกรณีผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางที่ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีกำลังขยาย 22.5 dB พร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสง 1 nm มีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.4 dB และ 0.46 dB ตามลำดับ เพื่อแสดงว่ามอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar สามารถรองรับลิงก์ที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ได้ โดยมีค่าโทษกำลังไม่เกินจาก

ขีดจำกัดของอุปกรณ์ตามแผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะได้ระบุไว้ 3 dB เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.7.1 และ 4.7.2.1



รูปที่ 4.25 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอ สำหรับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar ที่ขยายระยะทางส่งสัญญาณแสงไกลสุด 120 กิโลเมตร

ส่วนที่สองพิจารณาจากรูปที่ 4.25 พบว่าตำแหน่งหลังตัวส่งแสงมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 3.83 dB และ 5.418 dB ตามลำดับ ซึ่งได้มาจากการประมาณค่าอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อกำลังแสงตรวจจับสูงกว่า -24.5 dBm การที่ค่าโทษกำลังมีค่าสูงเป็นเหตุจากผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันดังในหัวข้อ 4.6 และผลกระทบการกระเจิงบริลลูอินกระตุ้นด้วยเช่นกัน ถัดมาค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ของตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงมีค่าประมาณ 0.66 dB และ 0.878 dB ตามลำดับ และตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.35 dB และ 0.39 dB ตามลำดับ นอกจากนี้ตำแหน่งเหมาะที่สุดมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} และ 10^{-12} ประมาณ 0.45 dB และ 0.488 dB ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโทษกำลังของตำแหน่งอื่น ๆ โดยค่าโทษกำลังทุกตำแหน่งยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

มอดูลรับส่งที่ใช้งานได้ระบุไว้เช่นกัน ส่วนตำแหน่งเหมาะที่สุดจะมีค่าความผิดพลาดบิตอยู่ระหว่างตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงและกึ่งกลางลิงก์ ทำให้มีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับสองตำแหน่งนี้ ซึ่งเป็นไปตามผลที่ได้บรรยายในหัวข้อ 4.7.2.1 เช่นเดียวกัน

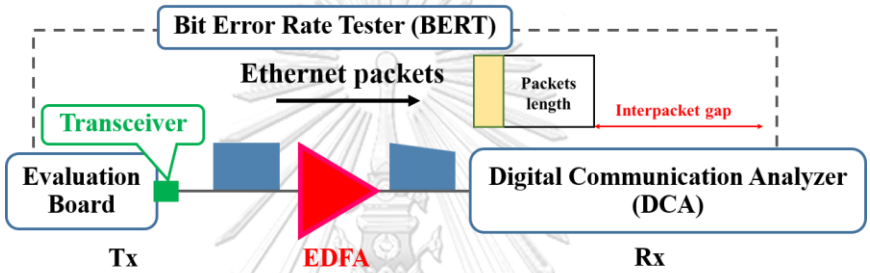
จากที่กล่าวมาทั้งหมดในส่วนแรกอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ สำหรับหัวข้อ 4.7.1 ผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันจะมีค่าโทษกำลังมากกว่าผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอี แต่ในหัวข้อ 4.7.2 จะมีค่าโทษกำลังที่ใกล้เคียงกันเป็นเหตุมาจากอัตราขยายของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางเพิ่มขึ้นทำให้มีสัญญาณรบกวนเอเอสอีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงมีค่าโทษกำลังเพิ่มขึ้นมากกว่าหัวข้อ 4.7.1 เมื่อต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันจะทำให้ค่าโทษกำลังลดลงจนไม่เกินขีดจำกัดของมอดูลรับส่งที่แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะระบุไว้ 2-3 dB ในส่วนที่สองอัตราความผิดพลาดบิตจากการเปลี่ยนตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางภายในลิงก์แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์จะมีอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุด แต่กรณีวางอีดีเอฟเอตำแหน่งหลังตัวส่งแสงมีอัตราความผิดพลาดบิตแย่ที่สุด โดยเฉพาะหัวข้อ 4.7.2 จะมีค่าโทษกำลังสูงจากผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันกับผลกระทบจากการกระเจิงบริลลูอินที่ถูกกระตุ้น นอกจากนี้ตำแหน่งเหมาะที่สุดจะมีอัตราความผิดพลาดบิตที่ใกล้เคียงอยู่ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์และก่อนหน้าตัวตรวจจับแสง ทำให้ตำแหน่งเหมาะที่สุดสามารถนำมาประยุกต์ทดแทนทั้งสองตำแหน่งที่กล่าวมาได้ ดังนั้นผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นปัญหาที่ส่งผลมากที่สุด และตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุด โดยตำแหน่งเหมาะที่สุดจะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตใกล้เคียงกัน ซึ่งหัวข้อในลำดับถัดไปจะบรรยายถึงปัจจัยที่ใช้งานมีความเกี่ยวข้องกับอัตราความผิดพลาดบิตด้วยเช่นกัน

4.8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต (Analysis of Power Variations on Ethernet Packets)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต อันเนื่องมาจากการประยุกต์ใช้อีดีเอฟเอในลิงก์ที่มีการส่งข้อมูลรูปแบบแพ็กเกต อาทิเช่น ลิงก์อีเทอร์เน็ต เมื่อนำอีดีเอฟเอมาแทรกภายในลิงก์จะส่งผลกระทบต่อกำลังบนแพ็กเกตที่ส่งแตกต่างกันไปตามประเภทของอีดีเอฟเอที่ใช้ ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.2 การทบทวนวรรณกรรม เป็นเหตุให้หัวข้อนี้ต้องการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับผลกระทบจากอีดีเอฟเอทั้ง 2 ประเภทคือ แบบทั่วไปและแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว ต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต ซึ่งอีดีเอฟเอแบบทั่วไปที่นำมาเปรียบเทียบจะมีอีดีเอฟเอ 2 เครื่อง ได้แก่ อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจากบริษัท Optoquest ดังรูปที่ 2.11 ในบทที่ 2 และอีดีเอฟเอทั่วไปจากบริษัท Viavi ดังรูปที่ 2.12 ในบทที่ 2 เช่นกัน ส่วนอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วจากบริษัท Optoquest ดังรูปที่ 2.13 ในบทที่ 2 โดยแบ่งพิจารณาตามกรณีที่พบเจอคือ (1) ช่วงเวลาการใช้งาน และ (2) ขนาดการส่งข้อมูล

แพ็กเกตอีเทอร์เน็ตปกติจะมีขนาดความยาวตั้งแต่ 512 บิต ถึง 12,144 บิต (64 ไบต์ ถึง 1,518 ไบต์) และระยะห่างระหว่างแพ็กเกตที่น้อยสุดคือ 96 บิต (9.6 ns ที่อัตราข้อมูล 10 Gb/s) โดยภายในลิงก์จะมีความหนาแน่นของทราฟฟิก (traffic density) ก็คือผลรวมระยะเวลาของแพ็กเกตทั้งหมดในหนึ่งวินาที หรือสัดส่วนระหว่างขนาดความยาวแพ็กเกตต่อผลรวมเวลาของแพ็กเกตทั้งหมด จากกรณีที่ต้องการวิเคราะห์สามารถทดสอบได้ดังรูป 4.26 ทำการโปรแกรมสัญญาณข้อมูลแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตจากเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตด้วยอัตราบิต 10 Gb/s รูปแบบพีอาร์บีเอส 7 กับ 9 (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) จากนั้นส่งสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตผ่านอีดีเอฟเอที่ต้องการทดสอบ และวัดผลการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตที่เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล



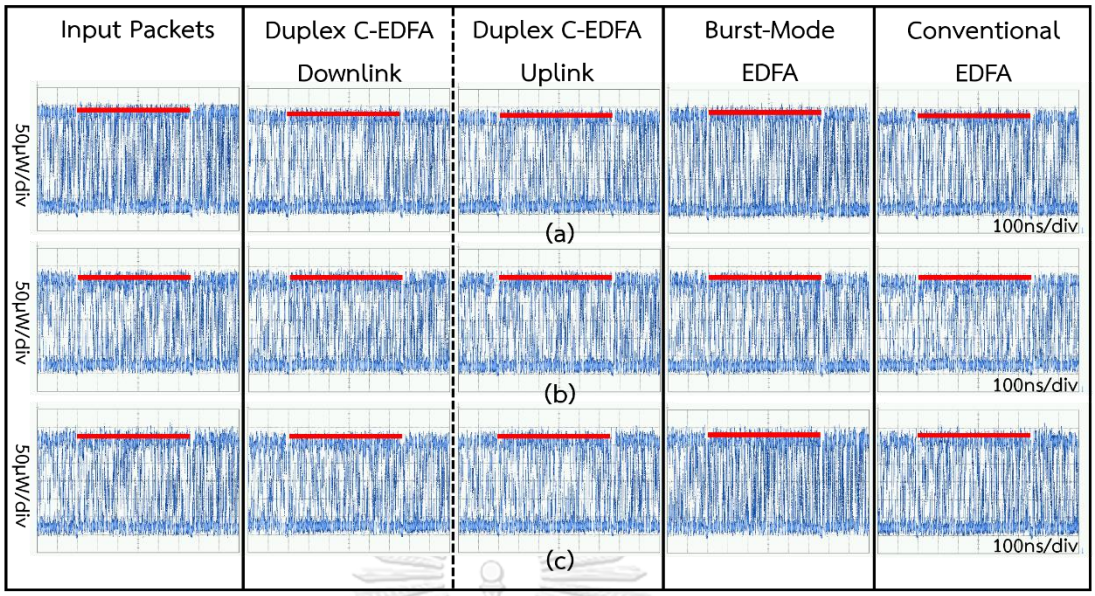
รูปที่ 4.26 แผนภาพบล็อกการทดลองวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต

4.8.1 กรณีตามช่วงเวลาการใช้งานอีเทอร์เน็ต

กรณีนี้โปรแกรมสัญญาณข้อมูลแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตด้วยรูปแบบพีอาร์บีเอส 2^9 NRZ (Non-Return-to Zero) โดยกำลังแสงเข้าอีดีเอฟเอเท่ากับ -8 dBm โดยกำหนดขนาดความยาวเป็นขนาดเฉลี่ยของแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 5,760 บิต (720 ไบต์) คงที่ และระยะห่างระหว่างแพ็กเกตจะกล่าวในหัวข้อย่อยลำดับถัดไป

4.8.1.1 ช่วงเวลาชั่วโมงทำงาน (Work Hour)

ช่วงเวลาชั่วโมงการทำงานจะมีการใช้งานข้อมูลอีเทอร์เน็ตสูง (peak usage) ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างแพ็กเกตน้อย จึงจำลองระยะห่างระหว่างแพ็กเกต 96 บิต ที่เป็นระยะห่างขั้นต่ำสุด ทำให้มีความหนาแน่นของทราฟฟิกประมาณ 98.36% (สัดส่วนระหว่าง 5,760 ต่อ 5,856 บิต) โดยจะได้ผลการทดลองดังรูป 4.27 ที่แสดงเรียงตามลำดับอีดีเอฟเอได้แก่ อีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง, อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว และอีดีเอฟเอทั่วไป

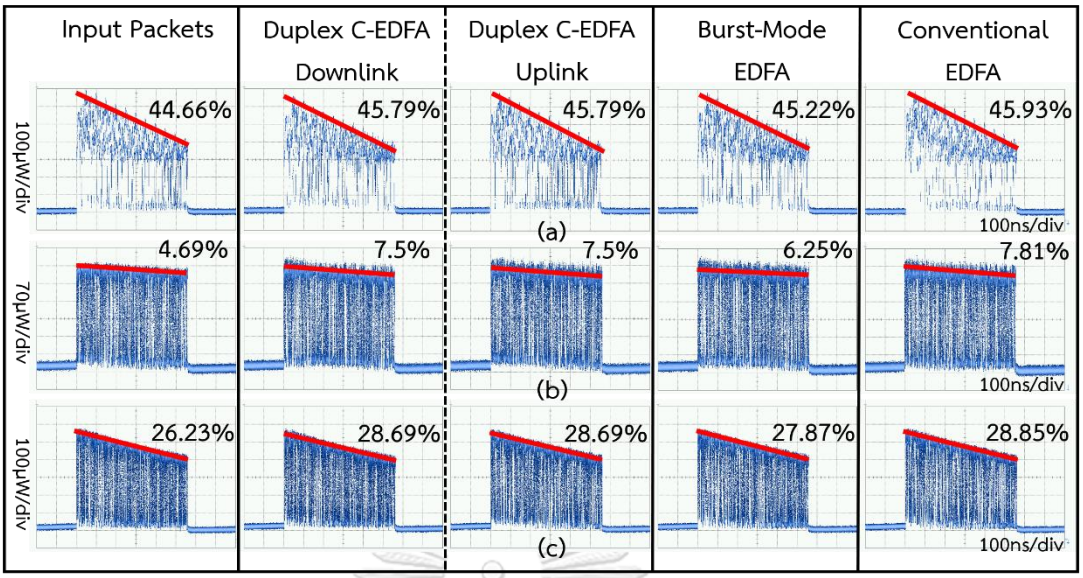


รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีระยะห่างระหว่างแพ็กเกตน้อย: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

จากรูปที่ 4.27 สังเกตได้ว่าแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตจากทั้งสามมอดูลรับส่ง หลังออกจากอีดีเอฟเอแต่ละประเภทในขณะที่มีความหนาแน่นทราฟฟิกสูงมาก จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต เนื่องจากความหนาแน่นทราฟฟิกสูงทำให้อีดีเอฟเอสามารถขยายข้อมูลแพ็กเกตได้อย่างต่อเนื่อง เสมือนว่าเป็นรูปสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous waveform)

4.8.1.2 ช่วงเวลาพักผ่อน (Rest Hour)

ในทางตรงกันข้ามกับหัวข้อ 4.8.1.1 ช่วงเวลาพักผ่อนจะมีการใช้งานข้อมูลอีเทอร์เน็ตน้อย (low usage) ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างแพ็กเกตมาก จึงจำลองระยะห่างระหว่างแพ็กเกต 9,600 บิต ทำให้มีความหนาแน่นของทราฟฟิกประมาณ 37.5% (สัดส่วนระหว่าง 5,760 ต่อ 15,360 บิต) ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีระยะห่างระหว่างแพ็กเกตมาก: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.28 จะสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตได้ โดยนำค่า a และ b ในรูปที่ 4.29 มาแทนในสมการ (4.1) [38] ดังนี้

$$\text{การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต (\%)} = \frac{a-b}{a} \qquad (4.1)$$

รูปที่ 4.29 แผนภาพสำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต

จากรูป 4.28 สังเกตได้ว่าแพ็กเกตขาเข้าของมอดูลรับส่งทั้งสามได้แก่ (a) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) มอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เป็นตัวส่งกำลังสัญญาณ มีการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 44.66%, 4.69% และ 26.23% ตามลำดับ ทำให้แพ็กเกตหลังจากผ่านอีดีเอฟเอจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นดังนี้

จากรูปที่ 4.28 (a) จะพบว่าแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตมีการเปลี่ยนแปลงกำลัง จึงนำค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตมาแทนในสมการ (4.1) ทำให้ได้การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตหลังจากผ่านอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางลิงก์ขาลงกับลิงก์ขาขึ้น, อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว และอีดีเอฟเอทั่วไปมีค่าประมาณ 45.79%, 45.22% และ 45.93% ตามลำดับ โดย

ผลกระทบของอีดีเอฟเอต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตจะประเมินจากผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตระหว่างแพ็กเกตขาเข้ากับหลังจากผ่านอีดีเอฟเอ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.13%, 0.56% และ 1.27% ตามลำดับ

ส่วนถัดมารูปที่ 4.28 (b) จะมีผลกระทบเช่นเดียวกัน จึงทำให้พบการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตหลังจากผ่านอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางลิงก์ขาลงกับลิงก์ขาขึ้น, อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว และอีดีเอฟเอทั่วไปมีค่าประมาณ 7.5%, 6.25% และ 7.81% ตามลำดับ ซึ่งมีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 2.81%, 1.56% และ 3.12% ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.28 (c) จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 28.69%, 27.87% และ 28.85% ตามลำดับ ทำให้มีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 2.46%, 1.64% และ 2.62% ตามลำดับ

จากผลการทดลองทั้งสามมอดูลรับส่งจะพบการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีความหนาแน่นทราฟฟิกปานกลาง และกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอไม่ได้สูงมาก จึงทำให้อีดีเอฟเอขยายข้อมูลแพ็กเกตให้มีขนาดสูงเกินปกติเพียงบางส่วน ซึ่งจะสังเกตเห็นผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

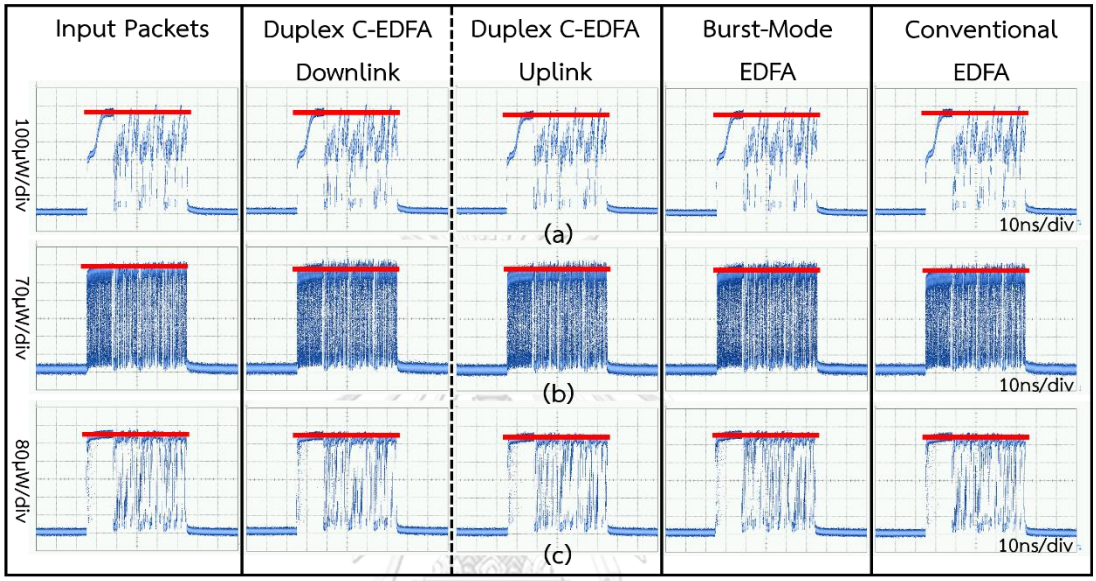
นอกจากนี้การเปลี่ยนมอดูลรับส่งจะมีผลต่อลักษณะแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตที่ส่ง ส่วนการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตจะมีผลกระทบก็ต่อเมื่อมีค่าอัตราส่วนเอกซ์ทิงชันสูง แต่ทั้งสามมอดูลรับส่งที่ใช้มีค่าอัตราส่วนเอกซ์ทิงชันประมาณ 9 dB จึงทำให้มีผลกระทบเพียงเล็กน้อย ยิ่งไปกว่านั้นจากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตจะเห็นได้ชัดเจนว่าอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีค่าผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตต่ำที่สุด เนื่องจากผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตเป็นค่าที่แสดงถึงผลกระทบของอีดีเอฟเอต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตได้อย่างชัดเจนว่า ถ้ามีค่าผลต่างสูงจะส่งผลกระทบต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตสูงตามไปด้วย ส่วนผลต่างมีค่าต่ำจะส่งผลกระทบต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตน้อย จึงสรุปได้ว่าอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วสามารถเพิ่มสมรรถนะได้ดีกว่าแบบทั่วไป

4.8.2 กรณีตามขนาดการส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ต

สำหรับกรณีนี้จะโปรแกรมสัญญาณข้อมูลแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตด้วยรูปแบบพีอาร์บีเอส 2^7 NRZ โดยกำลังแสงเข้าอีดีเอฟเอเท่ากับ -8 dBm เช่นเดิม โดยกำหนดระยะห่างระหว่างแพ็กเกตประมาณ 960 บิต (120 ไบต์) คงที่ แต่จะเปลี่ยนขนาดความยาวของแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตซึ่งกล่าวในหัวข้อย่อยลำดับถัดไป

4.8.2.1 ส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตขนาดสั้น (Short Ethernet Packets)

เมื่อผู้ใช้งานส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตขนาดเล็กเช่น ไฟล์ขนาดเล็ก, ตัวอักษร และข้อความ เป็นต้น ทำให้แพ็กเกตมีขนาดข้อมูลสั้น จึงกำหนดขนาดความยาวของแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 512 บิต ซึ่งเป็นขนาดขั้นต่ำสุด จะมีความหนาแน่นของทราฟฟิกประมาณ 34.78% (สัดส่วนระหว่าง 512 ต่อ 1,472 บิต) โดยจะได้ผลการทดลองดังรูป 4.30

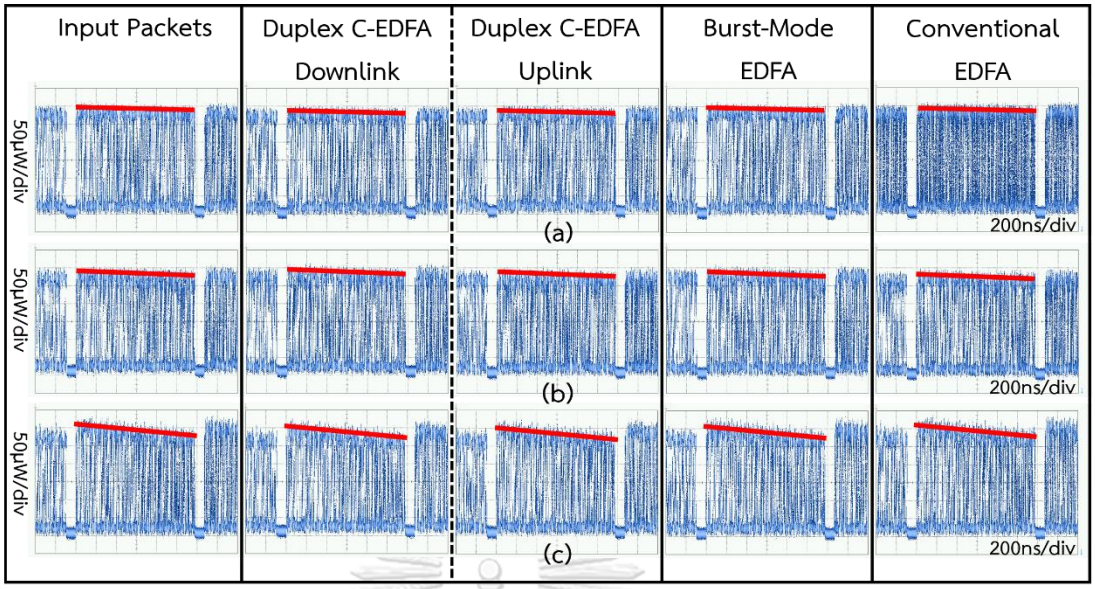


รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีแพ็กเกตขนาดสั้น: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

จากรูปที่ 4.30 ถึงแม้ว่าในกรณีส่งข้อมูลแพ็กเกตขนาดสั้นจะมีความหนาแน่นทราฟฟิกน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต เนื่องจากข้อมูลแพ็กเกตที่ส่งผ่านอีดีเอฟเอมีขนาดสั้นมาก จึงทำให้อีดีเอฟเอสามารถขยายกำลังได้ทุกแพ็กเกต

4.8.2.2 ส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตขนาดยาว (Long Ethernet Packets)

ในทางกลับกันเมื่อผู้ใช้งานส่งข้อมูลอีเทอร์เน็ตขนาดใหญ่เช่น ไฟล์รูปภาพและข้อความเสียง เป็นต้น ซึ่งแพ็กเกตจะมีขนาดข้อมูลยาว จึงกำหนดขนาดความยาวของแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 12,144 บิต ทำให้มีความหนาแน่นของทราฟฟิกประมาณ 92.67% (สัดส่วนระหว่าง 12,144 ต่อ 13,104 บิต) โดยจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตในกรณีแพ็กเกตขนาดยาว: มอดูลรับส่ง (a) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, (b) เอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network และ (c) เอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar

ในรูปที่ 4.31 จะได้ผลการทดลองทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 4.8.1.1 การใช้งานข้อมูลอีเทอร์เน็ตสูงก็คือ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต โดยมีความหนาแน่นทราฟฟิกสูงใกล้เคียงกัน ซึ่งข้อมูลแพ็กเกตมีการลดระดับลงเล็กน้อยบางส่วน เนื่องจากข้อมูลแพ็กเกตมีขนาดยาวมาก เมื่อส่งออกจากมอดูลรับส่งจะไม่สามารถรักษาระดับกำลังเหมือนแพ็กเกตขนาดสั้นถึงกลางได้ จึงทำให้แพ็กเกตส่วนท้ายมีระดับกำลังที่ลดลงเล็กน้อย

สรุปได้ว่าจากกรณีที่ได้ศึกษาทั้งหมด อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตต่ำที่สุด ทำให้อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วเหมาะสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ทดสอบนี้เมื่อต้องการคุณภาพข้อมูลแพ็กเกตที่ดีกว่าอีดีเอฟแบบทั่วไป แม้ว่าอีดีเอฟเอแบบทั่วไปจะได้รับการพัฒนาจนมีการเปลี่ยนแปลงกำลังบนอีเทอร์เน็ตใกล้เคียงกับแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว และปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดสำหรับการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตก็คือความหนาแน่นทราฟฟิกจึงเป็นไปตามงานวิจัย [15]-[18] ในหัวข้อ 1.2 การทบทวนวรรณกรรม ที่ได้เสนอว่าอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วถูกพัฒนามาเพื่อลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตหลังจากส่งผ่านอีดีเอฟเอ โดยทุกกรณีที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตที่ต่ำ เนื่องจากลิงก์ที่ทดลองมีอีดีเอฟเอเพียง 1 ตัวและมีความหนาแน่นของทราฟฟิกในระดับปานกลางจนถึงสูง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนอีดีเอฟเอเรียงต่อกันในลิงก์ให้มากขึ้นและลดความหนาแน่นของทราฟฟิกให้อยู่ในระดับต่ำประมาณ 0.36%-0.037% จะทำให้สังเกตเห็นผลกระทบการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตที่ชัดเจนมากขึ้นดังตัวอย่างในอ้างอิง [16]

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการวางตำแหน่งอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตอัตราบิต 10.3125 Gb/s ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่ซี (1530 - 1565 nm) ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ae ซึ่งมีจุดมุ่งหมายคือการขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงระหว่างมอดูลรับส่งทั่วไปที่สถานีฐานภายในโครงข่ายรวมกลุ่ม แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบกำลังทำให้งานวิจัยนี้เลือกใช้งานอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง เป็นเหตุให้ตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางในลิงก์มีความสำคัญเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับประเภทของอีดีเอฟเอ, ตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอ, สมรรถนะของลิงก์เมื่อแทรกอีดีเอฟเอ และผลกระทบของอีดีเอฟเอต่อแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต

จากผลการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางและอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว โดยช่วงความยาวคลื่นใช้งานของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางทั้งลิงก์ขาขึ้นและขาลงคือ 1530 nm ถึง 1562 nm ในขณะที่อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีช่วงตั้งแต่ 1537.37 nm ถึง 1561.62 nm ถัดมาอัตราขยายสูงสุดของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางทั้งลิงก์ขาขึ้นกับขาลงและอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วเท่ากับ 24.5 dB, 24.5 dB และ 31 dB ตามลำดับที่กระแสปั๊ม 0.200 A, 0.175 A และ 0.380 A ยิ่งไปกว่านั้นตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางทั้งลิงก์ขาขึ้นกับขาลงและอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีค่าเท่ากับ 4.6 dB, 5 dB และ 4.6 dB ที่กำลังขาเข้า -3 dBm จากหลักฐานที่กล่าวมาข้างต้นแสดงว่าอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีช่วงความยาวคลื่นใช้งานแคบกว่าเนื่องจากสนใจเฉพาะช่วงแบนราบเท่านั้น ทำให้มีกำลังขยายภายในช่วงความยาวคลื่นใช้งานใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ใช้กระแสปั๊ม (0.175 A) น้อยกว่า 0.200 A แต่ให้ค่าอัตราขยาย (24.5 dB) และตัวเลขสัญญาณรบกวน (4.6 dB) ที่เท่ากันกับอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง จึงเหมาะสมกับระบบการสวิตช์แพ็กเกตแสง ส่วนอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจะเหมาะสมกับกับระบบดับเบิลยูดีเอ็มทั่วไปที่มีความยาวคลื่นใช้งานหลากหลาย เนื่องด้วยอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางสามารถครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นใช้งานได้มากกว่า

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณงบกำลังตามตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจากระยะทางที่ส่งได้สูงสุด 80 km (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 80 km กับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 10 km) และ 120 km (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 120 km กับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน 15 km) พบว่าตำแหน่งหลังตัวส่งแสง (Booster) ซึ่งเป็นเพียงตำแหน่งเดียวที่จำเป็นต้องลดกำลังเผื่อของระบบลง จึงจะสามารถขยายระยะทางส่งสัญญาณข้อมูลแสงตามวัตถุประสงค์ได้ ยิ่งไปกว่านั้นการขยายระยะทางส่งสัญญาณจะมีผลกระทบจากโครมาติก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ดิสเพอร์ชันเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการถ่างออกของสัญญาณข้อมูล จึงต้องพิจารณางบเวลาขาขึ้นของทั้งระบบร่วมด้วยโดยการเปลี่ยนมอดูลรับส่งได้แก่ มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, บริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar มีผลการคำนวณงบเวลาขาขึ้นเท่ากับ 42.758 ps (44%), 38.403 ps (39.6%) และ 41.126 ps (42.4%) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 70% (0.7) ของคาบบิตตามเงื่อนไขงบเวลาขาขึ้น ทำให้ทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 10.3125 Gb/s ผ่านลิงก์ระยะทางสูงสุดเท่ากับ 80 km และ 120 km ได้

จากผลการคำนวณสัญญาณรบกวนเมื่อเปลี่ยนมอดูลรับส่งทั้งสามมอดูลสังเกตได้ว่าตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นจะมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่าตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี ถัดมาพิจารณาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นหลังจากเพิ่มอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพบว่า ตำแหน่งหลังตัวส่งแสงเป็นตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนควอนตัมและสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณ รบกวนเอเอสอีสูงที่สุด ส่วนตำแหน่งก่อนหน้าตัวตรวจจับแสงจะมีสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีสูงสุด แต่เมื่อแทรกตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm พบว่าผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเอเอสอีลดลง จึงทำให้การออกแบบลิงก์ที่ใช้งานอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจำเป็นต้องใช้ตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ร่วมด้วย

สืบเนื่องจากการใช้งานตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm ทำให้ไดอะแกรมระดับสำหรับส่วนสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าลดลง จนทำให้สัดส่วนกำลังสัญญาณแสงต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไดอะแกรมระดับแสดงเกี่ยวกับตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ (50%) เป็นตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับการขยายระยะทางส่งสัญญาณในลิงก์ แต่เมื่อติดตั้งใช้งานสำหรับบางพื้นที่อาจจะไม่สามารถติดตั้งอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ จึงจำเป็นต้องหาตำแหน่งที่ให้สมรรถนะใกล้เคียงกับตำแหน่งกึ่งกลางมากที่สุดก็คือ ตำแหน่งตั้งแต่ 30% จนถึง 70% ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุด ยิ่งไปกว่านั้นอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางถูกออกแบบมาเพื่อขยายกำลังสัญญาณแบบสื่อสารสองทาง เป็นเหตุให้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับทั้งสองลิงก์ที่ทดลองมีระยะทางส่งสัญญาณในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานไม่เท่ากันคือ 80 km กับ 120 km พบว่าตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางเหมาะที่สุดคือ ตำแหน่ง 40 km (50%) ของลิงก์ขาขึ้นและ 80 km (70%) ของลิงก์ขาลงตามลำดับ ตำแหน่งนี้จะเพิ่มเป็นการทดลองตำแหน่งเหมาะที่สุดสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งมีสมรรถนะใกล้เคียงกับตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มากที่สุด

หลังจากได้ตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางเหมาะที่สุด ผลทดลองวัดแผนภาพรูปตาทุกกรณีแสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาผลกระทบจากอุปกรณ์ภายในลิงก์จะพบปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชันที่ทำให้เกิดการถ่างออกของสัญญาณซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตามากที่สุด แต่การใช้

เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันจะสามารถลดผลกระทบได้ ส่วนปัญหาสัญญาณรบกวนเอเอสอีจากอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจะพบเพียงเล็กน้อยและสามารถลดผลกระทบนี้ได้ด้วยการใช้งานตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm เช่นกัน ถัดมาเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งการวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางจะมีความสัมพันธ์กับงบกำลังคือ กรณีตำแหน่งหลังตัวส่งแสงเป็นเพียงตำแหน่งเดียวที่แผนภาพรูปตามีขนาดเกินครึ่งเล็กน้อย โดยตำแหน่งนี้พบผลกระทบไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันและจำเป็นต้องลดกำลังเผื่อของระบบลงจึงมีงบกำลังเพียงพอ ส่วนกรณีตำแหน่งอื่นไม่ถูกจำกัดด้วยงบกำลัง ทำให้แผนภาพรูปตาในจุดสุดท้ายมีความใกล้เคียงกันทั้งหมด ในทำนองเดียวกันกับแผนภาพรูปตา อัตราความผิดพลาดบิตมีการพิจารณาด้วยเงื่อนไขเดียวกันเมื่อเปลี่ยนมอดูลรับส่งได้แก่ มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei (40 km), บริษัท Terrabit Network (80 km) และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar (80 km) คือ

(1) กรณีอัตราความผิดพลาดบิตจากอุปกรณ์ภายในลิงก์เมื่อเปลี่ยนมอดูลรับส่งทั้งสามมอดูลทดลอง พบปัญหาจากโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} & 10^{-12} เท่ากับ 2 & 2.07 dB, 0.92 & 0.8 dB และ 0.56 & 0.76 dB ตามลำดับ ถัดมาปัญหาจากสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} & 10^{-12} เท่ากับ 0.82 & 0.95 dB, 1.73 & 2.02 dB และ 1.03 & 1.19 dB ตามลำดับ หลังจากใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันและตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm ทำให้ค่าโทษกำลังลดลงที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} & 10^{-12} จนเหลือเท่ากับ 0.67 & 0.74 dB, 0.66 & 0.68 dB และ 0.4 & 0.46 dB ตามลำดับ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า อุปกรณ์ที่เพิ่มในลิงก์สามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นได้และมอดูลรับส่งที่ใช้งานทั้งหมดสามารถรองรับลิงก์ที่ออกแบบได้ เนื่องจากค่าโทษกำลังไม่เกินจากขีดจำกัดอุปกรณ์ตามแผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะได้ระบุไว้ (2 - 3 dB)

(2) กรณีอัตราความผิดพลาดบิตจากการเปลี่ยนตำแหน่งวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางได้ว่าตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุด โดยมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} & 10^{-12} เท่ากับ 0.3 & 0.45 dB, 0.57 & 1.06 dB และ 0.35 & 0.39 dB ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามกับตำแหน่งหลังตัวส่งแสงจะมีอัตราความผิดพลาดบิตแย่ที่สุด ซึ่งมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} & 10^{-12} เท่ากับ 1.26 & 1.44 dB, 2.27 & 2.88 dB และ 3.83 & 5.418 dB ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งเหมาะที่สุดมีค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} & 10^{-12} เท่ากับ 0.3 & 0.45 dB, 0.86 & 1.28 dB และ 0.45 & 0.488 dB ตามลำดับ ทำให้มีอัตราความผิดพลาดบิตที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ ดังนั้นตำแหน่งเหมาะที่สุดสามารถนำมาประยุกต์ทดแทนตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์ได้

การนำอีดีเอฟเอไปประยุกต์ใช้กับลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ส่งข้อมูลแบบแพ็กเกตพบว่า เฉพาะกรณีใช้งานช่วงเวลาพักผ่อนเท่านั้น โดยกำหนดความยาวแพ็กเกต 5,760 บิต กับระยะห่างระหว่างแพ็กเกต 9,600 บิต ทำให้มีความหนาแน่นของทราฟฟิกประมาณ 37.5% เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ต แต่ปัจจัยจากความหนาแน่นของทราฟฟิก, กำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ และจำนวนอีดีเอฟเอที่ใช้ภายในลิงก์ของงานวิจัยนี้จะทำให้ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตมีค่าต่ำมาก เมื่อเปลี่ยนมอดูลรับส่งได้แก่ มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei, บริษัท Terrabit Network และมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar เพื่อให้แพ็กเกตขาเข้าอีดีเอฟเอมีรูปร่างที่ต่างกันตามมอดูลรับส่งที่ใช้ จึงมีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตตามการใช้อีดีเอฟเอดังนี้ (1) อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางแบบทั่วไปทั้งลิงก์ขาขึ้นและขาลงมีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 1.13%, 2.81% และ 2.46% ตามลำดับ, (2) อีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 0.56%, 1.56% และ 1.64% ตามลำดับ และ (3) อีดีเอฟเอทั่วไปมีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตอีเทอร์เน็ตประมาณ 1.27%, 3.12% และ 2.62% ตามลำดับ ทำให้ได้ว่าอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วมีผลต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังบนแพ็กเกตน้อยที่สุดแม้ว่าจะเปลี่ยนใช้มอดูลรับส่งใดก็ตาม ส่วนอีดีเอฟเอที่เหลือมีผลต่างของกำลังการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ดังนั้นอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วให้สมรรถนะสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ตดีกว่าอีดีเอฟเอแบบทั่วไป

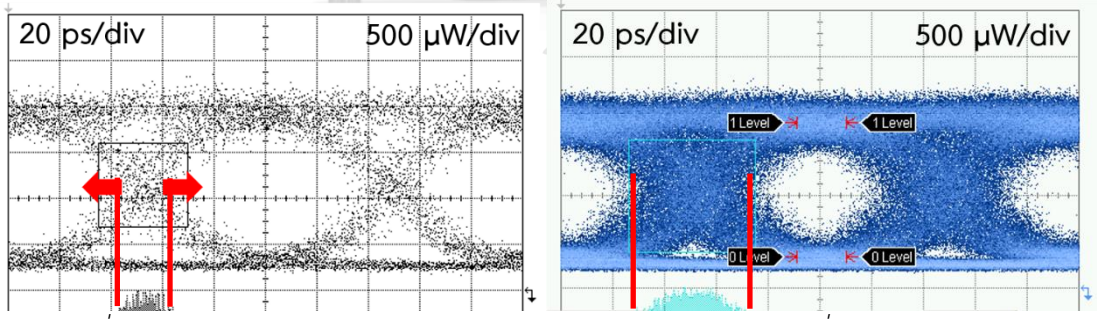
จากที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลอีเทอร์เน็ตที่อัตราบิต 10 Gb/s ภายในลิงก์ได้ระยะทางสูงสุด 80 km และ 120 km ตามลำดับ ซึ่งเกินกว่าขีดจำกัดของมอดูลรับส่งที่ใช้งาน ด้วยการใช้อีดีเอฟเอสื่อสารสองทางพร้อมกับตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัม 1 nm โดยวางอีดีเอฟเอสื่อสารสองทาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลิงก์เป็นตำแหน่งเหมาะที่สุด หรือตำแหน่งที่ให้สมรรถนะใกล้เคียงกันตั้งแต่ 30% จนถึง 70% ของระยะทางเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานสูงสุดภายในลิงก์ นอกจากนี้ผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นปัญหาที่ส่งผลมากที่สุด แต่สามารถลดปัญหานี้ด้วยการใช้เส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน ยิ่งไปกว่านั้นอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วจะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีกว่าอีดีเอฟเอแบบทั่วไปสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนช่วยในการศึกษาเกี่ยวกับการขยายระยะทางส่งสัญญาณและติดตั้งอีดีเอฟเอในลิงก์อีเทอร์เน็ตที่ใช้งาน ณ ปัจจุบันจวบจนอนาคต

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. หากต้องการเพิ่มสมรรถนะของตัวขยายแสงสื่อสารสองทางสำหรับลิงก์อีเทอร์เน็ต ควรเปลี่ยนอีดีเอฟเอแบบทั่วไปทั้งลิงก์ขาขึ้นและขาลง แทนที่ด้วยอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็ว

2. เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Agilent [39] ดังรูป 5.1 พบปัญหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าเสีย จึงต้องเปลี่ยนมาใช้เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Anritsu แทน เป็นเหตุให้เกิดปัญหาสัญญาณไฟฟ้าทางเวลา (Electrical Clock, CLK) ระหว่างเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตกับเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัลไม่สัมพันธ์กันหรือเรียกว่า ปัญหาการประสานเวลา (Synchronized) ดังรูป 5.2 ที่แสดงแผนภาพรูปตาระหว่างแบบวิธีวัดแผนภาพรูปตา (Eye-diagram Mode) กับแบบวิธีออสซิลโลสโคป (Oscilloscope Mode) ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าแบบวิธีออสซิลโลสโคปสัญญาณข้อมูลรูปตามีการขยับเคลื่อนไหวตามทิศทางลูกศร แต่เมื่อทดลองแบบวิธีวัดแผนภาพรูปตาจะทำให้เส้นของตาที่อ่านได้มีความหนามากกว่าค่าที่อ่านได้จริง

รูปที่ 5.1 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Agilent



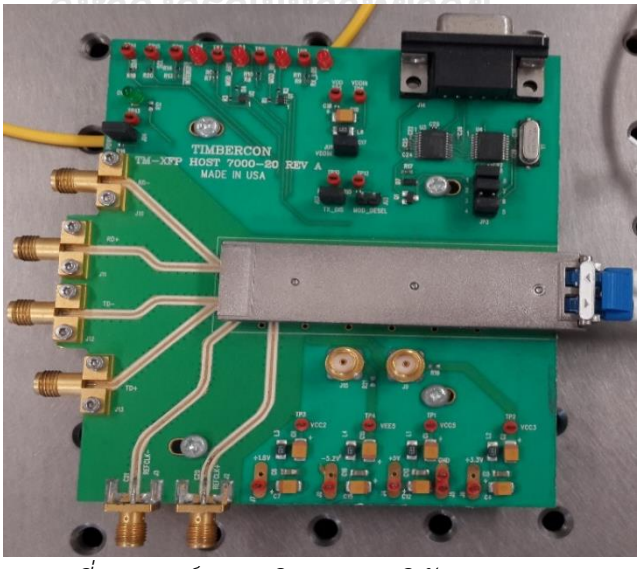
รูปที่ 5.2 แผนภาพรูปตาจากปัญหาสัญญาณไฟฟ้าทางเวลาระหว่างเครื่องวัดไม่สัมพันธ์กัน

3. จากปัญหาในข้อ 2 ควรตรวจสอบสัญญาณไฟฟ้าทางเวลาระหว่างเครื่องวัดจากต่างบริษัทก่อนนำมาทดลอง เพื่อปรับการตั้งค่าสัญญาณไฟฟ้าทางเวลาให้สัมพันธ์กัน และหากเป็นไปได้ควรใช้เครื่องมือวัดจากบริษัทเดียวกัน
4. ควรเข้าหัวเชื่อมต่อรูปแบบมาตรฐานสำหรับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันที่ต้นและปลายสาย เพื่อลดปัญหาจากความแตกต่างระหว่างขนาดแกน (Core) ของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานกับเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันในส่วนจุดเชื่อมต่อ (Splice) ดัง

รูป 5.3 ที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียสูง เนื่องจากม้วนเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันที่ทดลองไม่ได้เข้าหัวเชื่อมต่อมาตั้งแต่ต้น จึงมีความจำเป็นต้องเชื่อมต่อแบบหลอม (Fusion Splice) กับเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานที่มีหัวเชื่อมต่อมาตรฐาน

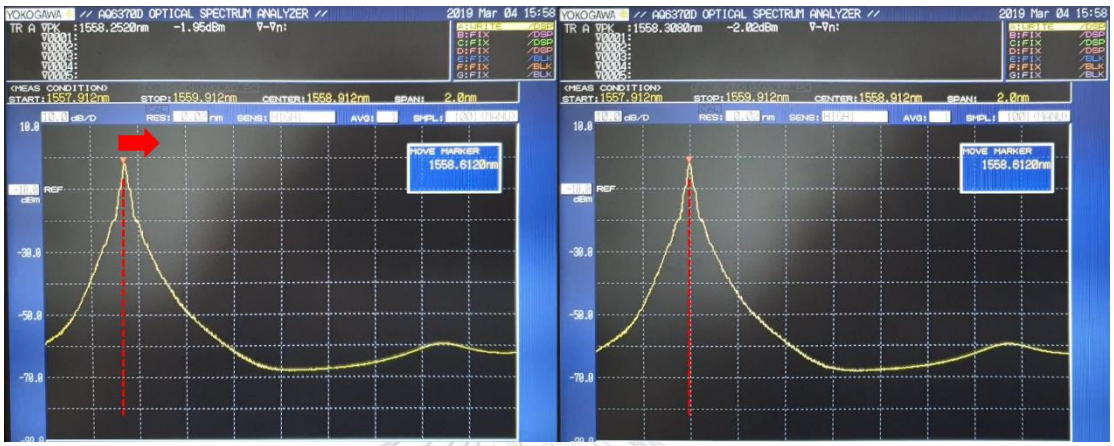
รูปที่ 5.3 ปัญหาความแตกต่างระหว่างขนาดแกนตรงส่วนจุดเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชันและเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน

5. ปัญหาบอร์ดประเมินผลของบริษัท Timbercon สำหรับเอกซ์เอฟพี [40] ดังรูป 5.4 ที่ใช้ทดลองเสื่อมสภาพ ส่งผลกระทบต่อแรงดันที่ป้อนแก่มอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีไม่เสถียร จึงต้องเปลี่ยนมาใช้งานบอร์ดประเมินผลจากบริษัท Finisar ซึ่งมีข้อได้เปรียบบอร์ดเก่าคือ มีแหล่งรับความร้อน (Heatsink) พร้อมด้วยพัดลมระบายความร้อน ทำให้ช่วยลดความร้อนภายในมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีเวลาใช้งานนาน ๆ



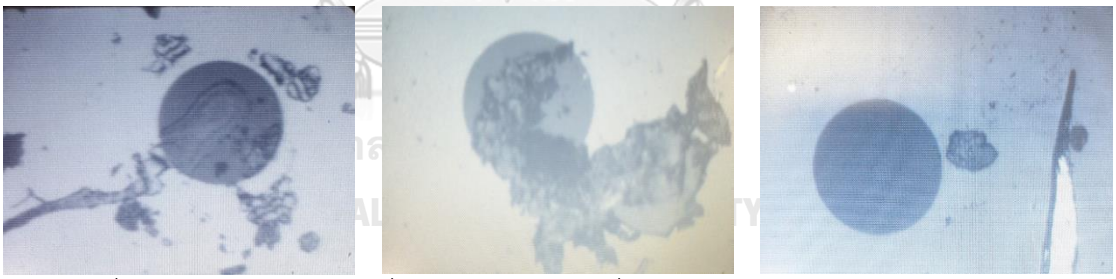
รูปที่ 5.4 บอร์ดประเมินผลของบริษัท Timbercon

6. ปัญหาจากอุณหภูมิภายในมอดูลรับส่งเวลาใช้งานซึ่งไม่คงที่ เมื่อวัดโพรไฟล์สเปกตรัมดังรูปที่ 5.5 สังเกตได้ว่าสเปกตรัมแสงมีการขยับเคลื่อนที่ในช่วงความยาวคลื่นระยะหนึ่ง เป็นเหตุให้กำลังขาออกจากมอดูลรับส่งไม่เสถียร ซึ่งการเปลี่ยนบอร์ดประเมินผลในข้อ 5 สามารถช่วยลดปัญหานี้ได้



รูปที่ 5.5 ปัญหาความร้อนภายในมอดูลรับส่ง

7. ปัญหาจากคราบฝุ่นกับสิ่งสกปรกภายในหัวเชื่อมต่อของมอดูลรับส่งและเส้นใยนำแสง ดังรูป 5.6 เมื่อใช้งานจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในจุดเชื่อมต่อมากกว่าปกติ โดยสามารถแก้ไขได้ด้วยตัวทำความสะอาดเส้นใยนำแสง (Fiber Optic Cleaner) ทั้งรูปแบบเทป (Tape) และแท่ง (Stick)



รูปที่ 5.6 ปัญหาคราบฝุ่นกับสิ่งสกปรกภายในหัวเชื่อมต่อของมอดูลรับส่งและเส้นใยนำแสง

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Huawei [9]

CU

XFP-10G-(1529.55nm to 1560.61nm)(DWDM,100GHz,Fixed)-SMF-40km Specifications

XFP-10G-(1529.55nm to 1560.61nm)(DWDM, 100GHz, Fixed)-SMF-40km Specifications

Table 1 XFP-10G-(1529.55nm to 1560.61nm)(DWDM,100GHz,Fixed)-SMF-40km Specifications

Parameter	Unit	Value
Optical Module Type		**XFP-10G-(1529.55nm to 1560.61nm) (DWDM,100GHz,Fixed)-SMF-40km**
Line code format	-	NRZ
Transmitter parameter specifications at point S		
Maximum mean launched power	dBm	2
Minimum mean launched power	dBm	-3
Minimum extinction ratio	dB	9
Operating frequency range	THz	192.10 to 196.05
Center frequency deviation	GHz	±10
Maximum -20 dB spectral width	nm	0.3
Minimum side mode suppression ratio	dB	35
Dispersion tolerance	ps/nm	800
Eye pattern mask	-	ITU-T G.959 - compliant
Receiver parameter specifications at point R		
Receiver type	-	PIN
Operating wavelength range	nm	1250 to 1600
Receiver sensitivity, EOL (FEC on)	dBm	-16
Minimum receiver overload (FEC on)	dBm	0
Maximum reflectance	dB	-27

with Author

Huawei
HXFP8441-230

DWDM ER

10G XFP DWDM ER with dual CDR | C23 / 1558.98 nm, 40 km / 14 dB, 100 GHz Grid - C-Band, LC-Duplex

DWDM 100 GHz | 40 km | 11.1 G | Dual CDR

SPECIFICATION

FORM FACTOR	XFP	POWERBUDGET (DB)	14 dB
CONNECTOR / POLISH	LC-Duplex PC	TRANSMIT MIN/MAX	-1 dBm / 4 dBm
INTERFACE	DWDM	RECEIVER MIN/MAX	-15 dBm / 0.5 dBm (overload)
TYPE	DWDM ER	WAVELENGTH TX (TYPICAL)	Channel 23 - 1558.98 nm
DISTANCE	40 km	WAVELENGTH RX (RANGE)	1270 - 1620 nm
TEMPERATURE RANGE	0°C - 70°C	LASER	EML
BANDWIDTH	9.95 Gbit/s - 11.1 Gbit/s	RECEIVER TYPE	PIN
DIGITAL DIAGNOSTIC MANAGEMENT (DDM)	Yes, internally calibrated	MODULATION	NRZ
POWER CONSUMPTION	3.5 W	TRANSMIT AND DISPERSION PENALTY	2 dB
CDR	TX and RX	EXTINCTION RATIO	8.2 dB
INBUILT FEC	No	PROTOCOLS	10G Ethernet, 10G FC, OTU2, STM-64

2. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Terrabit Network [10]

spectrum Terrabit XFP Series

SP-XF-10G-150-080-Dx

1550nm XFP single-Mode for 10GbE/10GFC/SDH/SONET
Duplex XFP Transceiver,
RoHS6 Compliant

Features

- Supports 9.95Gb/s to 11.1Gb/s bit rates
- Hot-Pluggable XFP Footprint
- Maximum Link Length of 80km
- Temperature-Stabilized EML transmitter
- Duplex LC Connector
- Built-in Digital Diagnostic Functions
- Operation Case Temperature:
  Standard: 0˚C to 70˚C
  Industrial: -5˚C to 75˚C
- No external clock required

Applications

- OC 192/STM 64
- 10GBASE-ZR/ZW 10G Ethernet
- 1200-SM-LL-L 10G Fiber Channel
- P1L1-22D2
- ITU-T G709

Specification

Table 1: Absolute Maximum Ratings*

Parameter	Symbol		Min	Max	Units
Maximum Supply Voltage 1	Vcc3		-0.5	4.0	V
Maximum Supply Voltage 2	Vcc5		-0.5	6.0	V
Storage Temperature	Ts		-40	85	°C
Case Operating Temperature	Top	SP-XF-10G-150-080-Dx	0	70	°C
		SI-XF-10G-150-080-Dx	-5	75	°C
Maximum Input Power	Pm			-8	dBm

* Exceeding any one of these values may destroy the device permanently.

Table 2: Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Unit
Operating Case Temperature	SP-XF-10G-150-080-Dx	0		70	°C
	SI-XF-10G-150-080-Dx	-5		75	°C
Supply Voltage 1	Vcc3	3.13	3.3	3.45	V
Supply Voltage 2	Vcc5	4.75	5	5.25	V

Table 3: Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Notes
Main Supply Voltage	Vcc5	4.75		5.25	V	
Supply Current #2	Vcc3	3.13		3.45	V	
Supply Current- Vcc5 Supply	Icc5			400	mA	
Supply Current- Vcc3 Supply	Icc3			750	mA	

Single-Mode SFP 10.3Gbps
Copyrights © 2009 Terrabit Networks Pte Ltd Ver2.1

Terrabit Networks
135, Joo Seng Road, PM Idustrial Building, #05-04, Singapore 368363 [Tel] 65.6741.1232 [Fax] 65.6749.0670
For enquiries, please email to sales@terrabitnet.com
www.terrabitnet.com

Module Total Power	P			4.5	W	
Transmitter						
Input Differential Impedance	Rin		100		Ω	3
Differential Data Input Swing	Vin, pp	120		820	mV	
Transmit Disable Voltage	Vd	2.0		Vcc	V	
Transmit Enable Voltage	Ven	GND		GND+0.8	V	
Transmit Disable Assert Time				10	us	
Receiver						
Differential Data Output Swing	Vout, pp	340	650	850	mV	3
Data Output Rise Time	Tr			38	PS	
Data Output Fall Time	Tf			38	PS	
LOS Fault	$V_{LOS\ Fault}$	Vcc-0.5		VccHOST	V	4
LOS Normal	$V_{LOS\ Nom}$	GND		GND+0.5	V	4

Note 3: After internal AC coupling.

Note 4: Loss of signal is open collector. Logic 0 indicates normal operation; logic 1 indicates no signal detected.

Table 4: Optical Characteristics

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Transmitter					
Output Opt. Pwr: 9/125 SMF	Pout	0		+4	dBm
Optical Wavelength	λ_c	1530		1565	nm
Spectral Width (-20dB)	$\Delta\lambda$			1	nm
Optical Extinction Ratio	ER	9			dB
Average Launch Power of OFF Transmitter	P_{off}			-30	dBm
TX Jitter Generation(peak-to-peak)	Txj			0.1	UI
TX Jitter Generation (RMS)	TXjRMS			0.01	UI
Relative Intensity Noise	RIN			-130	dB/Hz
Eye Mask	Compliant with ITU-T G691				
Receiver					
Receiver Sensitivity @9.95Gb/s	Pmin			-24	dBm
Receiver Sensitivity @10.7Gb/s	Pmin			-24	dBm
Maximum Input Power	Pmax	-7			dBm
Optical Center Wavelength	λ_c	1270	1550	1600	nm
Receiver Reflectance	Rf			-27	dB
LOS De-Assert	LOSD			-30	dBm
LOS Assert	LOSA	-37			dBm
LOS Hysteresis		0.5			dB

Ordering Information

Part No.	Data Rate	Laser	Fiber Type	Distance	Optical Interface	Temp.
SP-XF-10G-150-080-Dx	10Gbps	EML	SMF	80km	LC	Standard
SI-XF-10G-150-080-Dx	10Gbps	EML	SMF	80km	LC	Industrial

Single-Mode SFP 10.3Gbps
Copyrights © 2009 Terrabit Networks Pte Ltd Ver2.1

3. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar [11]

FINISAR

Product Specification

10Gb/s, 80km Single Mode, Multi-Rate SFP+ Transceiver

FTLX1871M3BCL

PRODUCT FEATURES

- Hot-pluggable SFP+ footprint
- Supports 8.5 and 9.95 to 11.3 Gb/s
- 80km link length
- 1600ps/nm chromatic dispersion tolerance
- -5/70°C case temperature range
- Internal transmitter/receiver CDR
- 1.5W/1.7W power consumption options
- Cooled 1550nm EML laser
- Limiting electrical interface receiver
- Duplex LC connector
- Built-in digital diagnostic functions
- RoHS-6 compliant (lead-free)

APPLICATIONS

- SONET OC-192, SDH STM-64 and OTN G.959.1 P1L1-2D2
- 10G Ethernet ZR and 10G Fibre Channel
- OTN G.709 OTU1e/2/2e FEC bit rates
- 8.5Gb/s Fibre Channel

Finisar's FTLX1871M3BCL transceivers are Enhanced Small Form Factor Pluggable SFP+ transceivers designed for use in 10-Gigabit multi-rate links up to 80km of G.652 single mode fiber. They are compliant with SFF-8431[1], SFF-8432[2] and G.959.1 P1L1-2D2, and support SONET OC-192, SDH STM-64, 10G Ethernet ZR and 10G Fibre Channel. Finisar's FTLX1871M3BCL transceivers use internal clock and data recovery (CDR) IC's for the transmitter and the receiver. This guarantees compliance with the SONET/SDH jitter requirements and it can be used to set the electrical interface to be XFI-compliant.

Digital diagnostics functions are available via a 2-wire serial interface, as specified in SFF-8472[3]. The optical transceiver is compliant per the RoHS Directive 2011/65/EU[4]. See Finisar Application Note AN-2038 for more details[5].

PRODUCT SELECTION

FTLX1871M3BCL

© Finisar Corporation – September 2015 Rev. C1

I. Pin Descriptions

Pin	Symbol	Name/Description	Ref.
1	V_{EET}	Transmitter Ground	1
2	T_{FAULT}	Transmitter Fault	2
3	T_{DIS}	Transmitter Disable. Laser output disabled on high or open.	3
4	SDA	2-wire Serial Interface Data Line	2
5	SCL	2-wire Serial Interface Clock Line	2
6	MOD_ABS	Module Absent. Grounded within the module	2
7	RS0	Rate Select 0.	4
8	RX_LOS	Loss of Signal indication. Logic 0 indicates normal operation.	5
9	RS1	Rate Select 1.	4
10	V_{EER}	Receiver Ground	1
11	V_{EER}	Receiver Ground	1
12	RD-	Receiver Inverted DATA out. AC Coupled.	
13	RD+	Receiver Non-inverted DATA out. AC Coupled.	
14	V_{EER}	Receiver Ground	1
15	V_{CCR}	Receiver Power Supply	6
16	V_{CCT}	Transmitter Power Supply	6
17	V_{EET}	Transmitter Ground	1
18	TD+	Transmitter Non-Inverted DATA in. AC Coupled.	
19	TD-	Transmitter Inverted DATA in. AC Coupled.	
20	V_{EET}	Transmitter Ground	1

Notes:

1. Circuit ground is internally isolated from chassis ground.
2. T_{FAULT} is an open collector/drain output, which should be pulled up with a 4.7k – 10k Ohms resistor on the host board if intended for use. Pull up voltage should be between 2.0V to Vcc + 0.3V. A high output indicates a transmitter fault caused by either the TX bias current or the TX output power exceeding the preset alarm thresholds. A low output indicates normal operation. In the low state, the output is pulled to <0.8V.
3. Laser output disabled on T_{DIS} >2.0V or open, enabled on T_{DIS} <0.8V.
4. Internally pulled down per SFF-8431 Rev 4.1. See Sec. X of this datasheet for the logic table to use for the internal CDRs locking modes.
5. LOS is open collector output. Should be pulled up with 4.7k – 10kΩ on host board to a voltage between 2.0V and 3.6V. Logic 0 indicates normal operation; logic 1 indicates loss of signal.
6. Internally connected

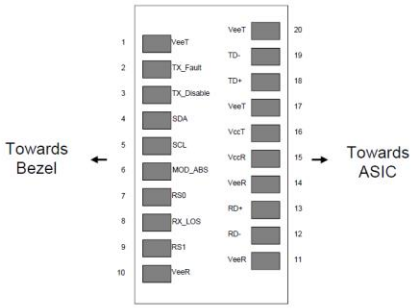


Figure 1. Diagram of Host Board Connector Block Pin Numbers and Names.

II. Absolute Maximum Ratings

Exceeding the limits below may damage the transceiver module permanently.

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
Maximum Supply Voltage	Vcc	-0.5		4.0	V	
Storage Temperature	T_S	-40		85	°C	
Relative Humidity	RH	0		85	%	1
Receiver Optical Damage Threshold	RX_{Damage}	5			dBm	

Notes:
1. Non-condensing

III. Electrical Characteristics (T_{OP} = -5 to 70 °C)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
Supply Voltage	Vcc	3.14	3.30	3.46	V	
Transmitter (Tx)						
Input differential impedance	R_{in}	80	100	120	Ω	
Differential data input swing	Vin,pp	120		850	mV	1
Transmit Disable Voltage	V_D	V_{cc}-0.8		V_{cc}	V	
Transmit Enable Voltage	V_{EN}	0		0.8	V	
Receiver (Rx)						
Output differential impedance	R_{out}	80	100	120	Ω	
Differential data output swing	$V_{out,}$pp	300		850	mV	1
Output rise time and fall time	T_r, T_f	28			ps	2
LOS asserted	$V_{LOS\ A}$	V_{cc}-0.8		V_{cc}	V	3
LOS de-asserted	$V_{LOS\ D}$	0		0.8	V	3
Power Supply Noise Tolerance	VccT/VccR	Per SFF-8431 Rev 4.1			mVpp	4
Power Consumption						
Tx and Rx CDR's ON	P_{diss}		1.6	1.7	W	5
Tx CDR OFF and Rx CDR ON			1.5	1.6	W	5
Tx & Rx CDR's OFF and Ethernet spec.				1.5	W	5

Notes:
1. Internally AC coupled. Data pins connect directly to the CDR.
2. 20 – 80%. Measured with Module Compliance Test Board and OMA test pattern. Use of four 1's and four 0's sequence in the PRBS 9 is an acceptable alternative. SFF-8431 Rev 4.1.
3. LOS is an open collector output. Should be pulled up with 4.7kΩ – 10kΩ on the host board. Normal operation is logic 0; loss of signal is logic 1.
4. See Section 2.8.3 of SFF-8431 Rev 4.1.
5. Typical power consumption values refer to 3.3V, 70°C case temperature and beginning of life.

IV. Optical Characteristics (T_{OP} = -5 to 70 °C, V_{CC} = 3.14 to 3.46 Volts)

Parameter			Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
Transmitter (Tx)								
Average Launch Power			P_{AVE}	0		4	dBm	
Optical Wavelength			λ	1530		1565	nm	
Side-Mode Suppression Ratio			SMSR	30			dB	
Optical Extinction Ratio			ER	9			dB	
Average Launch power when Tx is OFF			P_{OFF}			-30	dBm	
Jitter Generation 20kHz-80MHz, peak to peak			$Tx_{jpk2pk1}$			0.3	UI	1
Jitter Generation 4MHz-80MHz, peak to peak			$Tx_{jpk2pj2}$			0.1	UI	1
Relative Intensity Noise			RIN			-128	dB/Hz	
Receiver (Rx)								
Optical Center Wavelength			λ_C	1260		1600	nm	
Receiver Reflectance			R_{rx}			-27	dB	
Sensitivity	Bit Rate (Gb/s)	BER						
	8.5, 9.95-10.7	$<10^{-12}$	R_{SENS1}			-24	dBm	2,3
	11.1	$<10^{-12}$	R_{SENS2}			-23	dBm	2
		$<10^{-4}$	R_{SENS3}			-27	dBm	2
	11.3	$<10^{-4}$	R_{SENS4}			-27	dBm	2
Overload (Average Power)			P_{AVE}	-7			dBm	
LOS De-Assert			LOS_D			-28	dBm	
LOS Assert			LOS_A	-37		-30	dBm	
LOS Hysteresis			LOS_H	0.5			dB	
Path Penalty	Bit Rate (Gb/s)	BER						
	8.5, 9.95	$<10^{-12}$	PP_1			2	dB	4.a
	10.3-10.7	$<10^{-12}$	PP_2			3	dB	4.a
	11.1	$<10^{-4}$	PP_3			3	dB	4.b
	11.3	$<10^{-4}$	PP_4			3	dB	4.c

Notes:
1. SONET/SDH Tx jitter generation limits are guaranteed with the Tx CDR enabled and locked.
2. Measured with worst ER=9 dB; PRBS $2^{31} - 1$.
3. For 10GEthernet application, -24dBm is equivalent to an OMA of -22.09dBm for an ER = 9 dB.
4. Max chromatic dispersion tolerance over 80km of G.652 single mode fiber:
   a. 1600ps/nm
   b. 1450ps/nm
   c. 1300ps/nm

V. General Specifications

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Ref.
Bit Rate	BR	8.5		11.3168	Gb/s	1
Max. Supported Link Length	L_{MAX}			80	km	2

Notes:
1. Tested with a $2^{31} - 1$ PRBS pattern at the BER defined in Table IV.
2. Over G.652 single mode fiber.

Timing Parameters

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Ref.
Time to initialize	t_start_up			10	s	

VI. Environmental Specifications

Finisar FTLX1871M3BCL transceivers have an operating temperature range from -5°C to +70°C case temperature.

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Ref.
Case Operating Temperature	T_{op}	-5		70	°C	
Storage Temperature	T_{sto}	-40		85	°C	

VII. Regulatory Compliance

Finisar transceivers are Class 1 Laser Products and comply with US FDA regulations. These products are certified by TÜV and CSA to meet the Class 1 eye safety requirements of EN (IEC) 60825 and the electrical safety requirements of EN (IEC) 60950. Copies of certificates are available at Finisar Corporation upon request.

VIII. Digital Diagnostic Functions

Finisar FTLX1871M3BCL SFP+ transceivers support the 2-wire serial communication protocol as defined in the SFP MSA[1]. It is very closely related to the E^{2}PROM defined in the GBIC standard, with the same electrical specifications.

The standard SFP serial ID provides access to identification information that describes the transceiver's capabilities, standard interfaces, manufacturer, and other information.

Additionally, Finisar SFP+ transceivers provide a enhanced digital diagnostic monitoring interface, which allows real-time access to device operating parameters such as transceiver temperature, laser bias current, transmitted optical power, received optical power and transceiver supply voltage. It also defines a sophisticated system of alarm and warning flags, which alerts end-users when particular operating parameters are outside of a factory set normal range.

The SFP MSA defines a 256-byte memory map in E^{2}PROM that is accessible over a 2-wire serial interface at the 8 bit address 1010000X (A0h). The digital diagnostic monitoring interface makes use of the 8 bit address 1010001X (A2h), so the originally defined serial ID memory map remains unchanged. The interface is identical to, and is thus fully backward compatible with both the GBIC Specification and the SFP Multi Source Agreement. The complete interface is described in Finisar Application Note AN-2030: "Digital Diagnostics Monitoring Interface for SFP Optical Transceivers".

The operating and diagnostics information is monitored and reported by a Digital Diagnostics Transceiver Controller (DDTC) inside the transceiver, which is accessed through a 2-wire serial interface. When the serial protocol is activated, the serial clock signal (SCL, Mod Def 1) is generated by the host. The positive edge clocks data into the SFP transceiver into those segments of the E^{2}PROM that are not write-protected. The negative edge clocks data from the SFP transceiver. The serial data signal (SDA, Mod Def 2) is bi-directional for serial data transfer. The host uses SDA in conjunction with SCL to mark the start and end of serial protocol activation. The memories are organized as a series of 8-bit data words that can be addressed individually or sequentially.

For more information, please see the SFP MSA documentation[3] and Finisar Application Note AN-2030[7].

Please note that evaluation board FDB-1027 is available with Finisar ModDEMO software that allows simple to use communication over the 2-wire serial interface.

IX. Digital Diagnostic Specifications

FTLX1871M3BCL transceivers can be used in host systems that require either internally or externally calibrated digital diagnostics.

Parameter	Symbol	Units	Min	Max	Accuracy	Ref.
Accuracy						
Transceiver temperature	ΔDD_{Temp}	°C	-10	+75	±5°C	1
Transceiver supply voltage	$\Delta DD_{Voltage}$	V	2.8	4.0	±3%	
Transmitter bias current	ΔDD_{Bias}	mA	0	127	±10%	2
Transmitter output power	$\Delta DD_{Tx\text{-}Power}$	dBm	-1	+5	±2dB	
Receiver average optical input power	$\Delta DD_{Rx\text{-}Power}$	dBm	-28	-5	±2dB	

Notes:
1. Internally measured
2. The accuracy of the Tx bias current is 10% of the actual current from the laser driver to the laser

X. Internal CDR's Locking Modes

The FTLX1871M3BCL is equipped with internal CDR units on both the receiver and the transmitter sides. The host can set the CDR's to lock at 8.5Gb/s, 10G (9.95-11.3Gb/s), or in by-pass mode, by setting the rate select pins or the soft bits (logic OR). The different locking modes are shown in the following logic table:

R/S 0	R/S 1	CDR's Locking Mode
Logic OR of: pin 7 & bit 110.3	Logic OR of: pin 9 & bit 118.3	
Low or 0	Low or 0	Both CDR's lock at 8.5Gb/s
Low or 0	High or 1	Tx CDR is in bypass mode. Rx CDR locks at 10G (9.95-11.3Gb/s)
High or 1	Low or 0	Tx & Rx CDR's in bypass mode
High or 1	High or 1	Both CDR's lock at 10G (9.95-11.3Gb/s) The bits 110.3 and 118.3 are set to 1 by default at power-up

The RS0 and RS1 pins are internally pulled-down to ground as per [1]. The soft bits 110.3 and 118.3 are both set to "1" at the transceiver power-up, to select the 10G locking mode by default. The host can change this configuration via the 2-wire communication as described in the SFP MSA [1]. Alternative configurations can be factory set upon request. Please refer to Finisar for additional details.

XI. SFF-8431 Power-up Sequence

If either CDR is enabled, the typical power consumption of the FTLX1871M3BCL may exceed the limit of 1.5W specified for the Power Level II transceivers in [1], for which a power-up sequence is recommended. However, the FTLX1871M3BCL is factory set to power-up directly to its operating conditions. Upon request, it can be factory set to follow the power-up sequence specified for transceivers exceeding 1W, as per [1]. In power level I, the FTLX1871M3BCL does not carry traffic, but the 2-wire serial communication is active. Please refer to [1] and Finisar Application Note AN-2076 for additional details.

XII. Mechanical Specifications

Finisar FTLX1871M3BCL SFP+ transceivers are compatible with the SFF-8432 specification for improved pluggable form factor, and shown here for reference purposes only. Bail color is white.

ITEM	DIM (mm)	TOL (mm)
A	9.00	±0.3
B	9.60	±0.5
C	11.90	±0.5
D	13.85	±0.15
E	13.65	±0.15
F	2.80	±0.2
G	1.00	±0.2
H	4.00	REF
J	2.00	±0.2
K	56.50	REF
L	1.60	±0.5
M	2.25	±0.1
N	1.80	±0.1
P	37.10	±0.3
Q	9.15	±0.15
R	1.00	±0.1
S	8.55	±0.15
T	47.50	±0.2
V	2.55	±0.1
W	43.00	±0.2
X	14.70	±0.5
Z	0.55	±0.15

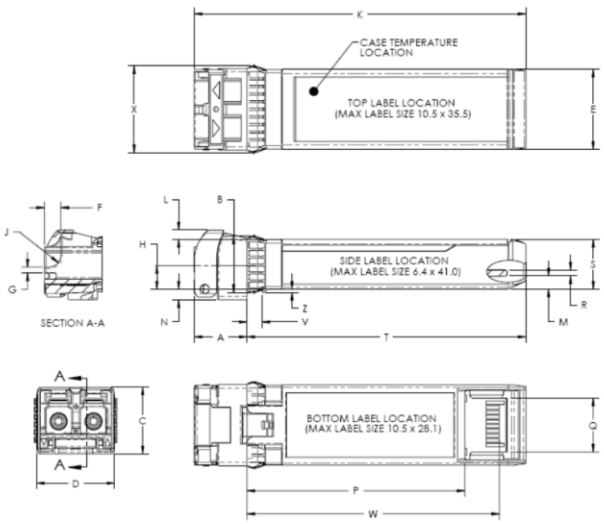


Figure 2. Mechanical Dimensions

XIII. Host Board SFP+ Connector Recommendations

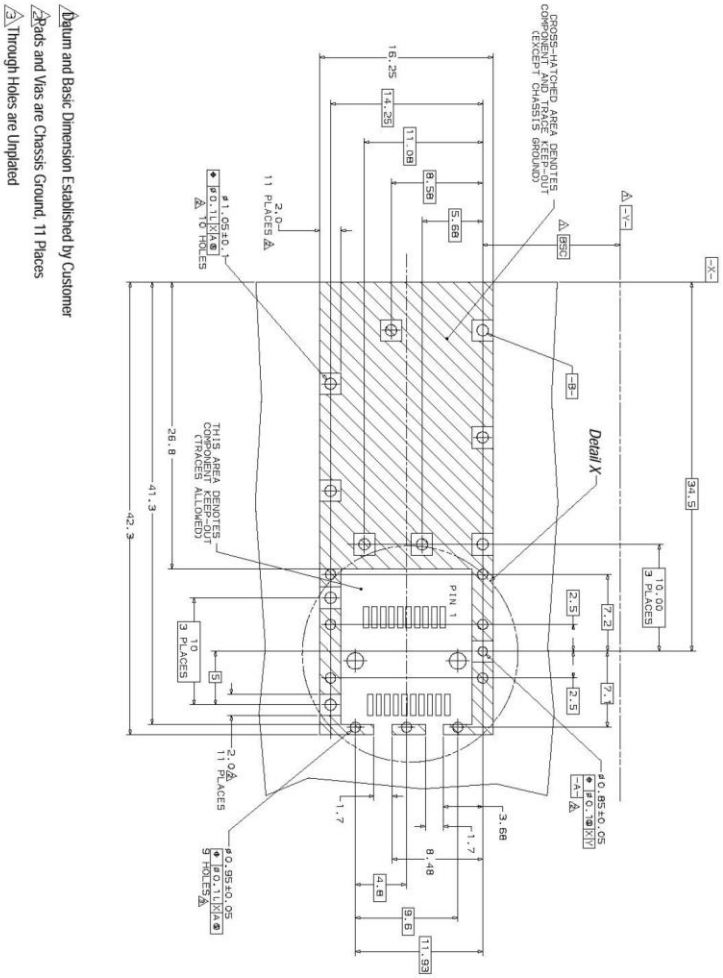
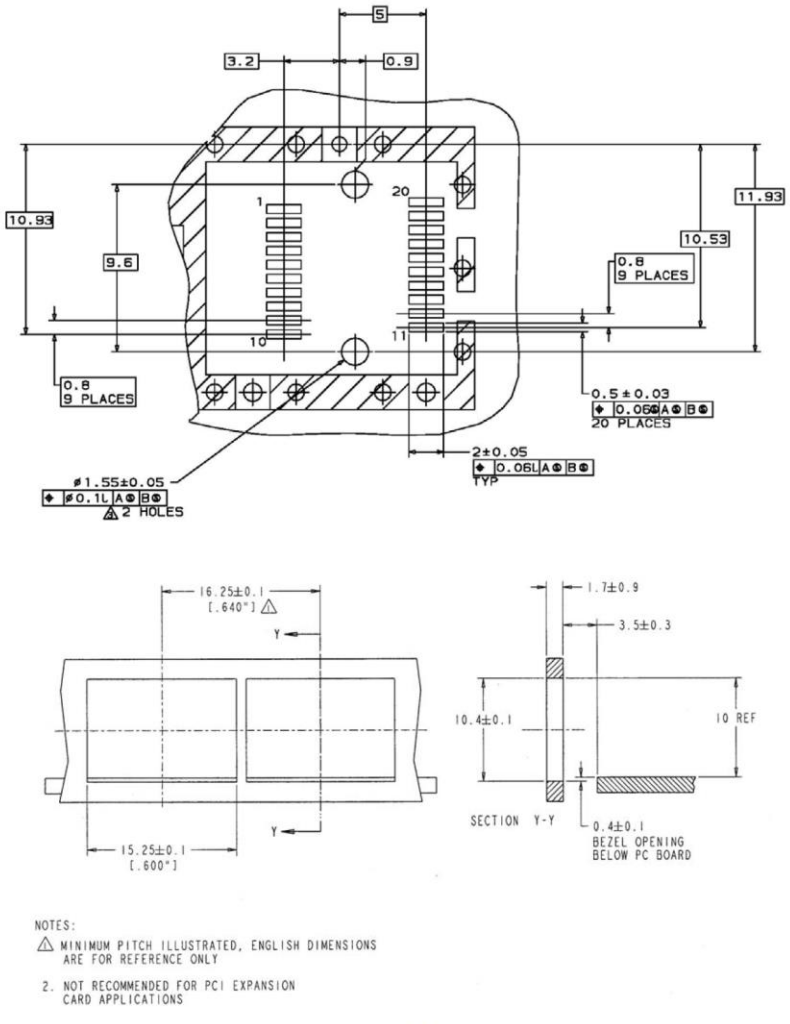


Figure 3. PCB Layout and Bezel Recommendations, as per [9]



NOTES:

1. MINIMUM PITCH ILLUSTRATED, ENGLISH DIMENSIONS ARE FOR REFERENCE ONLY
2. NOT RECOMMENDED FOR PCI EXPANSION CARD APPLICATIONS

Figure 4

XIV. Host-Module Interface Diagram

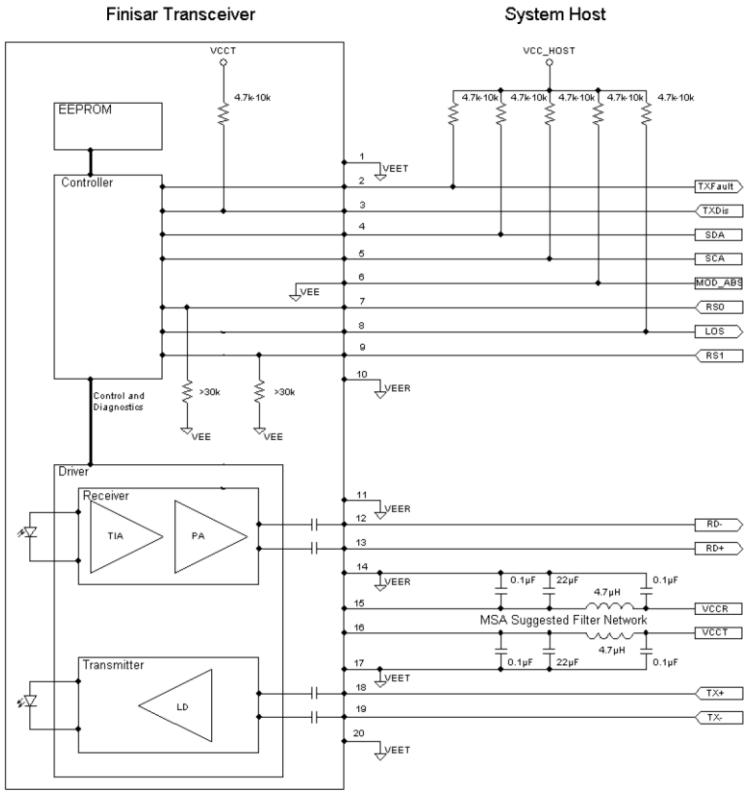


Figure 5

XV. References

1. "Specifications for Enhanced 8.5 and 10 Gigabit Small Form Factor Pluggable Module 'SFP+ '", SFF Document Number SFF-8431, Revision 4.1, including SFF-8431 Rev 4.1 Addendum. September 15, 2013
2. "Improved Pluggable Form factor", SFF Document Number SFF-8432, Revision 4.2, April 18, 2007.
3. "Digital Diagnostics Monitoring Interface for Optical Transceivers". SFF Document Number SFF-8472, Revision 10.1, March 1, 2007.
4. Directive 2011/65/EU of the European Council Parliament and of the Council, "on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment".
5. "Application Note AN-2038: Finisar Implementation of RoHS Compliant Transceivers"
6. Small Form-factor Pluggable (SFP) Transceiver Multi-Source Agreement (MSA)
7. "Application Note AN-2030: Digital Diagnostic Monitoring Interface for SFP Optical Transceivers"

XVI. Revision History

Revision	Date	Description
B1	01/22/2013	Production Release
B2	12/15/2013	Modified CDR's control logic table
C1	9/7/2015	Updated logo and RoHS statement

XVII. For More Information

Finisar Corporation
1389 Moffett Park Drive
Sunnyvale, CA 94089-1133
Tel. 1-408-548-1000
Fax 1-408-541-6138
sales@finisar.com
www.finisar.com

4. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของบอร์ดประเมินผลสำหรับมอดูลรับส่งเอกซ์เอฟพีของบริษัท Finisar [19]

Finisar

FDB-1022: XFP Evaluation Board

The Finisar FDB-1022 Evaluation Board is a convenient and powerful vehicle for testing and evaluating the new 10 Gigabit/s XFP optical transceivers.

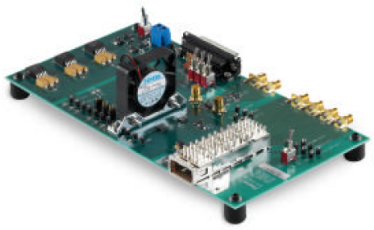
The board consists of a single XFP connector and cage, high quality transmission lines and connectors for the serial data signals, connections for reference clock inputs, all low speed status and control lines, and the 2-wire serial management interface. All pin connections are compliant with the XFP MSA Rev 1.0 Standard.

For convenience, the FDB-1022 contains onboard switching and linear power supplies to provide all three required module power supplies (1.8V, 3.3V and 5.0V) from a single external +12V connection. The outputs of each onboard supply are factory set, and may be switched off and on using S2. These supplies can be adjusted and monitored (both voltage and current) using the supplied evaluation board software. By removing jumpers J8, J11 and/or J12, the on-board supplies may be disconnected from the module and external supplies be connected at test points labeled 1.8/3.3/5.0V MOD PIN. These test points may be used to confirm the voltage at the module supply pins when using the on-board supplies. As a further convenience, a small fan is provided for cooling the module. This fan may be disabled by removing its power connector from jumper J10.

As supplied, the FDB-1022 is configured to accept a 10Gb/s differential REFCLK signal at SMA connectors J5/J6. An onboard divider converts this signal to the 1/64 rate REFCLK the XFP transceiver module requires. Alternatively, the board may be configured to allow a direct connection of a 1/64 clock through SMA connectors J16 and J21. This configuration may be setup by removing the 1nF 0402 capacitors from C11 and C16 and placing them at locations C65 and C66 (see Figure 2).

Indicators and controls are provided for all low-speed and power supply lines. Green LEDs, D1-D8, indicate the power supply state for the evaluation board, XFP module, and switching power supplies. Their assignment is clearly marked with screen-printed text on the board next to each LED. Red LEDs D11, D13, D14, and D15 show the status of the module INTERRUPT, MOD/ABSENT, LOS, and MOD_NR output lines. Note that D11, INTERRUPT LED, is on when no interrupt is asserted, while it is off when an asserted interrupt has occurred. Further, this operation is similar to that of its counterpart LED on the GUI for the XFP Lab software that accompanies this evaluation board. There, the bright red INT LED indicates that there is no interrupt asserted and will change to green when an interrupt is asserted.

All the signal lines are available on associated test points. The module PWRDWN, TXDIS, and MODDESEL lines may be manually controlled by switches S1, S3, and S5.



Software Control

The FDB-1022 evaluation board is supplied with software and a DB-25 cable for communication with a PC parallel port. This cable allows direct communication between the PC and the module via the 2-wire serial bus on pins SCL and SDA. XFP modules respond to 2-wire serial bus address A0h. Additionally, various evaluation board functions may be addressed on other I2C addresses. Contact Finisar for details on these functions.

The software included with the board provides a simple windows-based GUI and allows control and monitoring of the power supply and status functions of the evaluation board itself. Future versions of the software will allow monitoring of the Serial ID, digital diagnostics and status information available in Finisar's XFP transceivers.

Specifications

The Finisar FDB-1022 evaluation board requires a +12V ±10% power supply at J14. Input signals to the TX+ and TX- connectors should have an amplitude between 140mV and 700mV differential peak-to-peak (70mV to 350mV single-ended). Output signals on the RX+ and RX- connectors will have amplitudes between 180mV and 640mV single-ended.

A 10Gb/s REFCLK may be supplied at J5/J6. The onboard divider requires a signal amplitude of 200–1000 mV differential p-p (100-500mV S.E.). If a direct REFCLK connection is made, a signal of 640 – 1600 mV differential p-p (320 – 800 mV S.E.) is required.

©Finisar Corp – Rev E 24-Aug-04 *Finisar Proprietary*

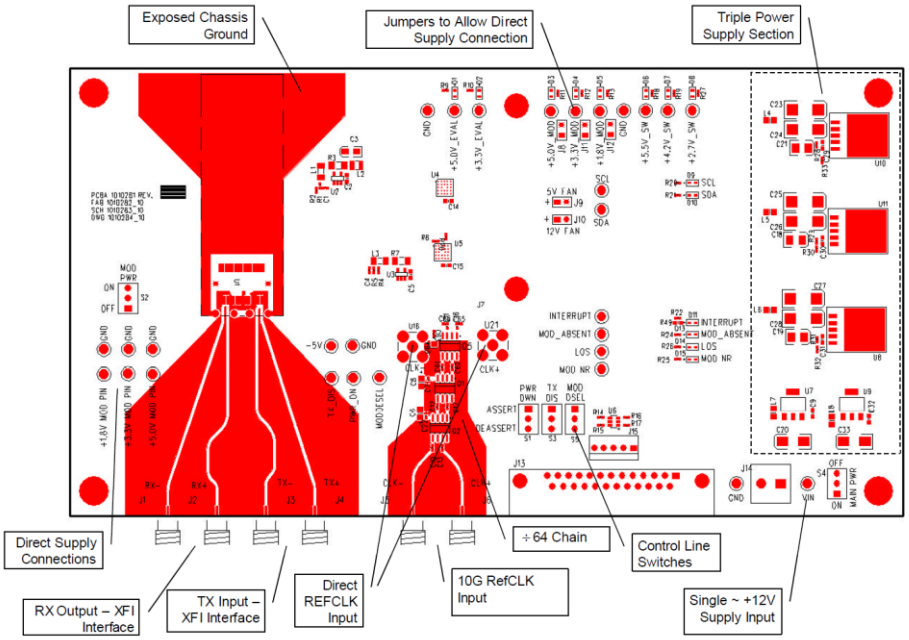


Figure 1. FDB-1022 - Layout and Connection Locations

Finisar

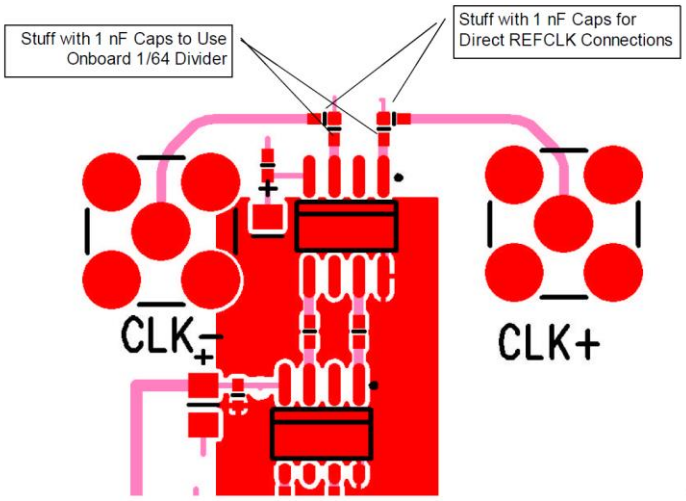


Figure 2. Coupling Capacitors for Switching Between Onboard 1/64 REFCLK Divider and Direct External REFCLK Connection

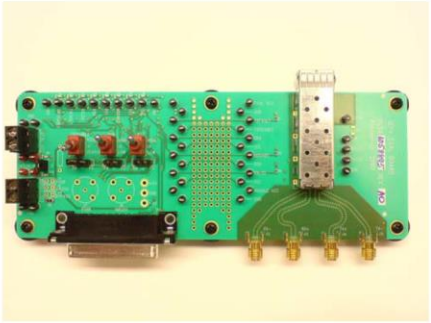
5. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของบอร์ดประเมินผลสำหรับมอดูลรับส่งเอสเอฟพีพลัสของบริษัท Finisar [20]

Finisar

Product Specification

SFP/SFP+ Evaluation Board

FDB-1027



Finisar's FDB-1027 Evaluation Board is the perfect vehicle for testing and evaluating SFP/SFP+ optical transceivers.

The board consists of a single SFP+ edge connector and cage, four 50-ohm SMA coaxial connectors (J12-J15) for the high-speed differential transmitter input and receiver output signals, and test points and LEDs for monitoring all other SFP+ pins. It is compatible with short wavelength and long wavelength SFP/SFP+ transceiver types for use at data rates of 125 Mb/s to 10.3 Gb/s.

The FDB-1027 SFP/SFP+ Evaluation Board is supplied with software and a DB-25 cable for communication with a PC parallel port. This cable allows direct communication between the PC and the module via the 2-wire serial bus on pins SCL and SDA, as well as for reading the status lines and setting the TX disable and Rate Select inputs.

The software included with the board provides a simple windows-based GUI for monitoring the Serial ID information available in Finisar's SFP/SFP+ transceivers.

Switch (S1) is provided to assert and test the transmit disable function. Switch (S2) is provided to select the operating bit rate of the receiver (RS0) in multi-rate SFP/SFP+ transceivers that require it. Switch (S3) is provided to select the operating bit rate of the transmitter (RS1) in multi-rate SFP+ transceivers that require it. (Note: SFP modules do not support RS1.) TX disable can be controlled either by the switch or the parallel port; control is determined by the position of the jumper (S4). Similarly, jumpers at (S5) and (S6) govern the RS0 and RS1 controls, respectively.

SPECIFICATIONS

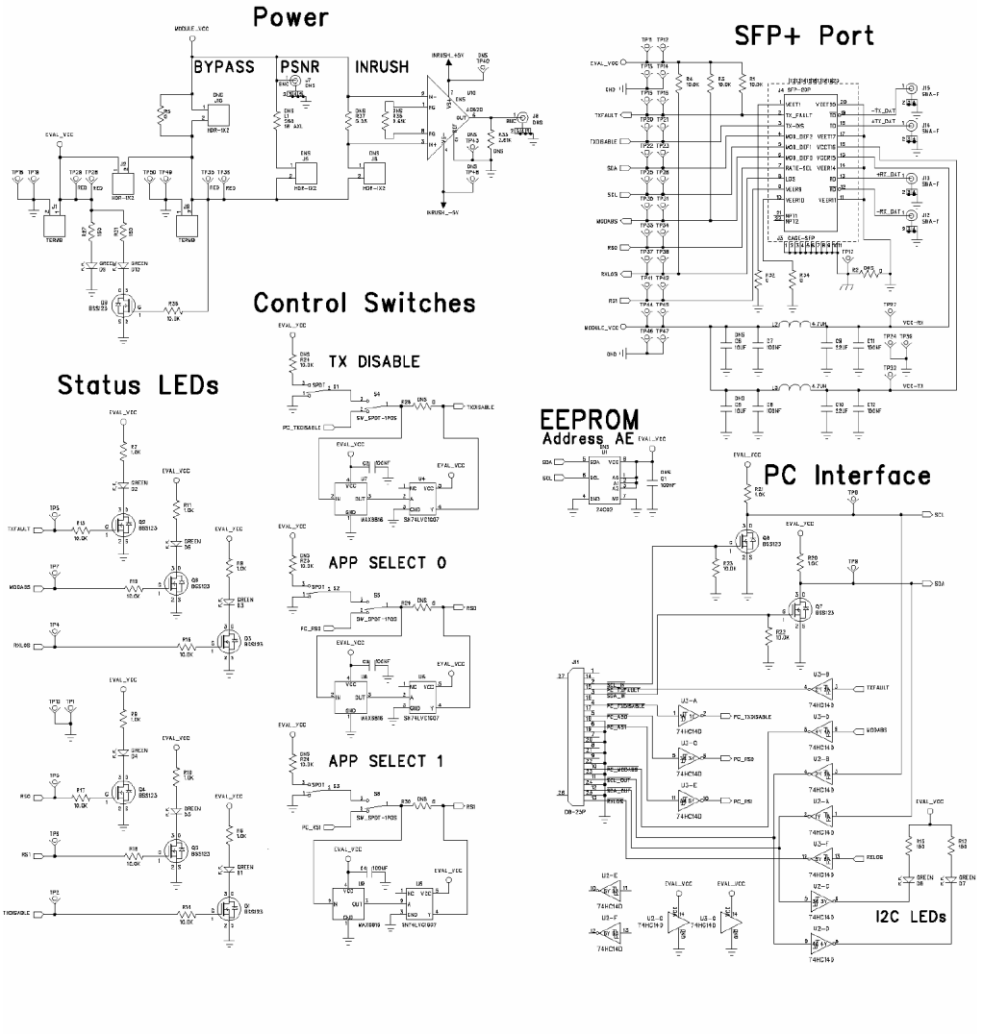
The FDB-1027 SFP/SFP+ Evaluation Board can be powered by one or two supply voltage(s) depending on whether the supply for the evaluation board and module need to be separated. A module supply voltage of 3.0 to 3.6V should be supplied at connector J9. If shunt at jumper J2 is removed, a second 3.3V supply can be provided at J1 to separately power the evaluation board.

Please refer to module data sheets for specifications of input signals to the TX+ and TX– connectors and output signals on the RX+ and RX– connectors. SFP/SFP+ transceivers have internal AC coupling on all data lines.

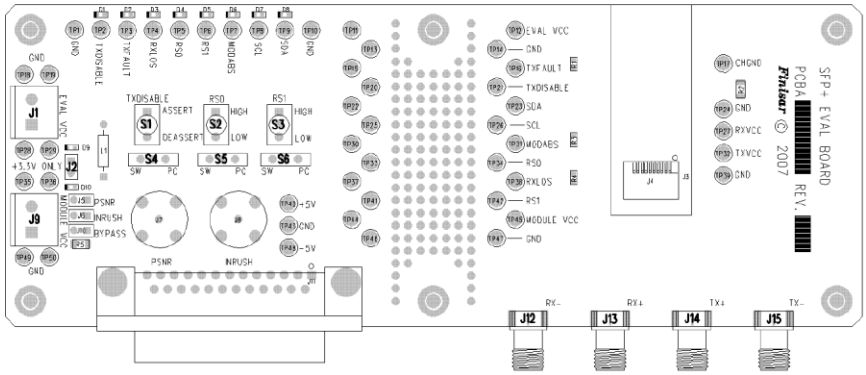
The board layout and schematics are shown on pages 2 and 3.

© Finisar Corporation January 29, 2007 Rev A

Finisar


Power
BYPASS
PSNR
INRUSH
Control Switches
TX DISABLE
APP SELECT 0
APP SELECT 1
Status LEDs
SFP+ Port
EEPROM
Address AE
PC Interface
I2C LEDs

Finisar



Finisar Corporation
1389 Moffett Park Drive
Sunnyvale, CA 94089-1133
Tel. 1-408-548-1000
Fax 1-408-541-6138
sales@finisar.com
www.finisar.com

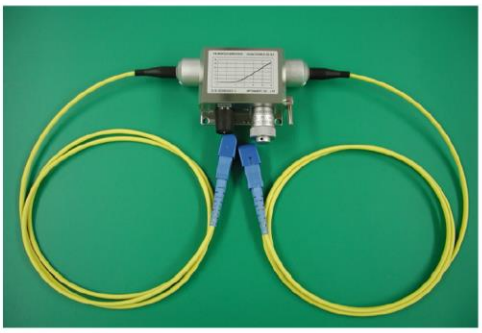
6. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest [23]

Variable Attenuator Module

This attenuator module is designed to control optical attenuation up to 40 dB by adjusting an micrometer. This product provides optical attenuation for high-power lasers up to 2-watts, and it is compatible with increasingly high-power light sources for optical communication systems.

Features

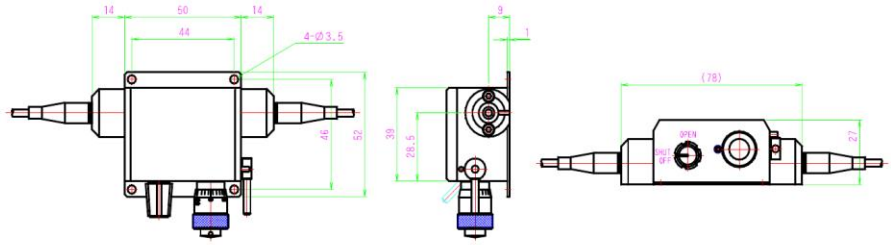
- **Compatible with high-power lasers (2-watt)**
- **Low insertion loss**
- **Low PDL**
- **C- and L-band application capability**
- **Built-in shutter function**
- **Low price**



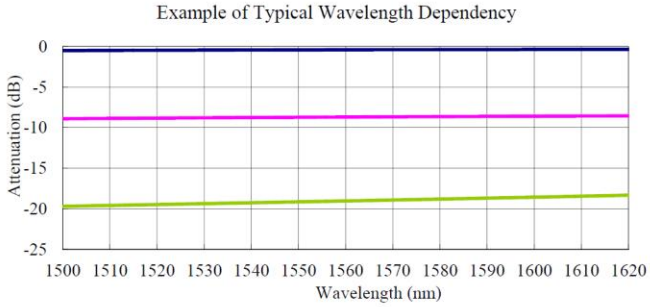
Typical Specifications

Model	VOAA
Wavelength Range	1500-1620 nm
Input Power	≤ 2W (CW)
Insertion Loss	≤ 0.6 dB
PDL (ATT ≤ 10 dB)	≤ 0.1 dB
Attenuation Range	0-40 dB
Return Loss	≥ 50 dB
Optical Fiber	SMF, DSF or PMF (φ3 mm cord)
Optical Connector	FC/SPC SC/SPC FC/Angled PC SC/Angled PC

Product Dimensions



Wavelength Dependency Data



Ordering Instructions

+Variable Optical Attenuator Module

Order format: VOAA - (1) - 40 - (2) / (3)

Order format example: VOAA-15-40-S/S

(Wavelength=1550nm, Fiber: SMF, Connecter: SC/SPC

(1) Wavelength	15: 1550 nm 13: 1310 nm
(2) Optical Fiber	S: SMF D: DSF P: PMF (φ3 mm cord)
(3) Optical Connector	F: FC/SPC S: SC/SPC FA: FC/Angled PC SA: SC/Angled PC

***Special orders for near-infrared are also accepted.**

7. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของตัวกรองเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท Optoquest [27]

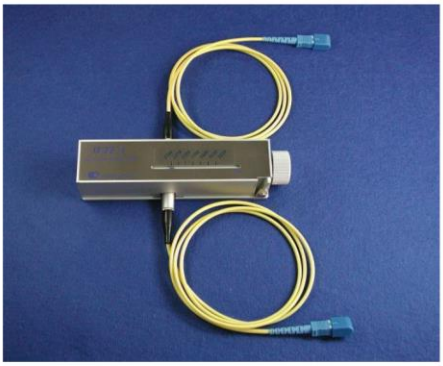
OPTOQUEST

Slide adjustment Type Wavelength Tunable Filter Module

Transmittance center wavelength can be tuned manually by changing the incident position of a dielectric multilayer bandpass filter surface. Linear gradation type of filter is used, and can be slid by rotating a dial.

Features

- **Wide wavelength tunable range (60 nm tunable)**
- **Low insertion loss**
- **Small ~~Low~~ variation of insertion loss in tuning**
- **Small ~~Low~~ variation of bandwidth in tuning**
- **Low PDL (polarization dependence loss) in tuning**



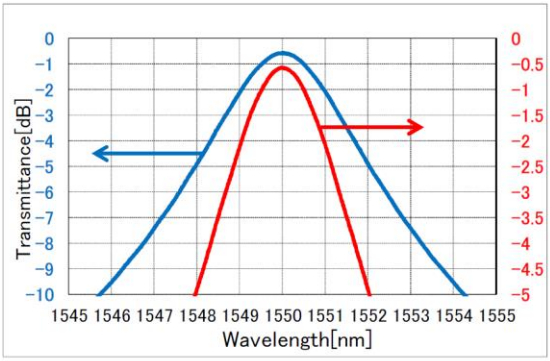
Typical Specifications

Model	WTFA		
Wavelength Range	1470-1530 nm	1520-1580 nm	1560-1620 nm
FWHM (-3 dB Bandwidth)	0.5 nm ± 0.2 nm	1 nm ± 0.2 nm	3 nm ± 0.3 nm
Insertion Loss	≦ 2.0 dB	≦ 1.5 dB	≦ 1.5 dB
PDL	≦ 0.1 dB		
Return Loss	≧ 50 dB		
Optical Fiber	SMF or PMF (φ3 mm cord)		
Optical Connector	FC/SPC SC/SPC FC/Angled PC SC/Angled PC		

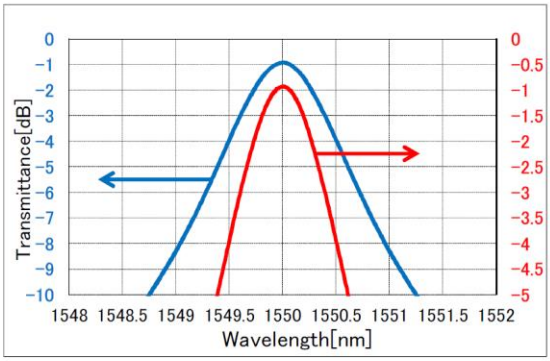
Wavelength Control Related Products

Example of Filter Characteristics

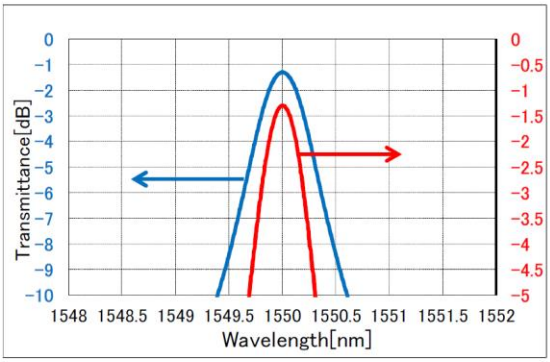
FWHM: 3 nm
Number of Cavities: 1
Center Wavelength: 1550 nm



FWHM: 1 nm
Number of Cavities: 1
Center Wavelength: 1550 nm

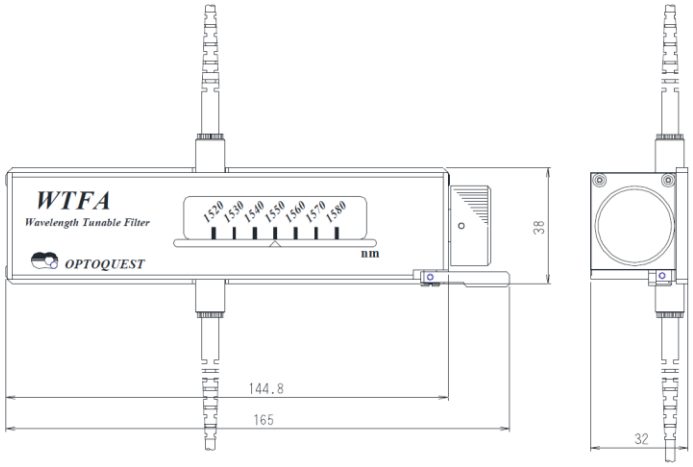


FWHM: 0.5 nm
Number of Cavities: 1
Center Wavelength: 1550 nm



Wavelength Control Related Products

Product Dimensions



Ordering Instructions

+Slide Adjustment Type Wavelength Tunable Filter Module

Order format: WTFA - (1) - (2) - (3) / (4)

Order format example: WTFA-1530-1-S/F

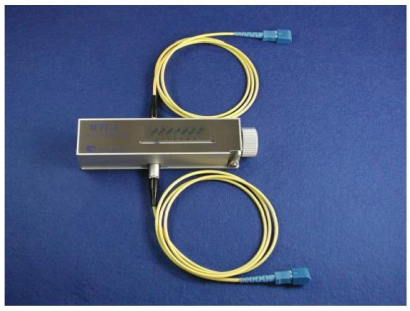
(Wavelength Range: 1470-1530 nm, FWHM: 1 nm, Fiber: SMF, Connecter: FC/SPC)

(1) Wavelength Range	1530: 1470-1530 nm	1580: 1520-1580 nm	1620: 1560-1620 nm
(2) FWHM (-3dB Bandwidth)	0.5: 0.5 nm ± 0.2 nm	1: 1 nm ± 0.2 nm	3: 3 nm ± 0.3 nm
(3) Optical Fiber	S: SMF P: PMF		
(4) Optical Connector	F: FC/SPC S: SC/SPC FA: FC/Angled PC SA: SC/Angled PC		

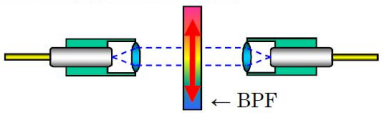
OPTQUEST CO., LTD. [Tokyo Sales Office]
2F Nihonbashi-Ginsan Bldg., 4-3-10, Nihonbashi-Honcho, Chuo-ku, Tokyo, 103-0023, JAPAN
URL: http://www.optoquest.co.jp E-mail: sales-info@optoquest.co.jp

Jan. 10, 2017

Wavelength Tunable Filter Module (Slide adjustment type)

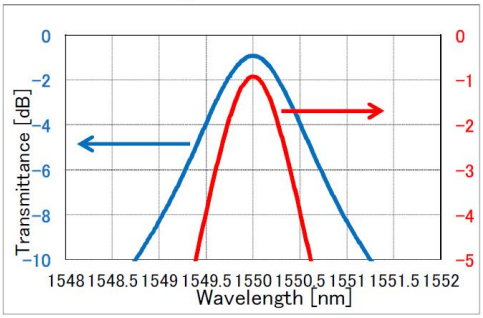


Optical configuration image



Example of Filter Characteristics

FWHM: 1 nm
Number of Cavities: 1
Center Wavelength: 1550 nm



Standard Specifications (at Model : WTFA-1580-1-S/F)	
Wavelength range	1520 ~ 1580 nm (60 nm)
-3 dB Bandwidth	1±0.2 nm
Insertion loss	≦ 1.5 dB
PDL	≦ 0.1 dB
Optical fiber	SMF
Optical connector	FC/SPC

8. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของตัวไหลเวียนแสงของบริษัท Agiltron [24]

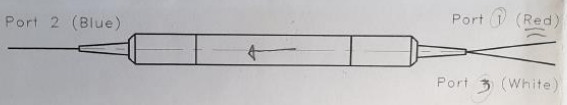
AGILTRON INC

15 Cabot Road, Woburn, MA 01801 Tel: (781) 935-1200 Fax: (781) 935-0240
www. agiltron.com

Final Test Data

Part Name: 1550 nm 3-port Circulator
Part Number: OCPI-305111334
Part Serial Nuber: 650895

Port Identification



Test Result

Parameter*	Test Data	Unit	Parameter*	Test Data	Unit
Testing Wavelength	1550	nm	Isolation (2→1)	53	dB
Insertion Loss (1→2)	0.74	dB	Isolation (3→2)	60	dB
Insertion Loss (2→3)	0.61	dB	Return Loss	56	ps
PDL (1→2)	0.08	dB	PMD	<0.10	dB
PDL (2→3)	0.03	dB	Fiber Type	SMF-28 with 900 um loose tube	
Cross Talk (1→3)	60	dB	Fiber length	1	m

Note: 1. Excluding connectors. 2.Testing data @ RM temperature.

Tested By ASB Date 1/5/2007 QA Date 1/10/2007

9. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของอีดีเอฟเอแบบทั่วไป บริษัท Amonics [33]

Amonics

AMONICS LTD.

ISO 9001 : 2008
Certificate No.: CC 5346

Mini EDFA

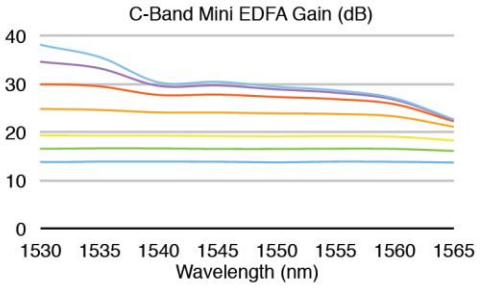
Applications

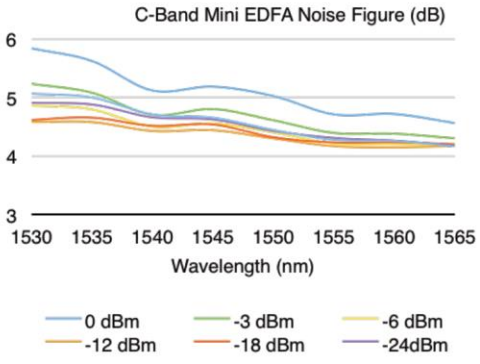
- SONET/SDH Systems
- LAN and MANs
- Fiber Optic Sensing
- Laboratory

Description

Amonics Mini EDFA is small in size, compact, stackable, and yet it comes with full and reliable EDFA performance. It is particularly suitable for scalable R&D experiments, quick testing in primitive working environment or budget laboratory setups.

The minature EDFA is powered up by a 5V USB port. It can be connected to a computer directly through a USB cable in order to control and monitor output power. Uncooled pump laser is used to minimize power consumption and keep the EDFA on low maintenance.





Key Features

- Small foot print
- USB port control & monitor
- Stackable
- Low power consumption
- Reliable and durable

The product is manufactured under a HKQAA ISO 9001 certified quality management system
The ISO 9001:2008 certification applies to the Hong Kong production site only

Amonics

AMONICS LTD.

Mini EDFA

Specifications

	C-Band Mini EDFA	L-Band Mini EDFA
Saturation Output Power (at 0 dBm input signal)	Typ. +13dBm, Min. +12dBm	Typ. +11dBm, Min. +10dBm
Small Signal Gain	Min. 28dB input signal at -30dBm, 1550nm	Min. 22dB input signal at -30dBm, 1584nm
Noise Figure (at -3dBm input signal)	Max. 5.5dB	Max. 6.5dB
Operating Wavelength	1530 – 1565nm	1570 – 1603nm
Input Isolation	> 30dB	
Output Isolation	> 30dB	
Polarization Dependent Gain	Typ. 0.3dB, Max. 0.5dBm	
Control Mode	APC, ACC	

* Other output power models are available upon request

General Parameters

Parameters	Unit	Specifications
Operation Temperature	°C	-0 to +40
Storage Temperature	°C	-10 to +70
Power Supply	VDC	5.0 ± 0.1
Dimensions	mm	Φ 75 x 22
Power Consumption	W	Typ. 1.5, Max. 2.0
Mechanical Control	-	Emission button with LED
Optical Power Monitoring	-	Output power
Power Supply & Remote Control Port	-	Micro USB (LabView control software included)
Optical Connector	-	FC/APC, FC/UPC, SC/APC, SC/UPC
Optical Fiber	-	Min. 0.5m long SMF-28

Ordering Information

Product Code	C-Band: CMEDFA L-Band: LMEDFA	

Amonics undertakes continuous and intensive product development to ensure its product performance at the highest technical standards. As a result, the specifications in this document are subject to change without notice.

Amonics Limited. 14/F, Lee King Industrial Building, 12 Ng Fong Street, San Po Kong, Kowloon, Hong Kong
Beijing Amonics Co. Ltd. Room 902, Unit 1, No.99 Chaoyang North Road, Beijing China 100025

Email: contact@amonics.com Website: www.amonics.com
HK Tel: +852 2428 9723 HK Fax: +852 2428 9704 Beijing Tel: +86 10 84783386 Beijing Fax: +86 10 84783396

CE FC

Amonics
Specialist in Optical Amplifiers

Amonics Limited

C-Band Erbium Doped Fiber Amplifier
Model: Mini EDFA

Serial No: 13110435 **Date of manufacturing: 30, August 2016**

1. Optical Performance:

Parameter	Units	Specification	Test Data
Mode of operation		CW	
Operating wavelength	nm	1530 to 1565	
Saturation output power @ 1550nm 0dBm input signal	dBm	Typ. 13	13.6
Input power level	dB	-30 to +3	
Noise figure @ 1550nm 0dBm input signal	dB	Typ. 5.0 Max. 5.5	5.4
Output isolation	dB	Min. 30	
Polarization dependent gain	dB	Typ. 0.3, Max. 0.5	
Polarization mode dispersion	ps	Typ. 0.2, Max. 0.3	

2. Operating Condition:

Parameter	Units	Specification
Optical fiber	-	SMF-28
Optical connector	-	FC/APC
Control mode	-	☐ Automatic current control (ACC) ☐ Automatic power control (APC) ☐ Automatic gain control (AGC) ☑ Automatic pump power control (ALC)
Control mode	-	Pump power, by Labview based control software
Output power @ 0dBm 1550nm input signal (Max. driving current)	dBm	13.6*

*Power meter wavelength is set at 1550nm for measurement and calibration.

3. Electrical and Mechanical Specifications:

Parameter	Units	Specification
Operating temperature range	°C	0 to 40
Storage temperature range	°C	-10 to 70
Dimensions	mm	Φ 75 x 20
Supply voltage	VDC	+5.0
Power consumption limit	W	Typ. 1, Max 1.25
Actual power consumption(Max. driving current)	W	0.91

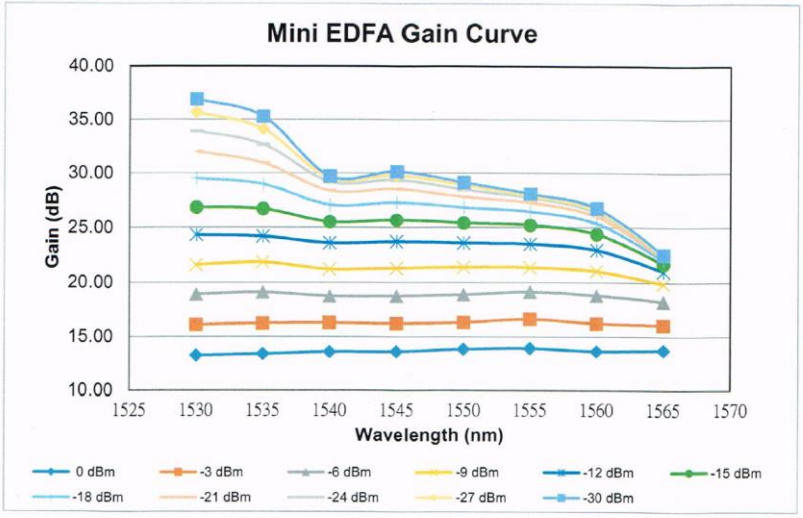


Figure 1: Optical gain measured by Agilent 81680A tunable laser and Anritsu MS9710B optical spectrum analyzer.

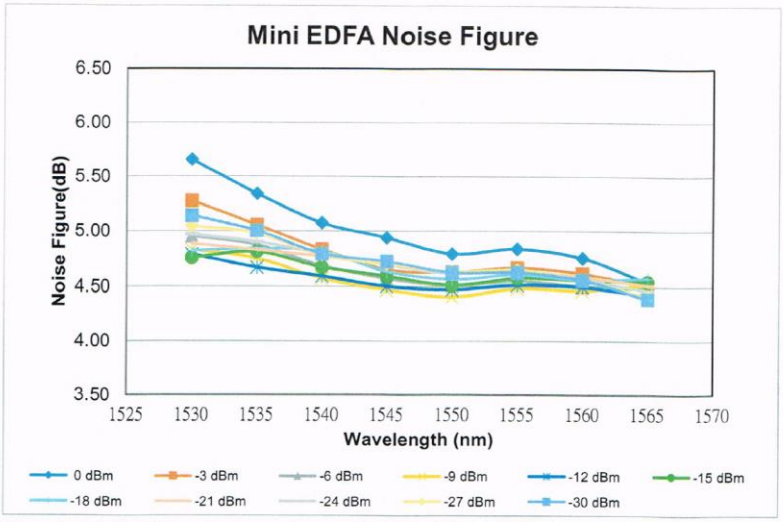


Figure 2: Noise Figure measured by Agilent 81680A tunable laser and Anritsu MS9710B optical spectrum analyzer. The noise figure is corrected by subtracting the self spontaneous emission of the tunable laser.

10. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของอีดีเอฟเอแบบวิธีส่งเป็นชุดอย่างเร็วบริษัท Amonics [26]

Amonics

AMONICS LTD.

ISO 9001 : 2008
Certificate No.: CC 5346

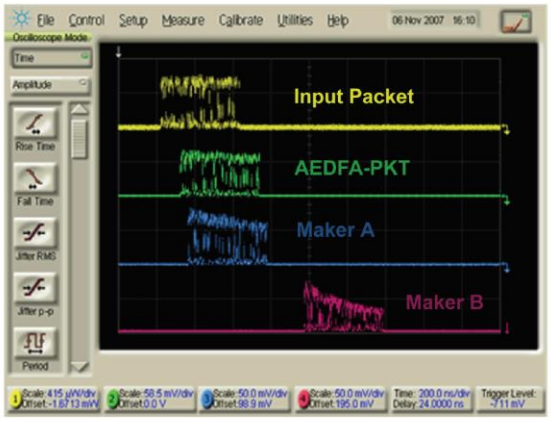
EDFA for Burst Mode Networks

Applications

- DWDM Systems
- FTTH
- Optical Packet Switching
- Systems
- Burst Mode Networks

Description

Amonics & NICT (National Institute of Information and Communications technology, Japan) co-developed EDFAs are designed for transient suppression. The results are EDFAs that possess high output power, high gain with very low noise , low gain excursion and are ideal for Optical packet Switching (OPS) applications. The turnkey microprocessor controlled EDFAs manage alarms and status indicators. An integrated RS232 or Ethernet computer interface enables easy control, diagnostic functions and data acquisition.



Key Features

- Patented design
- Low Noise Figure
- Transient suppressed
- Small foot print
- Small pattern effect @ Gbps
- High gain

The product is manufactured under a HKQAA ISO 9001 certified quality management system
The ISO 9001:2008 certification applies to the Hong Kong production site only

Amonics

AMONICS LTD.

EDFA for Burst Mode Networks

EDFA Specifications

	AEDFA-PKT-DWDM-15-B
Input Power Range	-16dBm to -3dBm
Output Power * (@ -3dBm input signal)	Min. +15dBm
Noise Figure (@ -3dBm input signal)	Max. 5.5dB
Operating Wavelength	1537.37 to 1561.62nm
Gain Flatness	Max. + / -1.2dB
Optical Gain (@ -3dBm Input signal)	Min. 18dB
Gain Excursion	Typ. 0.1dB/ms, Max. + / -0.2dB/ms
Input and Output Isolation	Min. 30dB
Polarization Dependent Gain	Max. 0.5dB
Control Mode	ACC (standard)

* Other output power models are available upon request

General Environmental Parameters

Parameter	Unit	Specification
Operation Temperature Range	ºC	0 to +40
Storage Temperature Range	ºC	-10 to +70
Power Supply	VAC	90 – 240, 47 – 63Hz
Dimensions	mm	260(W) x 330(L) x 120(H)
LCD Display	-	Input Power, Output Power, Pump Laser Current
Protection	-	Pump laser over heat warning
Optical Connector	-	FC/APC, FC/UPC, SA/APC, SC/UPC
Optical Fiber	-	SMF-28

Option:

- APC or AGC Control Mode
- Output Power Monitoring

Ordering Information

Product Code	AEDFA-PKT-DWDM-xx-B-zz	xx: Saturation Output Power in dBm zz: FA for FC/APC, FC for FC/UPC SA for SC/APC, SC for SC/UPC

Amonics undertakes a continuous and intensive product development to ensure its products perform to highest technical standards As a result, the specifications in this document are subject to change without notice.

Amonics Limited. 14/F, Lee King Industrial Building, 12 Ng Fong Street, San Po Kong, Kowloon, Hong Kong
Beijing Amonics Co. Ltd. Room 902, Unit 1, NO.99 Chaoyang North Road, Beijing China 100025
contact@amonics.com www.amonics.com HK Tel: +852 2428 9723 HK Fax: +852 2428 9704 Beijing Tel: +86 10 84783386 Beijing Fax: +86 10 84783396

CE FC

Amonics
Specialist in Optical Amplifiers

Amonics Limited

DWDM EDFA
Model: AEDFA-PKT-DWDM-15-B-SC

Serial: 14112101 **Date of manufacturing: 8 December, 2014**

1. Optical Performance:

Parameter	Units	Specification	Test Data
Operating wavelength	nm	1537.37 to 1561.62	
Total output power #	dBm	Min. 15	16.9
Signal Gain #	dB	Min. 18	> 18.8
Gain flatness	dB	Max. ±1.0	1.5
Noise figure #	dB	Typ. 5.5, Max. 6.0	< 4.3
Gain Transient Error	dB	Typ. ±0.1, Max. ±0.2	Pass
Input / Output isolation		Min. 30	
Polarization Dependent Gain	dB	Max. 0.5	
Polarization Mode Dispersion	ps	Typ. 0.2, Max. 0.3	

-3 dBm total input signal.

2. Operating Condition:

Parameter	Units	Specification
Output connector	-	SC/UPC receptacle
Optical fiber	-	SMF-28
Control mode	-	☑ Automatic current control (ACC) ☐ Automatic power control (APC) ☐Automatic gain control (AGC)
Number of laser controls (Max. driving current)	-	ACC: 1 (I_{set} = 380mA)
Display Total Output Power @ 1550nm -3dBm input signal (Max. Driving Current)	dBm	16.9 *

* Power meter wavelength is set at 1550nm for measurement and calibration.

3. Electrical and Mechanical Specifications:

Parameter	Units	Specification
Operating temperature range	°C	0 to 40
Storage temperature range	°C	-10 to 70
Power supply	VAC	90 – 240, 47 – 63 Hz
Dimensions	mm	330 (L) × 260(W) × 120(H)
Computer Interface	-	RS-232
Display	-	Laser driving current in mA, output power in dBm or mW
Optical power monitoring	-	Output power only
Protection	-	Safety Interlock, keylock, TEC overheat

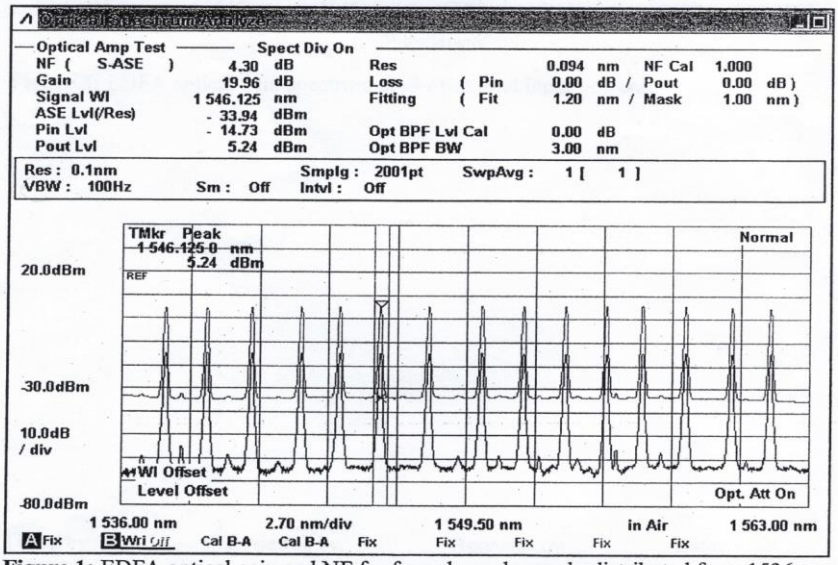


Figure 1: EDFA optical gain and NF for four channels evenly distributed from 1536 to 1563 nm, measured Anritsu MS9740A optical spectrum analyzer. Total input power is -3 dBm.

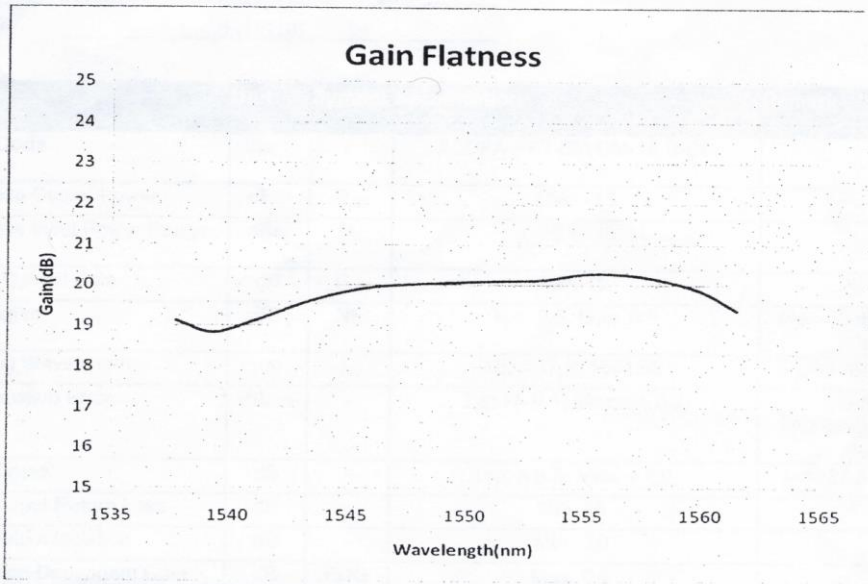


Figure 2: EDFA optical gain spectrum at -3 dBm total input power.

Tested by:	Reviewed by:	Approved by:	Date:
Dicky Chung	Ming Li	KS Tsang	

Amonics
Specialist in Optical Amplifiers

Product Specification

Template ID:	PR-07
Revision:	01.00
Page:	1 of 1

Model No.: AEDFA-PKT-DWDM-15-B-SC

Serial No.: 14112101

Parameter	Unit	Symbol	Specification	Remark
Product Code			AEDFA-PKT-DWDM-15-B-SC	-
Composite Output Power	dBm	P_{out}	Min. +15	P_{in} = -3 dBm
Composite Input Power Range	dBm	P_{in}	-16 to +3	
Optimal Optical Gain	dB	G_{op}	Min. 18	P_{in} = -3 dBm
Noise Figure	dB	NF	Typ. 5.5, Max. 6.0	Pin = -3 dBm λ=1537.37 - 1561.62 nm
Operating Wavelength	nm	λ_o	1537.37 to 1561.62	P_{in}=-3dBm P_{out}=+15dBm
Gain Transient Error	dB/μs	-	Typ.+/- 0.1, Max. +/- 0.2	-3dBm input, 4096bit@10Gbps, 100ns Guard time
Gain Flatness	dB	-	Typ. ± 0.5, Max. ± 1.0	λ=1537.37 - 1561.62 nm
Input / Output Return Loss	dB	-	Min. 45	-
Input / Output Isolation	dB	-	Min. 30	-
Polarization Dependent Gain	dB	PDG	Max. 0.5	-
Polarization Mode Dispersion	ps	PMD	Typ. 0.2, Max. 0.3	-
Control Mode	-	-	ACC	-
Environment				
Operation Temperature Range	°C		0 to +40	-
Storage Temperature Range	°C		-10 to +70	-
Operating Humidity	%		20 – 95	Non-condensing
Warm up time to full power stabilization	Min.		Max. 20	-
Power Supply	VAC		90 – 240, 47 – 63 Hz	-
Weight	Kg		~ 5	-
Dimensions	mm		260 (W) x 330(D) x 120(H)	-
User Interface				
Communication Interface			RS232	-
LCD Display			Output power, Pump Current	-
Front Panel Control Button			Pump Current, Keylock switch	-
Optical Connector			SC/UPC	-
Optical Fiber			SMF-28	-
Accessories			1. Switch Key x 1 2. RS232 Cable x 1 3. Power Cord x 1 4. Operation Manual x 1 5. Software User Manual x 1 6. Control Software CD ROM x 1 7. Test Report x 1	

Revision	Date (DD/MM/YY)	Change	Prepared By
01.00	21/11/14	Initial Release	Isabel

11. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของอีดีเอฟเอสื่อสารสองทางแบบทั่วไปของบริษัท Optoquest

2. General Information

2.1 Product Overview

This product is an ultra-stable high gain optical amplifier unit designed for applications requiring high efficiency optical amplification. It is a self-contained, compact module designed to supply high and stable gain across the specified range of the communication window.

2.1.1 Features

- High saturation output power
- High gain
- High stability
- Low noise

In addition, for polarization maintaining (PM) models:

- High polarization extinction ratio

2.1.2 Product Specification and Test Report

When you receive this product, please verify that a product specification and a test report are included. These documents contain important parameters regarding to the optical and electrical specifications of the product.

2.1.3 Mechanical Specifications

Dimension:	70 × 90 × 14 mm (D × W × H)
Case:	Anodized aluminum

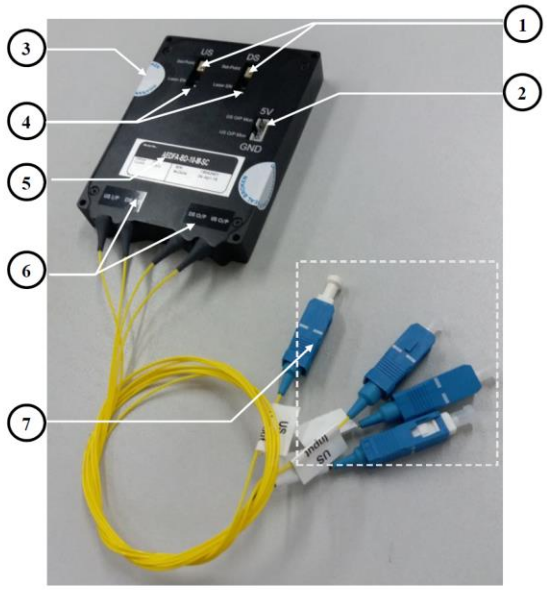
2.2 Accessories

When you receive this product, please verify the accessories specified in the ***product packing list*** are included. If there are any discrepancies, please notify The Manufacturer promptly.

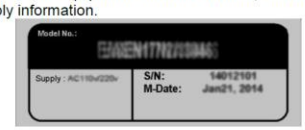
This product was carefully inspected before it was dispatched. It should be in proper working order upon receipt. You should, however, inspect the product for any damage that may have occurred in transit. If the shipping container or the packing material is damaged, keep it until the contents of the shipment have been checked to be free of mechanical and electrical damages. Notify The Manufacturer promptly if any notable damage is found.

3. Product Description

3.1 Module

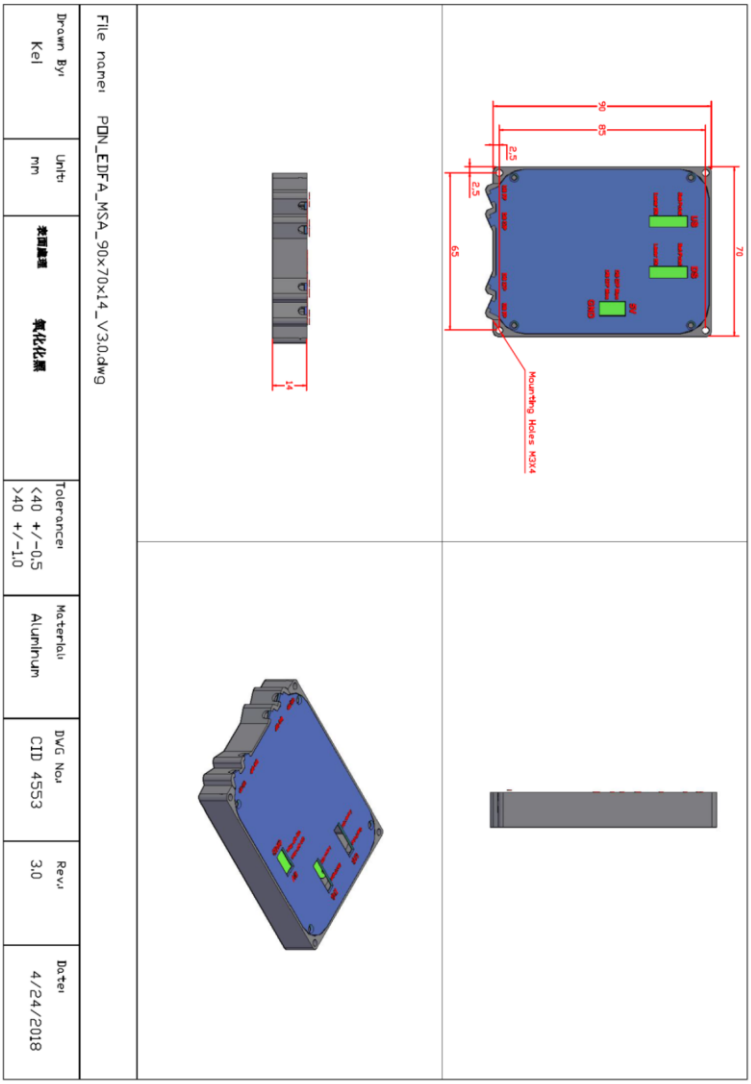


Feature	Function
(1) Set point control screw	User can turn the screw clockwise or counter-clockwise to adjust the set point.
(2) Control Interface Socket	This 4-pin IDC connector socket provides an interface to control the unit and acts as the US and DS optical output monitoring. Pin 1: 5V Pin 2: DS O/P Mon. Pin 3: US O/P Mon. Pin 4: GND
(3) Warranty Seal	The warranty seal(s) ensure us that the module has not been opened. **The warranty will be considered void if any of the seals have been tampered with or removed**.
(4) Laser Enable Switch	User can enable / disable the laser of US and DS with the laser enable switch.

Feature	Function
(5) Nameplate / Manufacturer ID	The nameplate records the equipment's model number, serial number, manufacture date, and power supply information. 
(6) Function Label	Label to specify the fiber-optic connector function. **US I/P:** Receptacle for US optical input. **DS I/P**: Receptacle for DS optical input. **US O/P:** Receptacle for US optical output. **DS O/P**: Receptacle for DS optical output. **The optical output receptacles serve as apertures that emit Invisible Laser Radiation when the optical driver(s) is enabled.**
(7) Optical Connector	The optical connector(s) for optical input/output. The fiber-optic connector type is stated in the test report: **FC/APC**: Ferrule Connector with Angled Physical Contact. **FC/UPC**: Ferrule Connector with Ultra-polish Physical Contact. **SC/APC**: Subscriber Connector with Angled Physical Contact. **SC/UPC**: Subscriber Connector with Ultra-polish Physical Contact. **LC/APC**: Lucent Connector with Angled Physical Contact. **LC/UPC**: Lucent Connector with Ultra-polish Physical Contact. **The optical output connector(s) serve as apertures that emit Invisible Laser Radiation when the optical driver(s) is enabled.** Proper cleaning and handling for the connectors are required to keep the equipment in proper performance.

5. Physical Dimensions

Dimensions are in millimeters unless otherwise noted.
Connectors are for illustration only. Please refer to Product Description Section for details.



Amonics
Specialist in Optical Amplifiers

Phone: +852 – 2428 9723
Fax: +852 – 2428 9704
Email: contact@amonics.com

QUOTATION

Amonics Limited,

Quote #: TK-113028
Date: 23 Jan, 2018

To: Optoquest	From: Terry Kwok
Contacts: Masaru Fukumitsu	Phone: (852) 2428 9723
Phone:	Fax: (852) 2428 9704
Email: fukumitsu@optoquest.co.jp	Email: terry.kwok@amonics.com

Item 1: +10dBm Output Power Bi-Directional C-band EDFA Specifications:

Parameter	Unit	Specification	Remarks
Product			
Description	-	Bi-Directional EDFA	-
Model Name	-	AEDFA-BD-10-M-SC	CW mode operation
Optical			
Operating Wavelength	nm	1530 – 1562	-
Input Signal Level	dBm	-20 to 0	-
Saturated Output Power (each port)*	dBm	Min. +10, Typ. +12	Input Power = 0dBm
Noise Figure	dB	Min. 5.8, Max. 6.3	Input Power = -3dBm
Polarization Mode Dispersion	ps	Typ. 0.2, Max. 0.3	-
Input & Output Isolation	dB	Min. 30	-
Environment			
Operation Temperature	°C	0 to +40	-
Storage Temperature	°C	-10 to +70	-
Dimensions	mm	90 x 70 x 14	inside a MSA module
Power Supply	VDC	+5.0 ± 0.1	-
Total Power Consumption	W	Max. 2.0	Bi-Direction
Interface			
Electrical Connector	-	4 pin (2mm Pitch)	-
Control Mode	-	Automatic pump current	Current adjustable with variable resistor
Optical Power Monitoring	-	Build-in Output PD	-
Optical Input & Output Terminal	-	Min. 0.5m long 900um tubing with SC/UPC Pigtail	-
Optical Fiber	-	SMF-28	-

検査成績書

2018年8月9日

Item name 品　名: 光トランシーバー用超小型光増幅システム Ultra compact optical amplifier system for optical transceiver		
品　番: －		
Serial number 製造番号: 1804C053		
quantity 数　量: 1 式		

品質保証	承認	検査員
山 18.8.09 崎(浦)	田 '18.8.09 中(田)	皆 18.8.09 川

Judgment

判定	合格 Passed

測定結果
Measurement result

C-Band帯双方向光増幅器
C-band Bi-directional Optical amplifiers
S/N:1804C053-5

Up-stream EDFA specification measured value

	仕様	測定値	備考
飽和出力 Saturation output	≧+10dBm	＞12.3dBm	入力波長1550nm、入力ﾊﾟﾜｰ0dBm Input wavelength Input power
Gain	－	22.5dB	入力波長1550nm、入力ﾊﾟﾜｰ-20dBm Input wavelength Input power
NF	≦6dB	＜5.5dB	入力波長1550nm、入力ﾊﾟﾜｰ-3dBm Input wavelength Input power
PMD	≦0.3ps	＜0.3ps	
アイソレータ アイソレーション isolation	≧30dB	IN ＞30dB OUT ＞30dB	アイソレータ単体での評価値

Down-stream EDFA specification measured value

	仕様	測定値	備考
飽和出力 Saturation output	≧+10dBm	＞12.4dBm	入力波長1550nm、入力ﾊﾟﾜｰ0dBm Input wavelength Input power
Gain	－	23.0dB	入力波長1550nm、入力ﾊﾟﾜｰ-20dBm Input wavelength Input power
NF	≦6dB	＜5.4dB	入力波長1550nm、入力ﾊﾟﾜｰ-3dBm Input wavelength Input power
PMD	≦0.3ps	＜0.3ps	
アイソレータ アイソレーション isolation	≧30dB	IN ≧30dB OUT ≧30dB	アイソレータ単体での評価値

Fiber type ﾌｧｲﾊﾞ種: 1.3零分散SMF　φ0.9mm芯線
Fiber length ﾌｧｲﾊﾞ長: 0.5m±0.1m
Connector type ｺﾈｸﾀ種: SC/UPC

備考: 1)

株式会社
オプトクエスト
URL:http://www.optoquest.co.jp

東京営業所: 〒103-0023 東京都中央区日本橋本町4-3-10 2F
TEL. 03-5200-0801 FAX.03-5200-0803
上尾工場: 〒362-0021 埼玉県上尾市原市1335
TEL. 048-724-1811 FAX.048-724-1813

12. แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของอีดีเอฟเอแบบทั่วไปของบริษัท Viavi [25]

MAP Erbium-Doped Fiber Amplifier

(mEDFA-A1)

Key Features

- Pre-amp, booster and in-line configurations
- High output power and gain maximize operating range
- Low noise figure minimizes optical impairment
- Monitoring and alarms available
- Can be automated when used with MAP-200 LXI-compliant interfaces and IVI drivers

Applications

- In-line, pre-amp and booster amplifier emulation
- Dense wavelength division multiplexing (DWDM) transmission for multi-channel applications
- SONET/SDH systems for single channel applications
- Optical signal-to-noise ratio (OSNR) experiments

Safety Information

- · The MAP EDFA, when installed in a
- MAP chassis, complies to CE,
- CSA/UL/IEC61010-1, LXI Class C
- requirements, meets the requirements
- of Class 3B in standard IEC
- 60825-1 (2002), and complies with
- 21 CFR 1040.1 except deviations per
- Laser Notice No. 50, July 2001.

The Multiple Application Platform (MAP) Erbium-Doped Fiber Amplifier (mEDFA-A1) is optimized for the industry-leading MAP-200 platform from Viavi. Based on the previous-generation MAP, the MAP-200 is the first photonic layer lab and manufacturing platform that is LAN Extensions for Instrumention (LXI)-compliant by conforming to the required physical attributes, Ethernet connectivity, and interchangeable virtual instrument (IVI) drivers. The MAP-200 platform is optimized for density and maximum configurability to meet specific application requirements in the smallest possible foot print. The MAP EDFA has a saturated output power ranging from 14 dBm to 21 dBm, features noise figures as low as 3.7 dB and has gain flatness better than 2.0 dB. All MAP EDFA models are available for operation in C- or L-band.

Specifications

Parameter	1550	1552	1552	1554	1558	1590	1592	1594
Amplifier type	Pre-amp	Booster	Booster high power	In-line	Booster DWDM	Pre-amp	Booster	In-line
Operating wavelength range	1528 to 1565 nm	1528 to 1565 nm	1528 to 1565 nm	1528 to 1565 nm	1528 to 1563 nm	1565 to 1610 nm	1565 to 1610 nm	1565 to 1610 nm
Input signal	Single channel	Single channel	Single channel	Single channel	Multichannel (DWDM)	Single channel	Single channel	Single channel
Saturated output power (minimum)[1]	>14 dBm	>17 dBm	>20 dBm	>17 dBm	>21 dBm	>15 dBm	>15 dBm	>20 dBm
Noise figure (maximum)[2]	<3.7 dB	<4.5 dB	<5.0 dB	<4.1 dB	<5.5 dB	<5.2 dB	<5.5 dB	<5.5 dB
Small signal gain (minimum)[3]	>37 dB	>30 dB	>32 dB	>35 dB	>25 dB	>24 dB	>22 dB	>28 dB
Input/output monitors	No	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes
Polarization dependent loss (PDL) (maximum)	<0.2 dB	<0.2 dB	<0.2 dB	<0.2 dB	<0.25 dB	<0.3 dB	<0.3 dB	<0.3 dB
Polarization mode dispersion (PMD) (maximum)	<0.5 ps	<0.4 ps	<0.4 ps	<0.5 ps	<0.65 ps	<0.6 ps	<0.6 ps	<0.6 ps
Input/output isolation (typical)	N/A/32 dB	45/32 dB	45/32 dB	32/32 dB	32/32 dB	N/A/40 dB	40/40 dB	40/40 dB
Spectral gain flatness (maximum) (p-p)[4]	N/A	N/A	N/A	N/A	<2.0 dB	N/A	N/A	N/A
Operating temperature	0 to 40°C							
Storage temperature	–30 to 60°C							
Humidity	Maximum 95% RH noncondensing from 0 to 45°C							
Dimensions (W x H x D)	4.06 x 13.26 x 37.03 cm (1.6 x 5.22 x 14.58 in)							
Weight	1.3 kg (2.87 lb)							

Note:
All specifications guaranteed at 1550 nm and at 23°C

1. Saturated Output Power measured:
   at 1550 nm at P_{in} = –4 dBm
   at 1550 nm at P_{in} = –4 dBm (mid-span) for models 1550, 1552, 1554, 1558
   at 1590 nm at P_{in} = 0 dBm (mid-span) for models 1590, 1592, 1594
2. Noise figure measured:
   at P_{in} = –30 dBm for model 1550
   at P_{in} = –4 dBm for models 1552, 1558, 1592
   at P_{in} = –20 dBm for models 1554, 1590, 1594
3. Small signal gain measured:
   at P_{in} = –30 dBm for model 1550
   at P_{in} = –20 dBm for model 1552, 1554, 1590, 1592, 1594
   at P_{in} = –4 dBm for model 1558
4. Flatness optimized:
   for P_{in} = –4 dBm for model 1558

Note:
1558 Input Power Monitor: Min Power displayed typical - 18 dBm and Max Power displayed typical +3 dBm

บรรณานุกรม

[1] *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2019. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/release-15

[2] *Recommendation ITU-R M.2083-0: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, ITU Radiocommunication Sector (ITU-R), Geneva, Switzerland, 2015. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en

[3] V. Vittavat, W. Duang-rudee, and W. Naoya, "Duplex optical amplifier for 10 Gb/s ethernet link over 120 km SSMF and 15 km DCF," in *Fourth International Conference on Photonic Solutions (ICPS 2019)*, Chiang Mai, Thailand, 20-22 November 2019, vol. 11331: SPIE, doi: 10.1117/12.2553000. [Online]. Available: https://doi.org/10.1117/12.2553000

[4] *IEEE Std 802.3ah: IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks*, IEEE, 2004.

[5] *IEEE Std 802.3ae: IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications - Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layer, and Management Parameters for 10 Gb/s Operation*, IEEE, 2002.

[6] *IEEE Std 802.3cc: IEEE Standard for Ethernet - Amendment 11: Physical Layer and Management Parameters for Serial 25 Gb/s Ethernet Operation Over Single-Mode Fiber*, IEEE, 2018.

[7] *IEEE Std 802.3bm: IEEE Standard for Ethernet - Amendment 3: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation over Fiber Optic Cables*, IEEE, 2015.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[8] *IEEE Std 802.3ba: IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 4: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation*, IEEE, 2010.

[9] Huawei Technologies. *XFP 10G 1529.55nm to 1560.61nm DWDM 100GHz Fixed SMF 40 km*, 2018. [Online]. Available: https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100043478/e83dbc6d/10-gbit-s-xfp-optical-module.

[10] Terrabit Networks. *XFP Transceiver: 10Gb/s, 1550nm, Single mode, 80km, w DDM Function*, 2009. [Online]. Available: http://www.terrabitnetworks.com/product/20180129121/xfp-transceiver-10gbs-1550nm-single-mode.aspx.

[11] Finisar Corporation. *10Gb/s, 80km Single Mode, Multi-Rate SFP+ Transceiver FTLX1871M3BCL*, 2015. [Online]. Available: https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/finisar_ftlx1871m3bcl_10g_zr_80km_multirate_sfp_optical_transceiver_productspecc1.pdf.

[12] *Recommendation ITU-T G.652 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), 2016. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en

[13] T. Rasmussen, A. Bjarklev, B. Pedersen, and J. H. Povlsen, "Optimum placement of a fiber-optical amplifier in high-bit-rate direct-detection systems," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 30, pp. 4376-4378, 1991/10/20 1991, doi: 10.1364/AO.30.004376.

[14] J. M. P. Delavaux and T. Stfusser, "10 Gb/s 120-km Bidirectional Repeaterless Transmission over Single-Mode Fiber," *Optical Fiber Technology,* vol. 1, no. 4, pp. 318-321, 1995/10/01/ 1995, doi: https://doi.org/10.1006/ofte.1995.1024.

[15] Y. Awaji, H. Furukawa, N. Wada, P. Chan, and R. Man, "Mitigation of transient response of erbium-doped fiber amplifier for burst traffic of high speed optical packets," in 2007 *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 6-11 May 2007 2007, pp. 1-2, doi: 10.1109/QELS.2007.4431233.

[16] Y. Awaji, H. Furukawa, N. Wada, P. Chan, and R. Man, "Challenges toward burst-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

mode EDFA," in 2009 7th *International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS)*, 8-10 Dec. 2009 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICICS.2009.5397488.

[17] Y. Awaji, H. Furukawa, B. J. Puttnam, N. Wada, P. Chan, and R. Man, "Burst-mode optical amplifier," in 2010 *Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference*, 21-25 March 2010 2010, pp. 1-3, doi: 10.1364/OFC.2010.OThI4.

[18] Y. Hirota, M. Shiraiwa, H. Furukawa, H. Harai, and N. Wada, "Demonstrating Network-scale Gain Transient Impact of Multiple Series EDFAs in Link Failure Cases," in *Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, California, 2018/03/11 2018: Optical Society of America, in OSA Technical Digest (online), p. Tu3 E.5 , doi: 10.1364/OFC.2018.Tu3E.5 . [Online]. Available: http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2018-Tu3E.5

[19] Finisar Corporation. *FDB-1022 XFP Evaluation Board*, 2004. [Online]. Available: https://www.digikey.com/catalog/en/partgroup/fdb-1022-xfp-evaluation-board/36700.

[20] Finisar Corporation. *FDB-1027 SFP/SFP+ Evaluation Board*, 2007. [Online]. Available: https://www.digikey.com/en/products/detail/finisar-corporation/FDB-1027/1832810.

[21] G. Keiser, *Optical Fiber Communication*, 5th edition ed. Singapore: McGraw-Hill, 2015.

[22] ผศ.ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ, *ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง:หลักการและองค์ประกอบ*. 2012.

[23] Optoquest. *Variable Attenuator Module*, Optoquest Co., Ltd., Japan, 2015, pp. 44-45. [Online]. Available: https://www.optoquest.co.jp/en/sitemap/sitemap.html#component.

[24] Agiltron. *SM Fiber Optical 3-port Circulator 1550nm*, 2011. [Online]. Available: https://www.agiltron.com/product/13101550-nm-optical-circulator/.

[25] Viavi Solutions. *Multiple Application Platform (MAP-200) Platform Overview: MAP Erbium-Doped Fiber Amplifier (mEDFA-A1)*, 2015, pp. 11-13. [Online]. Available: https://www.viavisolutions.com/en-us/products/map-erbium-doped-fiber-amplifier-medfa.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[26] Amonics. *Burst Mode EDFA (AEDFA-PKT-DWDM-1 5 -B-SC)*, Amonics Ltd., Hong Kong, 2019. [Online]. Available: https://www.amonics.com/product/13.

[27] Optoquest. *Slide adjustment Type Wavelength Tunable Filter Module*, Optoquest Co., Ltd., Japan, 2017. [Online]. Available: https://www.optoquest.co.jp/en/sitemap/sitemap.html#component.

[28] Anritsu. *MP2100A Series BERTWave*, Japan, MP2100Aseries-E-A-1-(8.00), 2013, pp. 1-24. [Online]. Available: https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/mp2100a.

[29] THORLABS. *Optical Power and Energy Meter, PM320E Dual-Channel Benchtop Console*. [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2748&pn=PM320E#8124.

[30] YOKOGAWA. *AQ6370D Telecom Optical Spectrum Analyzer 600 - 1700 nm*, 2020. [Online]. Available: https://tmi.yokogawa.com/th/solutions/products/optical-measuring-instruments/optical-spectrum-analyzer/aq6370d-optical-spectrum-analyzer/.

[31] Keysight Technologies. *86100C Infiniium DCA-J Wideband Oscilloscope Mainframe*, 2013. [Online]. Available: https://www.keysight.com/en/pd-318628-pn-86100C/infiniium-dca-j-wideband-oscilloscope-mainframe?nid=-32418.536883555.00&cc=TH&lc=eng.

[32] Keysight Technologies. *86105B 15 GHz optical / 20 GHz electrical module*, 2007. [Online]. Available: https://www.keysight.com/en/pd-103536-pn-86105B/15-ghz-optical-20-ghz-electrical-module?cc=TH&lc=eng&lsrch=true&searchT=86105B.

[33] Amonics. *Mini C-Band Erbium Doped Fiber Amplifier modules*, Amonics Ltd., Hong Kong, 2019. [Online]. Available: https://www.amonics.com/product/16.

[34] D. M. Baney, P. Gallion, and R. S. Tucker, "Theory and Measurement Techniques for the Noise Figure of Optical Amplifiers," *Optical Fiber Technology,* vol. 6, no. 2, pp. 122-154, 2000/04/01/ 2000, doi: https://doi.org/10.1006/ofte.2000.0327.

[35] Viavi Solutions. *T-BERD/MTS-8000 Scalable Multitest Platform*, 2020. [Online]. Available: https://www.viavisolutions.com/en-us/products/t-berd-mts-8000-scalable-multitest-platform.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[36] HAMAMATSU. *InGaAs PIN Receiver*, 2015. [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/photodiodes/ingaas-photodiode/index.html.

[37] KYOSEMI. *InGaAs APD-TIA 10Gbps Receivers*, Kyoto Semiconduictor Co.,Ltd., 2020. [Online]. Available: http://www.kyosemi.co.jp/en/products/category/apd-tia/ingaas-apd-tia-receiver/.

[38] Y. Awaji, H. Furukawa, N. Wada, E. Kong, P. Chan, and R. Man, "Burst-mode EDFA based on a mid-position gain flattening filter with an overpumping configuration for variable traffic conditions in a WDM environment," *Optical and Quantum Electronics,* vol. 40, no. 5, p. 461, 2008/04/24 2008, doi: 10.1007/s11082-008-9213-x.

[39] Keysight Technologies. *N4901B Serial BERT 13.5 Gb/s*, 2005. [Online]. Available: https://www.keysight.com/en/pd-2161400-pn-N4901B/serial-bert-135-gb-s?cc=TH&lc=eng&lsrch=true&searchT=N4901B.

[40] Timbercon. *XFP Host Test Board*, 2012. [Online]. Available: http://www.timbercon.com/assets/Uploads/xfp-host-test-board/XFP-Host-Test-Board.pdf.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิทวัส วรภมร
วัน เดือน ปี เกิด	30 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	125/25 หมู่บ้านณัฐกาญจน์ ถนน พุทธมณฑลสาย 2 ซอย พุทธมณฑลสาย2 ซอย21/1 แยก8 แขวง ศาลาธรรมสพน์ เขต ทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170
ผลงานตีพิมพ์	V. Vittavat, W. Duang-rudee, and W. Naoya, "Duplex optical amplifier for 10 Gb/s ethernet link over 120 km SSMF and 15 km DCF," in Fourth International Conference on Photonic Solutions (ICPS 2019), Chiang Mai, Thailand, 20-22 November 2019, vol. 11331: SPIE, doi: 10.1117/12.2553000. [Online]. Available: https://doi.org/10.1117/12.2553000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University