

การเพิ่มสมรรถนะโครงข่ายเอกซ์จีพอนด์ด้วยตัวขยายแสงสองทาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The Enhancement of XG-PON Using Bidirectional Optical Amplifier



Mr. Suchaj Rakkamdee

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	การเพิ่มสมรรถนะโครงข่ายเอกซ์จีพอนด้วยตัวขยายแสง สองทาง
โดย	นายสุชัชจจ์ รักคำมี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรรณสุชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรรณสุชีพ)
.....	กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวนดิศ อัครกุล)
.....	กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ วิศวินธานนท์)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร.อุกฤษฏ์ มั่นคง)

สุชัชวีร์ รักคำมี : การเพิ่มสมรรถนะโครงข่ายเอกซ์จีพอนด้วยตัวขยายแสงสองทาง. (The Enhancement of XG-PON Using Bidirectional Optical Amplifier) อ.ที่
 ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีเพิ่มสมรรถนะของโครงข่ายเอกซ์จีพอน (10-Gigabit-capable Passive Optical Network, XG-PON) อ้างอิงมาตรฐาน ITU-T G.987 ด้วยตัวขยายแสงสองทาง (Bidirectional optical amplifier) เพื่อรองรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 1024 ราย โครงข่ายเอกซ์จีพอนใช้อัตราบิตขาลง 9.9532 Gb/s ที่ช่วงความยาวคลื่น 1577 nm และอัตราบิตขาขึ้น 2.4883 Gb/s ที่ 1270 nm ตัวขยายแสงสองทางประกอบด้วยอีดีเอฟเอ (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) สำหรับความยาวคลื่นขาลงและเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) สำหรับความยาวคลื่นขาขึ้น วิทยานิพนธ์นี้วัดพารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทางเพื่อพิจารณาข้อจำกัดของอุปกรณ์ จากนั้นคำนวณสมการงบกำลังเพื่อหาขีดจำกัดของโครงข่ายจากกำลังสูญเสียของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard single-mode fiber) และตัวแยกแสงค่าต่างๆ ได้แก่ 1:256 และ 1:1024 เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองจากค่าอัตราความผิดพลาดบิต การส่งข้อมูลขาลงมีผลกระทบหลักมาจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic dispersion) ของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km และเชิร์ป (Chirp) ของเลเซอร์ การส่งข้อมูลขาขึ้นมีผลกระทบหลักมาจากสัญญาณรบกวนเอเอสไอ (Amplified Spontaneous Emission noise, ASE noise) ของเอสโอเอ ในท้ายที่สุดของการทดลองโครงข่ายเอกซ์จีพอนด้วยเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km และการแบ่ง 1024 จะส่งข้อมูลพร้อมกันทั้งขาลงและขาขึ้น การส่งขาลงปลอดความผิดพลาด ในทางกลับกันการส่งขาขึ้นมีอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 3.64×10^{-5} ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดของโครงข่ายเอกซ์จีพอนที่ระบุไว้ว่าต้องน้อยกว่า 10^{-4}

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070342821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Bidirectional Optical Amplifier, Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA),
Semiconductor Optical Amplifier (SOA), XG-PON

Suchaj Rakkammee : The Enhancement of XG-PON Using
Bidirectional Optical Amplifier. Advisor: Assoc. Prof. Duang-rudee
Worasucheep, Ph.D.

This thesis presents a method to enhance the 10-Gigabit-capable Passive Optical Network (XG-PON) based on ITU-T G.987 standard using the bidirectional optical amplifier to support 20-km distance and 1024 users. The XG-PON uses a downstream bit rate of 9.9532 Gb/s at wavelength range 1577 nm and an upstream bit rate of 2.4883 Gb/s at 1270 nm. The bidirectional optical amplifier consists of an Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) for downstream wavelength and Semiconductor Optical Amplifier (SOA) for upstream wavelength. First, this thesis measures many parameters of the bidirectional optical amplifier to consider its restriction. Then, the power budget equation is calculated to find network limitation from the power loss of Standard Single-Mode Fiber (SSMF) and optical splitter with different ratios such as 1:256 and 1:1024. When analyzing the Bit Error Rate (BER) results, the chromatic dispersion of 20-km SSMF and the laser chirp are major effects in downstream data transmission. The Amplified Spontaneous Emission (ASE) noise of SOA is a major effect in upstream data transmission. Finally, in an experimental of XG-PON with 20-km SSMF and 1024 splits, the data are transmitted simultaneously in both downstream and upstream: The downstream transmission is error-free. On the other hand, the upstream transmission has BER equal to 3.64×10^{-5} . This passes the XG-PON's requirement that specified to be less than 10^{-4} .

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณสำหรับความดูแลและช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งของ รศ.ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและถ่ายทอดความรู้ในทุกเรื่อง ไม่ว่าจะเป็งานวิจัยหรือการดำเนินชีวิต อีกทั้งยังให้ข้อเสนอแนะ แรงกระตุ้น และแรงผลักดัน ทำให้ข้าพเจ้ามีความกล้าที่จะศึกษาค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติมเรื่อยมา ยิ่งไปกว่านั้น อาจารย์ยังติดตามดูแลข้าพเจ้าเป็นอย่างดี ทำให้ข้าพเจ้าสามารถปรึกษาการทำวิทยานิพนธ์ได้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบและอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ในวิชาเรียนที่เปิดสอน และให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ Dr. Naoya Wada และทีมงาน National Institute of Communication and Information Technology (NICT) ทุกท่านที่ให้ความรู้และข้อเสนอแนะ อีกทั้งยังสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ เป็นอย่างดี จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ดร. ชติยา ไกรกาญจน์ สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อซื้ออุปกรณ์ที่สำคัญในการทดลอง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า สำหรับทุนการศึกษา และค่าใช้จ่ายรายเดือน แล้วยังคอยให้กำลังใจและถามไถ่ตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สุชัชจี้ รักคำมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	4
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	6
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	7
บทที่ 2 อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่าย	8
2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในโครงข่าย.....	8
2.1.1 เครื่องโอแอลที (Optical Line Termination, OLT)	8
2.1.1.1 ตัวส่ง (Transmitter, Tx).....	9
2.1.1.1.1 ตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver)	9
2.1.1.1.2 เลเซอร์ (Laser)	10
2.1.1.2 ตัวคู่ต่อดับเบิลยูดีเอ็ม (WDM Coupler)	11
2.1.1.3 ตัวรับ (Receiver, Rx).....	11

2.1.1.3.1	ตัวตรวจจับแสงชนิดเอ็ดพี/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทราน อิมพีแดนซ์ (Avalanche Photo-Detector/Trans-Impedance Amplifier, APD/TIA)	11
2.1.1.3.2	ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดจำกัด (Limiting Amplifier, LA).....	12
2.1.2	เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single-Mode Fiber, SSMF)	13
2.1.3	ตัวแยกแสง (Optical Splitter)	13
2.1.4	เครื่องโอเอ็นยู (Optical Network Unit, ONU)	13
2.2	อุปกรณ์ช่วยเพิ่มสมรรถนะโครงข่าย	14
2.2.1	ตัวขยายแสงสองทาง (Bidirectional Optical Amplifier).....	14
2.2.1.1	อีดีเอฟเอ (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA).....	14
2.2.1.2	เอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)	16
2.2.1.3	ตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสง (Optical Band Pass Filter, OBPF).....	17
2.2.1.4	ตัวคู่ต่อดับเบิลยูดีเอ็ม	17
2.2.2	ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน	17
2.3	เครื่องมือวัดผลการทดลอง	18
2.3.1	ชุดเครื่องมือวัดอัตราความผิดพลาดบิต (BERT) และแผนภาพรูปรูปตา (Eye Diagram) 18	
2.3.1.1	เครื่อง BERTWave	18
2.3.1.2	ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA).....	18
2.3.1.3	ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น (pin Photodetector)	19
2.3.2	ชุดเครื่องมือวัดแสง (Optical Measuring Instruments).....	19
2.3.2.1	มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter).....	19
2.3.2.2	เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA).....	20
บทที่ 3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.1	พารามิเตอร์ของตัวขยายแสง	21

3.1.1 ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range).....	21
3.1.2 อัตราการขยาย (Gain).....	21
3.1.3 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF).....	22
3.1.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณ (Signal Quantum Noise).....	22
3.1.3.2 สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (ASE Quantum Noise).....	22
3.1.3.3 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Signal-ASE Noise).....	23
3.1.3.4 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี (ASE-ASE Noise).....	23
3.1.3.5 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise).....	23
3.1.4 ความสูญเสียขึ้นอยู่กััโพลาไรเซชัน (Polarization Dependent Loss, PDL).....	25
3.1.5 การใช้กำลังไฟฟ้า (Power Consumption).....	25
3.2 ผลกระทบที่สำคัญของอุปกรณ์ในโครงข่าย.....	25
3.2.1 ผลกระทบของตัวขยายแสงและตัวแยกแสง.....	25
3.2.1.1 ผลกระทบของตัวขยายแสง.....	25
3.2.1.2 ผลกระทบของตัวแยกแสง.....	26
3.2.2 ผลกระทบของตัวรับ.....	26
3.2.3 ผลกระทบของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน.....	27
3.2.4 ผลกระทบของตัวส่งและเอสไอเอ.....	27
3.3 การวิเคราะห์ขีดจำกัดและคุณภาพของโครงข่าย.....	28
3.3.1 ขีดจำกัดของโครงข่าย.....	28
3.3.1.1 สมการงบกำลัง (Power Budget Equation).....	28
3.3.1.2 สมการงบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation).....	29
3.3.2 คุณภาพของโครงข่าย.....	29

3.3.2.1	แกนแนวตั้งของแผนภาพรูปตา.....	30
3.3.2.2	แกนแนวนอนของแผนภาพรูปตา	32
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	33
4.1	วิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทาง	33
4.1.1	ช่วงความยาวคลื่นใช้งานของตัวขยายแสงสองทาง.....	33
4.1.2	อัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงสองทาง	34
4.1.3	ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาริเซชันของตัวขยายแสงสองทาง.....	42
4.1.4	การใช้กำลังไฟฟ้าของตัวขยายแสงสองทาง	43
4.2	วิเคราะห์ขีดจำกัดของโครงข่าย.....	43
4.2.1	โครงข่ายที่รองรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียว 20 กิโลเมตรและผู้ใช้บริการ 256 ราย	43
4.2.2	โครงข่ายที่รองรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียว 20 กิโลเมตรและผู้ใช้บริการ 1024 ราย	44
4.3	วิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณและโครงข่าย	45
4.3.1	ผลกระทบจากกำลังสูญเสีย	45
4.3.2	ผลกระทบจากการบิดเบี้ยวของสัญญาณ.....	47
4.3.3	ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี.....	50
4.3.4	การวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายขาลง.....	53
4.3.5	การวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายขาขึ้น	54
4.3.6	การส่งข้อมูลพร้อมกันทั้งโครงข่ายขาลงและขาขึ้น	55
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	56
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2	ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม.....		59
ภาคผนวก.....		62
ดรชชนีคำศัพท์		86

ประวัติผู้เขียน..... 90



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 มาตรฐานโครงข่ายพอนของ ITU-T และ IEEE	2
ตารางที่ 3.1 การแก้ความผิดพลาดบิตด้วยรหัสรีดโซโลมอน	31
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวน	35
ตารางที่ 4.2 ตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ	36
ตารางที่ 4.3 ตัวเลขสัญญาณรบกวนของเอสไอเอ	40
ตารางที่ 4.4 งบกำลังของโครงข่าย สำหรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 256 ราย	43
ตารางที่ 4.5 งบกำลังของโครงข่าย สำหรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 1024 ราย	44
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวประกอบการถ่างออก	48
ตารางที่ 4.7 ตัวประกอบการถ่างออกของโครงข่ายขาลง ระยะทาง 20 และ 40 km	48
ตารางที่ 4.8 แผนภาพรูปตาโครงข่ายขาลงวัดด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น กำลังรับ -8 dBm	48
ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของเอสเอ็นอาร์กับอัตราความผิดพลาดบิต	51
ตารางที่ 4.10 แผนภาพรูปตาโครงข่ายขาขึ้นที่วัดด้วยโมดูลรับส่ง กำลังรับ -35 dBm	53

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์พื้นฐาน 4 ชนิด ตามมาตรฐานโครงข่ายพอน	1
รูปที่ 1.2 เอฟทีทีเอชในอาคารขนาดใหญ่ ที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมาก	2
รูปที่ 1.3 โมดูลรับส่งของ (ซ้าย) เครื่องโอแอลที และ (ขวา) เครื่องโอเอ็นยู บริษัท Huawei.....	3
รูปที่ 1.4 ตัวขยายแสงสองทางและองค์ประกอบภายใน	4
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทดลอง	8
รูปที่ 2.2 บอร์ดประเมินผลของบริษัท Finisar.....	9
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบภายในโมดูลรับส่งของเครื่องโอแอลที.....	9
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของตัวส่ง [14]	10
รูปที่ 2.5 (1) กระบวนการดูดกลืน (2) กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดเอง และ (3) กระบวนการ เปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น [14].....	10
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเลเซอร์ดีเอฟบี [14].....	11
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของตัวตรวจจับแสง (ซ้าย) ชนิดพีไอเอ็น และ (ขวา) ชนิดเอพีดี [14].....	12
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของตัวตรวจจับแสง/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิมพีแดนซ์ [14]...	12
รูปที่ 2.9 ตัวแยกแสง (ซ้าย) 1:4 และ (ขวา) 1:8	13
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในโมดูลรับส่งของเครื่องโอเอ็นยู.....	14
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบภายในตัวขยายแสงสองทาง.....	14
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอีดีเอฟเอ [15].....	14
รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของอีดีเอฟเอ [13].....	15
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างโปรไฟล์สเปกตรัมของชั้นสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ	15
รูปที่ 2.15 อัตราการขยายของตัวขยายแสงเปรียบเทียบกับกำลังแสงขาเข้า [13]	16
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเอสไอเอ [16]	16

รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโปรไฟล์สเปกตรัมของชั้นสัญญาณรบกวนของเอสโอเอ.....	17
รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน.....	18
รูปที่ 2.19 BERTWave รุ่น MP2100B ของบริษัท Anritsu.....	18
รูปที่ 2.20 ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ (ซ้าย) บริษัท JDSU และ (ขวา) บริษัท Optoquest.....	19
รูปที่ 2.21 ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็น รุ่น XPDV2320R ของบริษัท Finisar.....	19
รูปที่ 2.22 มิเตอร์วัดกำลังแสง รุ่น PM320E ของบริษัท Thorlab.....	19
รูปที่ 2.23 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง รุ่น AQ6370D ของบริษัท Yokogawa.....	20
รูปที่ 3.1 สัญญาณถูกขยายด้วยตัวขยายแสง.....	26
รูปที่ 3.2 สัญญาณถูกลดขนาดด้วยตัวแยกแสง.....	26
รูปที่ 3.3 สัญญาณรบกวนถูกเพิ่มเข้ามาในสัญญาณ.....	26
รูปที่ 3.4 สัญญาณที่ถ่างออกเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน.....	27
รูปที่ 3.5 สัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากเซิร์ป [19].....	28
รูปที่ 3.6 หน้ากากของแผนภาพรูปตาตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน [3].....	30
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของแผนภาพรูปตากับค่าอัตราความผิดพลาดบิต [14].....	30
รูปที่ 3.8 วิธีการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหลจากแผนภาพรูปตา.....	32
รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกการวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งาน.....	33
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแสงขาออกที่กระแสต่างกัน: (ซ้าย) อีดีเอฟเอ และ (ขวา) เอสโอเอ.....	34
รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการวัดอัตราการขยาย และตัวเลขสัญญาณรบกวน.....	34
รูปที่ 4.4 อัตราการขยายที่กระแส 0.15 A และตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ.....	35
รูปที่ 4.5 กำลังแสงขาออก และอัตราการขยายของอีดีเอฟเอ.....	36
รูปที่ 4.6 กำลังแสงขาออก, กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีและโอเอสเอ็นอาร์ของอีดีเอฟเอ.....	37
รูปที่ 4.7 อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์ และตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ.....	38
รูปที่ 4.8 อัตราการขยายที่กระแส 0.325 A และตัวเลขสัญญาณรบกวนของเอสโอเอ.....	38
รูปที่ 4.9 กำลังแสงขาออก และอัตราการขยายของเอสโอเอ.....	39

รูปที่ 4.10	กำลังแสงขาออก, กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีและไอเอสเอ็นอาร์ของเอสไอเอ 40	
รูปที่ 4.11	อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อไอเอสเอ็นอาร์ และพจน์ที่สามของสมการ (4.3).....	41
รูปที่ 4.12	แผนภาพบล็อกการทดลองวัดความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาริเซชัน.....	42
รูปที่ 4.13	สเปกตรัมกำลังแสงขาออกของเอสไอเอ: (ซ้าย) สูงที่สุด และ (ขวา) ต่ำที่สุด.....	42
รูปที่ 4.14	แผนภาพโครงสร้างที่มีระยะทาง 20 km, ตัวขยายแสงสองทางและตัวแยกแสง 1:256..	43
รูปที่ 4.15	แผนภาพโครงสร้างที่มีระยะทาง 20 km, ตัวขยายแสงสองทางและตัวแยกแสง 1:1024	44
รูปที่ 4.16	แผนภาพบล็อกสำหรับการทดลองของวิทยานิพนธ์	45
รูปที่ 4.17	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง กรณีส่งผ่านตัวแยกแสง.....	46
รูปที่ 4.18	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านตัวแยกแสง.....	46
รูปที่ 4.19	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง กรณีส่งผ่านระยะทาง 20, 40 km ..	47
รูปที่ 4.20	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านระยะทาง 20, 40 km .	49
รูปที่ 4.21	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง กรณีส่งผ่านอีดีเอฟเอ.....	50
รูปที่ 4.22	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านเอสไอเอ	51
รูปที่ 4.23	ค่าไอเอสเอ็นอาร์กรณีเริ่มต้นของโครงข่ายขาขึ้น ที่ความยาวคลื่น 1270 nm	52
รูปที่ 4.24	ค่าโทษกำลังของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านเอสไอเอ	52
รูปที่ 4.25	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง ตามเป้าหมายของวิทยานิพนธ์	53
รูปที่ 4.26	เชิร์ปของเอสไอเอ.....	54
รูปที่ 4.27	กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น ตามเป้าหมายของวิทยานิพนธ์	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

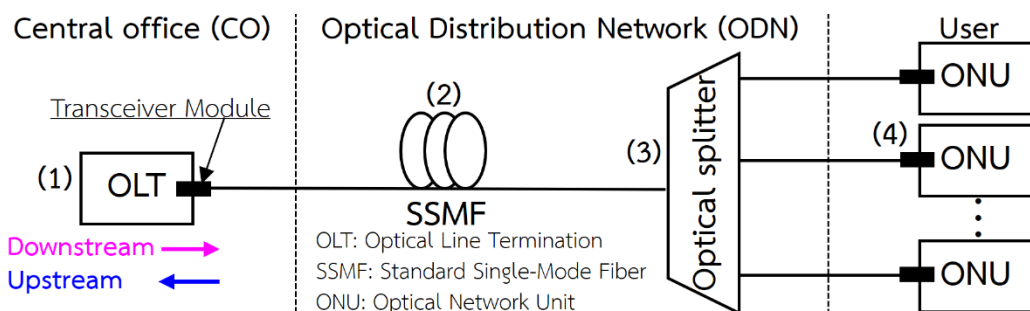
เอฟทีทีเอช (Fiber-To-The-Home, FTTH) เป็นโครงข่ายเข้าถึง (Access Network) ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยมีมาตรฐานสำคัญคือมาตรฐานโครงข่ายพอน (Passive Optical Network Standard, PON Standard) มาตรฐานนี้ประกอบด้วยโครงข่ายกระจายแสง (Optical Distribution Network, ODN) ที่มีแต่อุปกรณ์แพสซีฟ (Passive Device) ได้แก่ เส้นใยนำแสง (Optical Fiber) และตัวแยกแสง (Optical Splitter) เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างสำนักงานศูนย์กลาง (Central Office, CO) กับผู้ใช้บริการ (User) การส่งข้อมูลแสงขาลง (Downstream) และขาขึ้น (Upstream) อยู่ภายในเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน หรือรู้จักกันในชื่อการส่งสองทิศทาง (Bidirectional Transmission) เป็นวิธีการเชื่อมต่อระหว่างตัวส่ง (Transmitter, Tx) กับตัวรับ (Receiver, Rx) ของโครงข่ายพอน มาตรฐานนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 4 ชนิด ดังรูปที่ 1.1 คือ

(1) เครื่องโอแอลที (Optical Line Termination, OLT) ทำหน้าที่เชื่อมต่อข้อมูลแสงกับเครื่องโอเอ็นยู (Optical Network Unit, ONU) หลาย ๆ เครื่อง ด้วยโมดูลรับส่ง (Transceiver Module) ที่เสียบภายในเครื่อง ซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสงขาลงและรับข้อมูลแสงขาขึ้น

(2) เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single-Mode Fiber, SSMF) อ้างอิงตามมาตรฐาน ITU-T G.652.B หรือ G.652.D [1] สามารถส่งผ่านแสงโหมดเดี่ยวในช่วงความยาวคลื่น 1260 ถึง 1625 nm ซึ่งสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) มีค่าไม่เกิน 0.4 และ 0.3 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1310 และ 1550 nm ตามลำดับ

(3) ตัวแยกแสง ทำหน้าที่แยกข้อมูลแสงขาลงจากเครื่องโอแอลทีไปยังเครื่องโอเอ็นยูทุกเครื่องในโครงข่าย และรวมข้อมูลแสงขาขึ้นจากเครื่องโอเอ็นยูไปยังเครื่องโอแอลที

(4) เครื่องโอเอ็นยู ทำหน้าที่เชื่อมต่อข้อมูลจากผู้ใช้บริการกับเครื่องโอแอลทีด้วยโมดูลรับส่ง ซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสงขาขึ้นและรับข้อมูลแสงขาลง



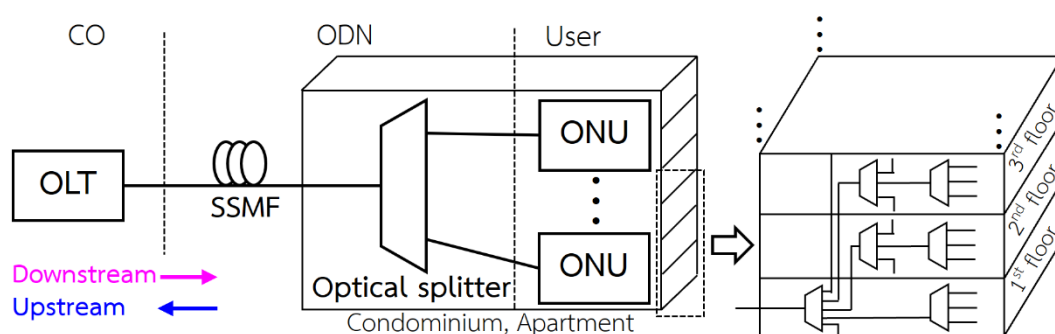
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์พื้นฐาน 4 ชนิด ตามมาตรฐานโครงข่ายพอน

มาตรฐานโครงข่ายพอนที่มีอัตราบิต (Bit Rate) ต่ำกว่า 10 Gb/s ถูกใช้อย่างกว้างขวางไปทั่วโลก ซึ่งปัจจุบันผู้ให้บริการเอฟทีทีเอชในประเทศไทยก็ใช้มาตรฐานกลุ่มนี้ มาตรฐานโครงข่ายพอนที่มีอัตราบิต 10 Gb/s เริ่มถูกนำมาใช้ในบางประเทศที่ต้องการอัตราบิตสูงขึ้น เช่น ญี่ปุ่น จีน เป็นต้น ในบางกลุ่มวิจัยระหว่างประเทศได้เริ่มศึกษาเกี่ยวกับมาตรฐานโครงข่ายพอนที่มีอัตราบิตสูงกว่า 10 Gb/s ระบบสื่อสารส่วนใหญ่ใช้มาตรฐานจาก International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) และ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ในปัจจุบันมาตรฐานโครงข่ายพอนที่สำคัญมี 7 ฉบับ ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 มาตรฐานโครงข่ายพอนของ ITU-T และ IEEE

มาตรฐาน	ชื่อ	อัตราบิตขาลง	อัตราบิตขาขึ้น	
ITU-T	G.984 [2]	G-PON	2.4883 Gb/s @ 1490 nm	2.4883 Gb/s @ 1310 nm
	G.987 [3]	XG-PON	9.9532 Gb/s @ 1577 nm	2.4883 Gb/s @ 1270 nm
	G.9807.1 [4]	XGS-PON	9.9532 Gb/s @ 1577 nm	9.9532 Gb/s @ 1270 nm
	G.989 [5]	NG-PON2	4x9.9532 Gb/s @ 1600 nm	4x9.9532 Gb/s @ 1535 nm
IEEE	802.3ah [6]	EPON	1.25 Gb/s @ 1490 nm	1.25 Gb/s @ 1310 nm
	802.3av [7]	10G-EPON	10.3125 Gb/s @ 1577 nm	10.3125 Gb/s @ 1270 nm
	802.3ca [8]	50G-EPON	2x25 Gb/s @ O-Band	2x25 Gb/s @ O-Band

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจเอฟทีทีเอชที่ใช้ในเขตมหานคร (Metropolis) ซึ่งมีแนวโน้มความหนาแน่นของจำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากที่อยู่อาศัยมีลักษณะเป็นอาคารขนาดใหญ่ประกอบด้วยห้องจำนวนมาก เช่น อาคารชุด (Condominium) ห้องชุด (Apartment) เป็นต้น ดังนั้นเอฟทีทีเอชจึงไม่จำเป็นต้องส่งข้อมูลแสงในระยะทางไกล แต่ต้องสามารถรองรับการกระจายข้อมูลแสงให้ครอบคลุมผู้ใช้บริการจำนวนมาก โดยการติดตั้งตัวแยกแสงกระจายไปตามแต่ละชั้นและแต่ละส่วนของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 เอฟทีทีเอชในอาคารขนาดใหญ่ ที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมาก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้โครงข่ายเอกซ์จีพอน (10-Gigabit-Capable PON, XG-PON) ตามมาตรฐาน ITU-T G.987 [3] ในการทดลองทั้งหมด เนื่องจากมาตรฐานนี้ใช้อัตราบิตขาลง 9.9532 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1577 nm และขาขึ้น 2.4883 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1270 nm ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้น และมาตรฐานนี้มีโมดูลรับส่งเชิงพาณิชย์ขายแล้วในปัจจุบัน ทำให้สามารถวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองได้เหมือนกับโครงข่ายที่ใช้งานจริง นอกจากนี้ในห้องปฏิบัติการวิจัย Electro-Magnetic Research Laboratory (EMRL) มีเพียงโมดูลรับส่งของเครื่องโอแอลทีและเครื่องโอเอ็นยู บริษัท Huawei ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งรองรับมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจำเป็นต้องใช้มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 1.3 โมดูลรับส่งของ (ซ้าย) เครื่องโอแอลที และ (ขวา) เครื่องโอเอ็นยู บริษัท Huawei

มาตรฐานส่วนใหญ่ในตารางที่ 1.1 ถูกออกแบบให้มิงบกำล้ง (Power Budget) ที่จำกัดสำหรับรองรับผู้ให้บริการจำนวนมากสุด 64 ราย ต่อเครื่องโอแอลที 1 เครื่อง ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของจำนวนผู้ให้บริการในเขตมหานคร ปัจจุบันปัญหานี้ถูกแก้ไขด้วยการติดตั้งเครื่องโอแอลทีและเดินสายเคเบิลเส้นใยนำแสงเพิ่ม แต่วิธีการนี้ใช้งบลงทุนที่สูงและมีข้อจำกัดด้านการรองรับจำนวนสายเคเบิลในแต่ละเส้นทาง วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอทางเลือกในการเพิ่มงบกำล้งด้วยตัวขยายแสง (Optical Amplifier) ที่เป็นอุปกรณ์แอ็กทีฟ (Active Device) ซึ่งเริ่มถูกนำมาใช้งานในโครงข่ายพอน การเลือกตัวขยายแสงให้เหมาะสมต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์และข้อจำกัดต่าง ๆ ของโครงข่ายที่นำไปใช้งาน

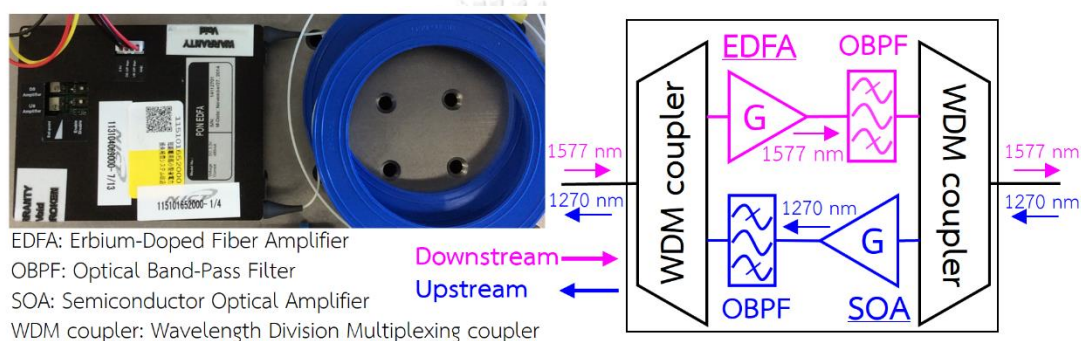
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาและทดลองตัวขยายแสง 2 ชนิด คือ

(1) อีดีเอฟเอ (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) เป็นตัวขยายแสงที่นิยมใช้กันมาก เพราะให้อัตราการขยาย (Gain) สูง และใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวกลางแอ็กทีฟ (Active Medium) จึงไม่มีผลกระทบจากสถานะของโพลาริเซชัน (State of Polarization) อีดีเอฟเอสามารถขยายกำล้งแสงได้ด้วยเลเซอร์ปั๊ม (Pump Laser) ที่ความยาวคลื่น 980 และ 1480 nm แต่มีข้อจำกัดคือสามารถขยายแสงได้สูงมากเฉพาะในแถบความถี่ซี (C-Band: 1530–1565 nm) และขยายได้น้อยลงในแถบความถี่แอล (L-Band: 1565–1625 nm)

(2) เอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) เป็นตัวขยายแสงที่ทำงานได้ในหลายช่วงความยาวคลื่นแสง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่เจือเข้าไปในชั้นโครงสร้าง เอสโอเอ

นิยมนำมาใช้ใน ช่วงความยาวคลื่นอื่น ๆ ที่อีดีเอฟเอทำงานไม่ได้ แต่มีข้อจำกัดคือต้องปรับสถานะของ โพลาริเซชันของแสงขาเข้าเอสโอเอให้เหมาะสมก่อน จึงจะให้อัตราการขยายที่ดีที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาและทดลองตัวขยายแสงสองทาง (Bidirectional Optical Amplifier) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ภายในประกอบด้วยอีดีเอฟเอฝั่งขาหลังและเอสโอเอฝั่งขาขึ้น โดยมีตัว คู่ต่อดับเบิลยูดีเอ็ม (Wavelength Division Multiplexing Coupler, WDM Coupler) ทำหน้าที่ รวมและแยกทางเดินของแสง นอกจากนี้ยังมีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสง (Optical Band-Pass Filter, OBPF) สำหรับความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ 1577 และ 1270 nm สอดคล้องกับค่าความยาวคลื่น ขาหลังและขาขึ้นของมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ตามลำดับ



รูปที่ 1.4 ตัวขยายแสงสองทางและองค์ประกอบภายใน

จากที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเครื่องโอแอลทีและเครื่องโอเอ็นยูมาจำลองโครงข่าย ให้ได้ตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ขั้นตอนต่อมาจะนำตัวขยายแสงสองทางซึ่งภายใน ประกอบด้วยอีดีเอฟเอสำหรับข้อมูลแสงขาหลังและเอสโอเอสำหรับข้อมูลแสงขาขึ้น แทรกเข้าไปใน โครงข่ายเพื่อเพิ่มงบกำลัง จากนั้นวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อพิสูจน์ว่าตัวขยายแสงสองทาง สามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงข่ายด้านจำนวนผู้ใช้บริการให้ได้มากขึ้นเพียงใด

1.2 การทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยได้เห็นแนวโน้มของ เทคโนโลยีและการพัฒนาอุปกรณ์ใน 3 แนวทางคือ

(ก) ตัวขยายแสงสองทางที่ใช้อีดีเอฟเอฝั่งขาหลังและใช้เอสโอเอฝั่งขาขึ้น

บทความที่ (1) [9] ในปี 2014 กลุ่มวิจัย National Institute of Information and Communications Technology (NICT) ในประเทศญี่ปุ่น สร้างตัวขยายแสงสองทาง ฝั่งขาหลังใช้อีดี เอฟเอขยายแสงในช่วงความยาวคลื่น 1577 nm ฝั่งขาขึ้นใช้เอสโอเอขยายแสงในช่วงความยาวคลื่น 1310 nm การใช้กำลังไฟฟ้า (Power Consumption) ของตัวขยายแสงสองทางเพียง 0.73 W แต่ สามารถส่งข้อมูลแสงได้ไกล 60 km และรองรับผู้ใช้บริการ 64 ราย

(ข) ตัวขยายแสงสองทางที่ใช้เอสโอเอทั้งฝั่งขาลงและขาขึ้น

บทความที่ (2) [10] ในปี 2015 กลุ่มวิจัย Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ในประเทศญี่ปุ่น สร้างตัวขยายแสงสองทาง ฝั่งขาลงใช้เอสโอเอขยายแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 1577 และ 1490 nm อย่างละตัว ฝั่งขาขึ้นใช้เอสโอเอ 2 ตัวต่อเรียงกันเพื่อขยายแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 1270 และ 1310 nm พร้อมกัน ตัวขยายแสงสองทางมีการควบคุมอัตราการขยายแบบอัตโนมัติ โดยแบ่งกำลังแสงมาตรวจจับเล็กน้อยแล้วป้อนกลับกระแสของเอสโอเอให้ได้อัตราการขยายที่ต้องการ ตัวขยายแสงสองทางสามารถส่งข้อมูลแสงได้ไกล 41.3 km และรองรับผู้ใช้บริการ 128 ราย

บทความที่ (3) [11] ในปี 2017 กลุ่มวิจัย NTT ปรับปรุงตัวขยายแสงสองทางในปี 2015 โดยลดจำนวนเอสโอเอฝั่งขาขึ้นเหลือ 1 ตัว และทดสอบในโครงข่ายของบริษัท NTT West กลุ่มวิจัยนำผลทดลองจริงมาวาดกราฟเปรียบเทียบกัน เพื่อใช้วิเคราะห์ความเหมาะสมและเสถียรภาพในการออกแบบโครงข่าย ซึ่งจะช่วยลดรายจ่ายด้านการลงทุน (Capital Expenditure, CAPEX) และรายจ่ายด้านการดำเนินงาน (Operation Expenditure, OPEX)

(ค) ตัวขยายแสงสองทางที่ใช้อีดีเอฟเอทั้งฝั่งขาลงและขาขึ้น

บทความที่ (4) [12] ปี 2016 กลุ่มวิจัย NTT สร้างตัวขยายแสงสองทาง ฝั่งขาลงใช้อีดีเอฟเอขยายแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 1600 nm ฝั่งขาขึ้นใช้อีดีเอฟเออีกตัวขยายแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 1530 nm ตัวขยายแสงสองทางถูกออกแบบให้อีดีเอฟเอฝั่งขาขึ้นยาวเพียงแค่ 0.7 m (โดยปกติจะใช้ความยาว 10 ถึง 30 m [13]) เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความแตกต่างของกำลังขยายแสงในช่วงความยาวคลื่น 1530 nm และนำกำลังแสงของเลเซอร์ปั๊มที่ไม่ถูกใช้ในอีดีเอฟเอขาขึ้นกลับมาใช้ในอีดีเอฟเอฝั่งขาลง

จากบทความที่ (1) ตัวขยายแสงสองทางมีลักษณะเหมือนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แต่ต่างตรงความยาวคลื่นขาขึ้นที่ใช้ 1310 nm ซึ่งไม่ตรงตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีฟอน บทความที่ (2) และ (3) เลือกใช้เอสโอเอทั้งขาลงและขาขึ้น มีข้อดีคือสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นใช้งานได้สะดวก ข้อเสียคือเอสโอเอใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าและในขณะเดียวกันก็ให้อัตราการขยายน้อยกว่าอีดีเอฟเอ บทความที่ (4) ใช้อีดีเอฟเอทั้งขาลงและขาขึ้น การใช้อีดีเอฟเอขยายแสง 1600 nm ในขาลงซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่อีดีเอฟเอขยายแสงได้น้อย เหมือนกับวิทยานิพนธ์นี้ที่ใช้อีดีเอฟเอขยายแสง 1577 nm จากบทความที่ (1) ถึง (4) สามารถสรุปได้ว่าตัวขยายแสงสองทางของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ฝั่งขาลงใช้อีดีเอฟเอและขาขึ้นใช้เอสโอเอ สามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงข่ายเอกซ์จีฟอนที่ความยาวคลื่นขาลง 1577 nm และขาขึ้น 1270 nm ได้

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวัดทดสอบและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวขยายแสงสองทาง (Bidirectional Optical Amplifier) ซึ่งภายในประกอบด้วยอีดีเอฟเอ (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) สำหรับการส่งข้อมูลแสงขาหลัง (Downstream) และเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) สำหรับการส่งข้อมูลแสงขาขึ้น (Upstream) โดยอ้างอิงมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน
2. เพื่อศึกษาและประกอบโครงข่ายตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ให้สามารถส่งได้ระยะทางอย่างน้อย 20 กิโลเมตร และมีจำนวนผู้ใช้บริการอย่างน้อย 64 ราย
3. เพื่อวัดทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายที่ใช้มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน เมื่อแทรกตัวขยายแสงสองทางเข้าไปในโครงข่าย เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการให้มากขึ้น

ขอบเขตของการวิจัย

1. วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวขยายแสงสองทางทั้งอีดีเอฟเอและเอสโอเอ ได้แก่ (1) ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range), (2) อัตราการขยายสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Gain), (3) ความสูญเสียขึ้นอยู่กัโพลาริเซชัน (Polarization Dependent Loss, PDL), (4) การใช้กำลังไฟฟ้า (Power Consumption), และ (5) ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF)
2. ประกอบโครงข่ายเอกซ์จีพอน ตามมาตรฐาน ITU-T G.987 โดยส่งอัตราบิตขาหลัง 9.9532 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1577 nm และส่งอัตราบิตขาขึ้น 2.4883 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1270 nm โดยวิเคราะห์ที่อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-3}
3. วัดทดสอบโครงข่ายเมื่อแทรกตัวขยายแสงสองทาง โดยส่งอัตราบิตขาหลัง 9.9532 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1577 nm และส่งอัตราบิตขาขึ้น 2.4883 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1270 nm ให้สามารถส่งได้ระยะทางอย่างน้อย 20 กิโลเมตร และมีจำนวนผู้ใช้บริการอย่างน้อย 256 ราย (เป็น 4 เท่าของค่ามาตรฐาน) โดยวิเคราะห์ที่อัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-3}

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์
2. วัดทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวขยายแสงสองทาง
3. ศึกษาและประกอบโครงข่ายที่ใช้มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน

4. วัดทดสอบและวิเคราะห์โครงข่ายเมื่อแทรกตัวขยายแสงสองทาง
5. เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวัดและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวขยายแสงได้
2. สามารถเข้าใจโครงข่ายที่ใช้มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนได้
3. สามารถวัดและวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายเมื่อแทรกตัวขยายแสงได้

1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา รวมไปถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย พร้อมทั้งขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับอีกด้วย

บทที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมดในโครงข่าย: บทนี้กล่าวถึงอุปกรณ์พื้นฐานในโครงข่ายเอกซ์จีพอนซึ่งประกอบด้วยเครื่องไอแอลที, เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน, ตัวแยกแสง, และเครื่องไอเอ็นยู อีกทั้งยังมีอุปกรณ์ช่วยเพิ่มสมรรถนะโครงข่ายซึ่งประกอบด้วยตัวขยายแสงสองทางและตัวควบคุมโพลาริเซชัน และส่วนสุดท้ายคือเครื่องมือวัดผลการทดลอง

บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง: บทนี้จะอธิบายหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยเป็นการอธิบายสมการและตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อโครงข่าย ได้แก่ พารามิเตอร์ของตัวขยายแสง, ผลกระทบที่สำคัญของอุปกรณ์ในโครงข่าย, และการวิเคราะห์ขีดจำกัดและคุณภาพของโครงข่าย ซึ่งจะใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทถัดไป

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง: บทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลจากทฤษฎีในบทที่ 3 โดยประกอบด้วย วิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทาง, วิเคราะห์ขีดจำกัดของโครงข่าย, และวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณและโครงข่าย

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: บทนี้จะสรุปประเด็นสำคัญในวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งกล่าวถึงปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะสำหรับการทดลอง เพื่อพัฒนาไปใช้ในโครงข่ายจริง

บทที่ 2

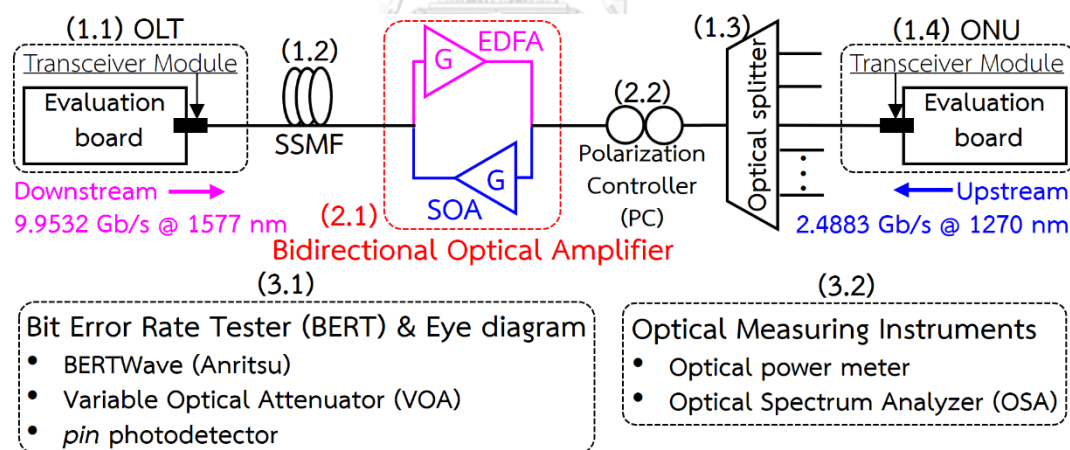
อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่าย

บทที่ 2 กล่าวถึงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทดลอง มี 3 ส่วนสำคัญ ดังรูปที่ 2.1 คือ

(1) อุปกรณ์พื้นฐานในโครงข่ายตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ได้แก่ (1.1) เครื่องโอแอลที, (1.2) เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน, (1.3) ตัวแยกแสง, และ (1.4) เครื่องโอเอ็นยู

(2) อุปกรณ์ช่วยเพิ่มสมรรถนะของโครงข่าย ได้แก่ (2.1) ตัวขยายแสงสองทางซึ่งภายในประกอบด้วยอีดีเอฟเอสำหรับฝั่งขาลงและเอสโอเอสำหรับฝั่งขาขึ้น, และ (2.2) ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller, PC)

(3) เครื่องมือวัดผลการทดลอง ได้แก่ (3.1) ชุดเครื่องมือวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT) และแผนภาพรูปตา (Eye Diagram) ประกอบด้วยเครื่อง BERTWave ของบริษัท Anritsu, ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA), และตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น (*pin* Photodetector), และ (3.2) ชุดเครื่องมือวัดแสง (Optical Measuring Instruments) ประกอบด้วยมิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter), และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA)



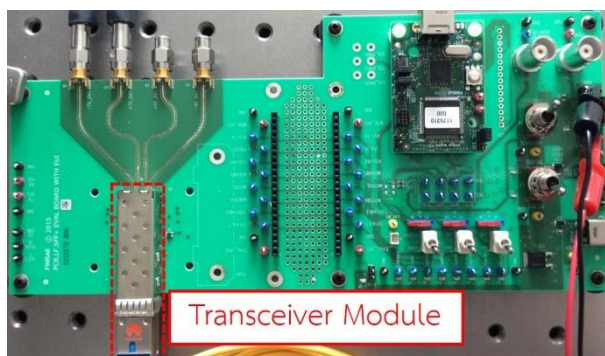
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทดลอง

2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในโครงข่าย

2.1.1 เครื่องโอแอลที (Optical Line Termination, OLT)

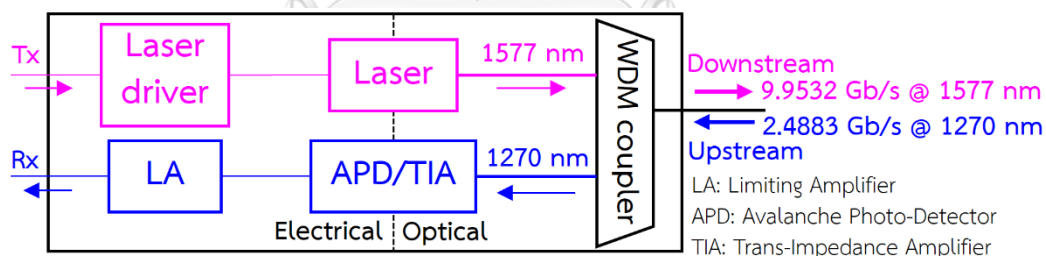
เครื่องโอแอลทีจะติดตั้งอยู่ที่สำนักงานศูนย์กลาง ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลแสงไปยังเครื่องโอเอ็นยูทุกเครื่องที่กระจายอยู่ตามตำแหน่งของผู้ใช้บริการ ภายในเครื่องโอแอลทีจะมีโมดูลรับส่งเสียบบอยู่หน้าเครื่อง สำหรับใช้ส่งข้อมูลแสงขาไปที่อัตราบิต 9.9532 Gb/s ความยาวคลื่น 1577 nm และรับข้อมูลแสงขาขึ้นที่อัตราบิต 2.4883 Gb/s ความยาวคลื่น 1270 nm ในการทดลองนี้จะใช้บอร์ด

ประเมินผล (Evaluation Board) จากบริษัท Finisar ดังรูปที่ 2.2 แทนการใช้งานเครื่องโอแอลที เพื่อความสะดวก (ไม่ต้องกำหนดค่าด้วยซอฟต์แวร์) สำหรับควบคุมการรับส่งข้อมูลแสงของโมดูลรับส่ง บริษัท Huawei รุ่น XGPON-OLT-N1 (S/N OM5270X101) ดังแสดงในบทที่ 1 รูปที่ 1.3 (ซ้าย)



รูปที่ 2.2 บอร์ดประเมินผลของบริษัท Finisar

องค์ประกอบภายในโมดูลรับส่งของเครื่องโอแอลที มี 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ (1) ตัวส่งซึ่งประกอบด้วยตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) และเลเซอร์ (Laser), (2) ตัวคู่ต่อดับเบิลยูดีเอ็ม, และ (3) ตัวรับซึ่งประกอบด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานอิมพีแดนซ์ (Avalanche Photo-Detector/Trans-Impedance Amplifier, APD/TIA) และตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดจำกัด (Limiting Amplifier, LA)



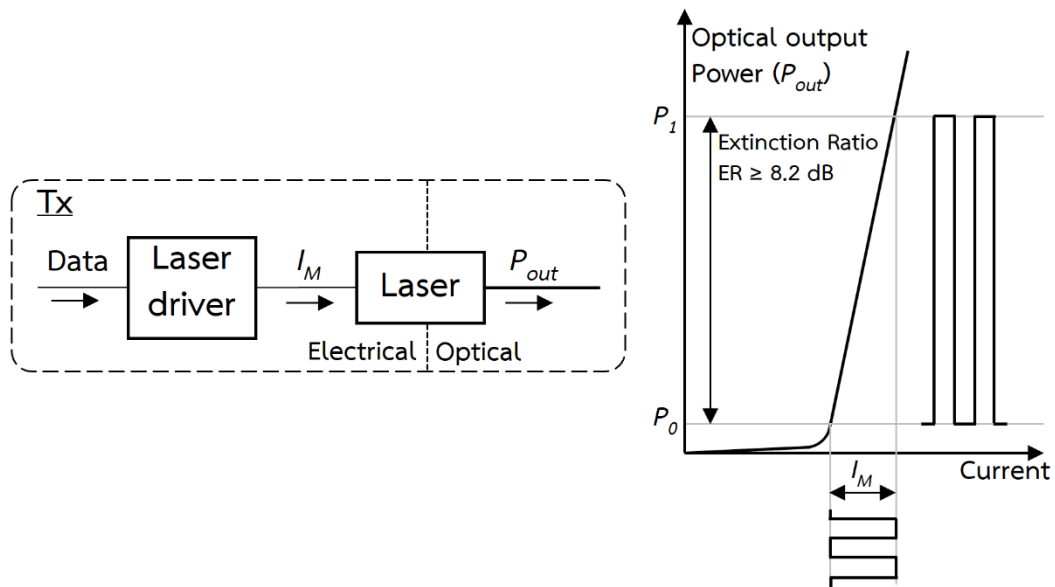
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบภายในโมดูลรับส่งของเครื่องโอแอลที

2.1.1.1 ตัวส่ง (Transmitter, Tx)

ประกอบด้วยตัวขับเลเซอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณข้อมูลไฟฟ้า และเลเซอร์ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแสงจากสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาจากตัวขับเลเซอร์

2.1.1.1.1 ตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver)

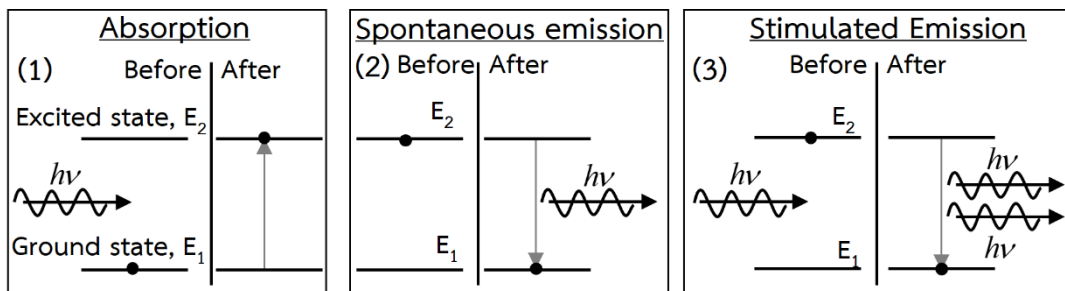
โครงข่ายเอกซ์จีพอนส่งข้อมูลแสงขาลงที่อัตราบิต 9.9532 Gb/s ด้วยวิธีมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) ซึ่งใช้ตัวขับเลเซอร์ควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้า (I_m) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ให้ได้ค่าอัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) มากกว่าหรือเท่ากับ 8.2 dB ตามข้อกำหนดของมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของตัวส่ง [14]

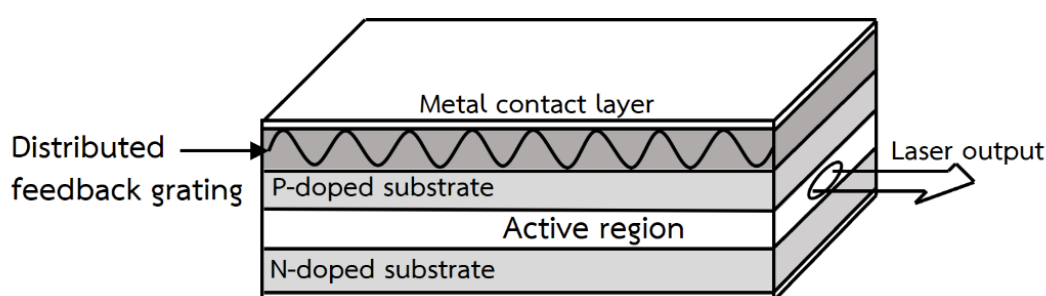
2.1.1.1.2 เลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์ให้กำเนิดสัญญาณแสงซึ่งมีความกว้างสเปกตรัม (Spectrum Width) ที่แคบกว่า แอลอีดี (Light Emitting Diode, LED) ภายในเลเซอร์มีการทำงานทั้งหมด 3 กระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือ (1) กระบวนการดูดกลืน (Absorption) เป็นการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนเพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนจากสถานะพื้น (Ground State) ที่ระดับพลังงาน E_1 ขึ้นไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) ที่ระดับพลังงาน E_2 , (2) กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดเอง (Spontaneous Emission) เกิดจากอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะไม่สมดุล แล้วอิเล็กตรอนร่วงจากสถานะกระตุ้นลงมาสถานะพื้น ทำให้ปลดปล่อยพลังงานออกมา, และ (3) กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) เกิดจากโฟตอนไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่ากับพลังงานของโฟตอนตัวแรก คือ $h\nu$ ในขณะที่อิเล็กตรอนร่วงจากสถานะกระตุ้นลงมาสถานะพื้น จนได้เป็นโฟตอนอีกตัว กระบวนการสุดท้ายนี้ใช้กำเนิดสัญญาณแสงที่ต้องการ



รูปที่ 2.5 (1) กระบวนการดูดกลืน (2) กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดเอง และ (3) กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น [14]

เลเซอร์มีหลายชนิด แต่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจเพียงเลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed Feed-Back Laser, DFB Laser) ซึ่งใช้ในมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน และมีความกว้างสเปกตรัมแคบกว่า 1 nm องค์ประกอบของเลเซอร์ดีเอฟบี ดังรูปที่ 2.6 ฝั่งด้านซ้ายและด้านขวาของตัวเลเซอร์มีระนาบเพื่อสะท้อนแสงไป-มาภายในบริเวณแอ็กทีฟ (Active Region) เพื่อให้กำลังแสงเพิ่มขึ้น เกรตติงป้อนกลับแบบกระจาย (Distributed Feedback Grating) ทำให้ค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) แตกต่างกัน โดยเลือกจากความถี่เรโซแนนซ์หลายค่าให้เหลือค่าเดียวและมีกำลังสูงสุดออกมาเพียงโหมดเดียวเท่านั้น จึงทำให้ได้สเปกตรัมแสงแคบมากตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเลเซอร์ดีเอฟบี [14]

2.1.1.2 ตัวคู่ต่อดับเบิลยูติเอ็ม (WDM Coupler)

ตัวคู่ต่อดับเบิลยูติเอ็มทำหน้าที่รวมและแยกเส้นทางเดินของแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกัน ให้ไปออกที่พอร์ตต่างกัน ในกรณีนี้คือความยาวคลื่น 1577 nm กับ 1270 nm ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อมองจากทิศขวาไปซ้ายจะเป็นการแยกแสงทั้งสองความยาวคลื่นที่วิ่งรวมอยู่ภายในเส้นใยนำแสงเส้นเดียว ให้ผ่านตัวคู่ต่อดับเบิลยูติเอ็มแยกไปออกที่พอร์ตบนกับล่างซึ่งเชื่อมต่อกับเลเซอร์และตัวตรวจจับแสงชนิดเอพิตี/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิมพีแดนซ์ ตามลำดับ ในทางกลับกันถ้ามองจากทิศซ้ายไปขวาจะเป็นการรวมแสงจากสองพอร์ตฝั่งซ้ายให้ไปออกพอร์ตเดียวกันในฝั่งขวา

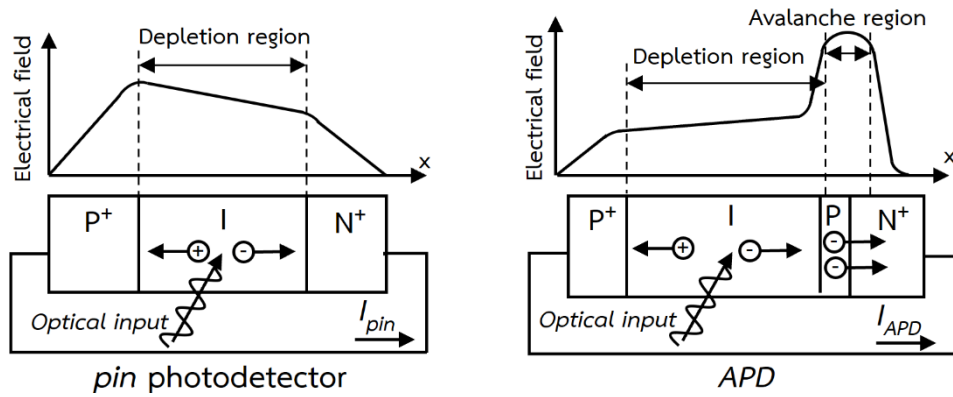
2.1.1.3 ตัวรับ (Receiver, Rx)

ประกอบด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดเอพิตี/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิมพีแดนซ์ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดจำกัดทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณที่เข้ามาเป็นบิต 1 หรือ 0 ซึ่งจะได้สัญญาณขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้าคงที่เพียงสองค่า

2.1.1.3.1 ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพิตี/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิมพีแดนซ์ (Avalanche Photo-Detector/Trans-Impedance Amplifier, APD/TIA)

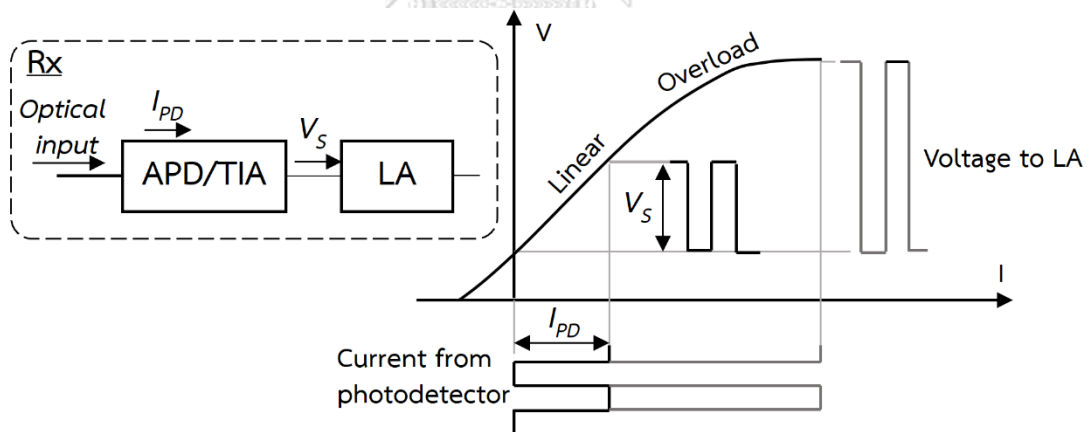
ตัวตรวจจับแสงทำหน้าที่แปลงข้อมูลแสงไปเป็นข้อมูลไฟฟ้า มี 2 ชนิด คือ (1) ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็นมีค่าความไวแสง (Sensitivity) แยก แต่มีข้อดีคือสร้างสัญญาณรบกวนน้อย องค์ประกอบเป็นดังรูปที่ 2.7 (ซ้าย) และ (2) ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพิตีความไวแสงดีกว่า เนื่องจากมี

บริเวณแอวาแลนซ์ (Avalanche Region) เพิ่มขึ้นจากตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น ตามรูปที่ 2.7 (ขวา) แต่สร้างสัญญาณรบกวนที่มากกว่า



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของตัวตรวจจับแสง (ซ้าย) ชนิดพีไอเอ็น และ (ขวา) ชนิดเอพีดี [14]

ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิสเตอร์จะเปลี่ยนข้อมูลในรูปกระแสไฟฟ้า (I_{PD}) ให้เป็นข้อมูลในรูปแรงดันไฟฟ้า (V_S) ด้วยหลักการทำงานดังรูปที่ 2.8 มาตรฐานโครงข่ายเอ็กซ์จีพอนจะใช้ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดีทำงานร่วมกับตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิสเตอร์แบบอินพุตในโมดูลรับส่ง ข้อมูลขาออกที่ได้ในรูปแรงดันไฟฟ้าจะถูกส่งต่อไปยังตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าถัดไป



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของตัวตรวจจับแสง/ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานซิสเตอร์ [14]

2.1.1.3.2 ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดจำกัด (Limiting Amplifier, LA)

เป็นตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่นิยมใช้งานและเหมาะสมกับข้อมูลดิจิทัล แต่ใช้ไม่ได้กับข้อมูลแอนะล็อก ทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่างระหว่างแรงดันของบิต 1 กับ 0 ให้สูงขึ้น จนได้สัญญาณขาออกคงที่สองระดับ ในขณะที่เดียวกันถ้าผลต่างระหว่างแรงดันของบิต 1 กับ 0 สูงเกินไป จะจำกัดขนาดของสัญญาณขาออกให้ไม่เกินสองระดับคงที่นั้น ๆ

2.1.2 เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single-Mode Fiber, SSMF)

เส้นใยนำแสงเป็นสื่อกลางในการนำสัญญาณแสงระหว่างเครื่องโอแอลทีกับเครื่องโอเอ็นยู โดยทั่วไปนิยมใช้เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมากกว่าเส้นใยนำแสงหลายโหมด (Multi-Mode Fiber, MMF) เพราะสามารถส่งแสงเพียงโหมดเดียวจึงรองรับอัตราบิตสูงกว่าและส่งระยะทางได้ไกลกว่า สำหรับค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD) อ้างอิงจากมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนต้องมีค่าไม่เกิน 20 และ -7 ps/(nm·km) ที่ความยาวคลื่น 1577 และ 1270 nm ตามลำดับ มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนจะต้องสามารถรองรับเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทางอย่างน้อย 20 km ได้

2.1.3 ตัวแยกแสง (Optical Splitter)

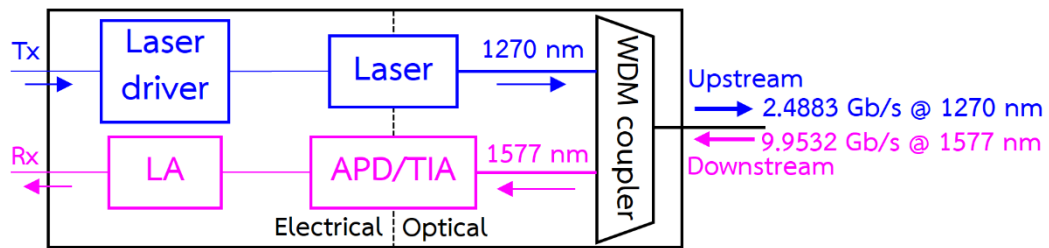
ตัวแยกแสงจะมีค่าสัดส่วนการแยก (Splitting Ratio) เช่น 1:4, 1:8 เป็นต้น ทำหน้าที่กระจายสัญญาณแสงจากเครื่องโอแอลทีไปยังเครื่องโอเอ็นยู และขณะเดียวกันก็รวมสัญญาณแสงจากเครื่องโอเอ็นยูทุกเครื่องกลับไปยังเครื่องโอแอลที ในการทดลองนี้จะใช้ตัวแยกแสง 1:4 และ 1:8 ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ซ้าย) และ (ขวา) ตามลำดับ นำมาต่อกันหลายตัวเพื่อให้ได้ค่าสัดส่วนการแยกเพิ่มสูงขึ้นตามที่โครงข่ายสามารถรองรับ ตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนต้องมีค่าสัดส่วนการแยกขั้นต่ำคือ 1:64



รูปที่ 2.9 ตัวแยกแสง (ซ้าย) 1:4 และ (ขวา) 1:8

2.1.4 เครื่องโอเอ็นยู (Optical Network Unit, ONU)

เครื่องโอเอ็นยูทำหน้าที่เชื่อมต่อข้อมูลจากผู้ใช้บริการกลับไปยังสำนักงานศูนย์กลาง โดยจะส่งข้อมูลแสงขาขึ้นที่อัตราบิต 2.4883 Gb/s ความยาวคลื่น 1270 nm และรับข้อมูลแสงขาลงที่อัตราบิต 9.9532 Gb/s ความยาวคลื่น 1577 nm ในการทดลองนี้จะใช้บอร์ดประเมินผลอีกบอร์ดแทนที่เครื่องโอเอ็นยู เพื่อความสะดวกสำหรับควบคุมการรับส่งข้อมูลแสงของโมดูลรับส่ง บริษัท Huawei รุ่น XG-PON1-ONU-N1 (S/N RTX166-501) ดังแสดงในบทที่ 1 รูปที่ 1.3 (ขวา) โดยทุกองค์ประกอบภายในโมดูลรับส่งของเครื่องโอเอ็นยู ดังรูปที่ 2.10 จะเหมือนกับโมดูลรับส่งของเครื่องโอแอลที ตามที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 2.1.1

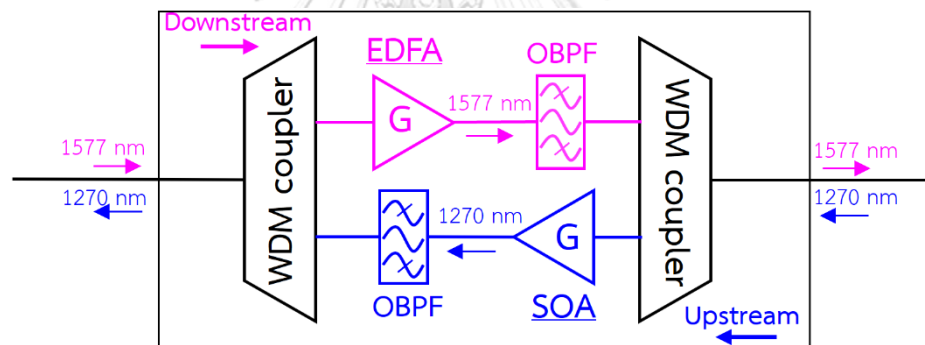


รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในโมดูลรับส่งของเครื่องไอเอ็นยู

2.2 อุปกรณ์ช่วยเพิ่มสมรรถนะโครงข่าย

2.2.1 ตัวขยายแสงสองทาง (Bidirectional Optical Amplifier)

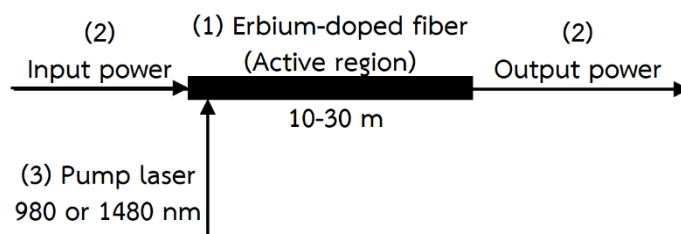
จากรูปที่ 2.11 ฝั่งขาหลังประกอบด้วยอีดีเอฟเอสำหรับขยายข้อมูลแสงที่อัตราบิต 9.9532 Gb/s และมีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ 1577 nm ฝั่งขาขึ้นประกอบด้วย เอสโอเอสำหรับขยายข้อมูลแสงที่อัตราบิต 2.4883 Gb/s และมีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ 1270 nm โดยตัวคู่ต่อดับเบิลยูดีเอ็มมีจำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่รวมและแยกทางเดินของแสงที่เข้ามาภายในตัวขยายแสงสองทาง



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบภายในตัวขยายแสงสองทาง

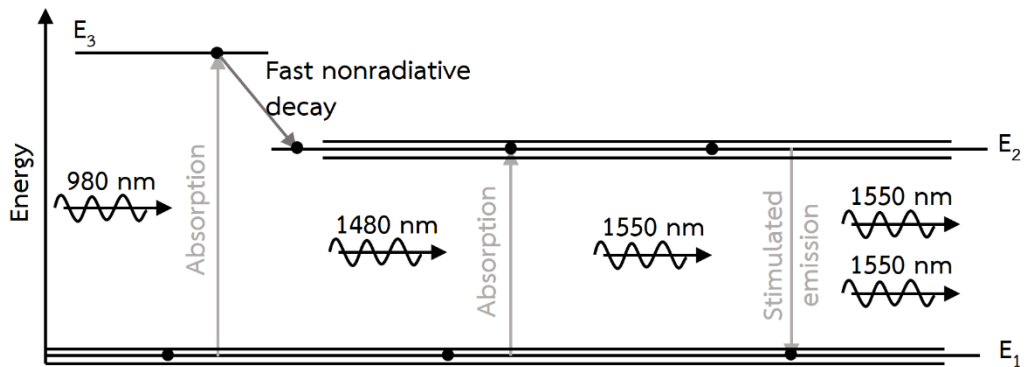
2.2.1.1 อีดีเอฟเอ (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)

โครงสร้างของอีดีเอฟเอ ดังรูปที่ 2.12 ประกอบด้วย (1) เส้นใยนำแสงที่เจือสารด้วยธาตุเออร์เบียม โดยทั่วไปมีความยาว 10 ถึง 30 m, (2) เส้นใยนำแสงสำหรับนำแสงเข้า-ออกอีดีเอฟเอ, (3) เลเซอร์ปั๊มมีความยาวคลื่นแสง 980 หรือ 1480 nm



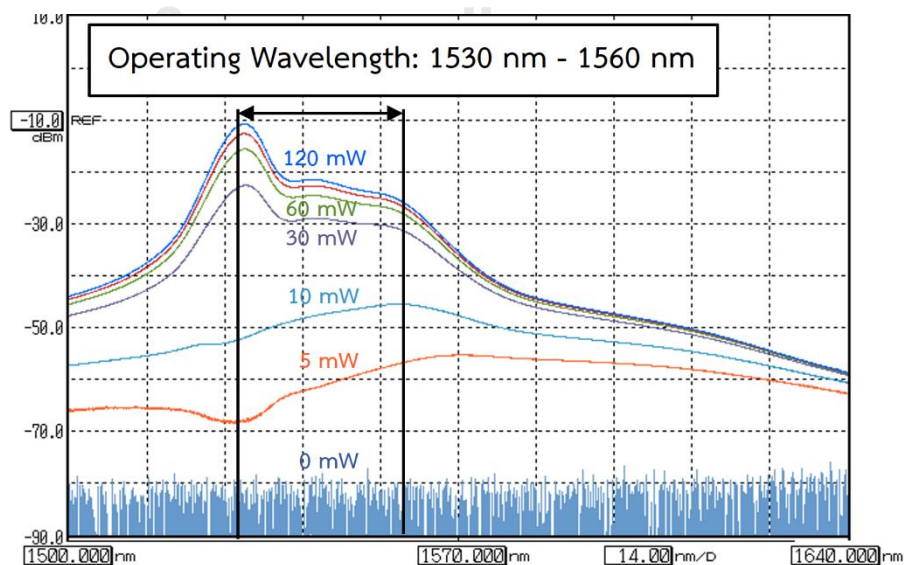
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอีดีเอฟเอ [15]

หลักการทำงานของอีดีเอฟเอคือรับสัญญาณแสงเข้ามาในเส้นใยนำแสงที่เจือสาร และรับแสงจากเลเซอร์ปั๊มความยาวคลื่น 980 หรือ 1480 nm เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนของเออร์เบียมให้เปลี่ยนระดับชั้นพลังงานสูงขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานลงมาอยู่ชั้นเดิม จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีความยาวคลื่นแสงในช่วงแถบความถี่ซี กลายเป็นสัญญาณแสงขาออกที่มีกำลังแสงสูงขึ้น ตามรูปที่ 2.13



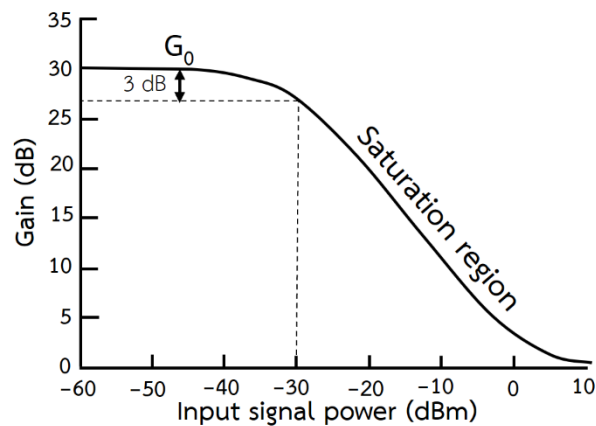
รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของอีดีเอฟเอ [13]

ตัวอย่างโพรไฟล์สเปกตรัม (Spectrum Profile) ของสัญญาณแสงขาออกจากอีดีเอฟเอ ซึ่งตั้งค่ากระแสปั๊ม (Pump Current) ที่แตกต่างกัน มีลักษณะทั่วไปตามรูปที่ 2.14 จะสังเกตเห็นว่าความสูงของชั้นสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ของอีดีเอฟเอ หรือเรียกว่าสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE Noise) แปรผันตามกระแสปั๊มที่จ่ายให้อีดีเอฟเอ และอยู่ในช่วงความยาวคลื่นใช้งานคือ 1530 ถึง 1560 nm โดยความยาวคลื่น 1530 nm มีอัตราการขยายสูงที่สุด



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างโพรไฟล์สเปกตรัมของชั้นสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ

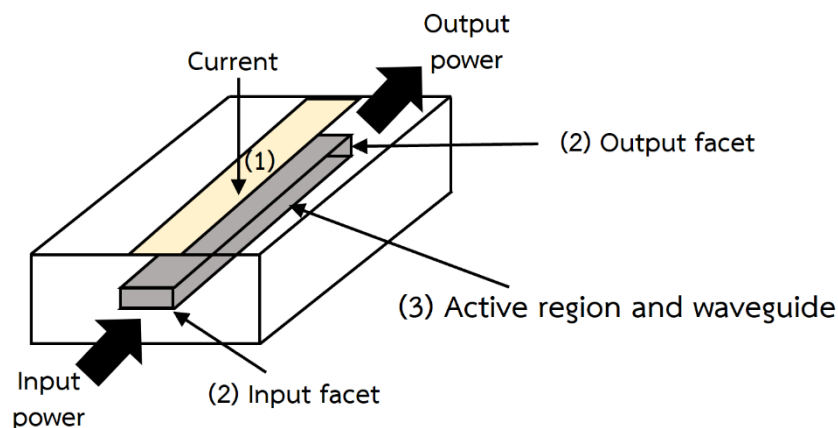
อัตราการขยายของตัวขยายแสงเปรียบเทียบกับกำลังแสงขาเข้ามีลักษณะตามรูปที่ 2.15 โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงอิ่มตัว (Saturation Range) และช่วงอัตราการขยายสัญญาณขนาดเล็ก แสดงด้วยตัวแปร G_0 ในช่วงอิ่มตัวจะมีกำลังแสงขาเข้าสูงกว่าและได้อัตราการขยายแปรผกผันกับกำลังแสงขาเข้า แต่ช่วงอัตราการขยายสัญญาณขนาดเล็กจะมีอัตราการขยายเข้าใกล้ค่าสูงสุดคือ G_0



รูปที่ 2.15 อัตราการขยายของตัวขยายแสงเปรียบเทียบกับกำลังแสงขาเข้า [13]

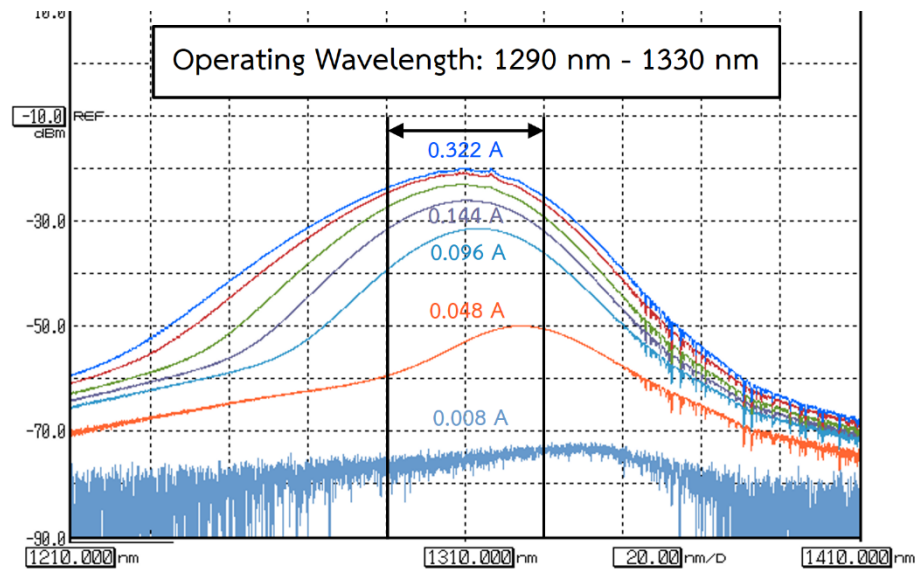
2.2.1.2 เอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)

โครงสร้างของเอสโอเอประกอบด้วย (1) แอปโโลหะสำหรับรองรับกระแสขับ, (2) ด้านขาเข้า-ขาออก (Input-Output Facets), และ (3) บริเวณแอ็กทีฟทำหน้าที่เป็นท่อนำคลื่น ตามรูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเอสโอเอคือ จ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำในบริเวณแอ็กทีฟให้เปลี่ยนระดับชั้นพลังงานสูงขึ้น เมื่อรับสัญญาณแสงขาเข้ามาในบริเวณแอ็กทีฟ อิเล็กตรอนจะลดระดับพลังงานลงมาอยู่ชั้นเดิมแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ที่มีความยาวคลื่นแสงตรงกับสัญญาณแสงขาเข้า อัตราการขยายของเอสโอเอจะเปลี่ยนค่าอย่างมากเมื่ออุณหภูมิและโพลาริเซชันของแสงขาเข้าเปลี่ยนไป



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเอสโอเอ [16]

ตัวอย่างโพรไฟล์สเปกตรัมของชั้นสัญญาณรบกวนจากเอสโอเอ เมื่อตั้งค่ากระแสปั๊มที่ต่างกัน จะมีลักษณะทั่วไปตามรูปที่ 2.17 ในกรณีนี้เอสโอเอถูกเจือสารให้ทำงานในช่วงความยาวคลื่น 1290 ถึง 1330 nm โดยมีค่าอัตราการขยายสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 1310 nm สังเกตได้ว่าระดับความสูงของชั้นสัญญาณรบกวนจะแปรผันตามกระแสปั๊มที่จ่ายให้เอสโอเอ



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโพรไฟล์สเปกตรัมของชั้นสัญญาณรบกวนของเอสโอเอ

2.2.1.3 ตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสง (Optical Band Pass Filter, OBPF)

ตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงทำหน้าที่กรองแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวน โดยสามารถออกแบบให้ทำงานได้ทุกช่วงความยาวคลื่น จากมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ช่วงความยาวคลื่นกลางและขาขึ้น คือ 1575 ถึง 1580 nm และ 1260 ถึง 1280 nm ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้องเลือกความกว้างของแถบความถี่ผ่านแสงให้กว้างประมาณ 20 nm

2.2.1.4 ตัวคู่ต่อดับเบิ้ลยูดีเอ็ม

ตัวคู่ต่อดับเบิ้ลยูดีเอ็มมีหลักการการทำงานเหมือนที่อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2

2.2.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน

เนื่องจากอัตราการขยายของเอสโอเอจะเปลี่ยนแปลงตามสถานะของโพลาไรเซชันของแสงขาเข้า เพราะฉะนั้นก่อนที่แสงจะเข้าเอสโอเอจำเป็นต้องถูกปรับโพลาไรเซชันให้เหมาะสม เพื่อให้เอสโอเอทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทั่วไปตัวควบคุมโพลาไรเซชันประกอบด้วยแผ่นครึ่งคลื่น (Half Wave Plate, HWP) และแผ่นหนึ่งในสี่คลื่น (Quarter Wave Plate, QWP) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 การหมุนแผ่นทั้งสองจะช่วยปรับสถานะของโพลาไรเซชันของแสงขาเข้าเอสโอเอ ให้ตรงกับของบริเวณแอกทิฟซึ่งมีหน้าที่เป็นท่อนำคลื่น จะทำให้ได้อัตราการขยายสูงสุด



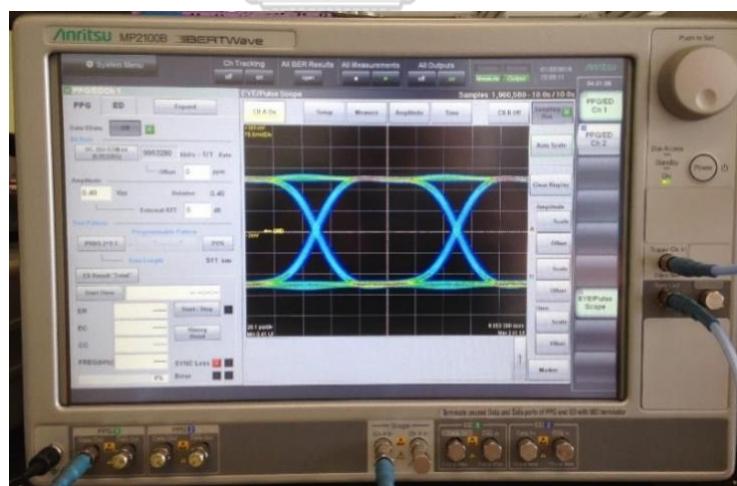
รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมโพลาริเซชัน

2.3 เครื่องมือวัดผลการทดลอง

2.3.1 ชุดเครื่องมือวัดอัตราความผิดพลาดบิต (BERT) และแผนภาพรูปตา (Eye Diagram)

2.3.1.1 เครื่อง BERTWave

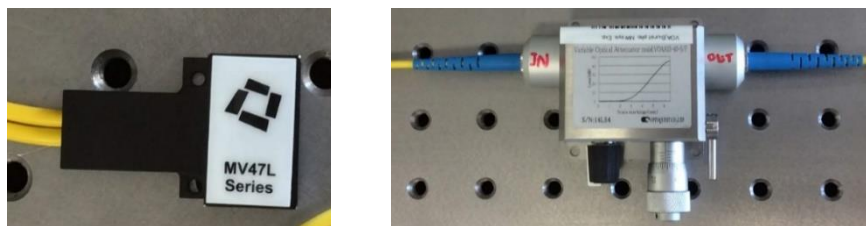
ในรูปที่ 2.19 เครื่อง BERTWAVE รุ่น MP2100B ของบริษัท Anritsu ทำหน้าที่สร้างและรับสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้า โดยสามารถรับสัญญาณไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ (1) รับสัญญาณด้วยตัวตรวจหาความผิดพลาด (Error Detector) เพื่อนำไปตรวจนับจำนวนบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นในข้อมูลที่รับเข้ามาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ส่งออกไป, และ (2) รับสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อแสดงแผนภาพรูปตาสำหรับใช้วิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณ ในการทดลองนี้ สัญญาณไฟฟ้าจะได้รับมาจากบอร์ดประเมินผลที่เสียบโมดูลรับส่งหรือตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นในหัวข้อ 2.3.1.3



รูปที่ 2.19 BERTWave รุ่น MP2100B ของบริษัท Anritsu

2.3.1.2 ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA)

ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ทำหน้าที่ลดทอนกำลังแสงที่จะเข้าอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตและแผนภาพรูปตาตามที่ต้องการ ในรูปที่ 2.20 เป็นตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ที่ใช้ในการทดลอง โดยรูปซ้ายเป็นของบริษัท JDSU รุ่น MV47L ส่วนรูปขวาเป็นของบริษัท Optoquest



รูปที่ 2.20 ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ (ซ้าย) บริษัท JDSU และ (ขวา) บริษัท Optoquest

2.3.1.3 ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็น (pin Photodetector)

ในรูปที่ 2.21 ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็น รุ่น XPDV2320R ของบริษัท Finisar ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณข้อมูลแสงและแปลงเป็นสัญญาณข้อมูลไฟฟ้า ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.1.1.3 อุปกรณ์ตัวนี้จะแตกต่างจากตัวตรวจจับแสงที่อยู่ภายในโมดูลรับส่ง เพราะไม่มีตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดใด ๆ รวมอยู่ภายในอุปกรณ์ด้วย ดังนั้นสัญญาณข้อมูลไฟฟ้าขาออกจะมีสัญญาณรบกวนปะปนมาน้อยกว่าสัญญาณที่ได้จากโมดูลรับส่ง ซึ่งช่วยให้วิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณได้ดีขึ้น

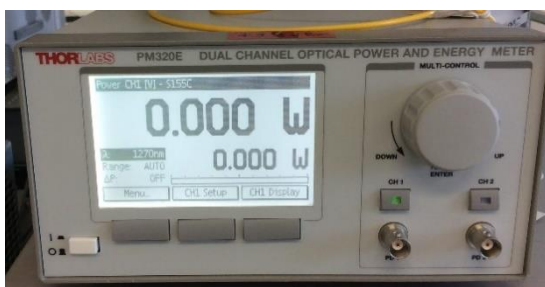


รูปที่ 2.21 ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็น รุ่น XPDV2320R ของบริษัท Finisar

2.3.2 ชุดเครื่องมือวัดแสง (Optical Measuring Instruments)

2.3.2.1 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter)

ในรูปที่ 2.22 มิเตอร์วัดกำลังแสง รุ่น PM320E ของบริษัท Thorlab มีตัวตรวจจับแสง รุ่น S155C ต่ออยู่ด้านท้ายเครื่อง ซึ่งสามารถตรวจจับแสงในช่วงความยาวคลื่น 800 ถึง 1700 nm และสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการวัดได้



รูปที่ 2.22 มิเตอร์วัดกำลังแสง รุ่น PM320E ของบริษัท Thorlab

2.3.2.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA)

ในรูปที่ 2.23 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง รุ่น AQ6370D ของบริษัท Yokogawa หลักการทำงานคือวัดกำลังแสงในช่วงแคบ ๆ โดยใช้ตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงชนิดแคบ (Narrow Optical Band Pass Filter) แล้วแสดงกำลังแสงที่วัดได้เป็นจุดเล็ก ๆ ในแกนแนวตั้ง จากนั้นขยับตัวกรองไปตามความยาวคลื่นในแกนแนวนอน พร้อมวัดค่ากำลังแสงจะได้จุดแสดงผลอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถมองเห็นโปรไฟล์สเปกตรัมของสัญญาณแสงได้



รูปที่ 2.23 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง รุ่น AQ6370D ของบริษัท Yokogawa

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แบ่งเป็น 3 หัวข้อสำคัญ ดังนี้

- (1) พารามิเตอร์ของตัวขยายแสงใช้เพื่อศึกษาตัวขยายแสงสองทาง ทำให้เข้าใจคุณสมบัติและขีดความสามารถของการทำงาน ก่อนนำไปแทรกในโครงข่าย
- (2) ผลกระทบที่สำคัญของอุปกรณ์ในโครงข่ายใช้เพื่อศึกษาโครงข่าย ทำให้เข้าใจถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ
- (3) การวิเคราะห์ขีดจำกัดและคุณภาพของโครงข่าย ด้วยแผนภาพรูปตาและค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)

3.1 พารามิเตอร์ของตัวขยายแสง

ตัวขยายแสงมี 5 พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ (1) ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range), (2) อัตราการขยาย (Gain), (3) ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF), (4) ความสูญเสียขึ้นอยู่กับการโพลาไรเซชัน (Polarization Dependent Loss, PDL), และ (5) การใช้กำลังไฟฟ้า (Power Consumption)

3.1.1 ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน (Operating Wavelength Range)

คือช่วงความยาวคลื่นที่ตัวขยายแสงสามารถขยายกำลังแสงขาเข้าได้ ในการทดลองจะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงวัดโพรไฟล์สเปกตรัมขาออกตัวขยายแสง โพรไฟล์สเปกตรัมของอีดีเอฟเอและเอสโอเอมีลักษณะดังแสดงในบทที่ 2 รูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.17 ตามลำดับ

3.1.2 อัตราการขยาย (Gain)

อัตราการขยายในหน่วย dB คือผลต่างของกำลังแสงที่ออกกับเข้าตัวขยายแสงในหน่วย dBm หาได้จากสมการที่ (3.1) [13] เมื่อนำมาวาดกราฟจะเป็นดังบทที่ 2 รูปที่ 2.15 ซึ่งช่วงอัตราการขยายสัญญาณขนาดเล็ก (G_0) มีขนาดคงที่และใกล้เคียงค่าสูงสุด

$$G_{dB} = P_{out_dBm} - P_{in_dBm} \quad \text{และ} \quad G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.1)$$

โดยที่	G_{dB}	คือ อัตราการขยาย (dB)
	P_{out_dBm}	คือ กำลังแสงขาออก (dBm)
	P_{in_dBm}	คือ กำลังแสงขาเข้า (dBm)
	G	คือ อัตราการขยาย (เท่า)
	P_{out}	คือ กำลังแสงขาออก (W)
	P_{in}	คือ กำลังแสงขาเข้า (W)

3.1.3 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF)

เป็นอัตราส่วนเอสเอ็นอาร์ (Signal-to-Noise Ratio, SNR) เข้าต่อเอสเอ็นอาร์ออกตัวขยายแสง (SNR_{in}/SNR_{out}) โดยสัญญาณขาเข้าและออกตัวขยายแสงหาจากสมการที่ (3.2) [13, 16, 17]

$$i_{Sig}^2 = (\mathfrak{R}P_r)^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ i_{Sig}^2 คือ สัญญาณซึ่งเกิดจากกำลังแสงที่ตัวตรวจจับแสงรับได้ (A^2)
 \mathfrak{R} คือ ค่าการตอบสนอง (Responsivity) ของตัวตรวจจับแสง (A/W)
 P_r คือ กำลังแสงของสัญญาณที่ตัวตรวจจับแสงรับได้ (W)
 ค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับแสงหาได้จากสมการที่ (3.3) [13]

$$\mathfrak{R} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (3.3)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency)
 q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน เท่ากับ 1.602×10^{-19} (C)
 h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ เท่ากับ 6.626×10^{-34} (J·s)
 ν คือ ความถี่แสง (Hz)
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง (m)
 c คือ ความเร็วแสง เท่ากับ 2.998×10^8 (m/s)

สัญญาณรบกวนมีทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย (1) สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณ (Signal Quantum Noise), (2) สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (ASE Quantum Noise), (3) สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Signal-ASE Noise), (4) สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี (ASE-ASE Noise), และ (5) สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise)

3.1.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณ (Signal Quantum Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมมีลักษณะเป็นการกระจายทางสถิติ ซึ่งเกิดขึ้นจากการนำไฟฟ้าด้วยประจุวิฤต (Discrete Charge) ในขณะที่แสงตกกระทบบนตัวตรวจจับแสง สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณหาได้จากสมการที่ (3.4) [13, 16, 17]

$$\sigma_{Q_Sig}^2 = 2q(\mathfrak{R}P_r)B_e \quad (3.4)$$

โดยที่ $\sigma_{Q_Sig}^2$ คือ สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณ (A^2)
 B_e คือ แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า (Hz) ของตัวรับ

3.1.3.2 สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (ASE Quantum Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี เกิดขึ้นจากชั้นสัญญาณรบกวนที่ตัวขยายแสงสร้างขึ้น หาได้จากสมการที่ (3.5) [13, 16, 17]

$$\sigma_{Q_ASE}^2 = 2q[\Re(MS_{ASE}B_o)]B_e \quad (3.5)$$

โดยที่	$\sigma_{Q_ASE}^2$	คือ สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)
	M	คือ จำนวนโหมดโพลาริเซชันของสัญญาณรบกวนเอเอสอี ($M = 2$ สำหรับการส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดียวมาตรฐาน)
	S_{ASE}	คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (W/Hz)
	B_o	คือ แบนด์วิดท์ทางแสง (Hz) ของตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสง

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีหาได้จากสมการที่ (3.6) [13, 16, 17]

$$S_{ASE} = \frac{P_{ASE}}{M \times Res} \quad (3.6)$$

โดยที่	P_{ASE}	คือ กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (W)
	Res	คือ แบนด์วิดท์ความละเอียดแสง (Optical Resolution Bandwidth) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Hz)

เนื่องจากการคำนวณบางสมการ ต้องใช้แบนด์วิดท์หรือช่วงความถี่แสงในหน่วย Hz เช่น B_o แต่ค่าที่ได้จากการวัดจริงจะเป็นช่วงความยาวคลื่นแสงในหน่วย m แทน ดังนั้นจึงต้องใช้สูตรตั้งสมการที่ (3.7) [13] เพื่อเปลี่ยนหน่วย

$$|\Delta\nu| = \left(\frac{c}{\lambda^2}\right)|\Delta\lambda| \quad (3.7)$$

โดยที่	$\Delta\nu$	คือ ช่วงความถี่แสง (Hz)
	$\Delta\lambda$	คือ ช่วงความยาวคลื่นแสง (m)

3.1.3.3 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Signal-ASE Noise)

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณแสงขาออก ปัดกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีของตัวขยายแสง หาได้จากสมการที่ (3.8) [13, 16, 17]

$$\sigma_{Sig-ASE}^2 = 4(\Re P_r)(\Re S_{ASE})B_e \quad (3.8)$$

โดยที่	$\sigma_{Sig-ASE}^2$	คือ สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)
--------	----------------------	---

3.1.3.4 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี (ASE-ASE Noise)

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี เกิดจากการปิดกันของสัญญาณรบกวนเอเอสอี ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนนี้ขึ้น หาได้จากสมการที่ (3.9) [13, 16, 17]

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = M\Re^2 S_{ASE}^2 (2B_o - B_e)B_e \quad (3.9)$$

โดยที่	$\sigma_{ASE-ASE}^2$	คือ สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี (A^2)
--------	----------------------	--

3.1.3.5 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise)

สัญญาณรบกวนจากความร้อนเกิดจากความต้านทานที่มีอยู่ในทุกวงจรไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวตรวจจับแสงจะต่อคู่กับตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าก็สร้างสัญญาณรบกวนจาก

ความร้อนเช่นกันแต่มีค่าสูงกว่ามาก สัญญาณรบกวนจากความร้อนจากความต้านทานโหลด คำนวณได้ดังสมการที่ (3.10) [13, 17]

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} B_e \quad (3.10)$$

โดยที่ σ_T^2 คือ สัญญาณรบกวนจากความร้อน (A^2)
 k_B คือ ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ เท่ากับ 1.381×10^{-23} (J/K)
 T คือ อุณหภูมิเคลวิน (K)
 R_L คือ ความต้านทานโหลด (Ω)

เอสเอ็นอาร์ที่ตำแหน่งขาเข้าของตัวขยายแสงหาได้จากสมการที่ (3.11) [13]

$$SNR_{in} = \frac{i_{Sig_in}^2}{\sigma_{Q_Sig_in}^2 + \sigma_T^2} \quad (3.11)$$

โดยที่ SNR_{in} คือ เอสเอ็นอาร์ที่ตำแหน่งขาเข้าของตัวขยายแสง (เท่า)
 $i_{Sig_in}^2$ คือ สัญญาณขาเข้า (A^2) โดยที่ $i_{Sig_in} = \Re P_{in}$
 $\sigma_{Q_Sig_in}^2$ คือ สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณขาเข้า (A^2)

เอสเอ็นอาร์ที่ตำแหน่งขาออกของตัวขยายแสงหาได้จากสมการที่ (3.12) [13]

$$SNR_{out} = \frac{i_{Sig_out}^2}{\sigma_{Q_Sig_out}^2 + \sigma_{Q_ASE}^2 + \sigma_{Sig_out-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2 + \sigma_T^2} \quad (3.12)$$

โดยที่ SNR_{out} คือ เอสเอ็นอาร์ที่ตำแหน่งขาออกของตัวขยายแสง (เท่า)
 $i_{Sig_out}^2$ คือ สัญญาณขาออก (A^2) โดยที่ $i_{Sig_out} = \Re GP_{in}$
 $\sigma_{Q_Sig_out}^2$ คือ สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณขาออก (A^2)
 $\sigma_{Sig_out-ASE}^2$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี (A^2)

ในท้ายที่สุดตัวเลขสัญญาณรบกวนในหน่วย dB หาได้จากสมการที่ (3.13) [13]

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right) \quad (3.13)$$

โดยที่ NF_{dB} คือ ตัวเลขสัญญาณรบกวน (dB)

เนื่องจากข้อจำกัดในการวัดตัวเลขสัญญาณรบกวนด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็นในหัวข้อที่ 2.3.1.3 ซึ่งมีค่าการตอบสนองต่ำ ทำให้สัญญาณรบกวนจากความร้อนมีความรุนแรงเหนือกว่าสัญญาณรบกวนอื่น และวิทยานิพนธ์นี้ต้องการวัดค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวขยายแสงเท่านั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกคำนวณค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงแทน โดยรวมสมการที่ (3.1) ถึง (3.13) อีกทั้งกำหนดให้ไม่มีผลของสัญญาณรบกวนจากความร้อนในวงจรไฟฟ้าและแบนด์วิดท์ทางแสงมากกว่าแบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า ($B_o \gg B_e$) จะได้สมการที่ (3.14) สำหรับนำไปคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอและเอสไอเอ (อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก)

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{1}{G} + \frac{P_{ASE} B_o}{G^2 P_{in} Res} + \frac{2\eta\lambda P_{ASE}}{hcMResG} + \frac{\eta\lambda P_{ASE}^2 B_o}{hcMRes^2 G^2 P_{in}} \right) \quad (3.14)$$

สำหรับฝั่งขวามือของสมการที่ (3.14) พจน์แรกคือสัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณขาออก ($\sigma_{Q_Sig_out}^2$) พจน์ที่สองคือสัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี ($\sigma_{Q_ASE}^2$) พจน์ที่สามคือสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี ($\sigma_{Sig_out-ASE}^2$) และพจน์ที่สี่คือสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี ($\sigma_{ASE-ASE}^2$)

3.1.4 ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน (Polarization Dependent Loss, PDL)

ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันคือผลต่างระหว่างกำลังสูงสุดกับกำลังต่ำสุดที่ออกมาจากตัวขยายแสง เมื่อปรับโพลาไรเซชันของสัญญาณขาเข้าไปให้ครบทุกสถานะด้วยตัวควบคุมโพลาไรเซชัน คำนวณได้จากสมการที่ (3.15) [16]

$$PDL_{dB} = P_{max_out_dBm} - P_{min_out_dBm} \quad (3.15)$$

โดย PDL_{dB} คือ ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน (dB)
 $P_{max_out_dBm}$ คือ ค่ากำลังแสงขาออกสูงที่สุด (dBm)
 $P_{min_out_dBm}$ คือ ค่ากำลังแสงขาออกต่ำที่สุด (dBm)

3.1.5 การใช้กำลังไฟฟ้า (Power Consumption)

การใช้กำลังไฟฟ้าคือกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวขยายแสงทำงาน หาได้จากสมการที่ (3.16)

$$\text{Power consumption} = V \times I \quad (3.16)$$

โดย Power consumption คือ การใช้กำลังไฟฟ้า (W)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

3.2 ผลกระทบที่สำคัญของอุปกรณ์ในโครงข่าย

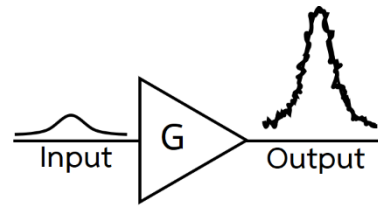
ผลกระทบที่สำคัญมี 4 ส่วน คือ (1) ผลกระทบของตัวขยายแสงและตัวแยกแสง, (2) ผลกระทบของตัวรับ, (3) ผลกระทบของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน, และ (4) ผลกระทบของตัวส่งและเอสไอเอ

3.2.1 ผลกระทบของตัวขยายแสงและตัวแยกแสง

3.2.1.1 ผลกระทบของตัวขยายแสง

ตัวขยายแสงจะขยายสัญญาณและเพิ่มสัญญาณรบกวนเอเอสอีเข้ามาในโครงข่าย จากรูปที่

3.1 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณขาออกถูกขยายด้วยตัวขยายแสงและเพิ่มสัญญาณรบกวนเอเอสอีด้วย



รูปที่ 3.1 สัญญาณถูกขยายด้วยตัวขยายแสง

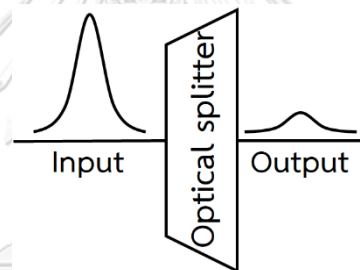
3.2.1.2 ผลกระทบของตัวแยกแสง

ตัวแยกแสงทำให้เกิดกำลังสูญเสียแทรก (Insertion Loss, IL) ขึ้นภายในโครงข่าย กำลังสูญเสียแทรกของตัวแยกแสงหาได้จากสมการที่ (3.17) จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณขาออก ถูกลดขนาดด้วยตัวแยกแสง

$$IL = 3 \log_2 (\text{splitting ratio}) \quad (3.17)$$

โดยที่ IL คือ กำลังสูญเสียแทรก (dB)

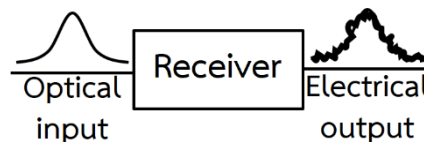
splitting ratio คือ ค่าสัดส่วนการแยก ได้แก่ 2, 4, 8,...



รูปที่ 3.2 สัญญาณถูกลดขนาดด้วยตัวแยกแสง

3.2.2 ผลกระทบของตัวรับ

ตัวรับประกอบด้วยตัวตรวจจับแสงและตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.1.3 ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นในโครงข่าย ตามที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1.3.1 ถึง 3.1.3.5 และสัญญาณรบกวนจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สัญญาณรบกวนถูกเพิ่มเข้ามาในสัญญาณ

สำหรับโครงข่ายที่มีตัวขยายแสง จำเป็นต้องใช้โอเอสเอ็นอาร์ (Optical SNR, OSNR) ตามสมการที่ (3.18) [13] สำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่าย

$$OSNR_{dB} = 10 \log \left[\frac{P_{out}}{P_{ASE}} \right] \text{ และ } OSNR = \frac{P_{out}}{P_{ASE}} \quad (3.18)$$

โดยที่ $OSNR_{dB}$ คือ โอเอสเอ็นอาร์ (dB)

เมื่อรวมสมการที่ (3.14) และ (3.18) จะได้ความสัมพันธ์ของโอเอสเอ็นอาร์ตัวเลขสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (3.19) สำหรับวิเคราะห์ตัวเลขสัญญาณรบกวนด้วยโอเอสเอ็นอาร์ (อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก) แบบควิตต์ความละเอียดแสงเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่เหมาะสมสำหรับการวัดโอเอสเอ็นอาร์คือ 0.1 nm

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{1}{G} + \frac{2}{G} \frac{B_o/2Res}{OSNR} + \frac{2\eta\lambda}{hcMRes} \frac{P_{in}}{OSNR} + \frac{2\eta\lambda}{hcMRes} \frac{P_{in}}{OSNR} \frac{B_o/2Res}{OSNR} \right) \quad (3.19)$$

3.2.3 ผลกระทบของเส้นใยนำแสงโหมดเดียวมาตรฐาน

ผลกระทบของเส้นใยนำแสงสามารถแสดงด้วยสมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Schrödinger Equation) ดังสมการที่ (3.20) [18] สำหรับฝั่งขวามือ พจน์แรกคือการลดทอนในเส้นใยนำแสง พจน์ที่สองคือโครมาติกดิสเพอร์ชัน และพจน์สุดท้ายคือผลกระทบไม่เชิงเส้น โดยวิทยานิพนธ์นี้ไม่สนใจผลกระทบไม่เชิงเส้น เนื่องจากมีค่าน้อยมาก

$$\frac{\partial A(t, z)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A(t, z) - \frac{j\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(t, z)}{\partial t^2} + j\gamma |A(t, z)|^2 A(t, z) \quad (3.20)$$

โดยที่ $A(t, z)$ คือ ขนาดเชิงซ้อนของสัญญาณพัลส์

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสง (dB/km)

β_2 คือ พารามิเตอร์ดิสเพอร์ชันของความเร็วกลุ่ม (ps^2/km)

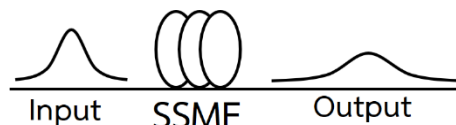
γ คือ พารามิเตอร์ไม่เชิงเส้น ($1/W \cdot km$)

พารามิเตอร์ดิสเพอร์ชันของความเร็วกลุ่มหาได้จากสมการที่ (3.21) [13]

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (3.21)$$

โดยที่ D คือ โครมาติกดิสเพอร์ชัน ($ps/(nm \cdot km)$)

ผลกระทบที่เกิดจากการลดทอนในเส้นใยนำแสงจะเหมือนกับรูปที่ 3.2 และผลจากโครมาติกดิสเพอร์ชันจะเป็นดังรูปที่ 3.4 เมื่อโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่ามาก สัญญาณจะถ่างออกมาก

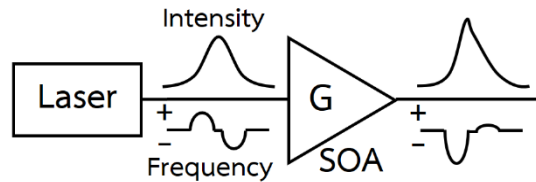


รูปที่ 3.4 สัญญาณที่ถ่างออกเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน

3.2.4 ผลกระทบของตัวส่งและเอสไอเอ

ตัวส่งประกอบด้วยตัวขับเลเซอร์และเลเซอร์ ในบทที่ 2 ตามหัวข้อที่ 2.1.1.1 โดยผลกระทบของตัวส่งเกิดจากวิธีมอดูเลตโดยตรง ซึ่งจะทำให้เลเซอร์เกิดผลกระทบที่เรียกว่า เชิร์ป (Chirp) และ

เอสโอเอที่มีโครงสร้างเหมือนเลเซอร์ก็ทำให้เกิดเซิร์ปเช่นกัน เซิร์ปของเลเซอร์และเอสโอเอจะส่งผลต่อสัญญาณในรูปความถี่เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่เครื่องหมายของความถี่ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากเซิร์ป [19]

เซิร์ปของเลเซอร์หาได้จากสมการที่ (3.22) [20]

$$C_{Laser} = -\frac{\text{Re}(n)}{\text{Im}(n)} \quad (3.22)$$

โดยที่ C_{Laser} คือ พารามิเตอร์เซิร์ปของเลเซอร์ มีค่าระหว่าง 2 ถึง 8 [20]

n คือ ดรรชนีหักเหแสงในโครงสร้างของเลเซอร์

เซิร์ปของเอสโอเอหาได้จากสมการที่ (3.23) [19]

$$C_{SOA} = C_{Laser} \frac{\left(\frac{dG_{dB}}{dP_{in_dBm}} \right)}{1 + \left(\frac{dG_{dB}}{dP_{in_dBm}} \right)} \quad (3.23)$$

โดยที่ C_{SOA} คือ พารามิเตอร์เซิร์ปของเอสโอเอ

3.3 การวิเคราะห์ขีดจำกัดและคุณภาพของโครงข่าย

เมื่อออกแบบโครงข่ายจำเป็นต้องคำนวณหาขีดจำกัดก่อนเสมอ เพื่อให้ทราบว่าคุณสมบัติเป็นข้อจำกัดของโครงข่าย เมื่อทดลองจริงจะวิเคราะห์คุณภาพด้วยอัตราความผิดพลาดบิตและแผนภาพรูปรูปตา เพื่อให้ทราบถึงปัญหาต่าง ๆ ในโครงข่าย

3.3.1 ขีดจำกัดของโครงข่าย

การส่งสัญญาณในโครงข่ายมี 2 ผลกระทบหลักคือ (1) ผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณสามารถหาขีดจำกัดด้านระยะทางและสัดส่วนการแยกแสง ด้วยสมการงบกำลัง (Power Budget Equation) และ (2) ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณพัลส์ สามารถหาขีดจำกัดด้านระยะทางและอัตราบิตข้อมูลด้วยสมการงบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation)

3.3.1.1 สมการงบกำลัง (Power Budget Equation)

ก่อนจะเริ่มการทดลองต้องคำนวณสมการงบกำลัง ดังสมการที่ (3.24) [13] เนื่องจากเลเซอร์มีกำลังแสงส่งที่จำกัดคือ P_{S_dBm} และตัวตรวจจับแสงก็มีขีดความสามารถในการรับกำลังแสงต่ำสุดได้ระดับหนึ่งคือ P_{R_dBm} ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อแทรกตัวขยายแสงในโครงข่าย โดยทั่วไปผลต่างระหว่างกำลังแสงสองค่านี้คือ P_{T_dB} ซึ่งต้องนำมาจัดสรรให้เหมาะสมในการออกแบบโครงข่ายเพื่อให้

ได้ระยะทางไกลและจำนวนผู้ใช้บริการมากที่สุด เมื่อค่า P_{T_dB} ไม่เพียงพอ สามารถเพิ่มตัวขยายแสงเข้าไปในโครงข่ายได้ โดยอัตราการขยายคือ G_{dB} แทรกเข้าไปในสมการ โดยจะพิจารณาจัดสรรกำลังให้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ (1) การลดทอนในเส้นใยนำแสง, (2) กำลังสูญเสียแทรกของตัวแยกแสง, และ (3) กำลังเผื่อของระบบ (system margin) เป็นค่าคงที่ เช่น 6 dB สำหรับเผื่อไว้ให้อุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายยังคงทำงานได้ตามปกติถึงแม้ว่ากำลังแสงจะลดหายไป 6 dB

$$P_{T_dB} = (P_{S_dBm} - P_{R_dBm}) + G_{dB} = \alpha L + IL + \text{system margin} \quad (3.24)$$

โดยที่ P_{T_dB}	คือ งบกำลังของโครงข่าย (dB)
P_{S_dB}	คือ กำลังแสงส่งจากเลเซอร์ (dBm)
P_{R_dB}	คือ กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวตรวจจับแสงรับได้ (dBm)
α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสง (dB/km)
L	คือ ระยะทางของเส้นใยนำแสง (km)
system margin	คือ กำลังเผื่อของระบบ (dB)

3.3.1.2 สมการงบประมาณเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation)

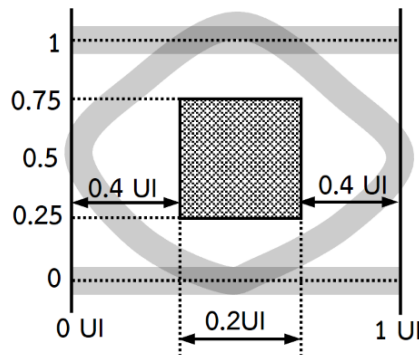
สมการงบประมาณเวลาขาขึ้นหาได้จากสมการที่ (3.25) [13] ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกระยะทางของเส้นใยนำแสงไว้ที่ 20 km ซึ่งเป็นระยะทางขั้นต่ำที่มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนกำหนดไว้ อีกทั้งค่าอัตราบิดข้อมูลก็เป็นตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่คำนวณสมการงบประมาณเวลาขาขึ้นเพื่อหาขีดจำกัดของโครงข่ายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณพัลส์ เพราะโมดูลรับส่งที่ใช้สามารถทำงานได้ตามมาตรฐาน

$$t_{\text{sys}} = \left(\sum_{i=1}^N t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

โดยที่ t_{sys}	คือ เวลาขาขึ้นทั้งหมดของโครงข่าย
N	คือ จำนวนอุปกรณ์ในโครงข่าย
t_i	คือ เวลาขาขึ้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโครงข่าย

3.3.2 คุณภาพของโครงข่าย

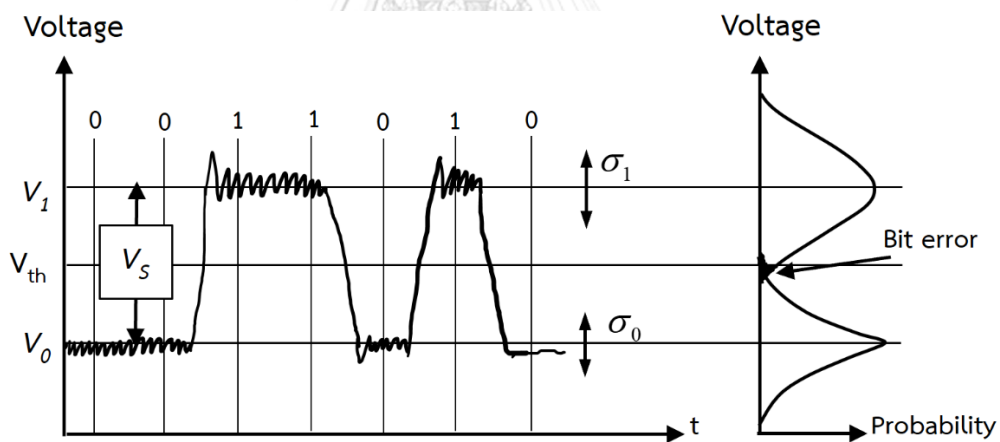
วิทยานิพนธ์นี้จะใช้แผนภาพรูปตาและอัตราความผิดพลาดบิตในการวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่าย โดยแผนภาพรูปตาเกิดจากการซ้อนทับกันของหลายๆ รูปคลื่น แผนภาพรูปตาสามารถแสดงผลกระทบจากอุปกรณ์ต่าง ๆ และทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตได้ ซึ่งมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนนั้นมีหน้ากาก (mask) ของแผนภาพรูปตา ดังรูปที่ 3.6 โดยที่ UI (Unit Interval) คือหนึ่งคาบบิต อัตราความผิดพลาดบิตเป็นการวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงในโครงข่าย ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมักถูกนำมาวาดกราฟ โดยการควบคุมกำลังแสงที่เข้าตัวตรวจจับแสง เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายที่เกิดจากผลกระทบต่าง ๆ



รูปที่ 3.6 หน้ากากของแผนภาพรูปตาตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน [3]

3.3.2.1 แกนแนวตั้งของแผนภาพรูปตา

ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของแผนภาพรูปตา หาได้จากการวัดระดับแรงดันไฟฟ้า (V) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของบิต 1 และ 0 ดังรูปที่ 3.7 เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นก็คือผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในหัวข้อ 3.1.3 หลักการที่สำคัญของวิธีนี้คือกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิตเป็นการแจกแจงปกติ แล้วจึงคำนวณความผิดพลาดที่ข้าม V_{th} ไปอยู่ในอีกบิต อัตราความผิดพลาดบิตแสดงดังสมการที่ (3.26) [13]



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของแผนภาพรูปตากับค่าอัตราความผิดพลาดบิต [14]

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (3.26)$$

โดยที่ BER คือ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต

$\operatorname{erf}(x)$ คือ ฟังก์ชันค่าคลาดเคลื่อน

Q คือ พารามิเตอร์คิว

พารามิเตอร์คิวหาได้จากสมการที่ (3.27) [13]

$$Q = \frac{V_1 - V_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{V_s}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.27)$$

- โดยที่ V_1 คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของบิต 1 (V)
 V_0 คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของบิต 0 (V)
 σ_1 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 (V)
 σ_0 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 (V)
 V_S คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของบิต 1 กับ 0 (V)

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์คิวกับเอสเอ็นอาร์หาได้จากสมการที่ (3.28) [21]

$$Q = \frac{\sqrt{SNR_{P_r}}}{2} \quad (3.28)$$

- โดยที่ SNR_{P_r} คือ เอสเอ็นอาร์ที่ตำแหน่งขาเข้าตัวตรวจจับแสง (เท่า)
 เอสเอ็นอาร์ที่ตำแหน่งขาเข้าตัวตรวจจับแสงหาได้จากสมการที่ (3.29) [13]

$$SNR_{P_r} = \frac{(\mathfrak{R}P_r)^2}{\sigma_{Q-Sig}^2 + \sigma_{Q-ASE}^2 + \sigma_{Sig-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2 + \sigma_T^2} \quad (3.29)$$

เนื่องจากตัวรับภายในโมดูลรับส่ง บทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.1.3 ประกอบด้วยขยายสัญญาณไฟฟ้า ชนิดทรานซิสเตอร์และชนิดจำกัด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ไม่ทราบค่าความต้านทานโหลดของตัวขยาย สัญญาณไฟฟ้าทั้งสองชนิดนี้ ดังนั้นการคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากแผนภาพรูปตา จึงไม่คำนวณสัญญาณรบกวนจากความร้อน เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายผลการทดลอง วิทยานิพนธ์นี้จะนำสมการที่ (3.29) มาจัดรูปใหม่ ได้สมการที่ (3.30) (อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก)

$$P_r = \frac{\mathfrak{R} \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{B_o/2Res}{OSNR} \right) \right]}{q \left[\frac{1}{4B_e SNR_{P_r}} - \left(\frac{1}{MRes} \right) \left(\frac{1}{OSNR} \right) \left(1 + \frac{B_o/2Res}{OSNR} \right) \right]} \quad (3.30)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.26), (3.28), และ (3.30) สามารถสรุปได้ว่าเมื่อกำลังแสงของสัญญาณที่ตัวตรวจจับแสงรับได้หรือเอสเอ็นอาร์มีค่าเปลี่ยนแปลง จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน

การแก้ความผิดพลาดล่วงหน้า (Forward Error Correction) แบบรหัสรีดโซโลมอน (Reed Solomon, RS) ถูกนำมาใช้งานในมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน รหัสรีดโซโลมอนของโครงข่ายขาลงและขาขึ้น [22] คือ RS (248,216) และ RS (248,232) ตามลำดับ ซึ่งสามารถแก้อัตราความผิดพลาดบิตได้ดังตารางที่ 3.1

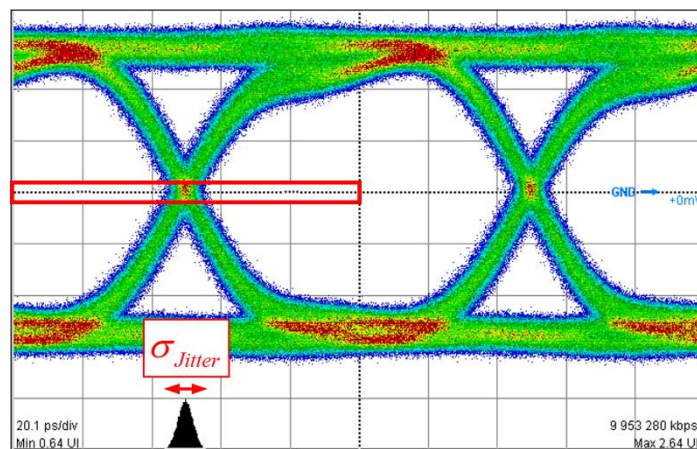
ตารางที่ 3.1 การแก้ความผิดพลาดบิตด้วยรหัสรีดโซโลมอน

	ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเข้า	
ค่าอัตราความผิดพลาดบิตออก = 10^{-12}	ขาลง, BER= 1.1×10^{-3}	ขาขึ้น, BER= 1.8×10^{-4}

จากตารางที่ 3.1 วิชยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์โครงข่ายขาลงและขาขึ้น ด้วยอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-3} และ 10^{-4} ตามลำดับ สำหรับมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนได้แนะนำให้วิเคราะห์โครงข่ายด้วยอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-6} ทั้งโครงข่ายขาลงและขาขึ้น

3.3.2.2 แกนแนวนอนของแผนภาพรูปตา

จากรูปที่ 3.6 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณเข้าไปอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลางรูป ซึ่งค่าที่วัดได้ในแกนแนวนอนของแผนภาพรูปตาคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหว (Jitter) วิธีการวัดค่าแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วิธีการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหวจากแผนภาพรูปตา

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหวสามารถคำนวณด้วยสมการประกอบการถ่างออก (Broadening Factor Equation) ตามสมการที่ (3.31) [18] ซึ่งวิธีการนี้จำเป็นต้องวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหวเริ่มต้นก่อนเสมอ จึงจะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้

$$\frac{\sigma_{Jitter}}{\sigma_{Jitter_0}} = \left[\left(1 - \frac{C\beta_2 L}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 L}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.31)$$

โดยที่ $\sigma_{Jitter} / \sigma_{Jitter_0}$ คือ ตัวประกอบการถ่างออก

σ_{Jitter_0} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหวเริ่มต้น (ps)

C คือ พารามิเตอร์เชิงรีป

T_0 คือ ครึ่งความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่จุด $1/e$ ของความเข้ม (ps)

ครึ่งความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่จุด $1/e$ ของความเข้ม หาได้จากสมการที่ (3.32) [18]

$$T_0 = T_{FWHM} / (2\sqrt{\ln 2}) \quad (3.32)$$

โดยที่ T_{FWHM} คือ เต็มความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่จุดกึ่งกลางของความเข้มสูงสุด (ps)

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง แบ่งเป็น 3 หัวข้อสำคัญ ดังนี้

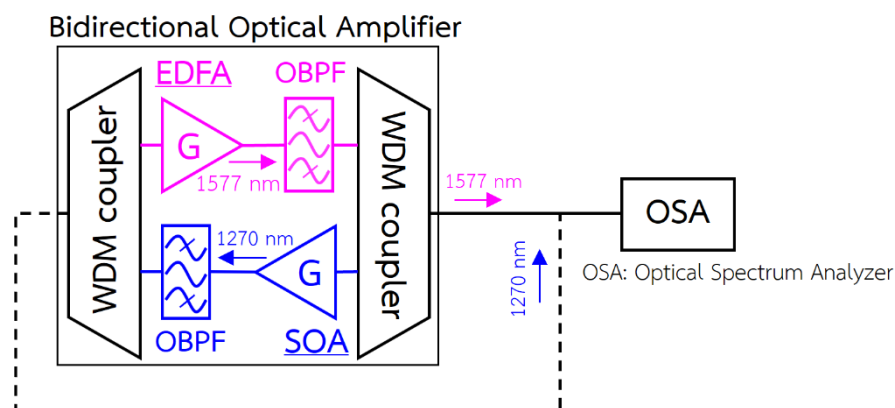
- (1) วิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทาง เพื่อให้รู้ขีดจำกัดก่อนนำไปใช้งาน
- (2) วิเคราะห์ขีดจำกัดของโครงข่าย ด้วยสมการงบกำลัง เพื่อให้ทราบถึงขีดจำกัดของโครงข่าย
- (3) วิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณและโครงข่าย ด้วยแผนภาพรูปตาและค่าอัตราความผิดพลาด บิต เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในโครงข่าย

4.1 วิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทาง

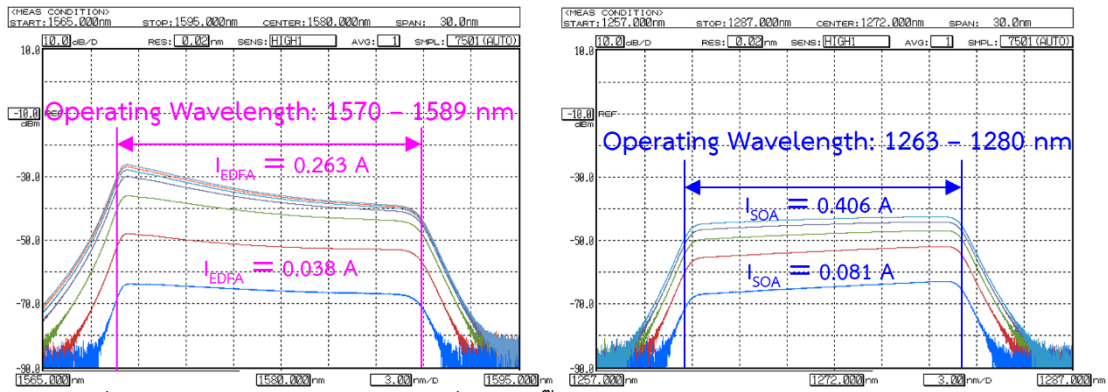
ผลการทดลองในหัวข้อนี้ได้นำเสนอไปในงานประชุมวิชาการ Third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017) [23] โดยเป็นการวัดค่าพารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทาง คือ (1) ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน, (2) อัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวน, (3) ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาริเซชัน, และ (4) การใช้กำลังไฟฟ้า

4.1.1 ช่วงความยาวคลื่นใช้งานของตัวขยายแสงสองทาง

นำเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมาวัดโพไฟล์สเปกตรัมของกำลังแสงขาออกตัวขยายแสงสองทาง ซึ่งประกอบด้วยอีดีเอฟเอกับตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ 1577 nm และเอสโอเอกับตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ 1270 nm เมื่อไม่มีแสงขาเข้าตามแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 4.1 ผลการทดลองของอีดีเอฟเอแสดงดังรูปที่ 4.2 (ซ้าย) ซึ่งตั้งค่ากระแสปั๊มต่างกัน ดังนี้ 0.038 A (เส้นต่ำที่สุด), 0.075 A, 0.113 A, 0.15 A, 0.188 A, 0.225 A และ 0.263 A (เส้นสูงที่สุด) ผลการทดลองของเอสโอเอแสดงดังรูปที่ 4.2 (ขวา) ซึ่งตั้งค่ากระแสปั๊ม ดังนี้ 0.081 A (เส้นต่ำที่สุด), 0.163 A, 0.244 A, 0.325 A และ 0.406 A (เส้นสูงที่สุด)



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกการวัดช่วงความยาวคลื่นใช้งาน

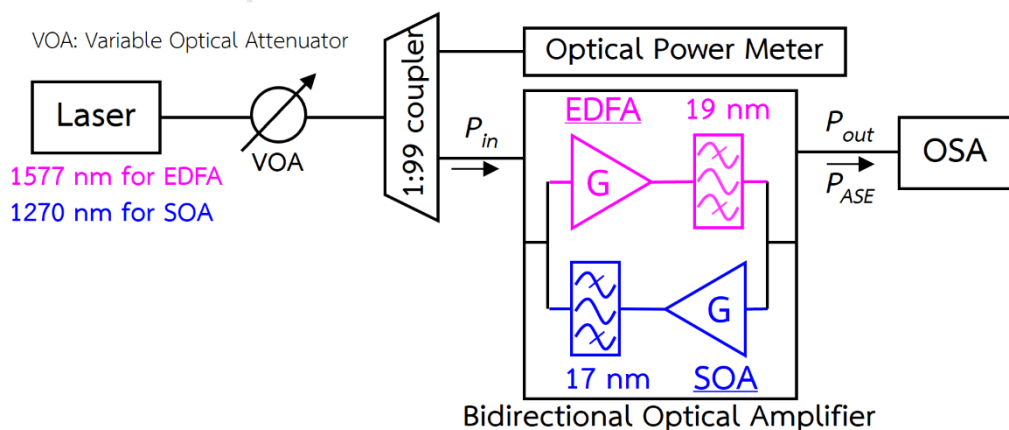


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแสงขาออกที่กระแสขับต่างกัน: (ซ้าย) อีดีเอฟเอ และ (ขวา) เอสโอเอ

จากผลการทดลองของอีดีเอฟเอรูปที่ 4.2 (ซ้าย) แสดงการทำงานอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1570 ถึง 1589 nm เนื่องจากมีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงกว้าง 20 nm ตามที่อธิบายในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.1.3 ใส่อยู่ภายในตัวขยายแสงสองทาง สำหรับช่วงการทำงานของเอสโอเอจะขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่เจอเข้าไปในชั้นโครงสร้าง ในกรณีนี้ผลการทดลองรูปที่ 4.2 (ขวา) แสดงการทำงานอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 1263 nm ถึง 1280 nm เนื่องจากผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงกว้างประมาณ 20 nm เช่นกัน

4.1.2 อัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงสองทาง

ทดลองตามแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.3 เมื่อส่งแสงความยาวคลื่น 1577 nm เข้าอีดีเอฟเอที่ตั้งค่ากระแสขับเท่ากับ 0.15 A และความยาวคลื่น 1270 nm เข้าเอสโอเอที่ตั้งค่ากระแสขับเท่ากับ 0.325 A โดยวัดกำลังแสงขาเข้า, ขาออก, และสัญญาณรบกวนเอเอสไอของตัวขยายแสงสองทางด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ซึ่งตั้งค่าแบนด์วิธความละเอียดแสงไว้เท่ากับ 0.1 nm



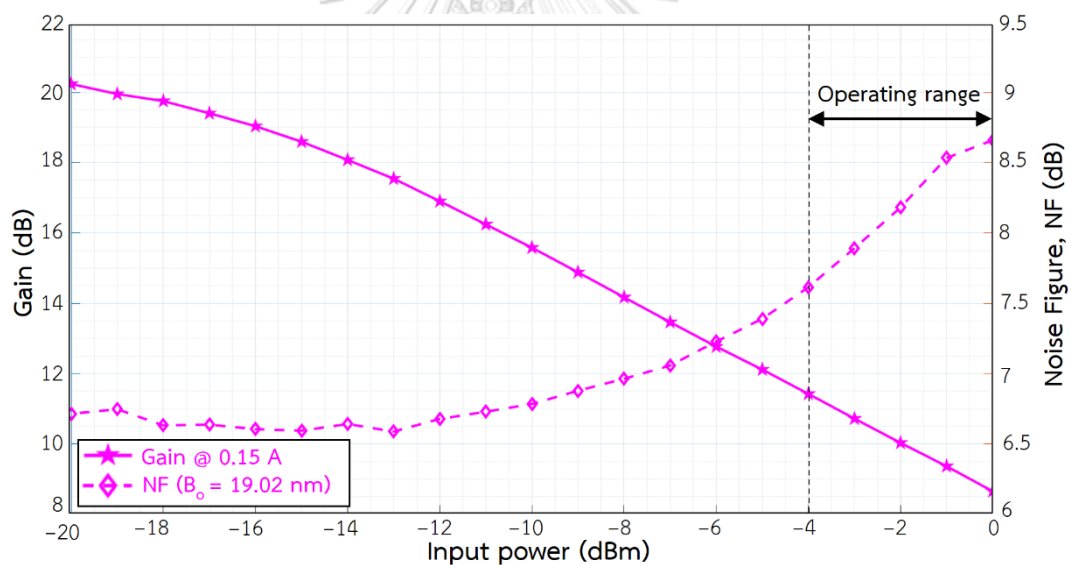
รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการวัดอัตราการขยาย และตัวเลขสัญญาณรบกวน

คำนวณอัตราการขยายตามสมการที่ (3.1) และตัวเลขสัญญาณรบกวนตามสมการที่ (3.14) จากนั้นค่อย ๆ ปรับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงด้วยตัวลดทอนแสงปรับค่าได้ เพื่อหาความสัมพันธ์

กับอัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวน ก่อนนำมาวาดกราฟ โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนแสดงในตารางที่ 4.1

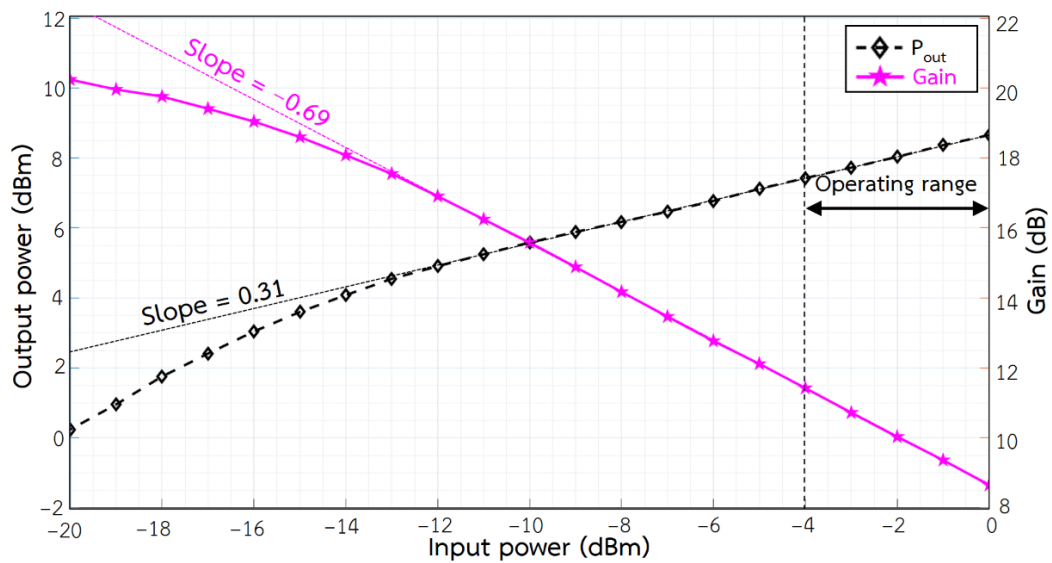
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวน

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขาลง	ขาขึ้น
จำนวนโหมดโพลาไรเซชันของสัญญาณรบกวนเอเอสอี	M	2	
แบนด์วิดท์ความละเอียดแสง ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง	Res (nm)	0.1	
แบนด์วิดท์ทางแสง	B_o (nm)	19.02	17.04
ประสิทธิภาพควอนตัม	η	1	
ความยาวคลื่นแสง	λ (nm)	1577	1270
ค่าคงตัวของพลังค์	h (J·s)	6.626×10^{-34}	
ความเร็วแสง	c (m/s)	2.998×10^8	



รูปที่ 4.4 อัตราการขยายที่กระแสไบแอม 0.15 A และตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนกับกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น อัตราการขยายจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งอัตราการขยายสูงสุดเท่ากับ 20.24 dB แต่ตัวเลขสัญญาณรบกวนจะเพิ่มขึ้น จากค่าประมาณ 6.6 dB ในช่วงกำลังแสงขาเข้าน้อย เป็นค่าเท่ากับ 8.6 dB ที่กำลังแสงขาเข้า 0 dBm โดยอีดีเอฟเอถูกใช้งานในช่วงกำลังแสงขาเข้า -4 ถึง 0 dBm เนื่องจากมีเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km ก่อนหน้าและใส่ตัวแยกแสงไว้ตามหลังตัวขยายแสงสองทาง



รูปที่ 4.5 กำลังแสงขาออก และอัตราการขยายของอีดีเอฟเอ

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกและอัตราการขยายกับกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น กำลังแสงขาออกจะเพิ่มขึ้นและความชันเป็นค่าคงที่ในช่วงใช้งานของอีดีเอฟเอ ตรงกันข้ามกับอัตราการขยายซึ่งมีค่าลดลงแบบเชิงเส้น นำสมการที่ (3.1) มาจัดเรียงพจน์ใหม่จะได้สมการที่ (4.1)

$$P_{out_dBm} - G_{dB} = P_{in_dBm} \quad (4.1)$$

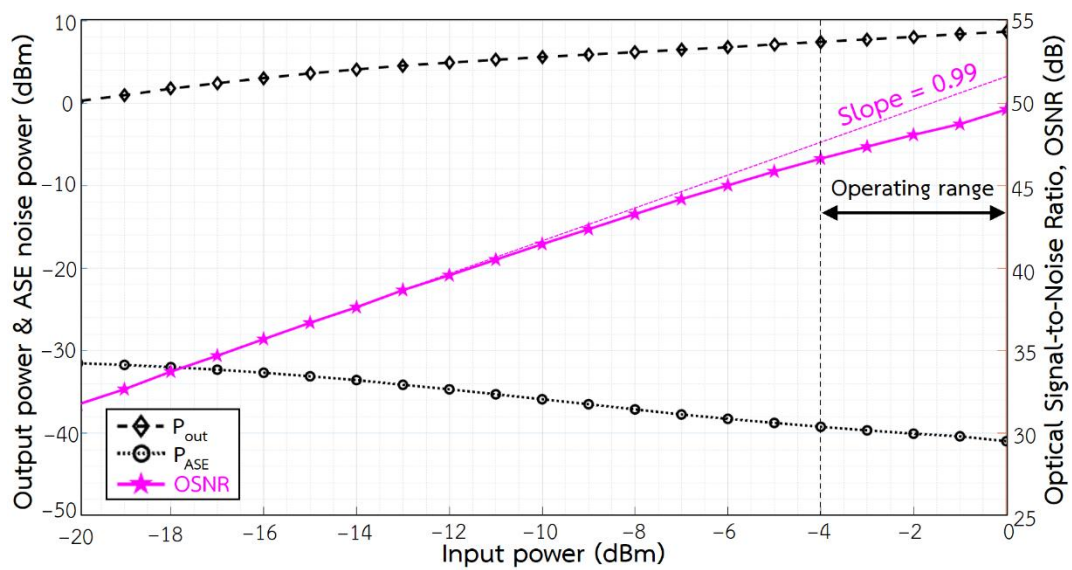
จากสมการที่ (4.1) สำหรับช่วงใช้งานของอีดีเอฟเอ ผลต่างระหว่างความชันของกำลังแสงขาออกกับความชันของอัตราการขยายมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งก็คืออัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ สรุปได้ว่าอัตราการขยายที่ลดลงเป็นเชิงเส้น เกิดขึ้นจากกำลังแสงขาออกอีดีเอฟเอซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ด้วยความชันที่ลดลง (ช่วงอิมพัลส์ของอีดีเอฟเอ)

สำหรับช่วงใช้งานของอีดีเอฟเอ ตัวเลขสัญญาณรบกวนตามสมการที่ (3.14) จะถูกคำนวณแยกทีละพจน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยเรียงกำลังแสงขาเข้าจากน้อยไปมาก

ตารางที่ 4.2 ตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ

กำลังแสงขาเข้า (P_{in})	-4 dBm	-2 dBm	0 dBm
$\frac{1}{G}$ (เท่า)	0.072	0.099	0.136
$\frac{P_{ASE} B_o}{G^2 P_{in} Res}$ (เท่า)	0.0003	0.0003	0.0003
$\frac{2\eta\lambda P_{ASE}}{hcMResG}$ (เท่า)	5.682	6.461	7.191
$\frac{\eta\lambda P_{ASE}^2 B_o}{hcMRes^2 G^2 P_{in}}$ (เท่า)	0.011	0.009	0.007

จากตารางที่ 4.2 เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น พจน์แรกคือสัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณขาออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผกผันกับอัตราการขยายที่ลดลง พจน์ที่สองคือสัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าน้อยมาก จึงละเลยได้ พจน์ที่สามคือสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีความรุนแรงอย่างมากและเพิ่มขึ้นตามกำลังแสงขาเข้า ส่วนพจน์สุดท้ายคือสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอีมีค่าลดลง ตรงข้ามกับกำลังแสงขาเข้าที่เพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าพจน์ที่สามมีความรุนแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับพจน์อื่น ๆ ในช่วงใช้งานของอีดีเอฟเอ (ช่วงกำลังแสงขาเข้ามาก)

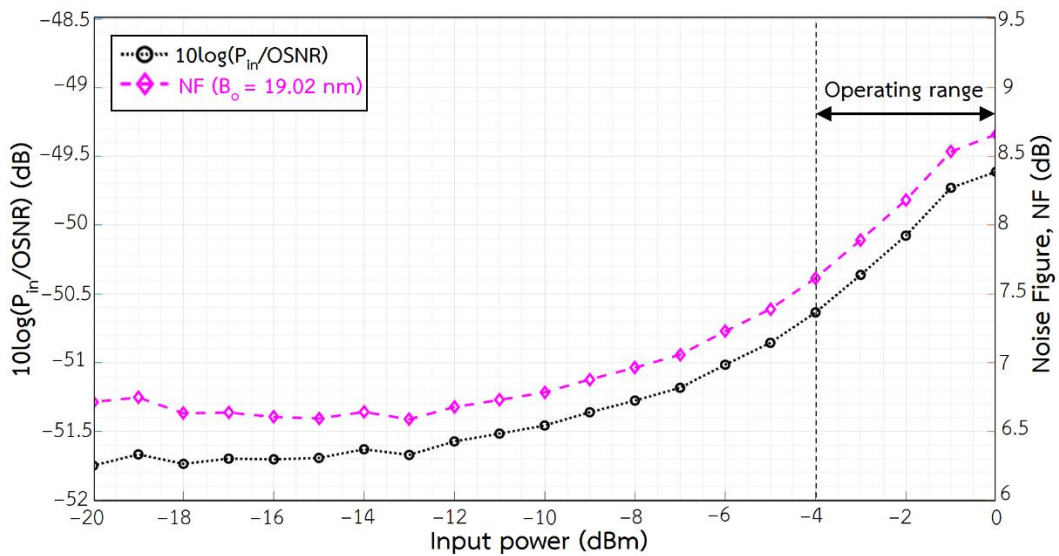


รูปที่ 4.6 กำลังแสงขาออก, กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีและโอเอสเอ็นอาร์ของอีดีเอฟเอ

เมื่อคำนวณโอเอสเอ็นอาร์ตามสมการที่ (3.18) จะได้รูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออก, กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี, และโอเอสเอ็นอาร์กับกำลังแสงขาเข้าอีดีเอฟเอ เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น กำลังแสงขาออกจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีจะมีค่าลดลง จึงทำให้อัตราส่วนกำลังแสงขาออกต่อสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนนี้คือโอเอสเอ็นอาร์ สำหรับช่วงกำลังแสงขาเข้าน้อย โอเอสเอ็นอาร์จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น แต่ช่วงกำลังแสงขาเข้ามาก โอเอสเอ็นอาร์จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นแต่ด้วยความชันที่ลดลง

พจน์สามของสมการที่ (3.19) จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.2 จะมีความรุนแรงมากในช่วงใช้งานของอีดีเอฟเอจึงละเลยพจน์อื่น ๆ เหลือเป็นสมการที่ (4.2) รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์และตัวเลขสัญญาณรบกวนกับกำลังแสงขาเข้า

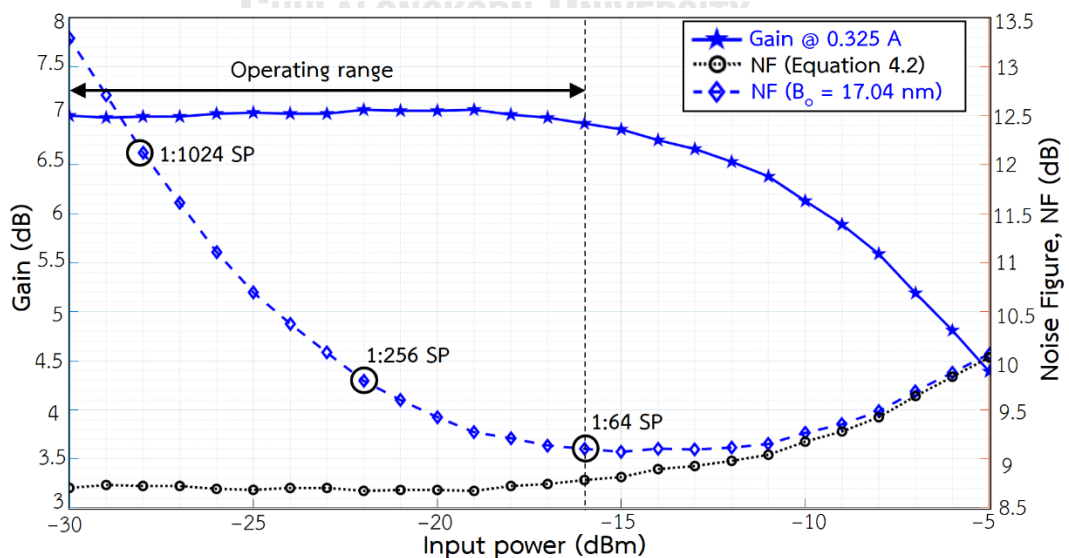
$$NF_{dB} = 10 \log \left[\left(\frac{2\eta\lambda}{hcMRes} \right) \left(\frac{P_{in}}{OSNR} \right) \right] \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.7 อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์ และตัวเลขสัญญาณรบกวนของอีดีเอฟเอ

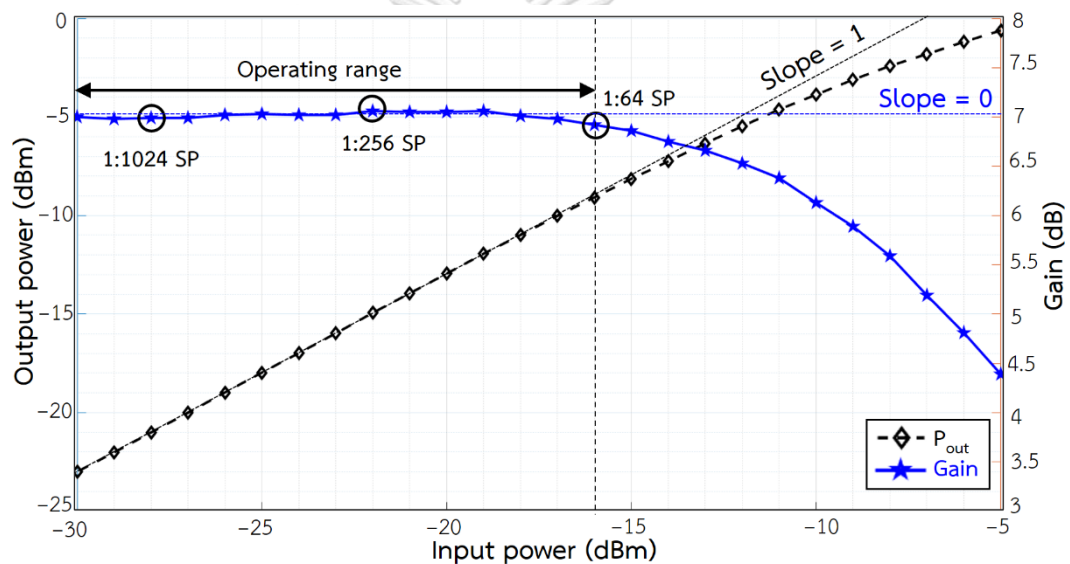
เมื่อพิจารณากำลังแสงขาเข้าและโอเอสเอ็นอาร์ของสมการที่ (4.2) กับรูปที่ 4.6 ช่วงกำลังแสงขาเข้าน้อย (ฝั่งซ้ายมือของรูป) กำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น และโอเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน จึงทำให้อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์เป็นค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ฝั่งซ้ายมือของรูป) สำหรับช่วงกำลังแสงขาเข้ามากของรูปที่ 4.6 (ฝั่งขวามือของรูป) กำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น แต่โอเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้นด้วยความชันที่ลดลง จึงทำให้อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์กระโดดขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.7 (ฝั่งขวามือของรูป)

จากรูปที่ 4.7 เส้นกราฟของตัวเลขสัญญาณรบกวนตามสมการที่ (3.14) เหมือนกับอัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์ตามสมการที่ (4.2) สรุปได้ว่าตัวเลขสัญญาณรบกวนในช่วงใช้งานของอีดีเอฟเอที่กระโดดขึ้น เกิดจากโอเอสเอ็นอาร์ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นด้วยความชันที่ลดลง



รูปที่ 4.8 อัตราการขยายที่กระแสปั๊ม 0.325 A และตัวเลขสัญญาณรบกวนของเอสไอเอ

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนกับกำลังแสงขาเข้าเอสโอเอ เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น อัตราการขยายจะค่อย ๆ ลดลงเหมือนอิตีเอฟเอ มีอัตราการขยายสูงสุดเท่ากับ 7.03 dB หากใช้สมการที่ (4.2) คำนวณเหมือนกับอิตีเอฟเอ จะได้ตัวเลขสัญญาณรบกวน ดังเส้นสีดำนวงกลม เป็นค่าคงที่เท่ากับ 8.7 dB ในช่วงใช้งานของเอสโอเอ ซึ่งมีกำลังแสงขาเข้าน้อย ดังนั้นเอสโอเอจำเป็นต้องคำนวณจากสมการที่ (3.14) เพื่อให้ครอบคลุมทุกพจน์ ซึ่งจะได้ตัวเลขสัญญาณรบกวน ดังเส้นสีน้ำเงินสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด สำหรับช่วงกำลังแสงขาเข้าน้อย ตัวเลขสัญญาณรบกวนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ตามกำลังแสงขาเข้าที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงกำลังแสงขาเข้ามาก ตัวเลขสัญญาณกลับเพิ่มขึ้นเหมือนกับอิตีเอฟเอ โดยตัวเลขสัญญาณรบกวนเท่ากับ 13.3, 9.1, และ 10 dB ที่กำลังแสงขาเข้า -30 , -15 , และ -5 dBm ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 กำลังแสงขาออก และอัตราการขยายของเอสโอเอ

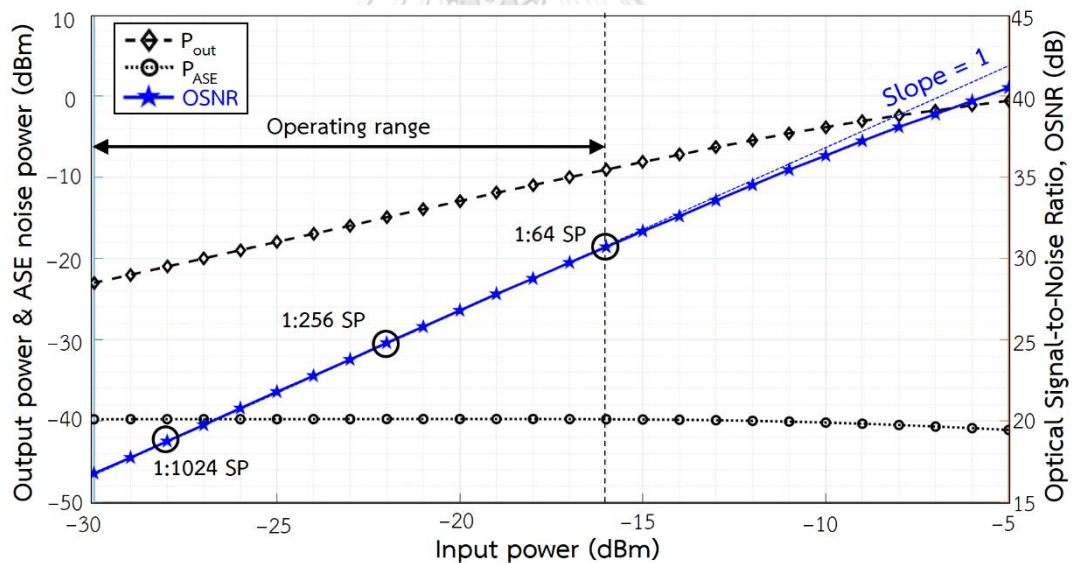
จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกและอัตราการขยายกับกำลังแสงขาเข้าเอสโอเอ เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น กำลังแสงขาออกจะเพิ่มขึ้น แต่อัตราการขยายลดลงเช่นเดียวกับอิตีเอฟเอ สำหรับช่วงใช้งานของเอสโอเอ จากสมการที่ (4.1) เมื่อความชันของกำลังแสงขาออกเท่ากับความชันของกำลังแสงขาเข้า จะได้อัตราการขยายเป็นค่าคงที่ใกล้เคียงค่าสูงสุด ดังนั้นช่วงใช้งานของเอสโอเอจึงอยู่ในช่วงอัตราขยายสัญญาณขนาดเล็ก

สำหรับช่วงใช้งานของเอสโอเอจะมีกำลังแสงขาเข้าน้อย เนื่องจากกำลังสูญเสียแทรกของตัวแยกแสง 1:64, 1:256, และ 1:1024 ซึ่งตัวแยกแสง 1:1024 มีกำลังสูญเสียแทรกมากที่สุด จึงทำให้กำลังแสงขาเข้ามีค่าน้อยที่สุด เมื่อนำตัวเลขสัญญาณรบกวน ตามสมการที่ (3.14) จากรูปที่ 4.8 เส้นสีน้ำเงินสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด มาคำนวณแยกทีละพจน์ จะได้ค่าดังตารางที่ 4.3 โดยเรียงจากกำลังแสงขาเข้าน้อยไปมาก ให้สอดคล้องกับตัวแยกแสง 1:1024, 1:256, และ 1:64

ตารางที่ 4.3 ตัวเลขสัญญาณรบกวนของเอสโอเอ

กำลังแสงขาเข้า (P_{in})	-28 dBm	-22 dBm	-16 dBm
$\frac{1}{G}$ (เท่า)	0.199	0.197	0.203
$\frac{P_{ASE} B_o}{G^2 P_{in} Res}$ (เท่า)	0.453	0.111	0.029
$\frac{2\eta\lambda P_{ASE}}{hcMResG}$ (เท่า)	7.243	<u>7.160</u>	<u>7.344</u>
$\frac{\eta\lambda P_{ASE}^2 B_o}{hcMRes^2 G^2 P_{in}}$ (เท่า)	<u>8.210</u>	2.015	0.533

จากตารางที่ 4.3 พจน์ที่สามมีความรุนแรงในทุกช่วงกำลังแสงขาเข้าเหมือนกับอีดีเอฟเอ แต่เมื่อกำลังขาเข้าน้อยมาก ๆ พจน์ที่สี่จะเริ่มรุนแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อกำลังแสงขาเข้าน้อยกว่า -28 dBm พจน์ที่สี่จะรุนแรงกว่าพจน์ที่สาม ดังนั้นการวิเคราะห์ช่วงใช้งานของเอสโอเอ จำเป็นต้องใช้ทั้งพจน์ที่สามและสี่

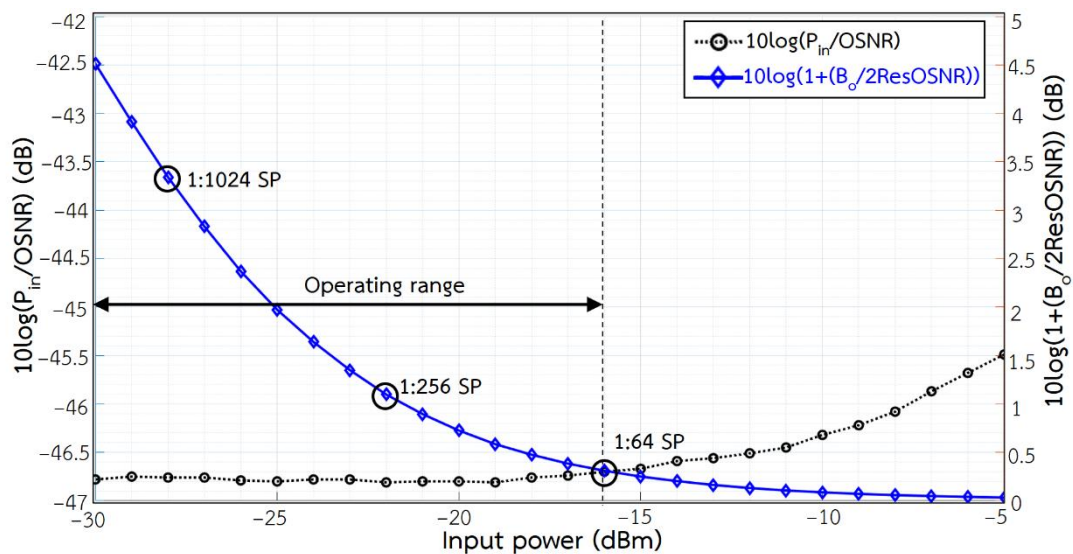


รูปที่ 4.10 กำลังแสงขาออก, กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีและโอเอสเอ็นอาร์ของเอสโอเอ

เมื่อคำนวณโอเอสเอ็นอาร์ตามสมการที่ (3.18) จะได้รูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออก, กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี, และโอเอสเอ็นอาร์กับกำลังแสงขาเข้าเอสโอเอ เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น กำลังแสงขาออกและโอเอสเอ็นอาร์จะเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับอีดีเอฟเอ แต่กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกกำลังแสงขาเข้าเอสโอเอ ซึ่งแตกต่างจากอีดีเอฟเอ

ถ้ากำหนดให้พิจารณาเฉพาะพจน์สามและสี่ของสมการที่ (3.19) จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.3 มีความรุนแรงมากในช่วงใช้งานของเอสโอเอ จะเหลือเป็นสมการที่ (4.3) รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์และพจน์ที่สามของสมการ (4.3) กับกำลังแสงขาเข้าเอสโอเอ

$$NF_{dB} = 10\log\left(\left(\frac{2\eta\lambda}{hcMRes}\right)\left(\frac{P_{in}}{OSNR}\right)\left(1 + \frac{B_o/2Res}{OSNR}\right)\right) \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.11 อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์ และพจน์ที่สามของสมการ (4.3)

เมื่อพิจารณากำลังแสงขาเข้าและโอเอสเอ็นอาร์ของพจน์สองในสมการที่ (4.3) กับรูปที่ 4.10 ช่วงกำลังแสงขาเข้าน้อย อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์เป็นค่าคงที่ แต่ช่วงกำลังแสงขาเข้ามาก อัตราส่วนกำลังแสงขาเข้าต่อโอเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังเส้นสีดำวงกลม เช่นเดียวกับอีดีเอฟเอ ดังรูปที่ 4.7 เส้นสีดำวงกลม

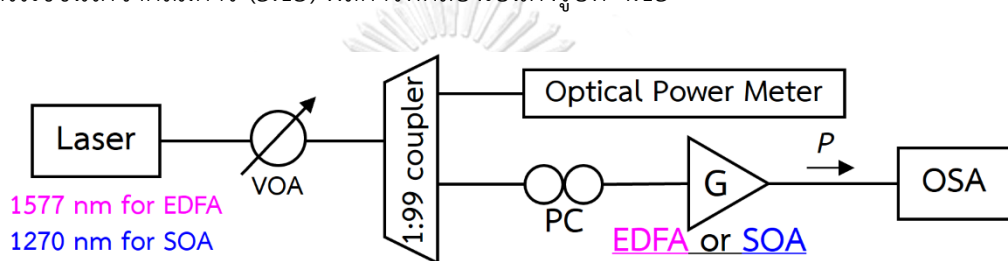
เมื่อแบนด์วิดท์ทางแสงของตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงหลังเอสโอเอเท่ากับ 17.04 nm และแบนด์วิดท์ความละเอียดแสงของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเท่ากับ 0.1 nm พิจารณาพจน์สามในสมการที่ (4.3) กับรูปที่ 4.10 เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น โอเอสเอ็นอาร์จะเพิ่มขึ้น แต่พจน์สามในสมการที่ (4.3) จะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เส้นสีน้ำเงินสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด

ตัวสัญญาณรบกวน ดังเส้นสีน้ำเงินสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด ในรูปที่ 4.8 สำหรับกำลังแสงขาเข้าน้อย (ซ้ายมือของรูป) เกิดมาจากพจน์สามในสมการที่ (4.3) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เส้นสีน้ำเงินสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด และสำหรับกำลังแสงขาเข้ามาก (ขวามือของรูป) เกิดมาจากพจน์สองในสมการที่ (4.3) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เส้นสีดำวงกลม สรุปได้ว่าสามารถลดความรุนแรงตัวเลขสัญญาณรบกวน ในช่วงกำลังแสงขาเข้าน้อย ด้วยการแทรกตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงชนิดแคบ

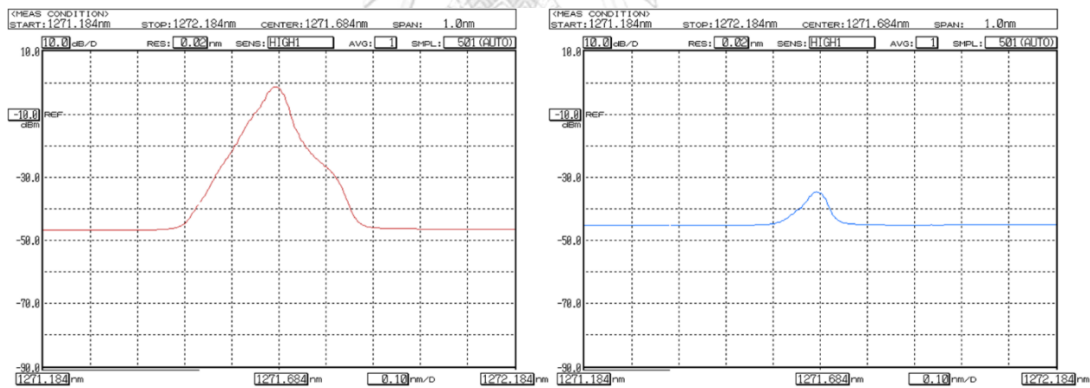
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 ของตัวขยายแสงสองทาง สรุปได้ว่าเมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น อัตราการขยายจะมีค่าลดลง และตัวเลขสัญญาณรบกวนเกิดจากสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณรบกวนเอเอสไอเป็นหลัก แต่เมื่อกำลังแสงขาเข้ามีค่าน้อยมาก ๆ สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสไอกับเอเอสไอจะมีค่ารุนแรงอย่างมาก ในกรณีที่แบนด์วิดท์ทางแสงมีขนาดกว้างมาก

4.1.3 ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันของตัวขยายแสงสองทาง

ทดลองตามแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.12 โดยปรับสถานะของโพลาไรเซชันด้วยตัวควบคุมโพลาไรเซชันเพื่อให้ได้กำลังแสงขาออกที่มีกำลังสูงสุดและต่ำสุด สามารถคำนวณค่าความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันได้จากสมการ (3.15) ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 แผนภาพบล็อกการทดลองวัดความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมกำลังแสงขาออกของเอสไอเอ: (ซ้าย) สูงที่สุด และ (ขวา) ต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.13 แสดงกำลังแสงสูงสุดและต่ำสุดอ่านจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงได้เท่ากับ -1 dBm และ -34 dBm ตามลำดับ เมื่อดังค่ากำลังแสงขาเข้าของเอสไอเอเท่ากับ -5 dBm ที่ 1270 nm และกระแสปั๊ม 0.325 A ได้ค่าความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน ตามสมการที่ (3.15) เท่ากับ 33 dB เพราะว่าเอสไอเอได้รับผลกระทบจากสถานะของโพลาไรเซชันที่เปลี่ยนแปลงอย่างมาก ในกรณีของอีดีเอฟเอ กำลังแสงขาเข้าเท่ากับ -5 dBm ที่ 1577 nm และกระแสปั๊ม 0.15 A กำลังแสงสูงสุดและต่ำสุดไม่แตกต่างกัน เนื่องจากอีดีเอฟเอไม่ได้รับผลกระทบจากสถานะของโพลาไรเซชันที่เปลี่ยนแปลง

4.1.4 การใช้กำลังไฟฟ้าของตัวขยายแสงสองทาง

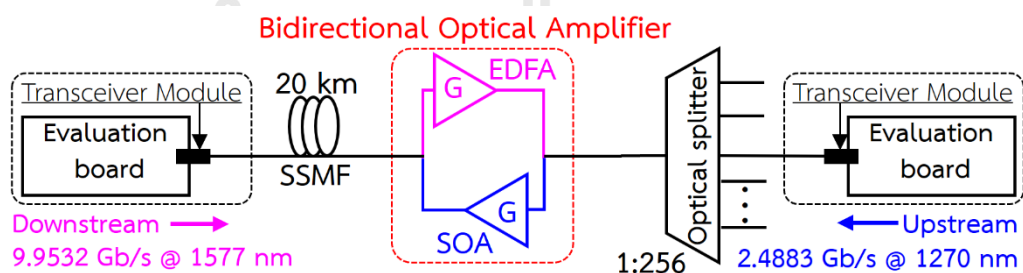
การใช้กำลังไฟฟ้าทั้งหมดคำนวณจากผลคูณของกระแสไฟตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวขยายแสงสองทาง โดยใช้มาตรวัดเอนกประสงค์แบบดิจิทัล (Digital Multimeter) วัดกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อตั้งค่ากระแสป้อนของอีดีเอฟเอและเอสโอเอที่ 0.15 A และ 0.325 A ตามลำดับ เหตุผลที่เลือกกระแสป้อนทั้ง 2 ค่าคือ เพียงพอและมีประสิทธิภาพสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากการเพิ่มกระแสป้อนจะได้อัตราการขยายสูงกว่าช่วงที่เลือกเพียงเล็กน้อย ดังนั้นผลการทดลองคือ อีดีเอฟเอมีการใช้กำลังไฟฟ้า 0.495 W ($0.15 \text{ A} \times 3.3 \text{ V}$) และเอสโอเอมีการใช้กำลังไฟฟ้า 1.0725 W ($0.325 \text{ A} \times 3.3 \text{ V}$) ทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 1.5675 W

4.2 วิเคราะห์ขีดจำกัดของโครงข่าย

ในหัวข้อนี้จะคำนวณงบกำลังของโครงข่ายในกรณีที่มีเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 กิโลเมตรกับผู้ใช้บริการ 256 ราย ซึ่งเป็นขั้นต่ำตามวัตถุประสงค์ และกับผู้ใช้บริการ 1024 ราย ซึ่งเป็นจำนวนสูงสุดตามมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน

4.2.1 โครงข่ายที่รองรับเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว 20 กิโลเมตรและผู้ใช้บริการ 256 ราย

คำนวณงบกำลังของโครงข่ายด้วยสมการที่ (3.24) ในกรณีที่เลือกให้โครงข่ายรองรับจำนวนผู้ใช้บริการ 256 ราย ตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ซึ่งทำให้ค่าอัตราบิดเฉลี่ยของแต่ละผู้ใช้บริการคือ $9.9532 \text{ Gb/s} \div 256 = 38.88 \text{ Mb/s}$ และเป็นอัตราบิตที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในปัจจุบัน โครงข่ายประกอบด้วยเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km, ตัวขยายแสงสองทาง, และตัวแยกแสง 1:256 ตามแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.14 ตารางที่ 4.4 มี 2 ส่วน คือ งบกำลังของโครงข่ายขาลงและขาขึ้น



รูปที่ 4.14 แผนภาพโครงข่ายที่มีระยะทาง 20 km, ตัวขยายแสงสองทางและตัวแยกแสง 1:256

ตารางที่ 4.4 งบกำลังของโครงข่าย สำหรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 256 ราย

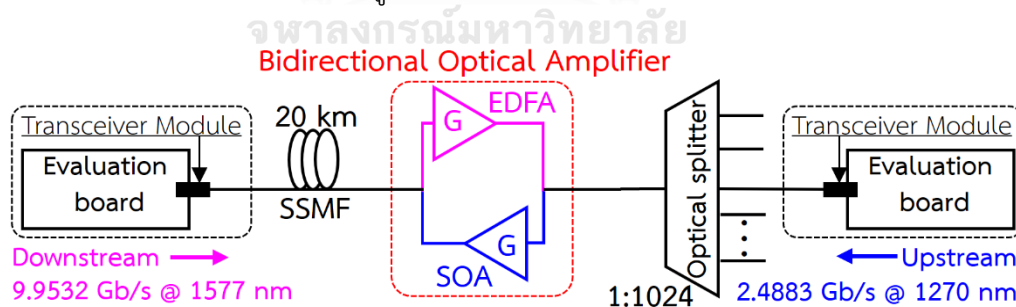
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขาลง	ขาขึ้น
กำลังแสงส่งจากเลเซอร์	P_{S_dBm} (dBm)	+2	+2
กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวตรวจจับแสงรับได้	P_{R_dBm} (dBm)	-28	-27.5

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขาลง	ขาขึ้น	
อัตราขยายแสง	G_{dB} (dB)	10.7	7	
งบกำลังของโครงข่าย (dB)		40.7	36.5	
การลดทอนในเส้นใยนำแสง 20 km	αL (dB)	3.8	6	
กำลังสูญเสียแทรกของตัวแยกแสง 1:256	IL (dB)	24	24	
กำลังสูญเสียทั้งหมด (dB)		27.8	30	
กำลังเผื่อของระบบ		system margin (dB)	12.9	6.5

จากตารางที่ 4.4 ถ้าคำนวณงบกำลังของโครงข่ายโดยไม่มีตัวขยายแสง งบกำลังของโครงข่ายจะน้อยกว่ากำลังแสงสูญเสียทั้งหมด จึงจำเป็นต้องแทรกตัวขยายแสงสองทางเพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับผู้ใช้บริการจำนวน 256 ได้ อีกทั้งยังมีกำลังเผื่อของระบบให้ฝั่งขาขึ้นอีก 6.5 dB ในกรณีนี้ขีดจำกัดของโครงข่ายอยู่ในฝั่งขาขึ้นที่มีค่าอัตราขยายของเอสโอเอไม่สูงเหมือนกับอัตราขยายของอีดีเอฟเอในฝั่งขาลง และมีการลดทอนในเส้นใยนำแสงในฝั่งขาขึ้นมากกว่าฝั่งขาลง

4.2.2 โครงข่ายที่รองรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียว 20 กิโลเมตรและผู้ใช้บริการ 1024 ราย

เป้าหมายของวิทยานิพนธ์ต้องสามารถรองรับผู้ใช้บริการจำนวน 1024 ราย ซึ่งเป็นจำนวนผู้ใช้บริการมากที่สุดที่มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนรองรับได้ อัตราบิตที่เฉลี่ยสำหรับแต่ละผู้ใช้บริการคือ $9.9532 \text{ Gb/s} \div 1024 = 9.72 \text{ Mb/s}$ ซึ่งเพียงพอที่จะแบ่งกันใช้งานในปัจจุบัน โดยโครงข่ายจะประกอบด้วยเส้นใยนำแสงโหมดเดียวมาตรฐาน 20 km, ตัวขยายแสงสองทาง, และตัวแยกแสง 1:1024 ตามแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.15 ตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.15 แผนภาพโครงสร้างที่มีระยะทาง 20 km, ตัวขยายแสงสองทางและตัวแยกแสง 1:1024

ตารางที่ 4.5 งบกำลังของโครงข่าย สำหรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 1024 ราย

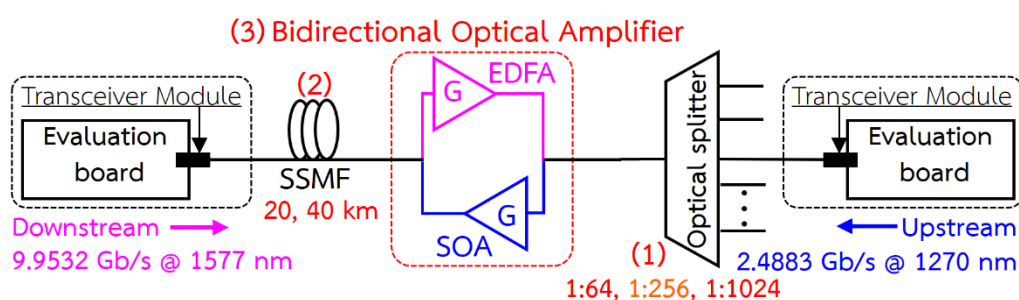
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขาลง	ขาขึ้น
กำลังแสงส่งจากเลเซอร์	P_{S_dBm} (dBm)	+2	+2
กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวตรวจจับแสงรับได้	P_{R_dBm} (dBm)	-28	-27.5
อัตราขยายแสง	G_{dB} (dB)	10.7	7

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขาลง	ขาขึ้น
งบกำลังของโครงข่าย (dB)		40.7	36.5
การลดทอนในเส้นใยนำแสง 20 km	αL (dB)	3.8	6
กำลังสูญเสียแทรกของตัวแยกแสง 1:1024	IL (dB)	30	30
กำลังสูญเสียทั้งหมด (dB)		33.8	36
กำลังเผื่อของระบบ	system margin (dB)	6.9	0.5

จากตารางที่ 4.5 หลังการแทรกตัวขยายแสงสองทาง โครงข่ายสามารถรองรับผู้ใช้บริการจำนวน 1024 รายได้ แต่การติดตั้งแบบนี้จะมีกำลังเผื่อของระบบเหลือน้อยมาก โดยขีดจำกัดยังอยู่ในฝั่งขาขึ้นเหมือนกับหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งการทดลองจริงในหัวข้อ 4.3 กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวตรวจจับแสงรับได้ในฝั่งขาขึ้นจะเท่ากับ -37.5 dBm เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สำหรับรองรับข้อมูลจากเครื่องโอเอ็นยูหลาย ๆ เครื่อง ดังนั้นโครงข่ายสำหรับระยะทาง 20 km ,ตัวขยายแสงสองทาง, และผู้ใช้บริการ 1024 ราย สามารถทำงานได้ แม้ว่ากำลังเผื่อของระบบจากการคำนวณจะมีค่าแค่ 0.5 dB

4.3 วิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณและโครงข่าย

หัวข้อนี้จะวิเคราะห์แผนภาพรูปตาและค่าอัตราความผิดพลาดบิตร่วมกัน โดยพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-3} สำหรับฝั่งโครงข่ายขาลง, 10^{-4} สำหรับฝั่งโครงข่ายขาขึ้น, และ 10^{-6} ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน [24] โครงข่ายตามแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.16 มี 3 ผลกระทบที่สำคัญ คือ (1) ผลกระทบจากกำลังสูญเสีย, (2) ผลกระทบจากการบิดเบี้ยวของสัญญาณ, และ (3) ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี จากนั้นจะวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายขาลงและขาขึ้น แล้วหัวข้อสุดท้ายจะส่งข้อมูลพร้อมกันทั้งโครงข่ายขาลงและขาขึ้น

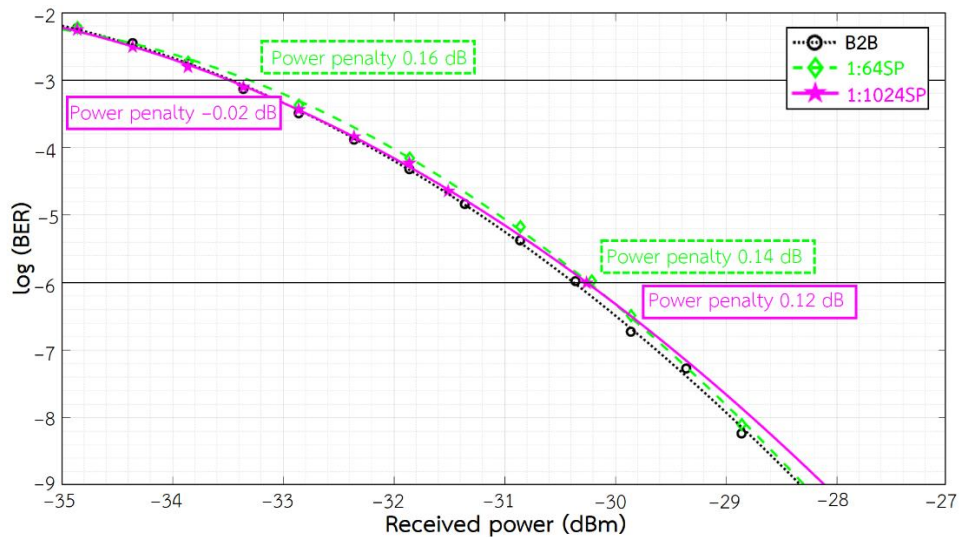


รูปที่ 4.16 แผนภาพบล็อกสำหรับทุกการทดลองของวิทยานิพนธ์

4.3.1 ผลกระทบจากกำลังสูญเสีย

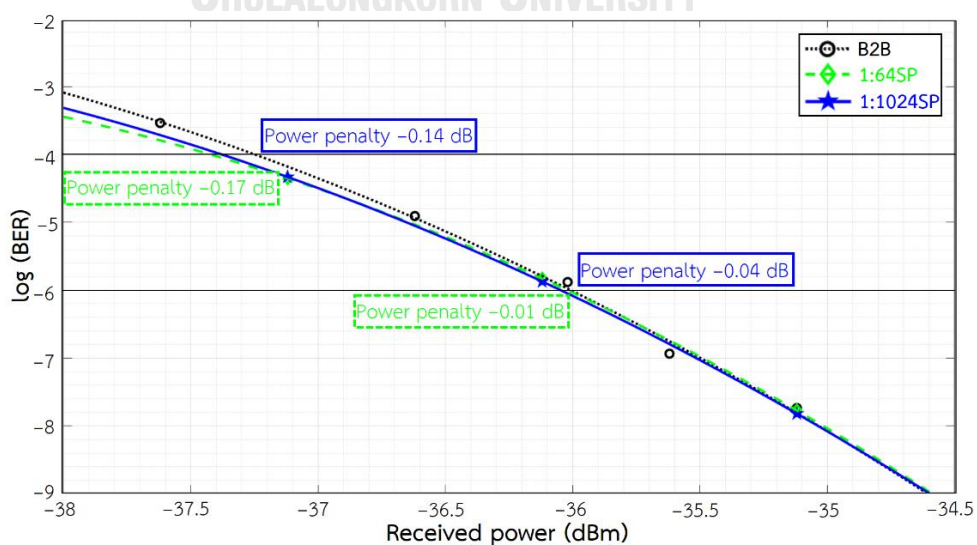
สำหรับกรณีนี้จะสนใจผลกระทบของตัวแยกแสงเท่านั้น โดยในการทดลองจะใช้ค่าสัดส่วนการแยกของตัวแยกแสง เท่ากับ 1:64 และ 1:1024 ตามลำดับ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกรณีเริ่มต้น

(Back-to-Back, B2B) ซึ่งมีเพียงเครื่องโอแอลทีกับโอเอ็นยู ผลการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับกำลังรับ (Received Power) ที่โมดูลรับส่ง ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 สำหรับโครงข่ายขาลงและขาขึ้น ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง กรณีส่งผ่านตัวแยกแสง

จากรูปที่ 4.17 เป็นผลการทดลองส่งข้อมูล 9.9532 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1577 nm ของโครงข่ายขาลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อส่งสัญญาณผ่านตัวแยกแสงแล้วเส้นกราฟมีแนวโน้มเหมือนกันกับกรณีเริ่มต้น เนื่องจากตัวแยกแสงไม่ได้เพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในโครงข่าย เมื่อพิจารณาค่าโทษกำลัง (Power Penalty) ระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกตัวแยกแสงด้วยค่าสัดส่วนการแยก 1:64 และ 1:1024 ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} มีค่าเท่ากับ 0.16 dB และ -0.02 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0.14 dB และ 0.12 dB ตามลำดับ สำหรับค่าโทษกำลังที่เป็นค่าติดลบเล็กน้อยหมายความว่าไม่มีค่าโทษกำลังเกิดขึ้นเลย



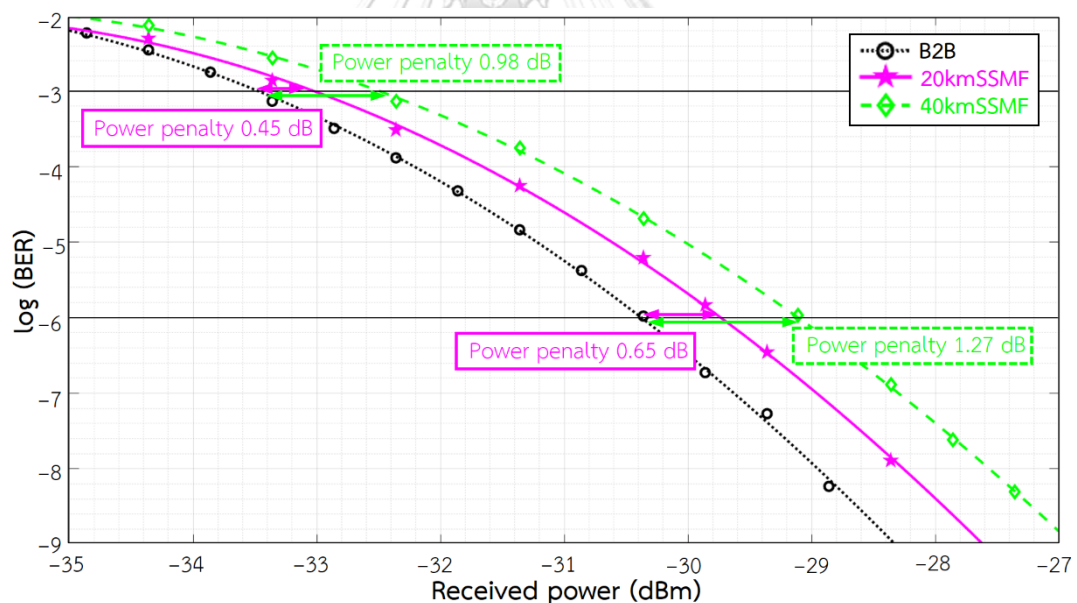
รูปที่ 4.18 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านตัวแยกแสง

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองกรณีส่งข้อมูล 2.4883 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1270 nm ผ่านตัวแยกแสงของโครงข่ายขาขึ้น เส้นกราฟมีแนวโน้มเหมือนกันกับกรณีเริ่มต้น เมื่อพิจารณาค่าโทษกำลังกรณีเริ่มต้นกับแทรกตัวแยกแสงด้วยค่าสัดส่วนการแยกเท่ากับ 1:64 และ 1:1024 ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} มีค่าเท่ากับ -0.17 dB และ -0.14 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ -0.01 dB และ -0.04 dB ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 สามารถสรุปได้ว่า ตัวแยกแสงไม่มีผลกระทบต่ออัตราความผิดพลาดบิต สอดคล้องกับสมการที่ (3.30) เมื่อโอเอสเอ็นอาร์ ($OSNR$) ไม่เปลี่ยนแปลงและกำลังรับ (P_r) เท่ากัน เอสเอ็นอาร์ (SNR_p) จะมีค่าคงที่ ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะคงที่เช่นเดียวกัน

4.3.2 ผลกระทบจากการบิดเบี้ยวของสัญญาณ

สำหรับกรณีนี้จะสนใจผลกระทบที่เกิดจากเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน ในการทดลองจะวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตกับกำลังรับของกรณีเริ่มต้นกับแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km และ 40 km ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 สำหรับโครงข่ายขาลงและขาขึ้น ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง กรณีส่งผ่านระยะทาง 20, 40 km

ผลการทดลองของโครงข่ายขาลง จากรูปที่ 4.19 จะสังเกตได้ว่าเส้นกราฟขยับเลื่อนไปทางขวา เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นจาก 20 km ไป 40 km พิจารณาค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km และ 40 km ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} มีค่าเท่ากับ 0.45 dB และ 0.98 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0.65 dB และ 1.27 dB ตามลำดับ

แต่ในโครงข่ายยังมีผลกระทบที่เกิดจากวิธีมอดูเลตโดยตรง ซึ่งไม่แสดงให้เห็นในแผนภาพรูปตาที่วัดด้วยโมดูลรับส่ง จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจจับแสงในหัวข้อ 2.3.1.3 วัดแผนภาพรูปตา พร้อมทั้งคำนวณในสมการที่ (3.31) ด้วยค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวประกอบการถ่างออก ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวประกอบการถ่างออก

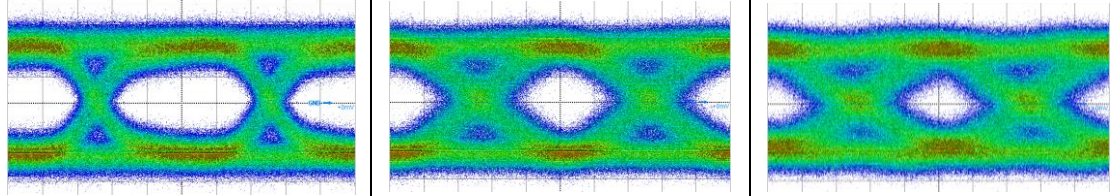
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขาลง	ขาขึ้น
พารามิเตอร์เซิร์ปของเลเซอร์ [20]	C_{Laser}	6	6
โครมาติกดิสเพอร์ชัน	D (ps/(nm•km))	20	-7
ระยะทางของเส้นใยนำแสง	L (km)	20 และ 40	
เต็มความกว้างของสัญญาณพัลส์ ที่ จุดกึ่งกลางของ ความเข้มสูงสุด	T_{FWHM} (ps)	100	400
ความยาวคลื่นแสง	λ (nm)	1577	1270
ความเร็วแสง	c (m/s)	2.998×10^8	

นำค่าจากตารางที่ 4.6 มาคำนวณในสมการที่ (3.21), (3.31), และ (3.32) จะได้ตัวประกอบการถ่างออกของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานที่ระยะทาง 20 km และ 40 km ดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 แสดงแผนภาพรูปตาที่วัดด้วยตัวตรวจจับแสง กำลังรับ -8 dBm

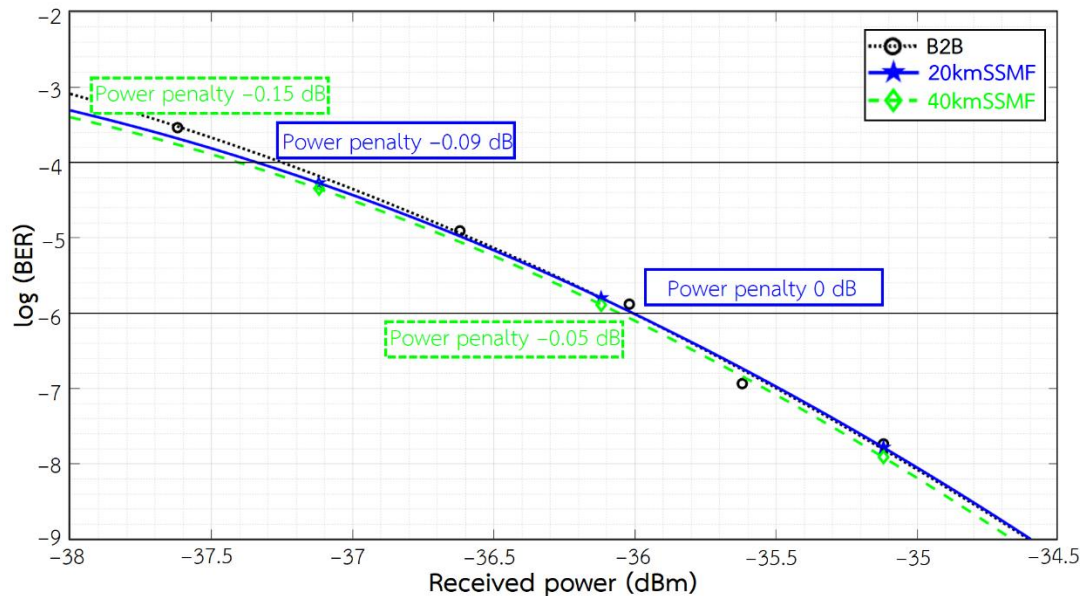
ตารางที่ 4.7 ตัวประกอบการถ่างออกของโครงข่ายขาลง ระยะทาง 20 และ 40 km

ตัวประกอบการถ่างออกที่ระยะทาง (km)	ขาลง	ขาขึ้น
20	1.88	0.99
40	2.77	0.98

ตารางที่ 4.8 แผนภาพรูปตาโครงข่ายขาลงวัดด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็น กำลังรับ -8 dBm

	B-B	20 km	40 km
			
พารามิเตอร์	B-B	20 km	40 km
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหว (ps)	4.51	9.39	11.61
ตัวประกอบการถ่างออกที่วัดจริง	-	2.08	2.57
ตัวประกอบการถ่างออกจากการคำนวณ	-	1.88	2.77

จากตารางที่ 4.8 ตัวประกอบการถ่วงออกที่วัดจริงจะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ ซึ่งเป็นผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (β_2) และเซิร์ปของเลเซอร์ (C) ดังแสดงในสมการที่ (3.31) สำหรับผลกระทบที่เกิดจากเซิร์ปในโครงข่ายขาลงจะทำให้สัญญาณเกิดการถ่วงออกมากกว่ากรณีทั่วไปที่ไม่มีเซิร์ปในโครงข่าย



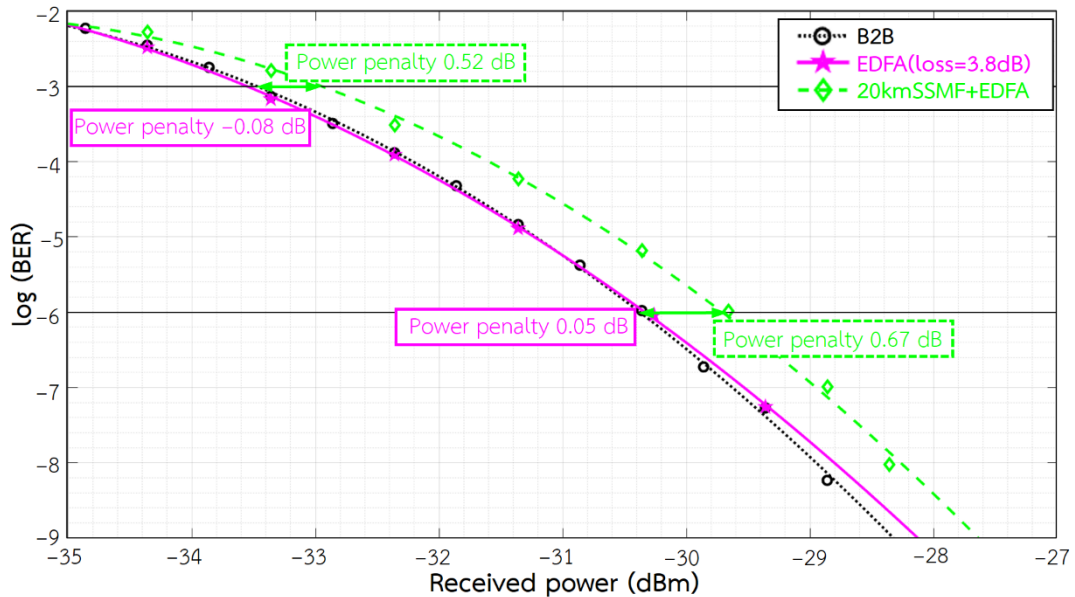
รูปที่ 4.20 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านระยะทาง 20, 40 km

จากรูปที่ 4.20 เป็นผลการทดลองของโครงข่ายขาขึ้น เส้นกราฟมีแนวโน้มเหมือนกันกับกรณีเริ่มต้น ค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km และ 40 km ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} มีค่าเท่ากับ -0.09 dB และ -0.15 dB ตามลำดับ ที่ระดับค่าอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0 dB และ -0.05 dB ตามลำดับ สำหรับแผนภาพรูปตาของโครงข่ายขาขึ้นจะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ เนื่องจากตัวประกอบการถ่วงออกมีค่าน้อยมาก และแนวโน้มของเส้นกราฟเหมือนกับกรณีเริ่มต้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.7

สำหรับโครงข่ายขาลงจะมีผลกระทบจากการบิดเบี้ยวของสัญญาณรุนแรงกว่าขาขึ้น เนื่องจากมีขนาดคาบพิทแคบกว่า 4 เท้า และค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันสูงกว่า 3 เท้า จากรูปที่ 4.19 โครงข่ายขาลง ค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับระยะทาง 20 km และ 40km ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} มีค่าเท่ากับ 0.45 dB และ 0.98 dB ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอนคือไม่เกิน 1 dB และ 2 dB สำหรับระยะทาง 20 km และ 40 km ตามลำดับ จากรูปที่ 4.20 โครงข่ายขาขึ้น ค่าโทษกำลังผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐานคือไม่เกิน 0.5 dB

4.3.3 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี

สำหรับโครงข่ายขาลงจะสนใจผลกระทบที่เกิดจากอีดีเอฟเอ ในการทดลองจะวัดกรณีเริ่มต้น, อีดีเอฟเอที่กำลังแสงขาเข้ามีกำลังสูญเสีย เท่ากับ 3.8 dB (ระยะทาง 20 km), และเส้นใยนำแสง โหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km + อีดีเอฟเอ จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.21

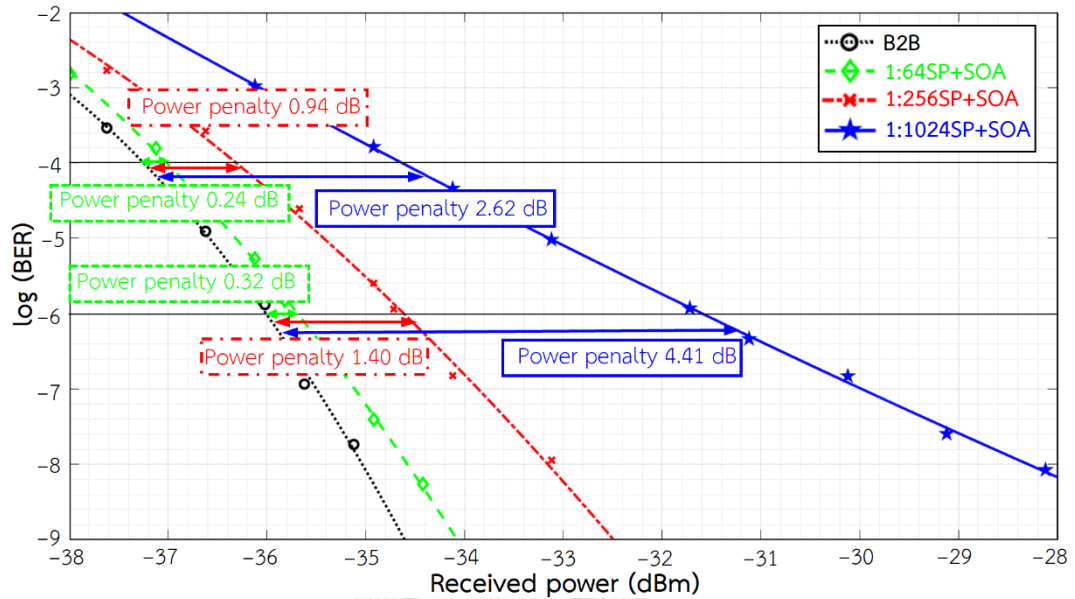


รูปที่ 4.21 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง กรณีส่งผ่านอีดีเอฟเอ

จากรูปที่ 4.21 เส้นกราฟของอีดีเอฟเอมีแนวโน้มเหมือนกรณีเริ่มต้น แต่เมื่อแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km เข้าไปข้างหน้าอีดีเอฟเอ เส้นกราฟจะขยับไปทางขวามือ เหมือนกับรูปที่ 4.19 ค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกอีดีเอฟเอ และเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km + อีดีเอฟเอ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} มีค่าเท่ากับ -0.08 dB และ 0.52 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0.05 dB และ 0.67 dB ตามลำดับ

แนวโน้มของค่าโทษกำลังกรณีแทรกอีดีเอฟเอ สอดคล้องกับรูปที่ 4.6 ซึ่งช่วงที่ใช้งานของอีดีเอฟเอ (ด้านขวามือของรูป) มีค่าไอเอสเอ็นอาร์สูงมาก ดังนั้นผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี จึงมีค่าน้อยและไม่ส่งผลต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิต แต่เมื่อแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km เส้นกราฟจะขยับไปทางขวา เนื่องจากผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยนำแสงและเซิร์ปของเลเซอร์ ดังแสดงในหัวข้อ 4.3.2

สำหรับโครงข่ายขาขึ้นจะสนใจผลกระทบของเอสไอเอ ในการทดลองจะมีกรณีเริ่มต้น, ตัวแยกแสงที่ค่าสัดส่วนการแยกเท่ากับ 1:64 + เอสไอเอ, 1:256 + เอสไอเอ, และ 1:1024 + เอสไอเอ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านเอสโอเอ

จากรูปที่ 4.22 แนวโน้มของเส้นกราฟจะขยับไปทางขวา ตามอัตราส่วนการแยก 1:64, 1:256, และ 1:1024 สอดคล้องกับค่าไอเอสเอ็นอาร์ที่ลดลง ดังรูปที่ 4.10 (ด้านซ้ายมือ) จึงทำให้เกิดผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสไอที่รุนแรงเพิ่มขึ้น ค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกตัวแยกแสง 1:64 + เอสโอเอ, 1:256 + เอสโอเอ, 1:1024 + เอสโอเอ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} มีค่าเท่ากับ 0.24 dB, 0.94 dB, และ 2.62 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0.32 dB, 1.40 dB, และ 4.41 dB ตามลำดับ

เมื่อนำสมการที่ (3.30) มาจัดให้รูปให้สอดคล้องกับค่าโทษกำลัง จะได้สมการที่ (4.4)

$$PP = 10 \log \left(\frac{P_{r_SOA}}{P_{r_B-B}} \right) \tag{3.30}$$

โดยที่ PP คือ ค่าโทษกำลัง (dB)

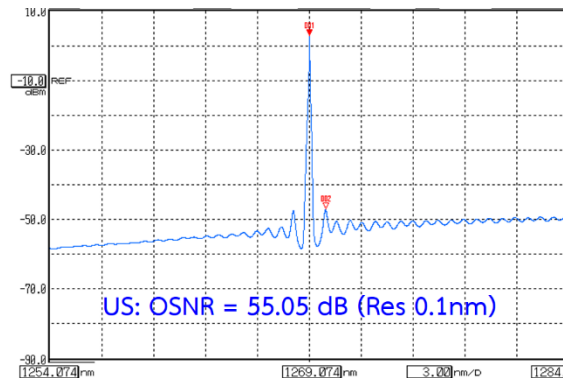
P_{r_SOA} คือ กำลังรับหลังแทรกตัวแยกแสงและตัวขยายแสง (W)

P_{r_B-B} คือ กำลังรับกรณีเริ่มต้น (W)

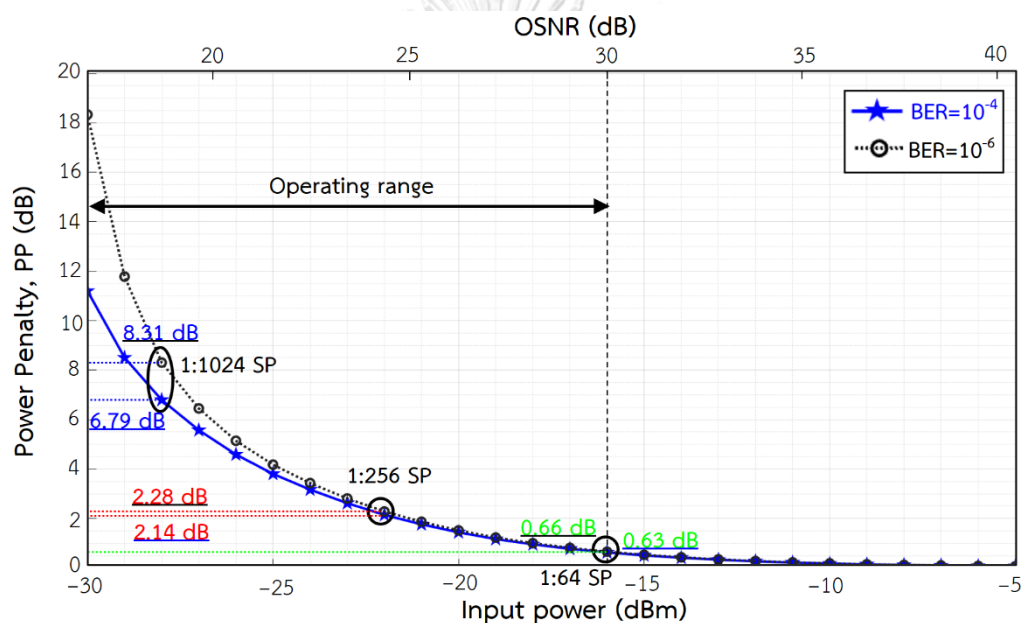
เมื่อนำค่าไอเอสเอ็นอาร์ขาออกเอสโอเอ จากรูปที่ 4.10, ค่าเอสเอ็นอาร์จากสมการที่ (3.26) และ (3.28) ดังตารางที่ 4.9, และนำค่าไอเอสเอ็นกรณเริ่มต้นจากรูปที่ 4.23 มาคำนวณในสมการที่ (4.4) โดยแบ่งที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} และ 10^{-6} จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโทษกำลังกับกำลังแสงขาเข้าและไอเอสเอ็นอาร์ ดังรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของเอสเอ็นอาร์กับอัตราความผิดพลาดบิต

	อัตราความผิดพลาดบิต = 10^{-4}	อัตราความผิดพลาดบิต = 10^{-6}
เอสเอ็นอาร์ (เท่า)	55.32	90.38



รูปที่ 4.23 ค่าโอเอสเอ็นอาร์กรณีเริ่มต้นของโครงข่ายขาขึ้น ที่ความยาวคลื่น 1270 nm

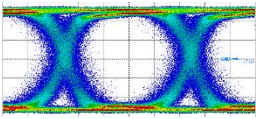
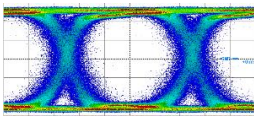
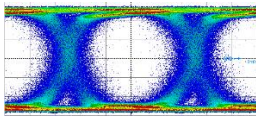
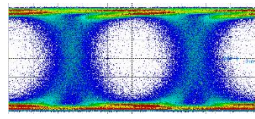


รูปที่ 4.24 ค่าโทษกำลังของโครงข่ายขาขึ้น กรณีส่งผ่านเอสโอเอ

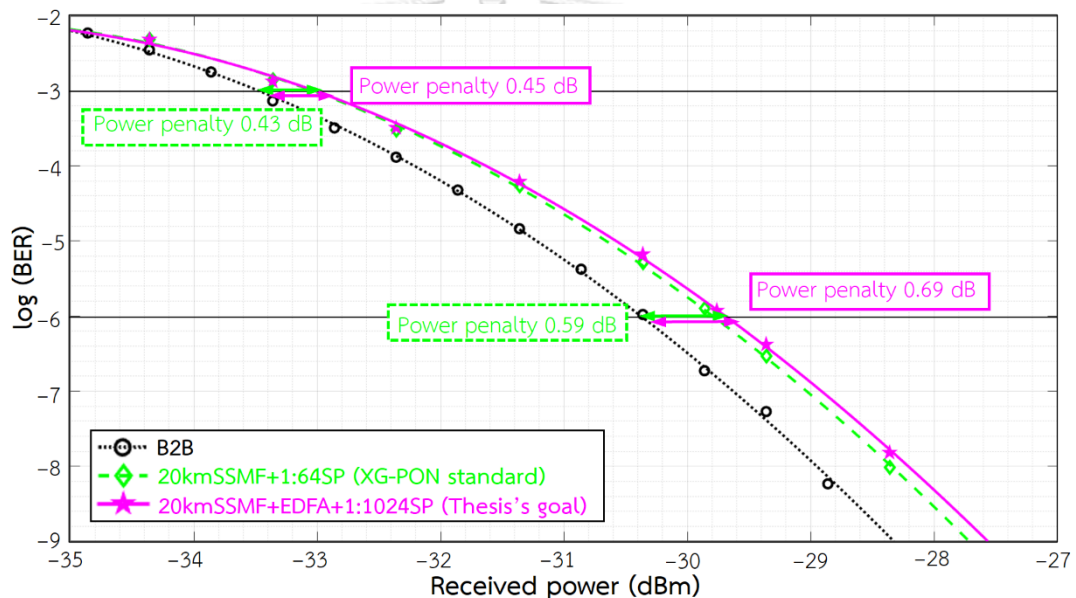
จากรูปที่ 4.24 เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้น ค่าโทษกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงที่กำลังแสงขาเข้าน้อย (ช่วงใช้งานเอสโอเอ) ค่าโทษกำลังที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} และ 10^{-6} จะมีค่าแตกต่างกัน แต่เมื่อกำลังแสงขาเข้าเพิ่มขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับรูปที่ 4.22 ซึ่งค่าโทษกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังแสงขาเข้าลดลง และค่าโทษกำลังที่ระดับความผิดพลาดบิต 10^{-4} จะมีค่าน้อยกว่า 10^{-6}

การวิเคราะห์ค่าอัตราความผิดพลาดบิตด้วยแผนภาพรูปตาทำได้โดยวัดค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (3.27) เมื่อกำหนดให้กำลังรับเท่ากัน (-35 dBm) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 และ 0 จะมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสัดส่วนการแยกที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.10 เนื่องจากผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสไอ

ตารางที่ 4.10 แผนภาพรูปตาโครงข่ายขาขึ้นที่วัดด้วยโมดูลรับส่ง กำลังรับ -35 dBm

B-B	1:64 + เอสโอเอ	1:256 + เอสโอเอ	1:1024 + เอสโอเอ	
				
พารามิเตอร์	B-B	1:64 + เอสโอเอ	1:256 + เอสโอเอ	1:1024 + เอสโอเอ
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 (mV)	8.12	8.35	8.55	10.25
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 (mV)	7.95	8.07	8.57	11.21

4.3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายขาลง

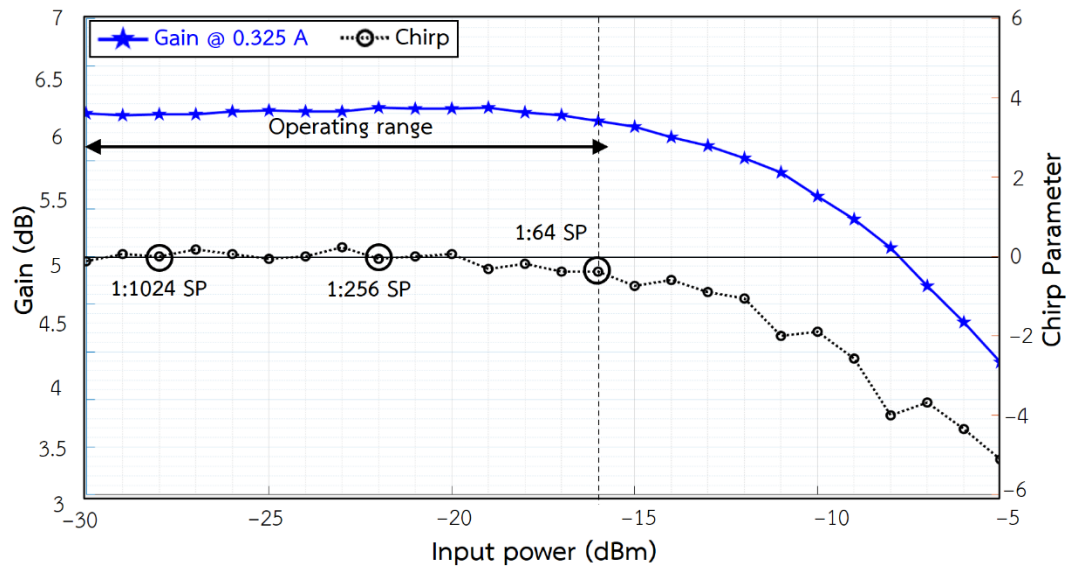


รูปที่ 4.25 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาลง ตามเป้าหมายของวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 4.25 แนวโน้มของเส้นกราฟจะขยับไปทางขวา เนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km และเชิงรับของเลเซอร์ เมื่อพิจารณาค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km + ตัวแยกแสง 1:64 และเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km + อีดีเอฟเอ + ตัวแยกแสง 1:1024 ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} มีค่าเท่ากับ 0.43 dB และ 0.45 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0.59 dB และ 0.69 dB ตามลำดับ

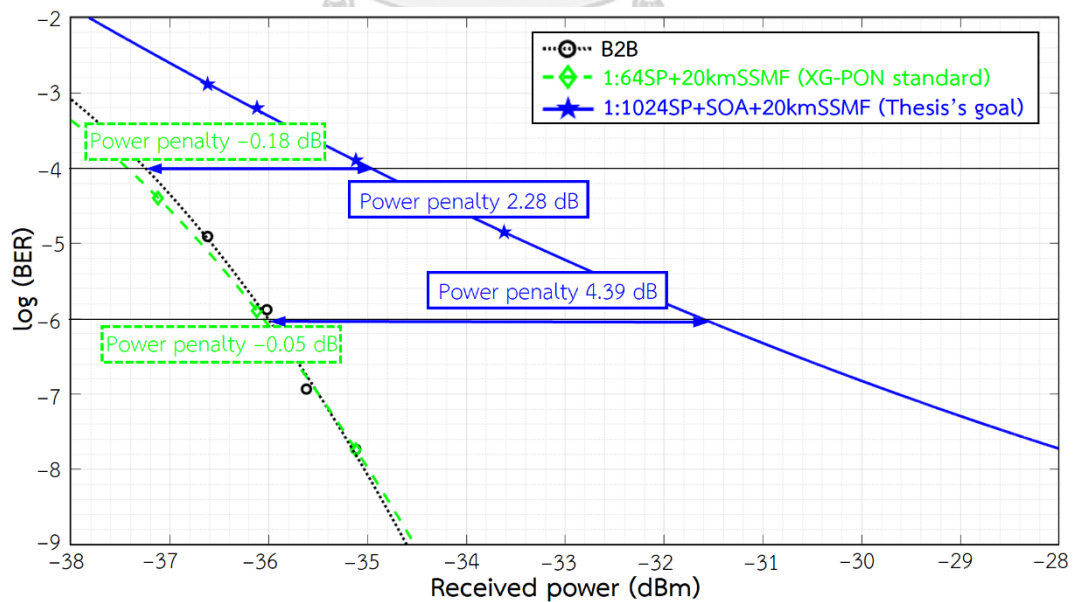
4.3.5 การวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายขาขึ้น

สำหรับโครงข่ายขาขึ้นจำเป็นต้องสนใจค่าเชิร์ปของเอสโอเอ โดยสามารถหาค่าเชิร์ปของเอสโอเอได้จากสมการที่ (3.23) เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์เชิร์ปของเลเซอร์ เท่ากับ 6 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 เชิร์ปของเอสโอเอ

จากรูปที่ 4.26 ค่าเชิร์ปของเอสโอเอจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในช่วงใช้งานของเอสโอเอ ดังนั้นค่าเชิร์ปของเอสโอเอจะไม่มีผลกระทบในโครงข่ายที่วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.27 กราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตของโครงข่ายขาขึ้น ตามเป้าหมายของวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 4.27 เส้นกราฟจะขยับไปทางขวา เนื่องจากผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอี ซึ่งเกิดจากเอสไอเอทีที่มีกำลังแสงขาเข้าน้อย พิจารณาค่าโทษกำลังระหว่างกรณีเริ่มต้นกับแทรกตัวแยกแสง 1:64 + เส้นใยนำแสงโหมตเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km และตัวแยกแสง 1:1024 + เอสไอเอ + เส้นใยนำแสงโหมตเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} มีค่าเท่ากับ -0.18 dB และ 2.28 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ -0.05 dB และ 4.39 dB ตามลำดับ

4.3.6 การส่งข้อมูลพร้อมกันทั้งโครงข่ายขาลงและขาขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองส่งสัญญาณข้อมูลขาลง 9.9532 Gb/s และข้อมูลขาขึ้น 2.4883 Gb/s ในโครงข่ายพร้อมกัน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยโครงข่ายประกอบด้วยเส้นใยนำแสงโหมตเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km, ตัวขยายแสงสองทาง, และตัวแยกแสง 1:1024 สำหรับฝั่งขาลงไม่มีความผิดพลาดบิตเกิดขึ้นเลยที่กำลังรับ -23.37 dBm เนื่องจากกำลังสูญเสียมีค่าน้อยกว่าฝั่งขาขึ้น และกำลังรับมีค่ามากกว่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวตรวจจับแสงรับได้ จึงทำให้ไม่เกิดความผิดพลาดบิตขึ้นเลยที่ฝั่งขาลง สำหรับฝั่งขาขึ้นได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 3.64×10^{-5} ที่กำลังรับ -33.94 dBm เนื่องจากข้อมูลขาขึ้นมีผลกระทบของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่รุนแรง และกำลังสูญเสียมีค่ามากกว่าฝั่งขาลง จึงทำให้เกิดค่าอัตราความผิดพลาดบิตขึ้น แต่อัตราความผิดพลาดบิตยังไม่เกินข้อกำหนดของมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ($BER \leq 10^{-4}$) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายนี้สามารถทำงานได้ตามมาตรฐาน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีเพิ่มสมรรถนะของโครงข่ายเอกซ์จีพอนด้วยตัวขยายแสงสองทางเพื่อรองรับโครงข่ายที่ถูกใช้ในมหานคร ซึ่งมีความหนาแน่นของผู้ใช้บริการสูงมาก จุดประสงค์หลักของการวิจัยคือศึกษาพารามิเตอร์ของตัวขยายแสงสองทางก่อนนำไปแทรกในโครงข่าย จากนั้นจึงประกอบโครงข่ายเอกซ์จีพอน ซึ่งมีอัตราบิตขาลง 9.9532 Gb/s ที่ความยาวคลื่นกึ่งกลาง 1577 nm และอัตราบิตขาขึ้น 2.4883 Gb/s ที่ความยาวคลื่นกึ่งกลาง 1270 nm ให้รองรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 64 ราย แล้วจึงนำตัวขยายแสงสองทางแทรกเข้าไปในโครงข่าย เพื่อรองรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 1024 ราย

ตัวขยายแสงสองทางประกอบด้วยอีดีเอฟเอสำหรับฝั่งขาลงและเอสโอเอสำหรับฝั่งขาขึ้น โดยอีดีเอฟเอทำงานในช่วงความยาวคลื่น 1570 nm ถึง 1589 nm เนื่องจากมีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงแทรกอยู่ข้างหลัง อีดีเอฟเอมีอัตราขยายสัญญาณขนาดเล็กเท่ากับ 20.24 dB และตัวเลขสัญญาณรบกวนอยู่ในช่วง 6.6 ถึง 8.66 dB สำหรับเอสโอเอที่มีตัวกรองแถบความถี่ผ่านแทรกอยู่ข้างหลัง เช่นเดียวกับอีดีเอฟเอ ทำงานในช่วงความยาวคลื่น 1263 nm ถึง 1280 nm เอสโอเอมีอัตราขยายสัญญาณขนาดเล็กเท่ากับ 7.03 dB และตัวเลขสัญญาณรบกวนเท่ากับ 13.3, 9.1, และ 10 dB ที่กำลังแสงขาเข้า -30, -15, และ -5 dBm ตามลำดับ อีกทั้งมีความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันเท่ากับ 33 dB ดังนั้นในการทดลองจำเป็นต้องมีตัวควบคุมโพลาไรเซชันเพื่อควบคุมแสงก่อนเข้าเอสโอเอเสมอ การใช้กำลังไฟฟ้าของตัวขยายแสงสองทางเท่ากับ 1.5675 W

จากนั้นคำนวณงบกำลังของโครงข่ายเอกซ์จีพอนที่แทรกตัวขยายแสงสองทาง โดยออกแบบโครงข่ายให้รองรับระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 1024 ราย งบกำลังที่คำนวณแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายสามารถทำงานได้ ซึ่งขีดจำกัดอยู่ในฝั่งขาขึ้น เนื่องจากเอสโอเอมีอัตราขยายที่น้อยกว่าอีดีเอฟเอ และการลดทอนในเส้นใยนำแสงของฝั่งขาขึ้นมีค่ามากกว่าฝั่งขาลง สำหรับการออกแบบนี้ ฝั่งขาขึ้นจะมีกำลังเผื่อของระบบน้อยมาก แต่ในการทดลองจริงจะมีกำลังเผื่อของระบบเพิ่มขึ้น 10 dB และถ้าลดผู้ใช้บริการเหลือ 256 ราย กำลังเผื่อของระบบจะเพิ่มมาอีก 6 dB เช่นเดียวกัน

ในการวิเคราะห์คุณภาพของโครงข่ายจะพิจารณาค่าโทซกกำลัง ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} สำหรับโครงข่ายขาลง, 10^{-4} สำหรับโครงข่ายขาขึ้น, 10^{-6} สำหรับโครงข่ายขาลงและขาขึ้น ผลกระทบที่สำคัญของโครงข่ายขาลงเกิดจากค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานกับค่าซีร์ปของเลเซอร์ ผลกระทบของโครงข่ายขาขึ้นเกิดจากกำลังแสงของสัญญาณรบกวน

เอเอสอี ซึ่งมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังแสงขาเข้าเอสไอเอมีค่าลดลง สอดคล้องกับโอเอสเอ็นอาร์ที่มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาค่าโทษกำลังของโครงข่ายขาลงระหว่างกรณีเริ่มต้นกับโครงข่ายเอกซ์จีพอน (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km + ตัวแยกแสง 1:64) และโครงข่ายตามวัตถุประสงค์ (เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km + อีดีเอฟเอ + ตัวแยกแสง 1:1024) ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-3} มีค่าเท่ากับ 0.43 dB และ 0.45 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ 0.59 และ 0.69 dB ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าโทษกำลังของโครงข่ายขาขึ้นระหว่างกรณีเริ่มต้นกับโครงข่ายเอกซ์จีพอน (ตัวแยกแสง 1:64 + เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km) และโครงข่ายตามวัตถุประสงค์ (ตัวแยกแสง 1:1024 + เอสไอเอ + เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน 20 km) ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-4} มีค่าเท่ากับ -0.18 dB และ 2.28 dB ตามลำดับ ที่ระดับอัตราความผิดพลาดบิต 10^{-6} มีค่าเท่ากับ -0.05 และ 4.39 dB ตามลำดับ ในกรณีที่ค่าโทษกำลังติดลบเล็กน้อยหมายความว่าไม่มีค่าโทษกำลังเกิดขึ้นในโครงข่าย

เมื่อทดลองส่งสัญญาณพร้อมกันทั้งโครงข่ายขาลงและขาขึ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยโครงข่ายประกอบด้วยเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km, ตัวขยายแสงสองทาง, และตัวแยกแสง 1:1024 ผลการทดลองของฝั่งขาลงไม่มีความผิดพลาดบิตเกิดขึ้นเลยที่ กำลังรับ -23.37 dBm สำหรับฝั่งขาขึ้นได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 3.64×10^{-5} ที่กำลังรับ -33.94 dBm แต่อัตราความผิดพลาดบิตยังไม่เกินข้อกำหนดของมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน ($BER \leq 10^{-4}$)

จากที่กล่าวมาข้างต้นวิทยานิพนธ์นี้สามารถประกอบโครงข่ายเอกซ์จีพอนที่แทรกตัวขยายแสงสอง ให้รองรับเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 20 km และผู้ใช้บริการ 1024 ราย โดยวิเคราะห์ผลกระทบต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในโครงข่ายด้วยแผนภาพรูปตาและอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดสอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1) วิธีวัดอัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงโดยตรงมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องถอดเข้า-ออกตัวขยายแสงสองทางทุกครั้ง เมื่อปรับกำลังแสงขาเข้า ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวัดพารามิเตอร์ที่จำเป็นของตัวขยายแสงสองทาง จากนั้นคำนวณค่าอัตราการขยายและตัวเลขสัญญาณรบกวนด้วยสมการแทนการวัดโดยตรง ทำให้ผลการทดลองมีความแปรปรวนน้อยลง

2) ทุกการทดลองที่มีเอสไอเอ เมื่อเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าหรือตำแหน่งของอุปกรณ์ในโครงข่าย จำเป็นต้องปรับตัวควบคุมโพลาไรเซชันเสมอ

3) โมดูลรับส่งที่ต่อกับบอร์ดประเมินผลจะระบายความร้อนได้ไม่ดี ช่วงแรกของการใช้งานจำเป็นต้องเปิดทิ้งไว้ จนกว่าความยาวคลื่นกึ่งกลางและกำลังแสงของเลเซอร์จะนิ่ง

4) แผนภาพรูปตาที่วัดได้จากโมดูลรับส่งจะมีสองเส้นซ้อนกันเสมอ ไม่สามารถแก้ไขได้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูป

5) พารามิเตอร์คิวที่วัดได้จากแผนภาพรูปตา เมื่อนำไปคำนวณในสมการอัตราความผิดพลาดบิต (3.27) จะได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่า 10^{-12} ซึ่งไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่วัดจริงได้

6) เมื่อแทรกเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน แผนภาพรูปตาจะค่อย ๆ เลื่อนไปทางขวามือของหน้าจอเสมอ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงวัดแผนภาพรูปตาเป็นเวลา 10 วินาที ต่อ 1 รูป เพื่อลดความแปรปรวนของการไหว (Jitter)

7) ถ้าเปลี่ยนเอสโอเอให้มีอัตราการขยายเพิ่มขึ้นและความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาริเซชันน้อยลง ตัวขยายแสงสองทางจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, 2016.
- [2] ITU-T G.984.2 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification, 2019.
- [3] ITU-T G.987.2 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification, 2020.
- [4] ITU-T G.9807.1 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON), 2016.
- [5] ITU-T G.989.2 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification, 2019.
- [6] IEEE Standard 802.3ah-2004 Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks, 2004.
- [7] IEEE Standard 802.3av-2009 Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks, 2009.
- [8] IEEE P802.3ca/D3.1, January 2020 Approved Draft Standard for Ethernet Amendment: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s Passive Optical Networks, 2020.
- [9] S. Shimizu, S. Kinoshita, K. Kitayama, and N. Wada, "0.73-W extremely low-power-consumption optical amplifier repeater for 10G-EPON systems," in *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 21-25 Sept. 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/ECOC.2014.6963938.
- [10] T. Tsutsumi *et al.*, "Long-Reach and High-Splitting-Ratio 10G-EPON System With Semiconductor Optical Amplifier and N:1 OSU Protection," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 1660-1665, 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2399500.
- [11] T. Tsutsumi *et al.*, "Field Measurement and Analysis of Long-Reach and High-Splitting-Ratio 10G-EPON With Optical Amplifier in Central Office," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 10, pp. 1775-1784, 2017, doi:

- 10.1109/JLT.2016.2641000.
- [12] M. Fujiwara, R. Koma, K. Suzuki, and A. Otaka, "Bidirectional EDFAs That Support E2-Class Power Budget of TWDM-PON Without Using Gain-Clamped Light Source," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 8, pp. 1997-2004, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2516558.
- [13] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2015.
- [14] D. Hood and E. Trojer, *Gigabit-Capable Passive Optical Networks*. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [15] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications Principles and Practice*, 3rd ed. Pearson Education Limited, 2009.
- [16] M. J. Connelly, *Semiconductor Optical Amplifiers*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [17] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [18] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 5th ed. Elsevier Inc, 2013.
- [19] T. Watanabe, N. Sakaida, H. Yasaka, F. Kano, and M. Koga, "Transmission performance of chirp-controlled signal by using semiconductor optical amplifier," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 1069-1077, 2000, doi: 10.1109/50.857752.
- [20] M. Osinski and J. Buus, "Linewidth broadening factor in semiconductor lasers--An overview," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 9-29, 1987, doi: 10.1109/JQE.1987.1073204.
- [21] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [22] *ITU-T G.987.3 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*, 2020.
- [23] S. Rakkamdee, B. Boriboon, D. Worasuchep, and N. Wada, "Measurement of characteristic parameters of 10 Gb/s bidirectional optical amplifier for XG-PON," in *Proc.SPIE*, 2018, vol. 10714.
- [24] *ITU-T G.Sup39 Optical system design and engineering considerations*, 2016.
- [25] I.-V. Incorporated. *FDB-1032-SFP+ Evaluation Board*. [Online]. Available:

<https://ii-vi.com/wp-content/uploads/2020/07/FDB-1032-SFP-Prod-Spec-RevC.pdf>.

- [26] I.-V. Incorporated. *50 GHz Single High-speed Photodetector XPDV2320R*. [Online]. Available: <https://ii-vi.com/product/50-ghz-1310-1550nm-single-high-speed-photodetector/>.
- [27] Optoquest. *Polarization Control Related Products*. [Online]. Available: https://www.optoquest.co.jp/en/pdf/pdf_cartridge.pdf.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

มาตรฐานโครงข่ายเอกซ์จีพอน [3, 22]

OLT transmitter (optical interface O _{1d})							
Nominal line rate	Gbit/s	9.95328					
Operating wavelength (Note 1)	nm	1575 – 1580					
Line code	–	NRZ					
Mask of the transmitter eye diagram	–	see clause 9.2.7.6.1					
Maximum reflectance at S/R, measured at transmitter wavelength	dB	NA					
Minimum ORL of ODN at O _{1h} and O _{1d} (Notes 2 and 3)	dB	more than 32					
ODN Class		N1	N2		E1	E2	
			N2a	N2b		E2a	E2b
Mean launched power MIN	dBm	+2.0	+4.0	+10.5	+6	+8	+14.5
Mean launched power MAX	dBm	+6.0	+8.0	+12.5	+10	+12	+16.5
Launched optical power without input to the transmitter	dBm	NA					
Minimum extinction ratio	dB	8.2					
Transmitter tolerance to reflected optical power (Note 7)	dB	more than –15					
Dispersion Range	ps/nm	0-400 (DD20) 0-800 (DD40)					
Minimum side mode suppression ratio	dB	30					
Maximum differential optical path loss	dB	15					
Jitter generation	–	see clause 9.2.9.7.3					
ONU receiver (optical interface O _{1d})							
Maximum optical path penalty (Note 6, Note 9)	dB	1.0 1.0 (DD20) 2.0 (DD40)					
Maximum reflectance at R/S, measured at receiver wavelength	dB	less than –20					
Bit error ratio reference level	–	10 ⁻³ (Note 4)					
ODN Class		N1	N2		E1	E2	
			N2a	N2b		E2a	E2b
Minimum sensitivity at BER reference level (Note 5)	dBm	–28.0	–28.0	–21.5	–28.0	–28.0	–21.5
Minimum overload at BER reference level	dBm	–8.0	–8.0	–3.5	–8.0	–8.0	–3.5
Consecutive identical digit immunity	bit	more than 72					
Jitter tolerance	–	see clause 9.2.9.7.2					
Receiver tolerance to reflected optical power (Note 8)	dB	less than 10					
NOTE 1 – In the case of outdoor OLT deployment, it is allowed for the operating wavelength to span between 1575 – 1581 nm.							
NOTE 2 – There are optional cases where the "minimum ORL of ODN at O _{1h} and O _{1d} " can be as low as 20 dB. (see [b-ITU-T G.983.1] Appendix D)							
NOTE 3 – The value of ONU transceiver reflectance corresponding to the "minimum ORL of ODN at O _{1h} and O _{1d} " is –20 dB. (see [b-ITU-T G.983.1] Appendix II)							
NOTE 4 – See [ITU-T G.Sup39], clause 9.4.1 for additional details.							
NOTE 5 – This sensitivity shall be met in the presence of G-PON and video overlay on the same ODN. If either G-PON, or video overlay, or both of them are absent, the sensitivity may be different (precise value is FFS).							
NOTE 6 – The specified penalty must be met by optics complying with the specified launch power range. If a transmitter exhibits a higher penalty, it can still comply if it equally increases the minimum launch power while remaining under the maximum launch power. In no case should the OPP exceed 2.5 dB.							

NOTE 7 – Parameter known in [ITU-T G.984.2] as "Tolerance to the transmitter incident light power".
 NOTE 8 – Parameter known in [ITU-T G.984.2] as "Tolerance to the reflected optical power".
 NOTE 9 – For ODN branches with a maximum OLT-ONU fibre length greater than 20 km, the applicable maximum OPP is the DD40 value. However, the fibre loss at the downstream wavelength is lower than that at the upstream wavelength and this more than compensates for the extra OPP of DD40 vs. DD20 (i.e., the upstream wavelength loss limits the link distance and therefore loss margin exists for the downstream signal). For systems that connect ONUs at both short and long distances (up to 40 km) to the same OLT port, the optical link must comply with the DD20 maximum OPP value for ONUs at ≤ 20 km and the DD40 maximum OPP value for ONUs at > 20 km.

ONU transmitter (optical interface O _m)				
Nominal line rate	Gbit/s	2.48832		
Operating wavelength	nm	1260 – 1280		
Line code	–	NRZ		
Mask of the transmitter eye diagram	–	see clause 9.2.7.6.2		
Maximum reflectance at R/S, measured at transmitter wavelength	dB	less than –6		
Minimum ORL of ODN at O _m and O _{rd} (Notes 1 and 2)	dB	more than 32		
ODN Class		N1	N2	E1 E2
Mean launched power MIN	dBm	+2.0	+2.0	+2.0 +2.0
Mean launched power MAX	dBm	+7.0	+7.0	+7.0 +7.0
Launched optical power without input to the transmitter (Note 3)	dBm	less than "Minimum sensitivity at BER reference level" – 10		
Maximum Tx enable (Note 3)	bits	32		
Maximum Tx disable (Note 3)	bits	32		
Minimum extinction ratio	dB	8.2		
Transmitter tolerance to reflected optical power (Note 8)	dB	more than –15		
Dispersion Range (Note 4, Note 5)	ps/nm	0 to –140 (DD20) 0 to –280 (DD40)		
Minimum side mode suppression ratio	dB	30		
Jitter transfer	–	see clause 9.2.9.7.1		
Jitter generation	–	see clause 9.2.9.7.3		
OLT receiver (optical interface O _m)				
Maximum optical path penalty (Note 7)	dB	0.5		
Maximum reflectance at S/R, measured at receiver wavelength	dB	less than –20		
Bit error ratio reference level	–	10 ⁻⁴ (Note 6)		
ODN Class		N1	N2	E1 E2
Minimum sensitivity at BER reference level	dBm	–27.5	–29.5	–31.5 –33.5
Minimum overload at BER reference level	dBm	–7.0	–9.0	–11 –13
Consecutive identical digit immunity	bit	more than 72		
Jitter tolerance	–	see clause 9.2.9.7.2		
Receiver tolerance to reflected optical power (Note 9)	dB	less than 10		
NOTE 1 – There are optional cases where the "minimum ORL of ODN at O _m and O _{rd} " can be as low as 20 dB. (see [b-ITU-T G.983.1] Appendix I)				
NOTE 2 – The value of ONU transceiver reflectance corresponding to the "minimum ORL of ODN at O _m and O _{rd} " is –20 dB. (see [b-ITU-T G.983.1] Appendix II)				
NOTE 3 – As defined in clause 9.2.7.3.1.				
NOTE 4 – Dispersion range is considered to be the most appropriate method of specifying a laser's spectral characteristic. These values are considered to be compatible with the older method of specifying values using maximum –20 dB width, for line rates below 2.5 Gbit/s.				
NOTE 5 – The equivalent maximum –20 dB width value is specified as less than 1 nm.				
NOTE 6 – See [ITU-T G.Sup39], clause 9.4.1 for additional details.				

10.3 Forward error correction

The PHY adaptation sublayer employs forward error correction (FEC) to introduce redundancy in the transmitted data. This allows the decoder to detect and correct certain transmission errors. In an XG-PON system, FEC encoding is based on Reed-Solomon (RS) codes.

Reed-Solomon (RS) codes are non-binary codes, which operate on byte symbols and belong to the family of systematic linear cyclic block codes. An RS code takes a data block of constant size and adds extra parity bytes at the end, thus creating a codeword. Using those extra bytes, the FEC decoder processes the data stream, discovers errors, corrects errors, and recovers the original data.

The most commonly used RS codes are RS(255, 239), where a 255-byte codeword consists of 239 data bytes followed by 16 parity bytes, and RS(255, 223), where a 255-byte codeword consists of 223 data bytes followed by 32 parity bytes. The RS(255, 239) code is specified in [ITU-T G.709].

This Recommendation employs RS codes in a truncated, or shortened, form, thus allowing to work with a more convenient codeword and data block size. The shortened codeword of 248 symbols is padded at the encoder with 7 leading zero symbols which are not transmitted but which are reinserted at the receiver prior to decoding.

In the downstream direction, the FEC code is RS (248, 216), which is a truncated form of RS(255, 223) code. In the upstream direction, the FEC code is RS (248, 232), which is a truncated form of RS(255, 239) code. The RS(248, 216) and RS(248, 232) codes are formally described in Annex B.

FEC support is mandatory for both OLT and ONU in the upstream as well as downstream directions. In the downstream direction, FEC is always on; in the upstream direction, the use of FEC is under dynamic control by the OLT.



ตัวขยายแสงสองทาง

PON Amplifier System

Model: PON EDFA

Serial No.: 14112701

Date of repair: 26 April 2017

RMA No.: 623

1. Performance based on integration

***The performances of the PON Amplifier are measured after Down-stream and Up-stream WDM filters are embedded inside the PON Amplifier. The test data shown below is not related to the specification, excluding power consumption.

1.1. Down-stream L-band Amplifier Performances

Parameter	Unit	Test Data
Mode of Operation	-	CW
Operating Wavelength	nm	1575 to 1580
Input Power Level	dB	-20 to -2
Optical Gain @ -12dBm 1580nm input signal	dB	18.62
Output Power @ -2dBm 1580nm input signal	dBm	9.82
Noise Figure @ -12dBm 1580nm input signal	dB	6.98
Output Isolation	dB	Min. 30
Polarization Mode Dispersion	ps	Typ. 0.2, Max. 0.3
Measured Power Consumption [#] (Switch on Down-stream unit only)	W	0.495* (3.3V×0.15A)

Include the driver board current is around 0.02A

* The power consumption is optimized when operated with Up-stream unit

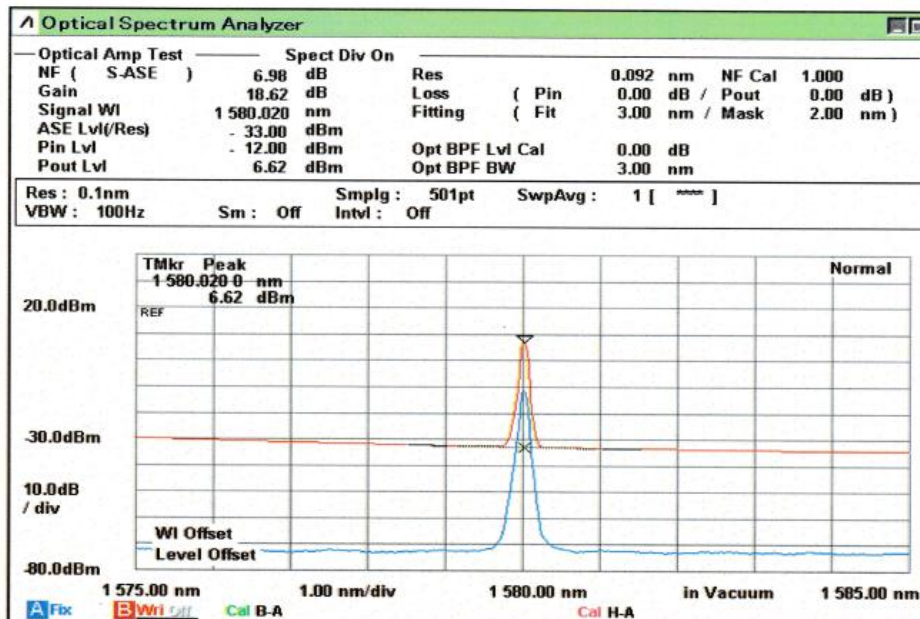


Figure 1: Down-stream L-band Amplifier Gain and Noise Figure measured by Agilent 81680A tunable laser and Anritsu MS9740A optical spectrum analyzer. (Input signal = 1580nm, -12dBm)

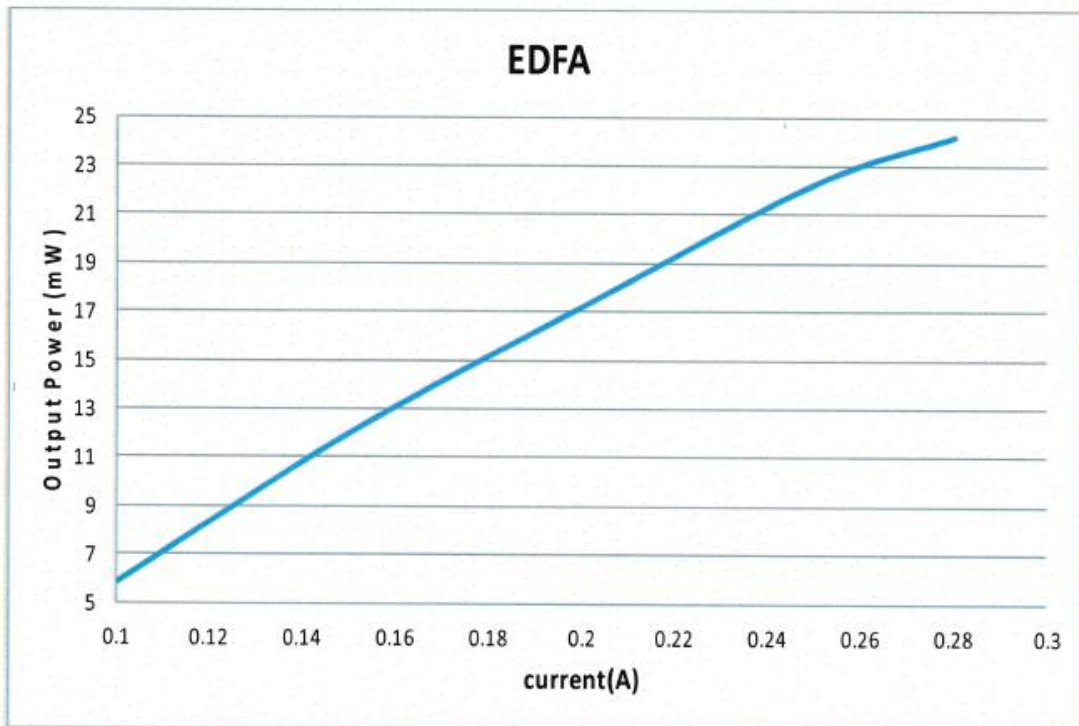


Figure 2: Relationship of Down-stream L-band Amplifier output power and current measured by Thorlabs S145C power head. The relationship is included the driver board current 0.02A. (Input signal = 1575nm, -2dBm)

1.2 US (SOA) Performance:

Parameter	Unit	Test Data
Mode of Operation	-	CW
Operating Wavelength	nm	1268
Optical Gain @ -15dBm 1268nm input signal	dB	6.74 [√]
Output Power @ -15dBm 1268nm input signal	dBm	-8.0
Noise Figure @ -15dBm 1268nm input signal	dB	8.78
Polarization Dependent Gain	dB	~8 [√]
Measured Power Consumption [#] (Switch on Up-stream unit only)	W	1.089* (3.3V×0.33A)

[√] Optical Gain has 8dB variation due to high polarization dependent gain

[#] Include the driver board current is around 0.02A

* The power consumption is optimized when operated with Down-stream unit

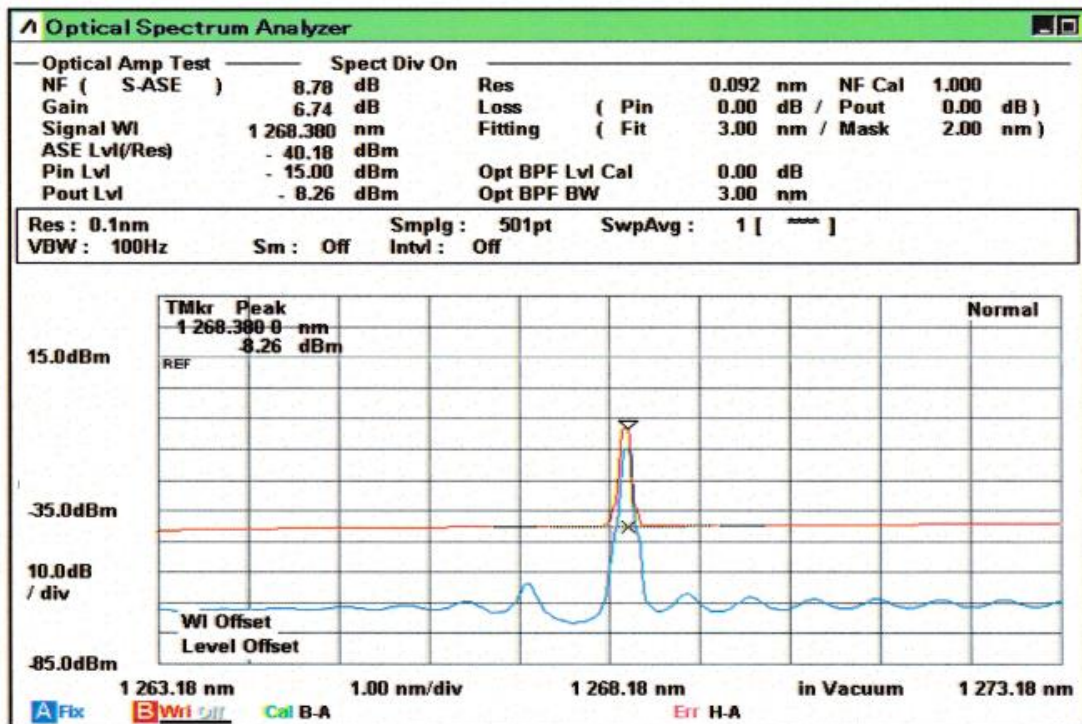


Figure 3: SOA Gain and Noise Figure measured by Amonics 1268nm DFB laser and Anritsu MS9740A optical spectrum analyzer. (Input signal = 1268nm, -15dBm)

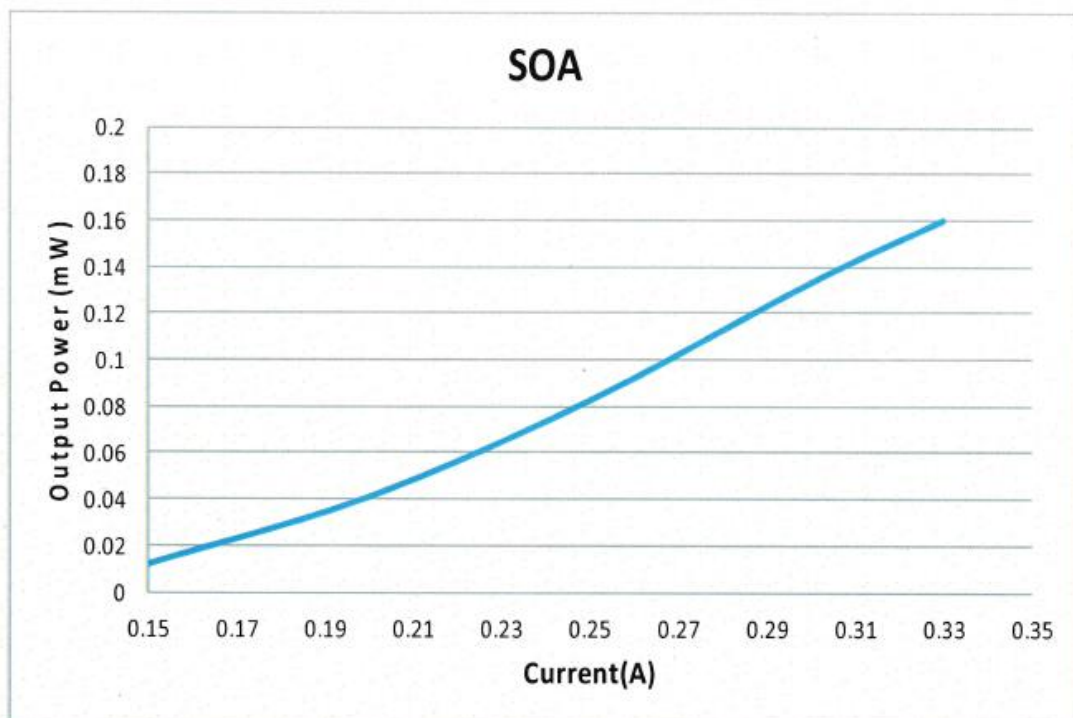


Figure 4: Relationship of US-SOA Gain and current measured by ASOA-1268 and Anritsu MS9740A optical spectrum analyzer. (Input signal = 1268nm, -15 dBm)

2. Operating Conditions:

Parameter	Unit	Specification
Optical Fiber & Connector	-	SMF-28 Min. 0.5m long 900um tubing SC/UPC connector
Control Mode	-	<input checked="" type="checkbox"/> Automatic current control (ACC) <input checked="" type="checkbox"/> Automatic power control (APC) <input checked="" type="checkbox"/> Automatic gain control (AGC)
Monitoring	-	DS-Amp. Output US-Amp. Output

3. Electrical and Mechanical Specifications:

Parameter	Unit	Specification
Operating Temperature Range	°C	0 to +40
Storage Temperature Range	°C	-10 to +70
Dimensions	mm	90(W) x 70(D) x 14(H)
Electrical Connector	-	4-Pin (2mm Pitch)
Supply voltage	VDC	+3.3 ± 0.1
Maximum Power Consumption	W	1.7
Measured Total Power Consumption [#] (DS-Amp. & US-Amp.)	W	1.367*(3.3V×0.415A) to 1.683** (3.3V×0.51A)

Include the driver board current is around 0.03A

* The lowest total power consumption is based on minimum specification of Down-stream and Up-stream.

** The optimization of total power consumption is based on optimized power consumption of Down-stream and Up-stream.

บอร์ดประเมินผล [25]

FINISAR[®]

Product Specification

FDB-1032-SFP+ Evaluation Board for SFP/SFP+/SFP28

OVERVIEW

Finisar's FDB-1032-SFP+ Evaluation Board is designed for testing and evaluating all SFP, SFP+ and SFP28 transceivers as well as SFPwire[®] Active Optical Cables. This is not a module compliance board, but it is compatible with MSA compliant SFP, SFP+ and SFP28 transceivers.

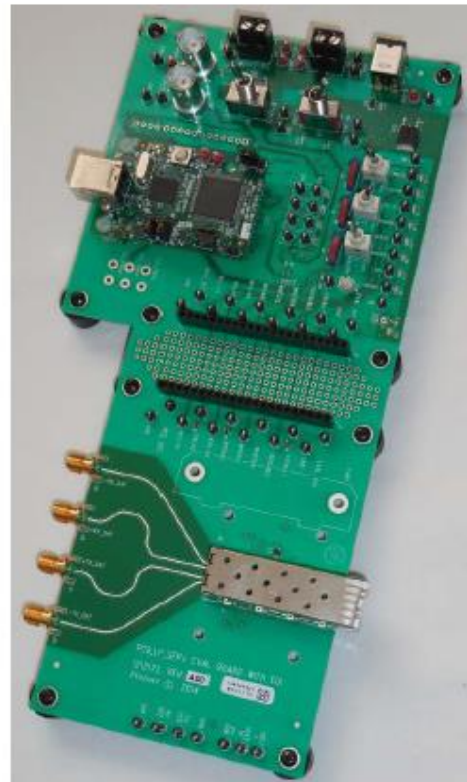
CONTENTS

The board consists of a single SFP28 edge connector and SFP28 cage assembly, four 50-ohm SMA female coaxial connectors (J15-J18) for the high-speed differential transmitter input and receiver output signals, and test points for monitoring the following pins:

- Module RX_LOS
- Module RX Rate Select 0
- Module TX Rate Select 1
- Module Absent
- TWI (Two Wire Interface) SCL and SDA
- TX Disable
- TX Fault
- Eval Board Ground and Vcc
- Module Vcc RX and TX
- Module Ground
- Case Ground

The Evaluation Board has LED's for the:

- RX_LOS
- RX Rate Select 0
- TX Rate Select 1
- Module Absent
- TWI – SDA and SCL (Low)
- TX Disable
- TX Fault
- Eval Board Power 5V
- Eval Board Power 3.3V



Customized Finisar Software that is specific to this product is available. Please contact your local Finisar Representative for details. The GUI needs to be installed on a Windows[®] XP or 7 Operating System (32bit or 64bit machine) that has an available USB port. The USB (type B) port is on the daughter card (called a FDB-INT-USB3).

FINISAR[®]

SPECIFICATIONS

The FDB-1032-SFP+ Evaluation Board has several different power options:

- A laboratory grade power supply with a voltage of 3.3VDC at a maximum of 1.2A at "Eval_Vcc" (J12); Set S7 to "5V REG". Set S8 to "COMBINED". This will use the one power supply to power the Eval board and the SFP. Note that there will be a voltage drop at the SFP due to a diode that protects against accidental reverse voltages. It is recommended to measure the Vcc to the SFP at the "Mod_Vcc" tap near the SFP cage to make sure it is within operating limits. This power drop can be avoided in this setting by attaching the power supply to Mod_Vcc (J14), but the voltage protection will also be avoided.
- An 8-20VDC source (e.g. laptop power supply) at J7; Set S7 to "5V REG". Set S8 to "COMBINED". This is the recommended configuration. The Eval Board has reverse voltage protection and is fused against shorts, but there is no voltage drop at the SFP connector. The jumper-hook labeled 8-20VDC and the ground pin next to it, may also be used in this configuration.
- A laboratory grade power supply with a voltage of 3.3VDC at a maximum of 1.2A at "Module_Vcc" (J14); Set S7 to "5V USB". Set S8 to "SEPARATE". This will use the power supply to power the SFP alone and have the Eval board powered by the USB. There is no reverse voltage protection diode on this supply input.
- For Class 1 (1W max) SFP/SFP+/SFP28 power applications, power via USB. Set S7 to "5V USB". Set S8 to "COMBINED". This will use the USB voltage for the Eval board as well as the SFP. It is recommended to measure the Vcc to the SFP at

"Mod_Vcc" near the SFP cage to make sure it is within operating limits.

Note that the MSA compliant pi filter will still be used for the SFP port in any of the above configurations.

The high speed lines are designed so there is <1ps skew between each differential pair. The standard SMA connectors used for the high speed differential pairs are female.

MANUAL MODE OPERATION

If the GUI interface is not used, the Eval Board can still be used in manual mode, where it can serve as a test platform for the SFP, SFP+ or SFP28 module to be mounted. Set slider switches, S4, S5 and S6 to the "SW" position, which is toward the SFP cage.

For the TWI (Two Wire Interface), use the taps that are labeled "MODSDA" and "MODSCL" near the LEDs. The other TWI taps are for internal use only.

AUTOMATED CONTROL MODE OPERATION

For GUI controlled operation set slider switches S4, S5, and S6 to the "PC" position, away from the SFP cage. Launch the GUI called Transceiver Workbench SFP MSA. This GUI will give you access to the DDM (Digital Diagnostic Monitors) as well as let you see and control masks for the Alarms and Warnings.

GUI INSTALLATION

Please contact Finisar for the required driver and software GUI. See the datasheet (FDB-INT-USB3) for the installation of the drivers necessary for the USB connection. Once the Eval Board is "seen" by the machine, the GUI can be installed. Copy the folder "Transceiver_Workbench_SFP_Customer_x.x.xx" to the computer's hard drive. Find the executable file "Transceiver_Workbench_SFP_MSA.exe" and run this application.

FINISAR[®]

NOTES

The rest of the connectors, pins, tap points, headers and IC's are for Finisar internal use only.

There is one momentary switch on the daughter card of the Eval Board. This is a manual reset of the TWI.

Figure 1 below shows the locations of important points mentioned in this datasheet.

Figure 2 below shows test points and LEDs.

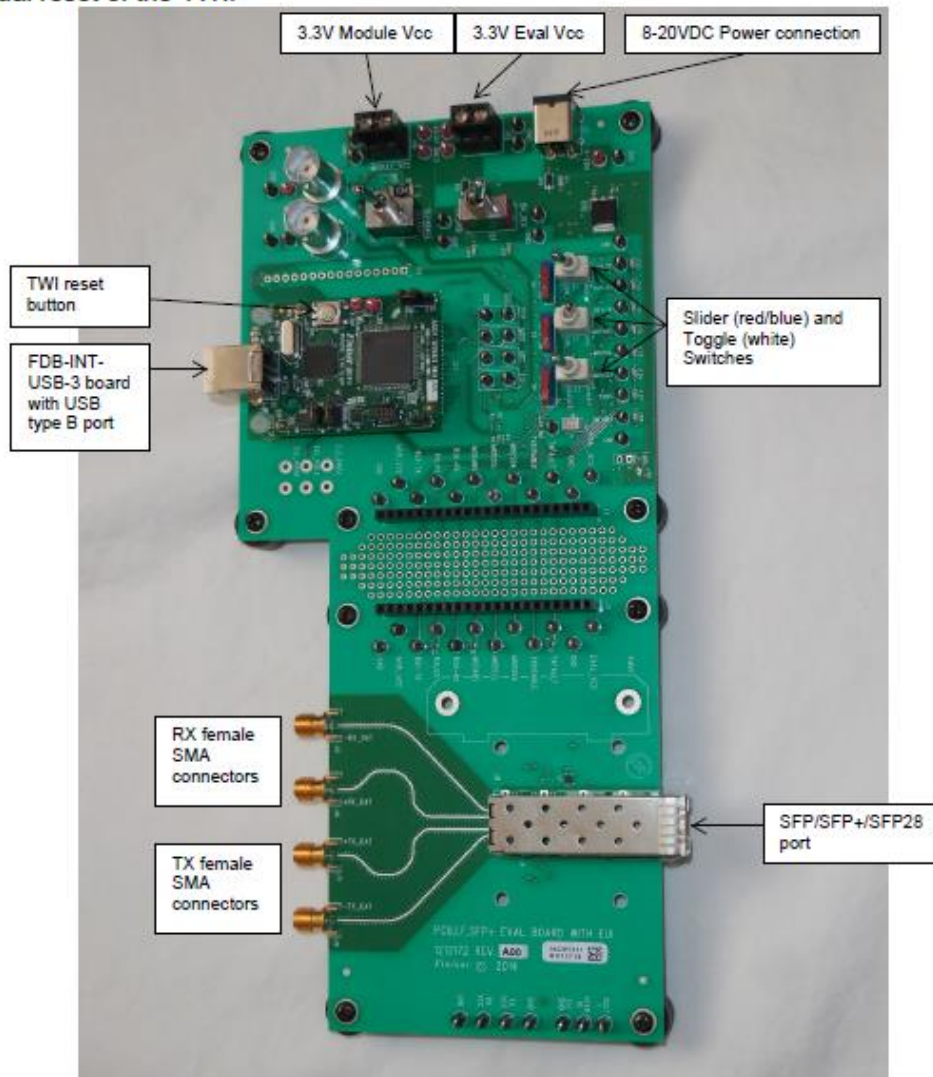


Figure 1. Top view of FDB-1032-SFP+

FINISAR®

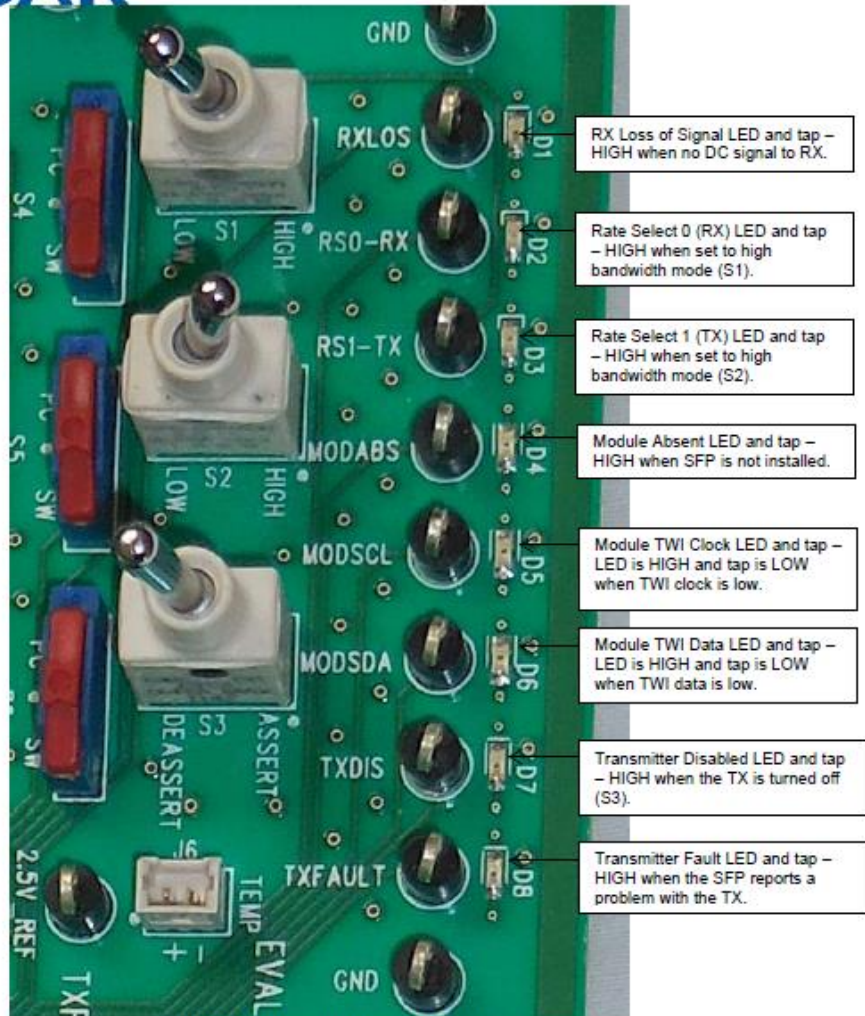


Figure 2. Test Points and LEDs

Finisar Corporation
 1389 Moffett Park Drive
 Sunnyvale, CA 94089-1134
 Tel. 1-408-548-1000
 Fax 1-408-541-6138
sales@finisar.com
www.finisar.com

ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอเอ็น [26]

FINISAR

Product Specification

50 GHz dual-window Photodetector

XPDV2320R

PRODUCT FEATURES

- 50 GHz electrical 3 dB bandwidth
- Excellent flat response within 3 dB bandwidth
- Support of 1310 and 1550nm
- Well matched 50 Ω output
- Unique on-chip integrated bias network

APPLICATIONS

- Communication system at 40 Gb/s
- High-speed lightwave characterization
- Microwave photonics up to 60 GHz



The XPDV23x0R platform exhibits an optimized frequency response in both, power and phase. It is ideally suited for OC-768/STM-256 long haul systems. The on-chip integrated bias network with optimized design ensures an undisturbed frequency response to the 3dB cut-off frequency and saves costs for internal bias-tees. The module is especially designed for both optical windows at 1310nm and 1550nm. Further advantage of the waveguide structure is the unbeatable RF high-power behavior. The photodetector shows a linear response up to an optical input power of 10dBm, resulting in a high output voltage swing avoiding the need for electrical amplification

ORDERING INFORMATION

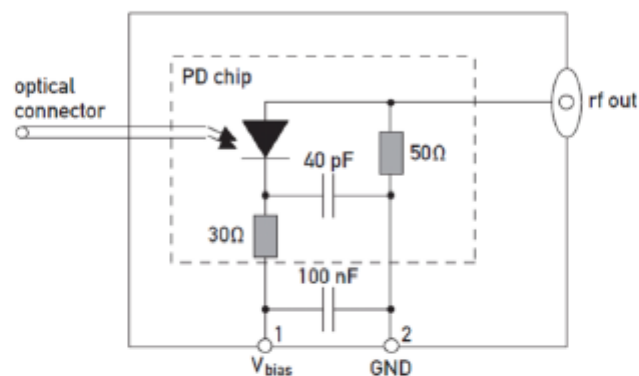
XPDV2320R-Vx-yy

Vx:	F	= V connector® female (standard)
	M	= V connector® male
yy:	FP	= FC/PC (standard)
		other connectors available upon request

I. Pin Description

# Pin	Symbol	Description
1	V_{bias}	PD bias supply, typical 2.8V
2	GND	case ground

II. Block Diagram



III. Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Photodiode Bias Voltage	V_{PD}		0		3.5	V
Average Optical Input Power	P_{opt}	CW or NRZ			13	dBm
Max. Output peak voltage	V_{peak}				1.5	V
Electro Static Discharge	V_{ESD}	$C=100\text{ pF}$, $R=1.5\text{ k}\Omega$ HBM	-250		250	V
Fiber Bend Radius			16			mm



Notice

Stresses greater than those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operations section for extended periods of time may affect reliability.

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation to equipment, take normal ESD precautions when handling this product.

IV. Environmental Conditions

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Relative Humidity	RH	non condensing	5		85	%
Storage Temperature	T _{sto}		-40		85	°C

V. Operating Conditions

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating Case Temperature	T _{Case}		0		75	°C
Operating Wavelength Range	λ		1300 1530		1330 1620	nm
Avg. Optical Input Power Range	P _{OPT}				10	dBm
Photodiode Bias Voltage	V _{PD}		2.0	2.8	3.3	V

VI. Electro-Optical Specifications

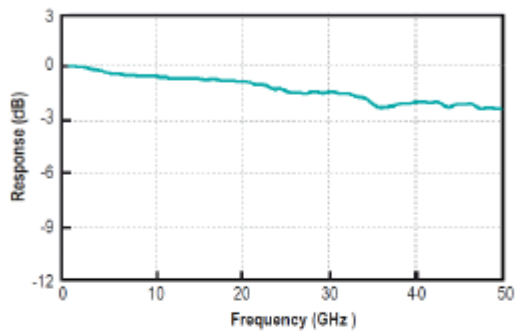
Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Photodiode DC Responsivity	R	1310nm		0.45		A/W
		1550nm		0.65		
Polarization Dependent Loss	PDL	1310nm		0.4	0.7	dB
		1550nm		0.3	0.5	
Optical Return Loss ¹	ORL	1310nm	24			dB
		1550nm	27			
3dB Cut-off Frequency ²	f _{3dB}		45	50		GHz
Output Reflection Coefficient	S ₂₂	0.05 ... 50GHz		-10	-8	dB
Photodiode Dark Current	I _{dark}			5	200	nA
Pulse Width				9	10	ps

Notes:

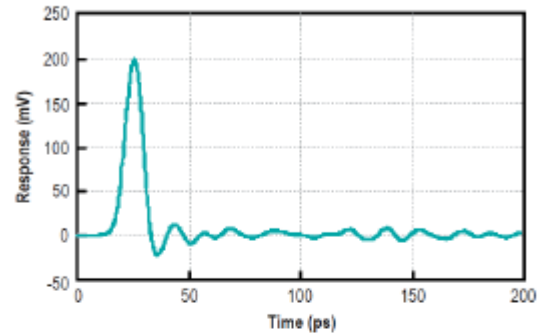
- $\lambda = 1550 \text{ nm}$ or 1310 nm , T_{Case} = 25 °C
- measured using Agilent 86030A 50GHz Lightwave component analyzer

VII. Typical Performance Curves

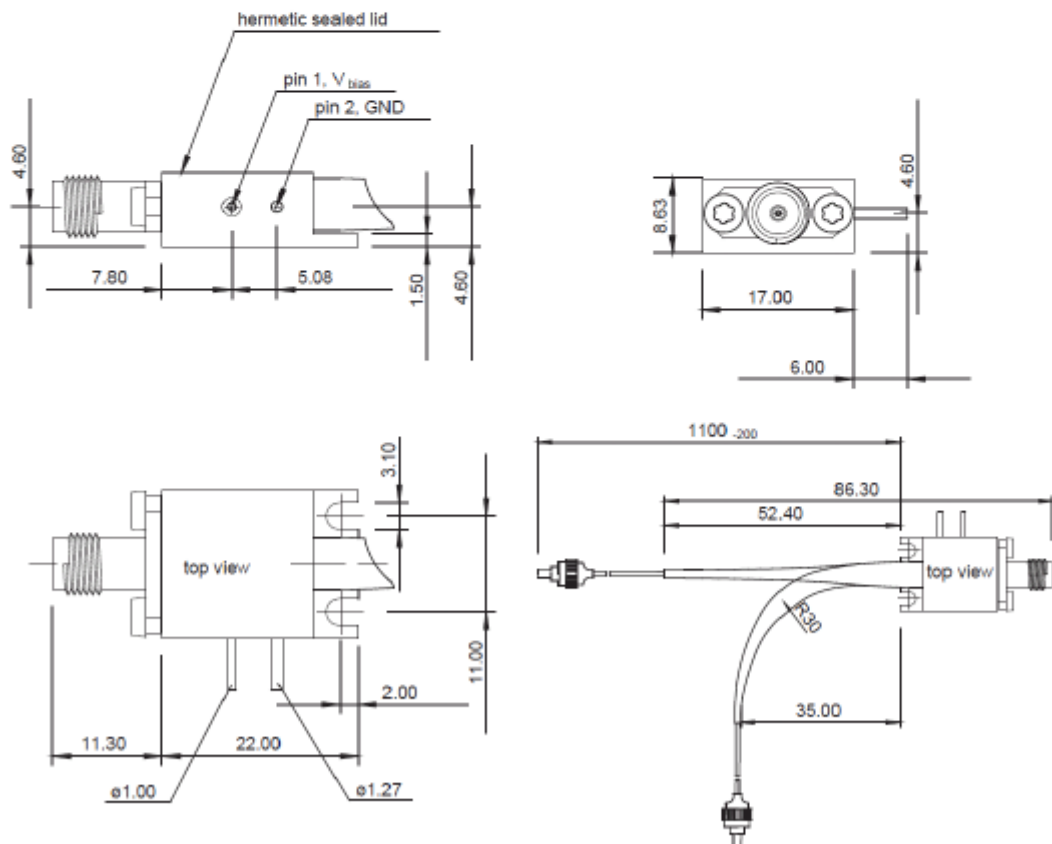
Frequency Response



Pulse Response



VIII. Mechanical Specifications



IX. Accessories

We recommend usage of our individually accessible photodetector power supply (PPS), in particular for optimized performance at high optical input levels. As portable device it provides stable biasing voltage supply and a front display for review on photocurrent.

ORDERING INFORMATION

PPS-03-X

- X: Power supply for XPDV21xxR series
Consists of 1x PPS and 1x cable X-type,
all PPS versions include two 1.5 V
batteries and a BNC-to-female connector
plug cable



X. Revision History

Revision	Date	Description
A1	07/24/2014	• Document created
A2	12/15/2014	• Block diagram revised

Notes

- Any trademarks used in this document are properties of their respective owners.
- Finisar Corporation reserves the right to make changes without notice.

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

ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน [27]

Polarization Control Related Products

OPTOQUEST CO., LTD.

[Table of Contents](#)

Cartridge Series

In this series, a large variety of optical components are modularized as cassettes which enable easy application for various optical experiments and optical measurement.

The polarization state, attenuation volume, optical characteristics of wavelength can be adjusted easily without cumbersome optical axis adjustment.

This series is recommended to be used as a tool for various research and development.

* This series can be applied for near-infrared and visible regions in addition to communication wavelength bands.

3-Stage Polarization Controller
(PCUA)



Features

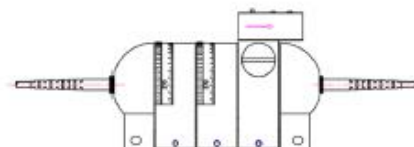
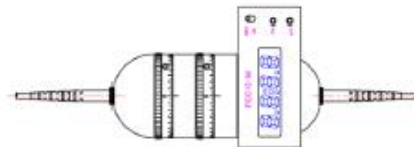
- Easy cassette exchange and replacement
- Low insertion loss
- Crystals, etc. of your request can be modularized as cassettes.

New Line-Up

This cassette can be installed to a standard cartridge type coupling module, which enables confirmation of the optical transmission volume without reconnection of optical fibers.

(*Applied wavelength: 1470-1630 nm)

Power Monitor Cassette
(PCC-15-M)



Polarizer Cassette
(PCC-A-p)

1/4 Wave Plate Cassette
(PCC-A-Q)

1/2 Wave Plate Cassette
(PCC-A-H)



Attenuator Cassette
(PCC-A)



Filter Cassette
(PCC-F)



Extinction Ratio Testing
Module
(PCUE)
※Please refer to 48 pages.



Polarization Control Related Products


OPTOQUEST CO., LTD.

[Table of Contents](#)

Standard Configuration (Example: 1550 nm)


3-Stage Polarization Controller (Model:PCUA)

Model: PCUA15-S/F (15P/15Q/15H) Model: PCUA15-D/F (15P/15Q/15H)	
Insertion Loss	≤ 0.9 dB
Loss Fluctuation	≤ 0.1 dB
Extinction Ratio	≥ 35 dB (Polarizer Cassette) *1
Return Loss	≥ 50 dB
Optical Fiber	SMF or DSF ($\varnothing 3$ -mm Cord)
Optical Connector	FC/SPC or SC/SPC



2-Stage Polarization Controller (Model:PCUB)

Model: PCUB15-S/F (15Q/15H) Model: PCUB15-D/F (15Q/15H)	
Insertion Loss	≤ 0.7 dB
Loss Fluctuation	≤ 0.1 dB
Return Loss	≥ 50 dB
Optical Fiber	SMF or DSF ($\varnothing 3$ -mm Cord)
Optical Connector	FC/SPC or SC/SPC



1-Stage Polarization Controller (Model:PCUC)

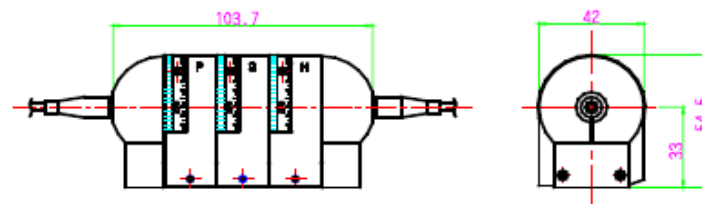
Model: PCUC15-S/F (15P) Model: PCUC15-D/F (15P)	
Insertion Loss	≤ 0.7 dB
Loss Fluctuation	≤ 0.1 dB
Extinction Ratio	≥ 35 dB (Polarizer Cassette) *1
Return Loss	≥ 50 dB
Optical Fiber	SMF or DSF ($\varnothing 3$ -mm Cord)
Optical Connectors	FC/SPC or SC/SPC



*1) Extinction ratios may vary depending on the fiber condition.

Product Dimensions

Model (Example): PCUA



Ordering Instructions

+Polarization Controller

Order format: (1) - (2) - (3) / (4) [(2)(5) / (2)(5) / (2)(5)]

1) Configuration example: 3-Stage Polarization Controller

Order format example: PCUA-15-S/F (15P/15Q/15H)

(Configuration: λ :1550nm, Coupling module+Polarizer + $\lambda/4$ + $\lambda/2$, Fiber: SMF, Connector: FC/SPC,)

2) Configuration example: 2-Stage Polarization Controller

Order format example: PCUB-13-S/SA (13Q/13H)

(Configuration: λ :1310nm, Coupling module + $\lambda/4$ + $\lambda/2$, Fiber: SMF, Connector: SC/Angled PC)

+Polarizer, $\lambda/4$, $\lambda/2$ Cassette

Order format: (1) - (2) - (5)

Order format example: PCC-15-P (Polarizer Cassette, λ :1550nm)

+Attenuator Cassette

Order format: PCC- A

+Wavelength Tunable Filter Cassette*

Order format: PCC- F *Please refer to 23 pages.

+Power monitor Cassette*

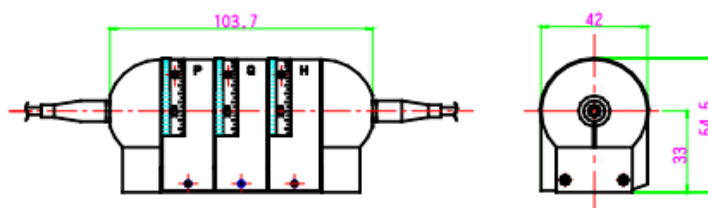
Order format: PCC- 15 -M *Applied wavelength is form 1470nm to 1630nm.

(1) Model	PCUA: 3-Stage PCUB: 2-Stage PCUC: 1-Stage PCMA: 0-Stage (Coupling module only for 3-stage) PCC: Cassette
(2) Wavelength	15: 1550 nm 13: 1310 nm 10: 1060 nm 98: 980 nm 85: 850 nm 78: 780 nm 65: 650 nm 53: 530 nm 48: 480 nm B: Broadband(1260-1620nm)
(3) Optical Fiber	S: SMF D: DSF P: PMF M: MMF
(4) Optical Connector	F: FC/SPC S: SC/SPC FA: FC/Angled PC SA: SC/Angled PC
(5) Cassette (PCC)	P: Polarizer Q: $\lambda/4$ Wave plate H: $\lambda/2$ Wave plate A: Attenuator F: Wavelength Tunable Filter M: Power Monitor

*1. Light sources need to be supplied for manufacturing in the case of wavelength zones with no prepared light sources, such as 480 nm.

Product Dimensions

Model (Example): PCUA



Ordering Instructions

+Polarization Controller

Order format: (1) - (2) - (3) / (4) [(2)(5) / (2)(5) / (2)(5)]

1) Configuration example: **3-Stage Polarization Controller**

Order format example: PCUA-15-S/F (15P/15Q/15H)

(Configuration: λ :1550nm, Coupling module+ Polarizer + $\lambda/4$ + $\lambda/2$, Fiber: SMF, Connector: FC/SPC,)

2) Configuration example: **2-Stage Polarization Controller**

Order format example: PCUB-13-S/SA (13Q/13H)

(Configuration: λ :1310nm, Coupling module + $\lambda/4$ + $\lambda/2$, Fiber: SMF, Connector: SC/Angled PC)

+Polarizer, $\lambda/4$, $\lambda/2$ Cassette

Order format: (1) - (2) - (5)

Order format example: PCC-15-P (Polarizer Cassette, λ :1550nm)

+Attenuator Cassette

Order format: PCC- A

+Wavelength Tunable Filter Cassette*

Order format: PCC- E *Please refer to 23 pages.

+Power monitor Cassette*

Order format: PCC- 15 -M *Applied wavelength is form 1470nm to 1630nm.

(1) Model	PCUA: 3-Stage PCUB: 2-Stage PCUC: 1-Stage PCMA: 0-Stage (Coupling module only for 3-stage) PCC: Cassette
(2) Wavelength	15: 1550 nm 13: 1310 nm 10: 1060 nm 98: 980 nm 85: 850 nm 78: 780 nm 65: 650 nm 53: 530 nm 48: 480 nm B: Broadband(1260-1620nm)
(3) Optical Fiber	S: SMF D: DSF P: PMF M: MMF
(4) Optical Connector	F: FC/SPC S: SC/SPC FA: FC/Angled PC SA: SC/Angled PC
(5) Cassette (PCC)	P: Polarizer Q: $\lambda/4$ Wave plate H: $\lambda/2$ Wave plate A: Attenuator F: Wavelength Tunable Filter M: Power Monitor

*1. Light sources need to be supplied for manufacturing in the case of wavelength zones with no prepared light sources, such as 480 nm.

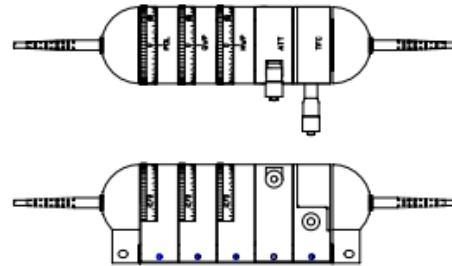
Variations

Various types of polarization controllers are successfully developed to meet the needs of polarization control. Non-cartridge type polarization controllers are also available. Please refer to the following list for an introduction to some of the available variations.

- 5-Stage Cartridge Type

> Features

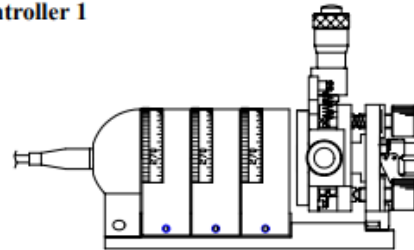
- Capability to contain up to 5 cartridges, instead of 3 which is the limit for the standard type
- Free cartridge combination as the standard type
- Customizable for any wavelength range to be applied



- Positioner-Equipped Polarization Controller 1

> Features

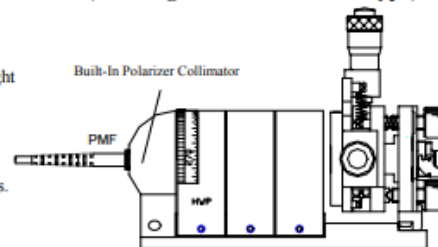
- Used for direct excitation of polarization-controlled light to an arbitrary fiber
- Adjustment is needed in the case of fiber attachment to an adapter part.
- Applicable adapters: SC FC MU and LC
- No tools are needed to exchange SC and FC types.



- Positioner-Equipped Polarization Controller 2 (Rotating Polarization Plane Type)

> Features

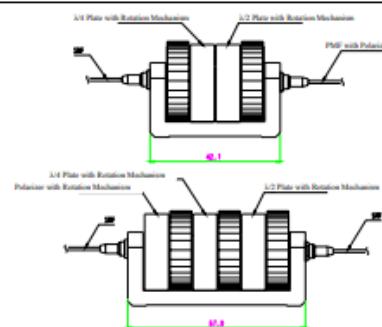
- Used for direct excitation of linearly polarized light to an arbitrary fiber in an arbitrary direction
- Adjustment is needed in the case of fiber attachment to an adapter part.
- Applicable adapters: SC FC MU and LC
- No tools are needed to exchange SC and FC types.



- Small Polarization Controller

> Features

- Small-sized and integrated with a bulk-type wave plate for embedded use
- 2-Stage (Q-H or Q-H + Polarizer-Equipped PMF*)
- * Polarizers are fixed, aligning with the polarization-maintaining axes of fibers.
- 3-Stage (P-Q-H or Q-H-Q)
- $\varnothing 0.25$ bare fibers and $\varnothing 0.9$ fibers are supported.



สมการ (3.14)

$$\begin{aligned}
 NF_{dB} &= 10 \log \left(\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{(\Re P_{in})^2 \left(2q \Re GP_{in} B_e + 2q \Re MS_{ASE} B_o B_e + 4 \Re^2 GP_{in} S_{ASE} B_e + M \Re^2 S_{ASE}^2 (2B_o - B_e) B_e \right)}{2q \Re P_{in} B_e (\Re GP_{in})^2} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{(\Re P_{in})^2 \left(q GP_{in} + q MS_{ASE} B_o + 2 \Re GP_{in} S_{ASE} + M \Re S_{ASE}^2 B_o \right)}{(\Re GP_{in})^2 \left(2q \Re P_{in} B_e \right)} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{1}{G^2} \frac{q GP_{in} + q MS_{ASE} B_o + 2 \left(\frac{\eta q \lambda}{hc} \right) GP_{in} S_{ASE} + M \left(\frac{\eta q \lambda}{hc} \right) S_{ASE}^2 B_o}{q P_{in}} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{q \left(GP_{in} + MS_{ASE} B_o + 2 \left(\frac{\eta \lambda}{hc} \right) GP_{in} S_{ASE} + M \left(\frac{\eta \lambda}{hc} \right) S_{ASE}^2 B_o \right)}{q G^2 P_{in}} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{GP_{in} + MS_{ASE} B_o + 2 GP_{in} \left(\frac{\eta \lambda S_{ASE}}{hc} \right) + M \left(\frac{\eta \lambda S_{ASE}^2 B_o}{hc} \right)}{G^2 P_{in}} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{G P_{in}}{G^2 P_{in}} + \frac{M \frac{P_{ASE}}{MRes} B_o}{G^2 P_{in}} + \frac{2 \eta \lambda G P_{in} \frac{P_{ASE}}{MRes}}{hc G^2 P_{in}} + \frac{M \eta \lambda \left(\frac{P_{ASE}}{MRes} \right)^2 B_o}{hc G^2 P_{in}} \right) \\
 NF_{dB} &= 10 \log \left(\frac{1}{G} + \frac{P_{ASE} B_o}{G^2 P_{in} Res} + \frac{2 \eta \lambda P_{ASE}}{hc MRes G} + \frac{\eta \lambda P_{ASE}^2 B_o}{hc MRes^2 G^2 P_{in}} \right)
 \end{aligned}$$

สมการ (3.19)

$$\begin{aligned}
 NF_{dB} &= 10 \log \left(\frac{1}{G} + \frac{P_{ASE} B_o}{G^2 P_{in} Res} + \frac{2 \eta \lambda P_{ASE}}{hc MRes G} + \frac{\eta \lambda P_{ASE}^2 B_o}{hc MRes^2 G^2 P_{in}} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{1}{G} + \left(\frac{2 P_{ASE}}{G^2 P_{in}} \right) \left(\frac{B_o}{2Res} \right) + \left(\frac{2 \eta \lambda}{hc MRes} \right) \left(\frac{P_{ASE}}{G} \right) + \left(\frac{2 \eta \lambda}{hc MRes} \right) \left(\frac{P_{ASE}^2}{G^2 P_{in}} \right) \left(\frac{B_o}{2Res} \right) \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{1}{G} + \left(\frac{2 P_{ASE}}{G (GP_{in})} \right) \left(\frac{B_o}{2Res} \right) + \left(\frac{2 \eta \lambda}{hc MRes} \right) \left(\frac{P_{ASE}}{\frac{P_{out}}{P_{in}}} \right) + \left(\frac{2 \eta \lambda}{hc MRes} \right) \left(\frac{P_{ASE}^2}{\frac{P_{out}}{P_{in}} (GP_{in})} \right) \left(\frac{B_o}{2Res} \right) \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{1}{G} + \left(\frac{2}{G \times OSNR} \right) \left(\frac{B_o}{2Res} \right) + \left(\frac{2 \eta \lambda}{hc MRes} \right) \left(\frac{P_{in}}{OSNR} \right) + \left(\frac{2 \eta \lambda}{hc MRes} \right) \left(\frac{P_{in}}{OSNR^2} \right) \left(\frac{B_o}{2Res} \right) \right) \\
 NF_{dB} &= 10 \log \left(\frac{1}{G} + \frac{2 B_o / 2Res}{G OSNR} + \frac{2 \eta \lambda P_{in}}{hc MRes OSNR} + \frac{2 \eta \lambda P_{in} B_o / 2Res}{hc MRes OSNR^2} \right)
 \end{aligned}$$

สมการ (3.30)

$$\begin{aligned}
SNR_{P_r} &= \frac{(\Re P_r)^2}{2q\Re P_r B_e + 2q\Re MS_{ASE} B_o B_e + 4\Re^2 P_r S_{ASE} B_e + M\Re^2 S_{ASE}^2 (2B_o - B_e) B_e} \\
&= \frac{1}{\frac{2q\Re P_r B_e}{(\Re P_r)^2} + \frac{2q\Re MS_{ASE} B_o B_e}{(\Re P_r)^2} + \frac{4\Re^2 P_r S_{ASE} B_e}{(\Re P_r)^2} + \frac{M\Re^2 S_{ASE}^2 (2B_o - B_e) B_e}{(\Re P_r)^2}} \\
&= \frac{1}{\frac{2qB_e}{\Re P_r} + \frac{2qMS_{ASE} B_o B_e}{\Re P_r^2} + \frac{4S_{ASE} B_e}{P_r} + \frac{MS_{ASE}^2 (2B_o) B_e}{P_r^2}} \\
&= \frac{1}{\frac{2qB_e}{\Re P_r} + \frac{2qP_{ASE} B_o B_e}{\text{Res}\Re P_r^2} + \frac{4P_{ASE} B_e}{M\text{Res}P_r} + \frac{P_{ASE}^2 (2B_o) B_e}{M\text{Res}^2 P_r^2}} \\
&= \frac{1}{\frac{2qB_e}{\Re P_r} + \frac{2qB_o B_e}{\text{Res}\Re P_r \text{OSNR}} + \frac{4B_e}{M\text{Res}\text{OSNR}} + \frac{2B_o B_e}{M\text{Res}^2 \text{OSNR}^2}} \\
&= \frac{2qB_e}{\Re P_r} + \left(\frac{4qB_e}{\Re P_r} \right) \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) + \left(\frac{4B_e}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) + \left(\frac{4B_e}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) \\
\frac{4qB_e}{2\Re P_r} + \left(\frac{4qB_e}{\Re P_r} \right) \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) + \left(\frac{4B_e}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) + \left(\frac{4B_e}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) &= \frac{1}{SNR_{P_r}} \\
\frac{q}{2\Re P_r} + \left(\frac{q}{\Re P_r} \right) \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) + \left(\frac{1}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) + \left(\frac{1}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) &= \frac{1}{4B_e SNR_{P_r}} \\
\frac{1}{4B_e SNR_{P_r}} - \left(\frac{1}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) \left(1 + \frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) &= \frac{q}{\Re P_r} \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) \right] \\
P_r &= \frac{\Re \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) \right]}{\frac{1}{4B_e SNR_{P_r}} - \left(\frac{1}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) \left(1 + \frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right)} \\
P_r &= \frac{\Re \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) \right]}{q \left[\frac{1}{4B_e SNR_{P_r}} - \left(\frac{1}{M\text{Res}} \right) \left(\frac{1}{\text{OSNR}} \right) \left(1 + \frac{B_o/2\text{Res}}{\text{OSNR}} \right) \right]}
\end{aligned}$$

ดรรชนีคำศัพท์

กรณีเริ่มต้น	Back-to-Back, B2B
กระแสปั๊ม	Pump Current
การแก้ความผิดพลาดล่วงหน้า	Forward Error Correction
การใช้กำลังไฟฟ้า	Power Consumption
การดูดกลืน	Absorption
การตอบสนอง	Responsivity
การเปล่งแสงแบบเกิดเอง	Spontaneous Emission
การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น	Stimulated Emission
การส่งสองทิศทาง	Bidirectional Transmission
กำลังเผื่อของระบบ	system margin
กำลังรับ	Received Power
กำลังสูญเสียแทรก	Insertion Loss, IL
เกรตติงป้อนกลับแบบกระจาย	Distributed Feedback Grating
ขาขึ้น	Upstream
ขาลง	Downstream
ความกว้างสเปกตรัม	Spectrum Width
ความไวแสง	Sensitivity
ความสูญเสียขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน	Polarization Dependent Loss, PDL
ค่าดรรชนีหักเหแสง	Refractive Index
ค่าโทษกำลัง	Power Penalty
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหว	Jitter
เครื่องมือวัดแสง	Optical Measuring Instruments
เครื่องมือวัดอัตราความผิดพลาดบิต	Bit Error Rate Tester, BERT
เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง	Optical Spectrum Analyzer, OSA
เครื่องโอเอ็นยู	Optical Network Unit, ONU
เครื่องโอแอลที	Optical Line Termination, OLT
โครงข่ายกระจายแสง	Optical Distribution Network, ODN
โครงข่ายเข้าถึง	Access Network
โครงข่ายเอกซ์จีพอน	10-Gigabit-Capable PON, XG-PON

โครมาติกดิสเพอร์ชัน	Chromatic Dispersion, CD
งบกำลัง	Power Budget
ช่วงความยาวคลื่นใช้งาน	Operating Wavelength Range
ช่วงอิ่มตัว	Saturation Range
ชั้นสัญญาณรบกวน	Noise Floor
เชิร์ป	Chirp
ด้านขาเข้า-ขาออก	Input-Output Facets
ตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสง	Optical Band-Pass Filter, OBPF
ตัวกรองแถบความถี่ผ่านแสงชนิดแคบ	Narrow Optical Band Pass Filter
ตัวกลางแอ็กทีฟ	Active Medium
ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดจำกัด	Limiting Amplifier, LA
ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิดทรานอิมพีแดนซ์	Trans-Impedance Amplifier, TIA
ตัวขยายแสง	Optical Amplifier
ตัวขยายแสงสองทาง	Bidirectional Optical Amplifier
ตัวขับเลเซอร์	Laser Driver
ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน	Polarization Controller, PC
ตัวคู่ต่อดับเบิ้ลยูดีเอ็ม	Wavelength Division Multiplexing Coupler, WDM Coupler
ตัวตรวจจับแสงชนิดพีไอเอ็น	<i>pin</i> Photodetector
ตัวตรวจจับแสงชนิดเอพีดี	Avalanche Photo-Detector, APD
ตัวตรวจหาความผิดพลาด	Error Detector
ตัวแยกแสง	Optical Splitter
ตัวรับ	Receiver, Rx
ตัวลดทอนแสงปรับค่าได้	Variable Optical Attenuator, VOA
ตัวเลขสัญญาณรบกวน	Noise Figure, NF
ตัวส่ง	Transmitter, Tx
แถบความถี่ซี	C-Band
แถบความถี่แอล	L-Band
บริเวณแอ็กทีฟ	Active Region
บริเวณแอวาแลนซ์	Avalanche Region
บอร์ดประเมินผล	Evaluation Board

แบนด์วิดท์ความละเอียดแสง	Optical Resolution Bandwidth
ประจุวิยุต	Discrete Charge
ประสิทธิภาพควอนตัม	Quantum Efficiency
ผู้ใช้บริการ	User
แผ่นครึ่งคลื่น	Half Wave Plate, HWP
แผนภาพรูปตา	Eye Diagram
แผ่นหนึ่งในสี่คลื่น	Quarter Wave Plate, QWP
โพรไฟล์สเปกตรัม	Spectrum Profile
มหานคร	Metropolis
มาตรฐานโครงข่ายพอน	Passive Optical Network Standard, PON Standard
มาตรวัดเอนกประสงค์แบบดิจิทัล	Digital Multimeter
มิเตอร์วัดกำลังแสง	Optical Power Meter
โมดูลรับส่ง	Transceiver Module
รหัสรีดโซโลมอน	Reed Solomon, RS
รายจ่ายด้านการดำเนินงาน	Operation Expenditure, OPEX
รายจ่ายด้านการลงทุน	Capital Expenditure, CAPEX
เลเซอร์	Laser
เลเซอร์ดีเอฟบี	Distributed Feed-Back Laser, DFB Laser
เลเซอร์ปั๊ม	Pump Laser
วิธีมอดูเลตโดยตรง	Direct Modulation
สถานะกระตุ้น	Excited State
สถานะของโพลาไรเซชัน	State of Polarization
สถานะพื้น	Ground State
สมการงบกำลัง	Power Budget Equation
สมการงบเวลาขาขึ้น	Rise-Time Budget Equation
สมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้น	(Nonlinear Schrödinger Equation
สมการประกอบการถ่างออก	Broadening Factor Equation
สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณ	Signal Quantum Noise
สัญญาณรบกวนควอนตัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี	ASE Quantum Noise

สัญญาณรบกวนจากความร้อน	Thermal Noise
สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเอเอสอี	Signal-ASE Noise
สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณรบกวนเอเอสอีกับเอเอสอี	ASE-ASE Noise
สัญญาณรบกวนเอเอสอี	Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE Noise
สัดส่วนการแยก	Splitting Ratio
สัมประสิทธิ์การลดทอน	Attenuation Coefficient
สำนักงานศูนย์กลาง	Central Office, CO
เส้นใยนำแสง	Optical Fiber
เส้นใยนำแสงหลายโหมด	Multi-Mode Fiber, MMF
เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวมาตรฐาน	Standard Single-Mode Fiber, SSMF
หน้ากาก	mask
ห้องชุด	Apartment
ออสซิลโลสโคป	Oscilloscope
อัตราขยาย	Gain
อัตราขยายสัญญาณขนาดเล็ก	Small Signal Gain
อัตราความผิดพลาดบิต	Bit Error Rate, BER
อัตราบิต	Bit Rate
อัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน	Extinction Ratio, ER
อาคารชุด	Condominium
อีดีเอฟเอ	Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA
อุปกรณ์แพสซีฟ	Passive Device
อุปกรณ์แอ็กทีฟ	Active Device
เอฟทีทีเอช	Fiber-To-The-Home, FTTH
เอสเอ็นอาร์	Signal-to-Noise Ratio, SNR
เอสโอเอ	Semiconductor Optical Amplifier, SOA
แอลอีดี	Light Emitting Diode, LED
โอเอสเอ็นอาร์	Optical SNR, OSNR

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสุชัชจ รักคำมี
วัน เดือน ปี เกิด	22 ธันวาคม 2537
สถานที่เกิด	นครสวรรค์, ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	199/37 หมู่ 1 ตำบลนครสวรรค์ตก อำเภอเมืองนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ 60000
ผลงานตีพิมพ์	Suchaj Rakkamdee, Budsara Boriboon, Duang-rudee Worasuchee, and Naoya Wada, "Measurement of characteristic parameters of 10 Gb/s bidirectional optical amplifier for XG-PON," in Proc. SPIE, 2018, vol. 10714.