

การทดลองโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่อัตราบิตข้อมูล 10 กิกะบิตต่อวินาที ด้วยระยะทางไกลและ
ผู้รับบริการจำนวนมาก



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Experiments of 10 Gb/s Optical Access Network with Long Reach and
A Large Number of Subscribers

Miss Budsara Boriboon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดลองโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่อัตราบิตข้อมูล 10 กิกะบิตต่อวินาที ด้วยระยะทางไกลและผู้รับบริการจำนวน มาก
โดย	นางสาวบุษรา บริบูรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงฤดี วรรณสุชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงฤดี วรรณสุชีพ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

บุขรา บริบูรณ์ : การทดลองโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่อัตราบิตข้อมูล 10 กิกะบิตต่อวินาที ด้วยระยะทางไกลและผู้รับบริการจำนวนมาก (Experiments of 10 Gb/s Optical Access Network with Long Reach and A Large Number of Subscribers) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ, 153 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง (Optical Access Network) ที่อัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s ตามมาตรฐาน ITU-T G.987 โดยส่งข้อมูลขาลง (Downstream) ที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm จุดประสงค์เพื่อมีระยะทางไกลสุดเท่ากับ 62 Km และมีจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด 256 ผู้รับบริการ เพราะฉะนั้นจึงวิเคราะห์หงบกำลัง (Power Budget) และงบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget) ซึ่งจะพิจารณาข้อจำกัดจากกำลังสูญเสียทั้งหมด (Total Loss) และการถ่างออกของสัญญาณในเทอมเวลา (Pulse Broadening Time) อันเนื่องมาจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด คือ ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML) ที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) เท่ากับ 8.69 dB และตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter) ที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 11.18 dB และ 15.17 dB โดยจะพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน ทั้งนี้ยังพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดบิตใน 4 กรณีต่างๆ ดังนี้ (1) กรณีวนซ้ำกลับ (Loopback), (2) กรณีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF) ระยะทางไกล 60 Km ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่ง มีผลกระทบมาจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน, (3) กรณีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทางไกล 62 Km และแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) เพื่อเพิ่มงบบกำลังในโครงข่าย ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่ง เช่นเดียวกัน มีผลกระทบมาจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE Noise) และ (4) กรณีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทางไกล 62 Km แทรกตัวขยายอีดีเอฟเอและตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF) เพื่อลดสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดจากตัวขยายอีดีเอฟเอ ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าดีขึ้น โดยสรุปคือวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่อัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s โดยส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานความยาว 62 Km และมีจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด 256 ผู้รับบริการ โดยใช้ตัวขยายอีดีเอฟเอ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5670267721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: XG-PON / OPTICAL SPLITTER / ERBIUM DOPED-FIBER AMPLIFIER / BIT ERROR RATE

BUDSARA BORIBOON: Experiments of 10 Gb/s Optical Access Network with Long Reach and A Large Number of Subscribers. ADVISOR: ASSOC. PROF. DUANG-RUDEE WORASUCHEEP, Ph.D., 153 pp.

This research demonstrates optical access network at bit rate 10 Gb/s based on XG-PON standard ITU-T G.987 with only downstream wavelength about 1550 nm. The purposes are the maximum distance of 62 Km and a large number of 256 subscribers. In consequence, power budget and rise-time budget equations are applied to calculate the limitation of total loss and pulse broadening time due to Chromatic Dispersion (CD). This thesis uses two optical transmitters: (1) Electro-Absorption Modulation Laser (EML) with 8.69 dB Extinction Ratio (ER) and (2) Mach-Zehnder Modulation Transmitter (MZM Transmitter) with 11.18 dB and 15.17 dB ERs, resulting in different Bit Error Rate (BER). Moreover, there are 4 cases to consider the trend of BER curves. The first case is loopback case. The second case is 60-Km Standard Single Mode Fiber (SSMF) that causes worse BER because of CD. The third case is 62-Km SSSM with Erbium Doped-Fiber Amplifier (EDFA) to increase power budget. Its BER gets worse due to Amplified Spontaneous Emission noise (ASE noise). The last case is 62-Km SSMF with EDFA and Tunable Optical Band Pass Filter (TOBPF) in order to reduce ASE noise from EDFA, that results in better BER. In conclusion, this research achieves the optical access network at bit rate 10 Gb/s with the maximum distance of 62-Km SSMF and 256 subscribers by using EDFA.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณสำหรับความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งของ รศ.ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แรงกระตุ้น แรงบันดาลใจในการทำงานวิจัย อีกทั้งข้อคิด ประสบการณ์ เกี่ยวกับการดำเนินชีวิต

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบและอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในวิชาเรียนที่เปิดสอน และให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ Photonic Network System Laboratory ภายใต้ National Institute of Information and Communications Technology of Japan (NICT) ที่สนับสนุนให้ไปฝึกงานที่ญี่ปุ่นระยะเวลา 3 เดือน ได้ประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ โดยมีนักวิจัยที่มีความเชี่ยวชาญให้คำปรึกษา

ขอบพระคุณบริษัท OPTOQUEST Co., Ltd ประเทศญี่ปุ่น สำหรับการสนับสนุนตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์ ตัวควบคุมโพลาริเซชัน และเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโพลาริเซอร์ ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง (Center of Excellence in Electrical Power Technology) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อซื้อตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver) แบบ XFP และตัวแยกแสง (Optical Splitter) ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอบพระคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ รอบตัวผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และกำลังใจในการวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
ดัชนีคำศัพท์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม.....	7
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
1.6 ประมวลผลวิทยานิพนธ์.....	16
บทที่ 2 อุปกรณ์สำคัญในโครงข่าย.....	17
2.1 อุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณแสง.....	17
2.1.1 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML).....	19
2.1.1.1 เลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed Feedback Laser, DFB Laser).....	20
2.1.1.2 ตัวกล้ำสัญญาณแสงแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM).....	22
2.1.2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter).....	22

2.1.2.1 เลเซอร์ดีบีอาร์ (Distributed Bragg Reflector Laser, DBR Laser)	23
2.1.2.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller).....	25
2.1.2.3 ตัวกั้วสัญญาณแบบมัท-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM).....	25
2.2 อุปกรณ์ภายในโครงข่าย.....	26
2.2.1 ตัวแยกแสง (Optical Splitter).....	27
2.2.2 ตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA).....	33
2.2.3 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF).....	39
2.3 อุปกรณ์ภาครับสัญญาณแสง.....	41
2.3.1 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA)	42
2.3.2 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter).....	43
2.3.3 ตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี (Avalanche Photo Diode, APD)	44
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	47
3.1 ผลกระทบจากการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF)	47
3.1.1 การลดทอน (Attenuation)	47
3.1.2 โครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD).....	49
3.2 สมการงบกำลัง (Power Budget Equation)	53
3.3 สมการบเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation).....	54
3.4 ผลกระทบจากตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี	56
3.4.1 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise)	56
3.4.2 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)	57
3.4.3 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise).....	57

3.5 ผลกระทบจากตัวขยายอดีเอฟเอ.....	57
3.5.1 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure).....	58
3.5.2 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)	58
3.5.3 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise).....	59
3.5.4 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอี (Signal-ASE Noise)	59
3.5.5 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับสัญญาณเอเอสอี (ASE-ASE Noise)	60
3.6 ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)	60
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	63
4.1 การวิเคราะห์ห้งบกำลัง (Power Budget Analysis)	63
4.2 การวิเคราะห์ห้งเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Analysis).....	66
4.3 การวิเคราะห์ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Analysis) กรณีต่างๆ.....	73
4.3.1 ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER).....	73
4.3.1.1 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML)	74
4.3.1.2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter).....	75
4.3.2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML).....	76
4.3.2.1 กรณีวนซ้ำกลับ (Loopback)	77
4.3.2.2 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 60 กิโลเมตร	78
4.3.2.3 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 62 กิโลเมตร ใช้ตัวแยกแสงและตัวขยายอดีเอฟเอ	79

4.3.3 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter).....	80
4.3.3.1 กรณีวนซ้ำกลับ (Loopback)	81
4.3.3.2 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐานระยะทาง 60 กิโลเมตร	82
4.3.3.3 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐานระยะทาง 62 กิโลเมตร ใช้ตัวแยกแสงและตัวขยายอิตีเอฟเอ.....	83
4.3.4 กรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ชนิด.....	85
บทที่ 5 การคำนวณผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB	88
5.1 การคำนวณโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion Computation).....	88
5.2 การคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Computation).....	89
5.2.1 กรณีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER)	89
5.2.2 กรณีวนซ้ำกลับ (Loopback).....	94
5.2.3 กรณีตัวขยายอิตีเอฟเอ	96
5.2.4 กรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้.....	100
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	104
6.1 สรุปผลการวิจัย	104
6.2 ข้อเสนอแนะ	105
รายการอ้างอิง	106
ภาคผนวก.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	153

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ	2
รูปที่ 1.2 ตัวรับส่งสัญญาณแสง	4
รูปที่ 1.3 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์	4
รูปที่ 1.4 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai	5
รูปที่ 1.5 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura	5
รูปที่ 1.6 ตัวขยายอิตีเอฟเอของบริษัท JDSU	6
รูปที่ 1.7 ตัวขยายอิตีเอฟเอของบริษัท Fitel	6
รูปที่ 1.8 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU	7
รูปที่ 1.9 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST.....	7
รูปที่ 2.1 โครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงโดยแทรกตัวขยายอิตีเอฟเอก่อนตัวแยกแสง	17
รูปที่ 2.2 กระบวนการการเกิดแสงในเลเซอร์	18
รูปที่ 2.3 ตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver).....	19
รูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อกภายในตัวรับส่งแสง	20
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของเลเซอร์ Fabry-Perot.....	21
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเลเซอร์ดีเอฟบี	21
รูปที่ 2.7 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)	22
รูปที่ 2.8 (a) เลเซอร์ดีเอฟบี (b) เลเซอร์ดีบีอาร์	23
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงที่ปรับได้ (Tuning Range), ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing) และ ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด (Source's Spectral Width)	24
รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller, PC)	25
รูปที่ 2.11 ตัวกล้ำสัญญาณแบบมัลติ-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM).....	26

รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ภายในโครงข่าย	26
รูปที่ 2.13 ตัวแยกแสงแบบ (a) แบบสมมาตรเอกรูป (Uniformly Symmetric) (b) แบบไม่สมมาตรเอกรูป (Uniformly Asymmetric).....	28
รูปที่ 2.14 การลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากความยาวของท่อนำคลื่น	29
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกและความยาวคลื่นแสงส่งผ่านตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมทั้ง 2 แบบ	29
รูปที่ 2.16 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura.....	30
รูปที่ 2.17 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai	32
รูปที่ 2.18 องค์ประกอบภายในเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater)	33
รูปที่ 2.19 แอปพลิเคชันของตัวขยายแสง	35
รูปที่ 2.20 ทิศทางการป้อนแสงภายในตัวขยายอดีเอฟเอ	37
รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของอัตราการขยายของตัวขยายอดีเอฟเอ	38
รูปที่ 2.22 ตัวขยายอดีเอฟเอของบริษัท JDSU.....	38
รูปที่ 2.23 ตัวขยายอดีเอฟเอของบริษัท Fitel	39
รูปที่ 2.24 องค์ประกอบภายในตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ชนิด Bragg-Grating-Based Devices.....	40
รูปที่ 2.25 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU	41
รูปที่ 2.26 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST	41
รูปที่ 2.27 แผนภาพบล็อกของภาครับสัญญาณแสง	42
รูปที่ 2.28 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท JDSU	43
รูปที่ 2.29 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท OPTOQUEST	43
รูปที่ 2.30 มิเตอร์วัดกำลังแสงของบริษัท THORLABS	44
รูปที่ 2.31 โครงสร้างภายในตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี	45
รูปที่ 2.32 องค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำภายในตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี	46
รูปที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง.....	48

รูปที่ 3.2 การถ่างออกของสัญญาณตามระยะทาง	49
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดรรชนีหักเหแสงและความยาวคลื่นแสง	50
รูปที่ 3.4 พื้นที่หน้าตัดของโพรไฟล์ดรรชนี (Cross-Sections of Index Profile) (a) แบบค่าเหมาะสมที่ 1310 nm (1310-nm-Optimized) (b) แบบค่าดิสเพอร์ชันเปลี่ยน (Dispersion-Shifted) (c) แบบค่าดิสเพอร์ชันเรียบ (Dispersion-Flattened) และ (d) แบบพื้นที่แกนกลางประสิทธิภาพกว้าง (Large-Effective-Core-Area).....	51
รูปที่ 3.5 (a) ดิสเพอร์ชันที่เกิดจากวัสดุและท่อนำคลื่น (b) ผลรวมดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวแต่ละแบบ.....	52
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการเกิดกำลังสูญเสียแทรกภายในโครงข่าย	54
รูปที่ 3.7 ตัวรับแสง	56
รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของผู้รับบริการจำนวน 64 ผู้รับบริการ.....	64
รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกของผู้รับบริการจำนวน 256 ผู้รับบริการ	65
รูปที่ 4.3 แผนภาพรูปตาของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้า.....	67
รูปที่ 4.4 กราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของ 1 เส้น.....	68
รูปที่ 4.5 กราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแก้วนำแสงที่ใช้ทั้งหมด 6 เส้น.....	68
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมแสงของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้า	69
รูปที่ 4.7 แผนภาพรูปตาของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์.....	70
รูปที่ 4.8 กราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้	71
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมแสงของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์	72
รูปที่ 4.10 แผนภาพรูปตาเมื่อมีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ (a) 8.69 dB และ (b) 15.17 dB...	73
รูปที่ 4.11 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน 8.69 dB ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้า	74
รูปที่ 4.12 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน 15.17 dB และ 11.18 dB ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์.....	75
รูปที่ 4.13 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน 15.17 dB, 11.18 dB และ 8.69 dB	76

รูปที่ 4.14 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการ การดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า	77
รูปที่ 4.15 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 60 Km ของตัว ส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า	78
รูปที่ 4.16 แผนภาพรูปตาที่ระยะทาง 60 Km ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการ ดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า.....	78
รูปที่ 4.17 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 62 Km ใช้ตัว แยกแสงและตัวขยายอิตีเอพเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า	79
รูปที่ 4.18 แผนภาพรูปตาหลังจากออกจากตัวขยายอิตีเอพเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลต ด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า.....	80
รูปที่ 4.19 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลค-เซนเดอร์... 81	
รูปที่ 4.20 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 60 Km ของตัว ส่งสัญญาณแสงแบบมัลค-เซนเดอร์.....	82
รูปที่ 4.21 แผนภาพรูปตาที่ระยะทาง 60 Km ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลค-เซนเดอร์.....	82
รูปที่ 4.22 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 62 Km ใช้ตัว แยกแสงและตัวขยายอิตีเอพเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลค-เซนเดอร์	83
รูปที่ 4.23 แผนภาพรูปตาหลังจากออกจากตัวขยายอิตีเอพเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลค-เซน เดอร์.....	84
รูปที่ 4.24 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีใช้ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบ ปรับได้ 2 ชนิด.....	85
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมแสงเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU	86
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมแสงเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST	86
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมแสงของตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของ (a) จาก บริษัท JDSU และ (b) จากบริษัท OPTOQUEST.....	87
รูปที่ 5.1 ผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณ.....	88

รูปที่ 5.2 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน
แตกต่างกัน..... 92

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกราฟที่มาจากกรคำนวณและการทดลองในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิง
ชันแตกต่างกัน..... 93

รูปที่ 5.4 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีวนซ้ำกลับจากการคำนวณ..... 95

รูปที่ 5.5 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีวนซ้ำกลับจากการคำนวณและการทดลอง 96

รูปที่ 5.6 แผนภาพบล็อกแสดงกำลังสูญเสียหลังตัวขยายอีดีเอฟเอ..... 96

รูปที่ 5.7 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอ..... 100

รูปที่ 5.8 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ .. 103



สารบัญตาราง

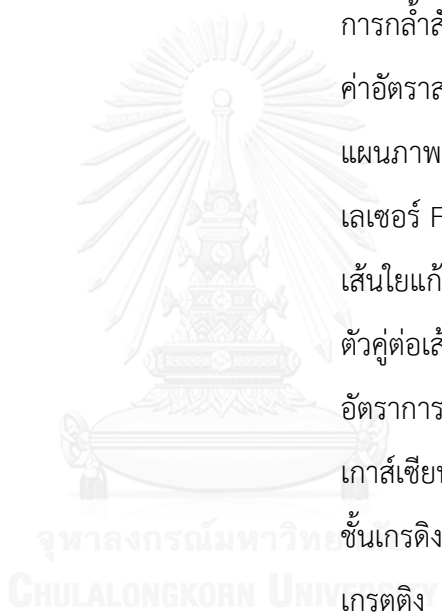
	หน้า
ตารางที่ 1.1 มาตรฐาน IEEE	8
ตารางที่ 1.2 มาตรฐาน ITU-T	8
ตารางที่ 2.1 กำลังแสงสูญเสียในตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura.....	31
ตารางที่ 2.2 กำลังแสงสูญเสียในตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai	32
ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแต่ละความยาวคลื่นแสงหลักในการใช้งาน	48
ตารางที่ 4.1 งบกำลังและกำลังแสงสูญเสียทั้งหมดในกรณีระยะทาง 62 Km และ 64 ผู้รับบริการ..	64
ตารางที่ 4.2 งบกำลังและกำลังแสงสูญเสียทั้งหมดกรณีระยะทาง 62 Km และ 256 ผู้รับบริการ....	66
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต	89
ตารางที่ 5.2 อัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน.....	91
ตารางที่ 5.3 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีวนซ้ำกลับจากการคำนวณ	95
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงกำลังสูญเสียหลังตัวขยายอดีเอฟเอ	97
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีตัวขยายอดีเอฟเอจากการคำนวณ	99
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้จากการคำนวณ	102

ดัชนีคำศัพท์

Absorption	การดูดกลืน
Absorption Coefficient	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
Absorption Profile	โพรไฟล์การดูดกลืน
Active Layer	ชั้นแอคทีฟ
Amplified Spontaneous Emission Noise (ASE Noise)	สัญญาณรบกวนเอเอสอี
Attenuation	การลดทอน
Attenuation Coefficient	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน
Avalanche Effect	ปรากฏการณ์ถล่มทลาย
Avalanche Photo Diode (APD)	ตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี
Band-Gap Energy	แถบความกว้างพลังงาน
Bandwidth	แบนด์วิดท์
Bias Voltage	แรงดันไบแอส
Bit Error Rate (BER)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต
Bit Rate	อัตราบิตข้อมูล
Block Diagram	แผนภาพบล็อก
Bragg Reflector	ตัวสะท้อนแบร์ริก
Center Wavelength	ความยาวคลื่นแสงตรงกลาง
Channel Spacing	ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ
Characteristic	ค่าลักษณะเฉพาะ
Charge Layer	ชั้นประจุ
Chromatic Dispersion, CD	โครมาติกดิสเพอร์ชัน
Cladding	วัสดุหุ้ม
Clock and Data Recovery (CDR)	วงจรถ่ายคืนสัญญาณนาฬิกาและสัญญาณข้อมูล
Coaxial Cable	สายเคเบิลแกนร่วม

Coherent	โคฮีเรนต์
Conduction Band	ชั้นนำไฟฟ้า
Confinement Factor	แฟกเตอร์คอนไฟน์เมนต์
Continuous Wavelength	ความยาวคลื่นแสงต่อเนื่อง
Core	แกนกลาง
Coupler	ตัวคู่ต่อ
Coupling Loss	กำลังสูญเสียจากคู่ควบ
Coupling Region	บริเวณควบคู่
Crosstalk	สัญญาณแทรกข้าม
Dark Current Noise	สัญญาณรบกวนกระแสมืด
Data Sheet	แผ่นข้อมูล
Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)	โครงข่ายการรวมสัญญาณแบบความยาวคลื่นแสงหนาแน่น
Depletion Region	บริเวณปลดพาหะ
Depletion Region Width	ความกว้างของบริเวณปลดพาหะ
Direct Modulation	การกล้ำสัญญาณโดยตรง
Dispersion Compensating Fiber (DCF)	เส้นใยแก้วนำแสงชนิดชดเชยดิสเพอร์ชัน
Distributed-Bragg-Reflector Laser (DBR Laser)	เลเซอร์ดีบีอาร์
Distributed-Feed Back Laser (DFB Laser)	เลเซอร์ดีเอฟบี
Downstream	การส่งข้อมูลขาลง
Effective Index	ดรรชนียังผล
Electrical Amplifier	ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า
Electrical Bandwidth	แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า
Electrical to Optical Converter (E/O Converter)	ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง
Electro-Absorption Modulation Laser (EML)	ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า
Electron Charge	ค่าประจุอิเล็กตรอน

Electron-Hole Ionization Rate	อัตราไอออไนเซชันของคู่อิเล็กตรอนโฮล
Electron-Hole Pair	คู่อิเล็กตรอนโฮล
Erbium Doped-Fiber Amplifier (EDFA)	ตัวขยายอีดีเอฟเอ
Ethernet	อีเทอร์เน็ต
Excess Loss	กำลังแสงสูญเสียส่วนเกิน
Excess Noise Factor	แฟกเตอร์สัญญาณรบกวนส่วนเกิน
Excited State	สถานะกระตุ้น
Exponential	เอกซ์โพเนนเชียล
External Modulation	การกล้ำสัญญาณภายนอก
Extinction Ratio (ER)	ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน
Eye Diagram	แผนภาพรูปตา
Fabry-Perot Laser	เลเซอร์ Fabry-Perot
Fiber Bragg Grating	เส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงชนิดแบร์ริก
Fused Fiber Coupler	ตัวคู่ต่อเส้นใยแก้วนำแสงเชื่อมกัน
Gain	อัตราขยาย
Gaussian Pulse	เกาส์เซียนพัลส์
Grading Layer	ชั้นเกรตติง
Grating	เกรตติง
Ground State	สถานะพื้น
Half Wave Plate (HWP)	ระนาบครึ่งคลื่น
Hole	โฮล
Inter Symbol Interference (ISI)	การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์
Integrated Modulation	การกล้ำสัญญาณรวม
Intensity Modulation	การกล้ำสัญญาณแสงแบบความเข้ม
Interactive Region	บริเวณเชิงโต้ตอบ
Interchannel Crosstalk	สัญญาณแทรกข้ามระหว่างช่องสัญญาณ
Internet	อินเทอร์เน็ต



Laser	เลเซอร์
Light-Emitting Diode (LED)	แอลอีดี
Loopback	วนซ้ำกลับ
Mach-Zehnder Modulation Transmitter (MZM Transmitter)	ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์
Mach-Zehnder Modulator (MZM Modulator)	ตัวกล้ำสัญญาณแบบมัทซ์-เซนเดอร์
Modulator	ตัวกล้ำสัญญาณ
Multimode Fiber	เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด
Multiplication Factor	แฟกเตอร์การคูณ
Noise Figure (NF)	ตัวเลขสัญญาณรบกวน
Noise Jitter	สัญญาณรบกวนของจิตเตอร์
Non-Linear Effect	ผลไม่เชิงเส้น
On-Off Keying (OOK)	สัญญาณแสงแบบโอโอเค
Optical Access Network	โครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง
Optical Amplifier	ตัวขยายแสง
Optical Bandwidth	แบนด์วิธทางแสง
Optical Filter	ตัวกรองสัญญาณแสง
Optical Input Power	กำลังแสงขาเข้า
Optical Isolator	ตัวแยกทางแสง
Optical Output Power	กำลังแสงขาออก
Optical Power Meter	มิเตอร์วัดกำลังแสง
Optical Power of ASE Noise	กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี
Optical Power Return Loss	กำลังแสงจากการสะท้อนกลับ
Optical Receiver	ตัวรับแสง
Optical Receiver's Sensitivity	ค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้
Optical Spectral Width	ความกว้างสเปกตรัมแสง
Optical Spectrum	สเปกตรัมแสง

Optical Splitter	ตัวแยกแสง
Optical to Electrical Converter (O/E Converter)	ตัวแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า
Optical Transceiver	ตัวรับส่งแสง
Optical Transmitter	ตัวส่งแสง
Passive	แพสซีฟ
Passive Optical Network (PON)	โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ
Pattern Generator	เครื่องก่อกำเนิดแบบ
Photocurrent	กระแสโฟโต
Photodetector	ตัวตรวจจับแสง
Photon	โฟตอน
PIN Photodetector	ตัวตรวจจับแสงแบบพิน
Planar Lightwave-Circuit Splitter (PLC Splitter)	ตัวแยกแสงชนิดพีแอลซี
Planck's Constant	ค่าคงที่ของพลังค์
Polarization Controller	ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน
Polarization Sensitivity	ความไวต่อโพลาไรเซชัน
Polarization-Maintaining Fiber (PMF)	เส้นใยแก้วนำแสงชนิดคงค่าโพลาไรเซชัน
Polarized Laser	เลเซอร์โพลาไรซ์
Power Budget	งบกำลัง
Pulse Broadening Time	การถ่างออกของสัญญาณในเทอมเวลา
Pumped Wavelength	ความยาวคลื่นแสงปั๊ม
Pumped Fiber	เส้นใยแก้วนำแสงที่ถูกปั๊ม
Pumped Laser	เลเซอร์ปั๊ม
Pumped Power	กำลังปั๊ม
Pumped Source	แหล่งกำเนิดปั๊ม
Quantum Efficiency	ประสิทธิภาพควอนตัม
Quantum Noise	สัญญาณรบกวนควอนตัม

Quarter Wave Plate (QWP)	ระนาบหนึ่งในสี่คลื่น
Raman Amplifier	ตัวขยายรามาน
Received Power	กำลังรับ
Reflectivity	ค่าการสะท้อน
Refractive Index	ค่าดัชนีหักเหแสง
Repeater	เครื่องทวนสัญญาณ
Research and Development (R&D)	การวิจัยและพัฒนา
Resolution Bandwidth	ค่าความละเอียดแบนด์วิดท์ของเครื่องวัด
Resonant Frequency	ความถี่เรโซแนนซ์
Response Time	การตอบสนองเวลา
Responsivity	ค่าการตอบสนอง
Reverse Bias Voltage	แรงดันไบแอสย้อนกลับ
Rise Time	เวลาขาขึ้น
Rise-Time Budget	งบเวลาขาขึ้น
Saturation	ช่วงอิ่มตัว
Scattering	การกระเจิงของแสง
Semiconductor	สารกึ่งตัวนำ
Semiconductor Laser	เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ
Semiconductor Optical Amplifier (SOA)	ตัวขยายเอสโอเอ
Signal-ASE Noise	สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับ สัญญาณเอเอสอี
Signal-to-Noise Ratio (SNR)	อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณ รบกวน
Spectral Density of Spontaneous-Emission Noise	ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณ รบกวนเอเอสอี
Spectral Width	ความกว้างสเปกตรัม
Spontaneous Emission	การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง
Spontaneous Emission Factor	แฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

Spontaneous-Emission Power	กำลังของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง
Standard Single Mode Fiber (SSMF)	เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐาน
State of Polarization (SOP)	สถานะโพลาไรเซชัน
Stimulated Emission	การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น
Tapered Region	บริเวณแถบ
Thermal Noise	สัญญาณรบกวนจากความร้อน
Thermo-Electric Cooler (TEC)	เทอร์โมออิเล็กทรอนิกส์คูลเลอร์
Threshold	ขีดเริ่มเปลี่ยน
Threshold Voltage	แรงดันตัดสิน
Transmitted Power	กำลังส่ง
Tunable Laser	เลเซอร์แบบปรับได้
Tunable Optical Band Pass Filter (TOBPF)	ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้
Upstream	การส่งข้อมูลขาขึ้น
Valence Band	ชั้นวาเลนซ์
Variable Optical Attenuator (VOA)	ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้
Waveguide	ท่อนำคลื่น
Waveguide Gap	ความห่างระหว่างท่อนำคลื่น
Waveguide Width	ความกว้างของท่อนำคลื่น
Wavelength	ความยาวคลื่นแสง
Wavelength Division Multiplexing (WDM)	โครงข่ายการรวมสัญญาณแบบความยาวคลื่นแสง
Wire Communication	การสื่อสารแบบมีสาย
Wireless Communication	การสื่อสารแบบไร้สาย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

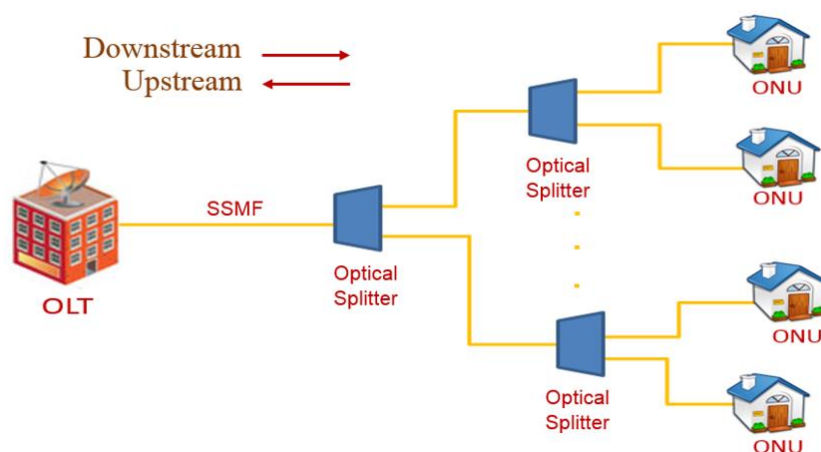
ในปัจจุบันระบบสื่อสารที่ใช้ในประเทศไทยมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้พัฒนาอุปกรณ์สื่อสารและการส่งสัญญาณ ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์มือถือที่สามารถสนทนาแบบเห็นหน้าคู่สนทนาและสามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต (Internet) หรือสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) ได้ ซึ่งการส่งสัญญาณในลักษณะนี้จะเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) โดยตัวกลางในการส่งสัญญาณคืออากาศ แต่การส่งสัญญาณแบบไร้สายก็มีข้อจำกัดในการส่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยภายนอก เช่น สภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการนำการสื่อสารแบบมีสาย (Wire Communication) มาใช้ประกอบกัน เพื่อลดปัจจัยหรือผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและเพิ่มความเสถียรในการส่งข้อมูลอีกด้วย

ปัจจุบันการสื่อสารแบบมีสายในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงใช้สายเคเบิลทองแดง (Copper Cable) เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ ซึ่งสายทองแดงจะมีข้อจำกัดเมื่อส่งในระยะทางไกลมากกว่า 10 Km ขึ้นไป เนื่องจากคุณสมบัติของทองแดงมีการลดทอนค่อนข้างสูง ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ประมาณ 0.8 dB/cm เมื่อส่งสัญญาณที่อัตราบิตข้อมูล (Bit Rate) 500 Mb/s ด้วยสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable) จึงต้องติดตั้งเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater) ในโครงข่ายเพื่อทวนสัญญาณจากการลดทอนที่มีค่าค่อนข้างสูง ทำให้ต้องติดตั้งตัวทวนสัญญาณแต่ละตัวมีระยะห่างกันไม่มาก ส่งผลให้มีต้นทุนสูงขึ้นเพราะต้องติดตั้งเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีอัตราบิตข้อมูลที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความต้องการของผู้รับบริการในปัจจุบันที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดความเร็วสูงสุดของสายทองแดง อีกทั้งเมื่อผู้ให้บริการวางสายทองแดงไปถึงจุดกระจายสัญญาณซึ่งทำหน้าที่กระจายสัญญาณไปยังที่อยู่อาศัยของผู้รับบริการ อัตราบิตข้อมูลจะลดลงเมื่อผู้รับบริการส่งหรือรับข้อมูลพร้อมกัน โดยจะแบ่งอัตราบิตข้อมูลอย่างเท่าๆ กันตามจำนวนผู้รับบริการในขณะนั้น เนื่องจากสายทองแดงมีข้อจำกัดอยู่ค่อนข้างมากตามที่ได้กล่าวมา ทำให้ในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะนำเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF) มาใช้ร่วมกับสายทองแดงเพิ่มมากขึ้น เพราะว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมีข้อจำกัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสายทองแดง

โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงใช้แสงในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางโดยใช้เลเซอร์ (Laser) หรือ แอลอีดี (Light-Emitting Diode, LED) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแสง และใช้ตัวรับแสง (Optical Receiver) ในการแปลงสัญญาณแสงรับคืนเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยเส้นใยแก้วนำแสงชนิด

โหมตเดียวมีค่าการลดทอนกำลังค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงสามารถส่งสัญญาณไประยะทางไกลได้โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนประมาณ 0.2 dB/Km - 0.4 dB/Km [1] (ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ความยาวคลื่นแสง) ทำให้สามารถลดต้นทุนในการแทรกเครื่องทวนสัญญาณอีกด้วย และสามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดียวที่อัตราบิตข้อมูลมากกว่า 1 Gb/s ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับสายทองแดง เมื่อผู้ให้บริการวางเส้นใยแก้วนำแสงไปถึงจุดกระจายสัญญาณนั้นสัญญาณก็จะกระจายไปยังที่อยู่อาศัยของผู้รับบริการ โดยกำลังของสัญญาณจะลดทอนลงไปตามกำลังแสงสูญเสียที่มาจากการลดทอน และกำลังสูญเสียแทรกในตัวแยกแสง (Optical Splitter) ดังนั้นประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะวางโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดียวจากผู้ให้บริการไปยังผู้รับบริการจำนวนมากยิ่งขึ้น การวางโครงข่ายลักษณะนี้จะเรียกว่า Fiber To The x (FTTx) โดยที่ x จะแตกต่างกันตามผู้รับบริการ เช่น ถ้าผู้รับบริการเป็นบุคคลทั่วไปที่อยู่อาศัยตามบ้าน โครงข่ายนั้นจะเรียกว่า Fiber To The Home (FTTH) ซึ่งอยู่ในมาตรฐานของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ (Passive Optical Network, PON)

โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟประกอบด้วยอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณแสงคือ Optical Line Terminal (OLT) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสงคือ Optical Network Unit (ONU) นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายจะเป็นแบบแพสซีฟ (Passive) ได้แก่ ตัวแยกแสงหรืออุปกรณ์ Wavelength Division Multiplexing Coupler (WDM Coupler) ใช้เมื่อมีการรับส่งสัญญาณที่มีหลายความยาวคลื่นแสง



รูปที่ 1.1 โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ

จากรูปที่ 1.1 อธิบายลักษณะการส่งสัญญาณในโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ ทางฝั่งผู้ให้บริการจะส่งสัญญาณที่มอดูเลตแล้วผ่านตัว OLT โดยภายในโครงข่ายจะใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดียวมาตรฐาน ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะกับการส่งสัญญาณระยะทางไกลและรองรับอัตราบิต

ข้อมูลสูง นอกจากนี้ภายในโครงข่ายยังมีตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบแพสซีฟแทรกอยู่เป็นจุดกระจายสัญญาณเพื่อให้สัญญาณกระจายไปยังผู้รับบริการซึ่งรับสัญญาณด้วยตัว ONU การส่งสัญญาณจากผู้ให้บริการไปยังผู้รับบริการเรียกว่าการส่งข้อมูลขาลง (Downstream) ในทางกลับกันถ้าส่งข้อมูลจากผู้รับบริการไปยังผู้ให้บริการเรียกว่าการส่งข้อมูลขาขึ้น (Upstream) โดยจำนวนผู้รับบริการและระยะทางที่ต้องการส่งสัญญาณไปยังผู้รับบริการขึ้นอยู่กับกำลังส่ง (Transmitted Power) และค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับสัญญาณสามารถรับได้ (Optical Receiver's Sensitivity) นอกจากนี้โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟยังมีมาตรฐานในการส่งสัญญาณไม่ว่าจะเป็นอัตราบิตข้อมูลหรือความยาวคลื่นแสง โดยจะกล่าวในหัวข้อย่อย 1.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม

จากที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการประกอบโครงข่าย XG-PON (10-Gigabit-Capable Passive Optical Networks) โดยการส่งข้อมูลขาลงที่อัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s อ้างอิงตามมาตรฐาน ITU-T G.987 [2] และใช้โปรโตคอล (Protocol) แบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) ซึ่งการส่งสัญญาณแสงจะใช้ตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด คือ (1) ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML) โดยตัวส่งแสงชนิดนี้จะอยู่ในตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver) แบบ 10 Gigabit small Form-factor Pluggable (XFP) เซิงพาณิชย์ [3] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และ (2) ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter) [4] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งตัวส่งแสงทั้ง 2 ชนิดจะส่งข้อมูลขาลงที่อัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s โดยส่งที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm ตามแผ่นข้อมูล (Data Sheet) แต่ตามมาตรฐานของ ITU-T G.987 [2] ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งข้อมูลขาลงคือ 1577 nm ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีจำหน่ายเป็นจำนวนมากนักจึงต้องใช้ตัวรับส่งแสงเชิงพาณิชย์ที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm แทน โดยความแตกต่างหลักที่สามารถนำมาใช้คำนวณเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ความยาวคลื่นแสงก็คือค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ที่แตกต่างกันไม่มากนัก เหตุผลในการใช้ตัวส่งแสง 2 ชนิด เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ต้องการจะศึกษาผลกระทบจากค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) ที่แตกต่างกันโดยวิเคราะห์จากค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) และแผนภาพรูปตา (Eye Diagram) เป็นต้น



รูปที่ 1.2 ตัวรับส่งสัญญาณแสง



รูปที่ 1.3 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์

การรับสัญญาณแสงใช้ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี (Avalanche Photo Diode, APD) [3] ซึ่งอยู่ในตัวรับส่งแสงแบบ XFP เซิงพาณิชย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 สามารถรับสัญญาณได้ที่มีความยาวคลื่นแสงช่วง 1270 nm - 1600 nm ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีโดยส่วนใหญ่ใช้ในแอปพลิเคชัน (Application) เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านโครงข่ายแล้วเกิดกำลังแสงสูญเสียไปในเส้นใยแก้วนำแสงหรือกำลังแสงสูญเสียแทรกจากอุปกรณ์ ทำให้เหลือกำลังแสงก่อนเข้าตัวรับแสงค่อนข้างต่ำ โดยตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีสามารถรับกำลังแสงได้ต่ำสุดเท่ากับ -24 dBm [3] จะเห็นว่ามีค่ากำลังแสงต่ำที่สุดที่ตัวรับสัญญาณรับได้ต่ำกว่าตัวตรวจจับแสงแบบพิน (PIN Photodetector) ที่สามารถรับกำลังแสงได้ต่ำสุดเท่ากับ -19.5 dBm [5] เท่านั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปที่การเพิ่มงบกำลังเป็นหลัก ซึ่งหมายความว่ายิ่งตัวรับแสงมีค่ากำลังแสงต่ำสุดที่รับได้ต่ำเท่าไรก็จะสามารถเพิ่มงบกำลังได้มากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มระยะทางและจำนวนผู้รับบริการในระบบได้ เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีมาใช้ในการวิจัยนี้

ภายในโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้ทดลองจะใช้ตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบแพสซีฟ เพื่อกระจายสัญญาณแสงไปยังผู้รับบริการ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวแยกแสงเพียง 1 ชนิด จาก 2 บริษัท คือ ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมจากบริษัท Hautai [6] ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมจากบริษัทจากบริษัท Fujikura [7] ดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยภายในตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมจะใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นตัวกระจายแสง ใน

งานวิจัยนี้จะใช้ตัวแยกแสงดังต่อไปนี้ 1:2 หมายถึงมีสัญญาณเข้า 1 ช่องสัญญาณและแบ่งกำลังขาออกเท่ากันแยกไปได้ 2 ช่องสัญญาณขาออก นอกจากนั้นยังมี 1:4, 1:8 และ 1:16 อีกด้วย โดยค่ากำลังแสงก็จะถูกแบ่งออกไปอย่างเท่าๆ กันตามจำนวนช่องสัญญาณขาออกที่สามารถกระจายได้



รูปที่ 1.4 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai



รูปที่ 1.5 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura

อุปกรณ์สำคัญที่ใช้แทรกเข้าไปในโครงข่ายเพื่อเพิ่มงบกำลังคือตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 [8] และรูปที่ 1.7 [9] เป็นอุปกรณ์แบบแอคทีฟ (Active) จึงทำให้งานวิจัยนี้ไม่ใช่โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบพาสซีฟแต่จะเรียกว่าโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง (Optical Access Network) แทน ตัวขยายอีดีเอฟเอจะขยายสัญญาณได้เฉพาะช่วงความยาวคลื่น 1528 nm - 1563 nm ตามแผ่นข้อมูล [8], [9] ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องเลือกตัวส่งแสงอยู่ในช่วง 1550 nm เพราะตัวขยายอีดีเอฟเอจะสามารถขยายแสงที่ความยาวคลื่นแสงนั้นได้ นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายจึงทำให้มีราคาค่อนข้างถูกกว่าและเนื่องจากตัวขยายแสงแบบเฉพาะค่าความยาวคลื่นแสง 1577 nm ยังอยู่ในขั้นตอนวิจัยซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 1.2

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม อ้างอิงเกี่ยวกับการพัฒนาตัวขยายแสงแบบขยายเฉพาะความยาวคลื่นแสงที่ต้องการจะรับส่งสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU-T G.987 [2] แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขอบเขตจำกัดด้านวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือวัด จึงไม่สามารถทำงานวิจัยในด้านการพัฒนาตัวขยายแสงได้ เพราะฉะนั้นจะทำการแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอเข้าไปในโครงข่ายแล้วศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบต่อโครงข่ายได้ ยกตัวอย่างเช่นเมื่อส่งสัญญาณมาจากต้นทางจะไม่มีสัญญาณรบกวน (Noise) จนกระทั่งเมื่อสัญญาณเข้าตัวขยายแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบแอคทีฟทำหน้าที่ขยายสัญญาณทั้งหมดที่เข้ามารวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวขยายแสงด้วย ดังนั้นสัญญาณรบกวนจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเมื่อใช้ตัวขยายแสง อาจจะใช้อุปกรณ์ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนหลังจากที่ออกมาจากตัวขยายแสงได้



รูปที่ 1.6 ตัวขยายอีดีเอฟเอของบริษัท JDSU



รูปที่ 1.7 ตัวขยายอีดีเอฟเอของบริษัท Fitel

ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 [10] และรูปที่ 1.9 [11] ทำหน้าที่กรองสัญญาณแสงเฉพาะค่าความยาวคลื่นแสงที่ต้องการโดยมีความกว้างสเปกตรัม (Spectral Width) ประมาณ 0.25 nm - 1 nm ตามแผ่นข้อมูล [10], [11] สามารถปรับช่องสัญญาณให้ตรงกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการได้ ซึ่ง

อุปกรณ์นี้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวขยายแสง โดยแทรกหลังตัวขยายแสงเพื่อลดกำลังแสงของสัญญาณรบกวนที่ออกมาในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่ต้องการได้



รูปที่ 1.8 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU



รูปที่ 1.9 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่มีลักษณะโครงข่ายแบบ XG-PON โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่กล่าวมาในข้างต้น

1.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม

เนื่องจากปัจจุบันมีเทคโนโลยีด้านการสื่อสารมากมาย เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีมาตรฐานที่ใช้เป็นมาตรฐานสากลโลกเพื่ออ้างอิงไปในทางเดียวกัน โดยระบบสื่อสารส่วนใหญ่จะใช้มาตรฐาน 2 มาตรฐานในการอ้างอิงคือ มาตรฐานของ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) และ มาตรฐานของ International Telecommunication Union (ITU-T) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อและเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ดังนี้

มาตรฐานของ IEEE ในส่วนของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ (Passive Optical Network, PON) ดังแสดงในตารางที่ 1.1 เริ่มจาก Ethernet-Passive Optical Network (E-PON) ตามมาตรฐาน IEEE 802.3bk [12] โดยการส่งข้อมูลขาหลัง (Downstream) และการส่งข้อมูลขาขึ้น (Upstream) มีอัตราบิตข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 1 Gb/s และใช้โปรโตคอล (Protocol) ในการส่งเป็นแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) ในส่วนของความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ที่ใช้ในการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาหลังจะแตกต่างกัน โดยการส่งข้อมูลขาขึ้นจะส่งที่ความยาวคลื่นแสง 1310 nm ส่วนการส่งข้อมูลขาหลังจะส่งที่ความยาวคลื่นแสง 1490 nm ต่อมาได้มีการเพิ่มอัตราบิตข้อมูลให้เร็วขึ้นเป็น 10.3125 Gb/s ตามมาตรฐาน 10 Gigabit-Ethernet PON (10G-EPON) ตามมาตรฐาน IEEE 802.3av [13] โดยการส่งข้อมูลขาหลังและขาขึ้นมีอัตราบิตข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 10.3125 Gb/s และใช้โปรโตคอลแบบอีเทอร์เน็ตเช่นเดียวกับ E-PON ในส่วนของความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งข้อมูลขาขึ้นจะใช้ความยาวคลื่นแสง 1270 nm และการส่งข้อมูลขาหลังจะใช้ความยาวคลื่นแสง 1577 nm

ตารางที่ 1.1 มาตรฐาน IEEE

มาตรฐาน	ชื่อ	อัตราบิตข้อมูลขาขึ้น	อัตราบิตข้อมูลขาหลัง
IEEE 802.3bk	E-PON	1 Gb/s @ 1310 nm	1 Gb/s @ 1490 nm
IEEE 802.3av	10G-EPON	10.3125 Gb/s @ 1270 nm	10.3125 Gb/s @ 1577 nm

ตารางที่ 1.2 มาตรฐาน ITU-T

มาตรฐาน	ชื่อ	อัตราบิตข้อมูลขาขึ้น	อัตราบิตข้อมูลขาหลัง
ITU-T G.983.1	B-PON	622.08 Mb/s @ 1310 nm	1244.16 Mb/s @ 1490 nm
ITU-T G.984.2	G-PON	2488.32 Mb/s @ 1310 nm	2488.32 Mb/s @ 1490 nm
ITU-T G.987	XG-PON	10 Gb/s @ 1270 nm	10 Gb/s @ 1577 nm
ITU-T G.989.1	NG-PON2	40 Gb/s	40 Gb/s

มาตรฐานของ ITU-T ดังแสดงในตารางที่ 1.2 จะมีความคล้ายคลึงกับมาตรฐานของ IEEE โดยในส่วนของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟเริ่มจาก Broadband Optical Access System based on Passive Optical Network (B-PON) ตามมาตรฐาน ITU-T G.983.1 [14] โดยมีอัตราบิตข้อมูลขาขึ้นสูงสุดเท่ากับ 622.08 Mb/s และอัตราบิตข้อมูลขาหลังสูงสุดเท่ากับ 1244.16 Mb/s ซึ่งใช้โปรโตคอลแบบ Asynchronous Transfer Mode (ATM) ในการรับส่งข้อมูล ส่วนความยาวคลื่นแสงในการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาหลังที่ใช้นั้นจะแตกต่างกัน การส่งข้อมูลขาขึ้นจะใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1260 nm - 1360 nm โดยทั่วไปแล้วจะใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 1310 nm ส่วนการส่งข้อมูลขาหลังจะใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1480 nm - 1500 nm โดยทั่วไปจะใช้ความยาวคลื่น

แสงที่ 1490 nm สามารถส่งได้ไกลที่สุดระยะทาง 20 Km และมีการกระจายสัญญาณให้ผู้รับบริการสูงสุดเป็นจำนวน 32 ผู้รับบริการ มิงบกำลัง (Power Budget) คือ Class A: 5-20 dB, Class B: 10-25 dB และ Class C: 15-30 dB ต่อมาได้มีการเพิ่มอัตราบิตข้อมูลดังมาตรฐานต่อไปนี้

Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON) ตามมาตรฐาน ITU-T G.984.2 [15] เป็นการพัฒนามาจาก B-PON โดยมีความยาวคลื่นแสงทั้งขาขึ้นและขาลง โปรโตคอล ระยะทางส่งสัญญาณที่ไกลที่สุด และงบกำลังเหมือนกันกับ B-PON จะแตกต่างกันที่ G-PON มีการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงที่อัตราบิตข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 2488.32 Mb/s และมีการกระจายสัญญาณให้ผู้รับบริการสูงสุดจำนวน 64 ผู้รับบริการ นอกจากนี้ตามมาตรฐาน ITU-T G.984.6 [16] กล่าวถึงการขยายระยะทางเพิ่มมากขึ้น (Long Reach) โดยการใช้ตัวขยายแสง (Optical Amplifier) หรือ เครื่องทวนสัญญาณ (Repeater) เพื่อให้ส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น ระยะทางมากที่สุดคือ 60 Km ต่อมาได้มีการเพิ่มอัตราบิตข้อมูลในการรับส่งมากยิ่งขึ้นและช่วงความยาวคลื่นแสงในการส่งก็เปลี่ยนไปอีกด้วย

10-Gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON) ตามมาตรฐาน ITU-T G.987 [2] แตกต่างกับ B-PON และ G-PON อย่างสิ้นเชิง โดย XG-PON จะแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ XG-PON1 และ XG-PON2 ทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกันแค่อัตราบิตข้อมูลในการส่งขาขึ้นเท่านั้น ซึ่ง XG-PON1 การส่งข้อมูลขาขึ้นจะส่งด้วยอัตราบิตข้อมูล 2.5 Gb/s ส่วน XG-PON2 คือ 10 Gb/s จึงขอเรียกทั้ง 2 ชนิดรวมกันเป็น XG-PON โดยการส่งข้อมูลขาลงมีอัตราบิตข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 10 Gb/s ซึ่งใช้โปรโตคอลแบบอีเทอร์เน็ตในการรับส่งข้อมูล ส่วนความยาวคลื่นแสงในการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงที่ใช้นั้นจะแตกต่างกัน การส่งข้อมูลขาขึ้นจะใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1260 nm - 1280 nm โดยทั่วไปแล้วจะใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 1270 nm ส่วนการส่งข้อมูลขาลงจะใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1575 nm - 1580 nm โดยทั่วไปจะใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 1577 nm สามารถส่งได้ระยะทางอย่างต่ำ 20 Km และส่งระยะทางไกลสุดได้ 60 Km ซึ่งมีการกระจายสัญญาณให้จำนวนผู้รับบริการอย่างน้อยที่สุด 64 ผู้รับบริการ และมิงบกำลังดังต่อไปนี้ N1 Class: 14-29 dB, N2 Class: 16-31 dB, E1 Class: 18-33 dB และ E2 Class: 20-35 dB นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาต่อไปอีกแต่อยู่นอกเหนือขอบเขตของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แต่จะขอกล่าวรายละเอียดอย่างคร่าวๆ เพื่อสามารถไปศึกษาต่อในอนาคตได้

40-Gigabit-capable Passive Optical Networks (NG-PON2) ตามมาตรฐาน ITU-T G.989.1 [17] การส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงมีอัตราบิตข้อมูลสูงสุด 40 Gb/s โดยใช้เทคนิค Multiple Wavelength Channel Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM) โดยมีการใช้ช่องสัญญาณ 4 - 8 ช่องสัญญาณในการส่งซึ่งแต่ละช่องสัญญาณสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตข้อมูล

สูงสุด 10 Gb/s ด้วยระยะทางอย่างต่ำ 40 Km และส่งได้ไกลที่สุดระยะทาง 60 Km มีการกระจายสัญญาณให้จำนวนผู้รับบริการอย่างน้อยที่สุด 256 ผู้รับบริการ

จะเห็นว่าทั้ง 2 มาตรฐานที่กล่าวมามีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นอัตราการส่งข้อมูลหรือความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นอ้างอิงไปตามมาตรฐาน ITU-T เป็นหลัก เพื่อให้สืบสนในการใช้อ้างอิงมาตรฐาน

การทบทวนวรรณกรรมเป็นการศึกษาผลงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์แล้วซึ่งเนื้อหาที่มีความน่าสนใจและเกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะนำข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์มาวิเคราะห์แนวโน้มของเทคโนโลยีจากอดีตจนถึงปัจจุบันว่าได้มีการพัฒนาแนวคิดทฤษฎีและอุปกรณ์ไปในลักษณะใด หัวข้อและเนื้อหาหลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกี่ยวกับโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่มีลักษณะแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ โดยพิจารณาปัจจัยหลักดังต่อไปนี้ อัตราบิตข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ส่งข้อมูลระยะทางไกลและเพิ่มผู้รับบริการในโครงข่ายจำนวนมากขึ้น เมื่อได้ค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์พบว่าประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านการสื่อสารอย่างมากเมื่อเทียบกับหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยด้วย ซึ่งประเทศญี่ปุ่นได้มีการวางโครงข่าย Fiber-to-The-Home (FTTH) ที่เป็นลักษณะหนึ่งในโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟเกือบทั่วประเทศแล้ว เพราะฉะนั้นงานวิจัยจากประเทศญี่ปุ่นจึงเป็นมาตรฐานที่สามารถนำมาวิเคราะห์แนวโน้มของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ได้เป็นอย่างดี โดยสามารถนำมาสรุปแนวโน้มเป็นกลุ่มต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

กลุ่มแรกคือกลุ่ม NTT Communications Corporation เป็นบริษัทชั้นนำอันดับต้นๆ เกี่ยวกับการสื่อสารในประเทศญี่ปุ่นที่มีการวิจัยและพัฒนา (Research and Development, R&D) ที่น่าสนใจมาก จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงในลักษณะโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ จะเห็นแนวโน้มที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันดังต่อไปนี้

เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 18 [18] ปี 2006 เกี่ยวกับโครงข่ายแบบ G-PON ตามมาตรฐาน ITU-T G.984.2 [15] โดยการส่งข้อมูลขาขึ้นมีอัตราบิตข้อมูลเท่ากับ 1.24 Gb/s ที่ความยาวคลื่นแสง 1310 nm และการส่งข้อมูลขาลงมีอัตราบิตข้อมูลเท่ากับ 2.5 Gb/s ที่ความยาวคลื่นแสง 1490 nm โดยใช้อุปกรณ์เชิงพาสซีฟในการรับส่งสัญญาณ ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นในเรื่องการพัฒนาตัวขยายแสงเพื่อให้ขยายสัญญาณแสงได้ในสองทิศทางคือทั้งการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลง โดยใช้ตัวขยายแสงในโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟ คือ Optically-Amplified PON จะประกอบด้วยตัวขยายแสงขาขึ้นชนิด A Gain-Clamped Praseodymium-Doped Fiber Amplifier (GC-PDFA) เป็นแบบ Burst-Mode Optical Amplifier และตัวขยายแสงขาลงชนิด Thulium-Doped Fiber

Amplifier (T DFA) เป็นแบบ Continuous-Mode Optical Amplifier จากงานวิจัยสามารถเพิ่มงบกำลังได้มากขึ้น นำไปสู่การรับส่งสัญญาณระยะไกล 60 Km และมีจำนวนผู้รับบริการเพิ่มขึ้นถึง 256 ผู้รับบริการ

เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 19 [19] ปี 2010 ใช้โครงข่าย G-PON ตามมาตรฐาน ITU-T G.984.2 [15] เหมือนกับเอกสารอ้างอิง [18] และเน้นในเรื่องการพัฒนาตัวขยายแสงได้ในสองทิศทางเช่นกัน แต่ตัวขยายแสงจะแตกต่างกันโดยในที่นี้ คือ Hybrid Burst-Mode Optical Fiber Amplifier (OFA) จะประกอบด้วยตัวขยายแสงขาขึ้นชนิด Gain-Clamped Praseodymium-Doped Fiber Amplifier (GC-PDFA) และ Automatic Gain Controlling Praseodymium-Doped Fiber Amplifier (AGC-PDFA) และมีตัวขยายแสงขาลงชนิด Conventional Thulium-Doped Optical Fiber Amplifier (T DFA) จากงานวิจัยสามารถเพิ่มงบกำลังได้มากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มจำนวนผู้รับบริการถึง 1024 ผู้รับบริการ

เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 20 [20] ปี 2012 ใช้โครงข่าย 10G-EPON ตามมาตรฐาน IEEE 802.3av [13] โดยการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงมีอัตราบิตข้อมูลเท่ากับ 10.3125 Gb/s ความยาวคลื่นแสงในการส่งข้อมูลขาขึ้นใช้ความยาวคลื่นแสง 1270 nm และการส่งข้อมูลขาลงใช้ความยาวคลื่นแสง 1577 nm โดยงานวิจัยนี้เน้นในเรื่องการพัฒนาตัวขยายแสงในโครงข่าย PON ที่เรียกว่า Optical-Amplifier-Based PON Repeater ซึ่งจะประกอบด้วยตัวขยายแสงขาขึ้นชนิด Fast Automatic Level Control-Semiconductor Optical Amplifier (Fast ALC-SOA) และตัวขยายแสงขาลงชนิด ALC-SOA ซึ่งการส่งข้อมูลขาลงมีอุปกรณ์ Electrical Dispersion Compensation (EDC) แทรกอยู่ในโครงข่ายเพื่อชดเชยปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD) อีกด้วย จากงานวิจัยสามารถเพิ่มงบกำลังไปถึง 79.5 dB นำไปสู่การเพิ่มระยะทางในการรับส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) ได้ไกล 100 Km

จากเอกสารอ้างอิงลำดับที่ 18 ถึง 20 ของกลุ่ม NTT Communications Corporation จะเห็นว่าแนวโน้มคือเน้นไปที่การพัฒนาตัวขยายแสงเพื่อขยายสัญญาณข้อมูลแสงได้ทั้งสองทิศทางทั้งขาขึ้นและขาลง โดยใช้ตัวขยายแสงที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการตามมาตรฐาน ITU-T เพื่อมีงบกำลังมากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มระยะทางในการรับส่งสัญญาณและจำนวนผู้รับบริการมากขึ้น นอกจากนี้อัตราบิตข้อมูลทั้งการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงเพิ่มขึ้นจาก 1.24 Gb/s เป็น 10.3125 Gb/s ตามมาตรฐาน ITU-T อีกด้วย

กลุ่มที่ 2 คือกลุ่ม Mitsubishi Electric Corporation เป็นบริษัทขนาดใหญ่ที่ผลิตอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมากและยังเป็นบริษัทอันดับต้นๆ เช่นเดียวกับ NTT Communications

Corporation ที่มีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางการสื่อสารที่น่าสนใจเช่นกัน โดยวรรณกรรมที่ได้ศึกษามาเกี่ยวกับโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงในลักษณะโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟมีแนวโน้มดังต่อไปนี้

เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 21 [21] ปี 2012 ใช้โครงข่ายหลักคือ XG-PON ตามมาตรฐาน ITU-T G.987 [2] และใช้โครงข่าย G-PON ตามมาตรฐาน ITU-T G.984.2 [15] ประกอบกัน เพื่อตัวเลือกอัตราการส่งข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น โดยงานวิจัยนี้เน้นไปที่การพัฒนาตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver) แบบ 10 Gigabit Small Form-Factor Pluggable (XFP) ทางฝั่งผู้ให้บริการ โดยตัวรับส่งแสงแบบ XFP ถูกพัฒนาให้เป็นแบบ 10G/1G Dual-Rate Burst-Mode XFP ซึ่งการส่งข้อมูลขาลงและขาขึ้นมีอัตราบิตข้อมูลเท่ากับ 10.3 Gb/s และ 1.25 Gb/s ได้ตามลำดับ ส่วนด้านฝั่งผู้รับบริการจะมีตัวรับส่งสัญญาณแบบ Enhanced Small Form-Factor Pluggable (SFP+) โดยแต่ละตัวสามารถรับส่งสัญญาณได้ที่อัตราบิตข้อมูลเดียวกันเท่านั้น ซึ่งก็คือ 10.3 Gb/s หรือ 1.25 Gb/s โดยใช้ความยาวคลื่นแสงที่ส่งในขาขึ้นและขาลงตามมาตรฐานของ XG-PON และ G-PON จากงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มงบกำลังได้มากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มจำนวนผู้รับบริการเพิ่มขึ้นถึง 256 ผู้รับบริการ ในระยะทาง 15 Km

เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 22 [22] ปี 2013 เน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคโดยใช้ Time-and-Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) เพื่อสามารถส่งสัญญาณไปในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ยังไม่ได้ใช้งาน โดยงานวิจัยนี้ใช้โครงข่าย G-PON และ XG-PON ร่วมกัน โดยมีความยาวคลื่นแสงขาขึ้นและขาลงของทั้ง 2 โครงข่ายนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T G.984.2 [15] และ ITU-T G.987 [2] ซึ่งงานวิจัยนี้นอกจากการจะใช้ 2 โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังใช้ช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่ตรงกับความยาวคลื่นแสงมาตรฐานที่ถูกใช้งานแล้วเพิ่มเข้ามาอีกด้วย โดยใช้ความยาวคลื่นแสงในการส่งข้อมูลขาขึ้นช่วง 1535 nm – 1540 nm และความยาวคลื่นแสงในการส่งข้อมูลขาลงที่ 1600 nm ที่อัตราบิตข้อมูล 2.5 Gb/s นอกจากจะใช้ประโยชน์จากช่วงความยาวคลื่นแสงที่ว่างให้เป็นประโยชน์แล้ว จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ที่ช่วงความยาวคลื่นแสงสำหรับการส่งข้อมูลขาขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่ช่วงความยาวคลื่นแสงขาขึ้นของโครงข่าย G-PON และ XG-PON อีกด้วย ทำให้งบกำลังมากขึ้น นำไปสู่การส่งข้อมูลที่ระยะทางไกล 40 Km และมีจำนวนผู้รับบริการ 64 ผู้รับบริการ

จากเอกสารอ้างอิงลำดับที่ 21 และ 22 ของกลุ่ม Mitsubishi Electric Corporation จะเห็นว่าแนวโน้มคือการพัฒนาโครงข่าย G-PON และ XG-PON ให้มีงบกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อส่งข้อมูลได้ในระยะทางไกลและมีจำนวนผู้รับบริการเพิ่มขึ้นในโครงข่าย ซึ่งก็มีแนวโน้มที่คล้ายกับกลุ่ม NTT

Communications Corporation แต่จะแตกต่างกันที่กลุ่มของ NTT Communications Corporation เน้นการวิจัยและพัฒนาด้วยสายแสง แต่ทางกลุ่มของ Mitsubishi Electric Corporation เน้นไปทางด้านเทคนิคในการวิจัยและพัฒนามากกว่า อย่างไรก็ตามแต่จุดประสงค์ในการวิจัยและพัฒนา ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

นอกจากประเทศญี่ปุ่นที่มีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟซึ่งมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านนี้เป็นอย่างมากแล้ว ก็ยังมีประเทศทางยุโรปซึ่งก็ทำการวิจัยและพัฒนาในด้านนี้เช่นเดียวกัน

เอกสารอ้างอิงลำดับที่ 23 [23] ปี 2007 ใช้โครงข่าย G-PON ตามมาตรฐาน ITU-T G.984.2 [15] ซึ่งส่งที่อัตราบิตข้อมูลเท่ากันทั้งการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลงคือ 2.488 Gb/s นอกจากนี้ยังมีการนำช่วงความยาวคลื่นแสง 1510 nm – 1550 nm มาใช้เป็นช่วงกระจายสัญญาณวีดีโออีกด้วยจึงต้องใช้ตัว Coarse Wavelength Division Multiplexing Coupler (CWDM MUX) ที่ฝั่งผู้ให้บริการและผู้รับบริการเพื่อแยกความยาวคลื่นแสงในการส่งและรับสัญญาณ โดยงานวิจัยนี้เน้นที่การพัฒนาตัวขยายแสงให้ขยายแสงได้ทั้งสองทิศทาง โดยการส่งข้อมูลขาลงจะใช้ Semiconductor Optical Amplifier-Raman Hybrid Amplifier (SRHA) ขยายแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 1490 nm - 1550 nm ส่วนการส่งข้อมูลขาขึ้นจะใช้ Semiconductor Optical Amplifier (SOA) ในการขยายแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 1310 nm จากงานวิจัยสามารถเพิ่มงบกำลังได้มากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มจำนวนผู้รับบริการเพิ่มขึ้นถึง 64 ผู้รับบริการ ในระยะทาง 60 Km

อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแนวโน้มในการพัฒนาโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะพัฒนาด้านอุปกรณ์หรือเทคนิคต่างๆ โดยมีจุดประสงค์คือทำให้โครงข่ายส่งอัตราบิตข้อมูลที่สูงขึ้น มีระยะทางไกลมากขึ้น และส่งให้ผู้รับบริการจำนวนมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบแพสซีฟตามแนวทางข้างต้น โดยใช้อุปกรณ์เชิงพาณิชย์ภายใต้ข้อจำกัดของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดภายในห้องปฏิบัติการวิจัย Electro-Magnetic Research Laboratory (EMRL) ที่อาคารเจริญวิศวกรรม ชั้น 13 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง (Optical Access Network) ด้วยอัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s ที่สามารถส่งได้ระยะทางไกลและมีจำนวนผู้รับบริการในโครงข่ายอย่างน้อย 64 ผู้รับบริการ
2. เพื่อวัดทดสอบและวิเคราะห์ผลของการส่งสัญญาณแสงด้วยค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) ที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวส่งแสง (Optical Transmitter) 2 ชนิด คือ ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML) และตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)
3. เพื่อวัดทดสอบและวิเคราะห์ผลการถ่างออกของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD) ในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF) เมื่อส่งข้อมูลในระยะทางไกล
4. เพื่อวัดทดสอบและวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE Noise) เนื่องจากการแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) ในโครงข่ายเพื่อชดเชยกำลังแสงสูญเสียส่วนใหญ่ที่เกิดจากตัวแยกแสง (Optical Splitter) และบางส่วนที่เกิดจากเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง โดยการส่งข้อมูลขาลง (Downstream) ให้กับผู้รับบริการที่อัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm และส่งข้อมูลระยะทางไม่เกิน 80 Km ตามข้อจำกัดของตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver) เชิงพาณิชย์ที่ซื้อมาใช้ทดสอบ
2. วัดและวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อส่งสัญญาณแสงด้วยค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด คือ ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าและตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์ โดยวิเคราะห์ที่อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) เท่ากับ 10^{-12}
3. วัดและวิเคราะห์ผลกระทบของการถ่างออกของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐาน ระยะทาง 60 Km เปรียบเทียบกับกรณีวนซ้ำกลับ (Loopback Case) โดยวิเคราะห์ที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-12}

4. วัดและวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนเอเอสอีต่อโครงข่ายเนื่องจากการแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอ ซึ่งมีค่าอัตราการขยาย (Gain) และตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF) ที่แตกต่างกัน โดยวิเคราะห์ที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-12}
5. ทดลองปรับปรุงค่าอัตราความผิดพลาดบิตโดยการแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF) หลังตัวขยายอีดีเอฟเอ เพื่อลดกำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสอี

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการใช้งานของอุปกรณ์และเครื่องมือวัด
2. ศึกษาค้นคว้าหาหัวข้อวิทยานิพนธ์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
3. จัดซื้อตัวรับส่งแสงแบบ 10 Gigabit Small Form-Factor Pluggable (XFP) และตัวแยกแสง (Optical Splitter)
4. อบรมการใช้เครื่องมือวัดจาก Product & System Director (บริษัท SCP Groups) และ Application Engineering Manager (บริษัท IRCT)
5. ทำการทดลองในกรณีต่างๆ โดยใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Electro-Magnetic Research Laboratory (EMRL)
6. ทำการทดลองในกรณีต่างๆ โดยใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเตอร์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Phonic Network System Laboratory ภายใต้ National Institute of Information and Communications Technology (NICT) of Japan
7. วิเคราะห์ผลการทดลองทางทฤษฎี โดยการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อวาดกราฟและวิเคราะห์ผลการทดลอง
8. วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองและผลทางทฤษฎีในแต่ละกรณีของ 2 ตัวส่งสัญญาณแสง และสรุปผลการทดลอง
9. เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ศึกษาเรียนรู้และปฏิบัติจริงในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดภายในห้องปฏิบัติการวิจัย Electro-Magnetic Research Laboratory (EMRL) อย่างถูกต้องโดยผ่านการอบรมจากผู้เชี่ยวชาญ
2. สามารถประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง

3. ทำการทดลองจากการประกอบโครงข่ายโดยใช้อุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการ และสามารถเก็บผลการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัดได้อย่างถูกต้อง
4. เรียนรู้ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีได้
5. เรียนรู้หลักการคิดวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ว่าเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีหรือไม่
6. สามารถนำวิทยานิพนธ์นี้ไปต่อยอดในอนาคต โดยการเพิ่มผู้รับบริการหรือระยะทางให้มากขึ้นและทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้การวัดค่าอัตราความผิดพลาดได้

1.6 ประมวลผลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: บทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับภาพรวมของวิทยานิพนธ์ กล่าวถึง ความเป็นมาและปัญหาว่าเหตุใดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเกิดขึ้นและมีความสำคัญอย่างไร ได้ทำการศึกษาทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังมีจุดประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์อย่างชัดเจน

บทที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่าย: กล่าวถึงหลักการใช้งานและความสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบโครงข่ายทั้งอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณแสงและอุปกรณ์ภาครับสัญญาณแสง อีกทั้งยังมีอุปกรณ์แทรกในโครงข่ายที่มีส่วนสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์อีกด้วย

บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง: อธิบายเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเป็นการอธิบายสมการและตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโครงข่าย ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาสมการงบกำลัง สัญญาณรบกวนจากตัวรับแสง และการหาค่าอัตราความผิดพลาด เป็นต้น

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง: กล่าวถึงการประกอบโครงข่ายและการตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโครงข่าย แสดงผลการทดลองในแต่ละกรณีของการทดลองภายในโครงข่าย โดยเน้นไปที่การคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดเพื่อนำไปพิจารณาสมรรถนะของการรับสัญญาณแสงที่ตัวรับแสงอีกด้วย

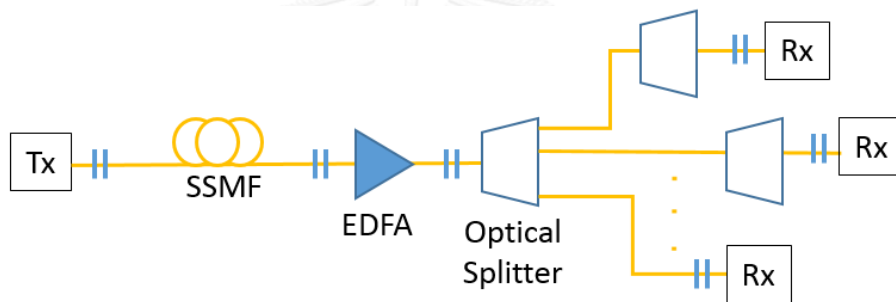
บทที่ 5 การคำนวณผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB: เป็นบทที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ต่างๆ ที่ใช้สมการในการคำนวณ และใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียนโค้ดเพื่อวาดกราฟออกมา นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนี้ไปเปรียบเทียบกับ บทที่ 4 เพื่อดูแนวโน้มของผลการทดลองว่าสอดคล้องกับทางทฤษฎีหรือไม่ อย่างไร

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: ในหัวข้อนี้จะสรุปประเด็นสำคัญในวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะที่จะนำวิทยานิพนธ์ไปพัฒนาหรือนำไปใช้กับโครงข่ายจริง

บทที่ 2

อุปกรณ์สำคัญในโครงข่าย

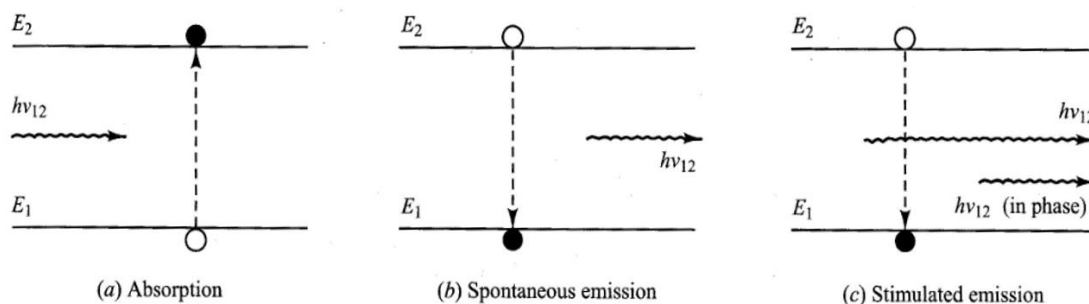
บทที่ 2 กล่าวถึงอุปกรณ์สำคัญที่นำไปประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง (Optical Access Network) ซึ่งมีหลายอุปกรณ์ด้วยกัน ประกอบด้วยอุปกรณ์ทางภาคส่งสัญญาณแสง เช่น เลเซอร์ (Laser) และตัวกล้ำสัญญาณ (Modulator) ส่วนอุปกรณ์ทางภาครับสัญญาณแสง คือ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) โดยการจะประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงดังรูปที่ 2.1 เพราะฉะนั้นจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ภายในโครงข่าย เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive) ได้แก่ ตัวแยกแสง (Optical Splitter) เพื่อใช้ในการแยกแสงไปยังผู้รับบริการ นอกจากนี้ยังใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟ (Active) ได้แก่ ตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) เพื่อเพิ่มกำลังแสงและงบกำลัง (Power Budget) อีกด้วย อุปกรณ์ต่างๆ จะอธิบายในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 โครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงโดยแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอก่อนตัวแยกแสง

2.1 อุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณแสง

ในอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญคือเลเซอร์ (Laser) เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณแสงที่มีความกว้างสเปกตรัม (Spectral Width) ที่แคบ ซึ่งช่วงความยาวคลื่นแสงที่สามารถผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ถูกเจือเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยปกติแล้วจะมีความยาวคลื่นแสงหลัก 3 ความยาวคลื่นแสง ได้แก่ 850 nm, 1310 nm และ 1550 nm โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจสัญญาณแสงช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm ซึ่งเป็นมาตรฐานในการแพร่สัญญาณ (Broadcasting) ตาม ITU-T G.983.3 [24] สำหรับกระบวนการมี 3 กระบวนการหลักคือ 1. กระบวนการดูดกลืน (Absorption) 2. กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) และ 3. กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [1]



รูปที่ 2.2 กระบวนการการเกิดแสงในเลเซอร์

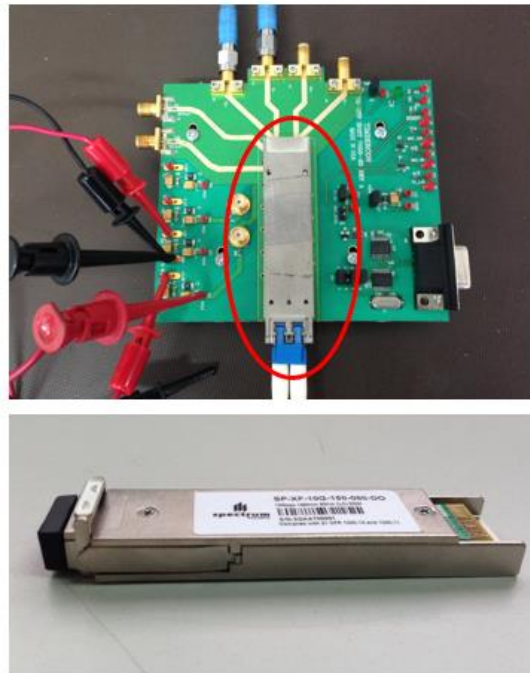
จากรูปที่ 2.2 (a) กระบวนการดูดกลืน เป็นการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนเพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนจากสถานะพื้น (Ground State) ขึ้นไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) ต่อมาอิเล็กตรอนเกิดสภาวะไม่สมดุล ทำให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยพลังงานออกมาดังรูปที่ 2.2 (b) กลายเป็นกระบวนการการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง ส่วนรูปที่ 2.2 (c) กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเกิดจากโฟตอนไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่ากับพลังงานของโฟตอนตัวแรก เพราะฉะนั้นจะเกิดแสงออกมาจากเลเซอร์ด้วยกำลังแสงที่มากพอ โดยเลเซอร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ 1. เลเซอร์ Fabry-Perot (Fabry-Perot Laser) 2. เลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed-Feed Back Laser, DFB Laser) และ 3. เลเซอร์ดีบีอาร์ (Distributed-Bragg-Reflector Laser, DBR Laser) ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เลเซอร์อยู่ 2 ชนิด คือ เลเซอร์ดีเอฟบีและเลเซอร์ดีบีอาร์ โดยจะอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

นอกจากเลเซอร์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณแสงแล้ว ยังมีการกล้ำสัญญาณ (Modulation) 3 ชนิดหลัก ได้แก่ การกล้ำสัญญาณโดยตรง (Direct Modulation), การกล้ำสัญญาณรวม (Integrated Modulation) และ การกล้ำสัญญาณภายนอก (External Modulation) นำมาใช้กล้ำสัญญาณแสงกับสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดแบบ (Pattern Generator) ออกมาเป็นสัญญาณแสงแบบโอไอเค (On-Off Keying, OOK) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การกล้ำสัญญาณ 2 แบบ คือ การกล้ำสัญญาณรวมและการกล้ำสัญญาณภายนอก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เปรียบเทียบสมรรถนะในการส่งสัญญาณระหว่างตัวส่งสัญญาณแสง 2 แบบ ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML) และ ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

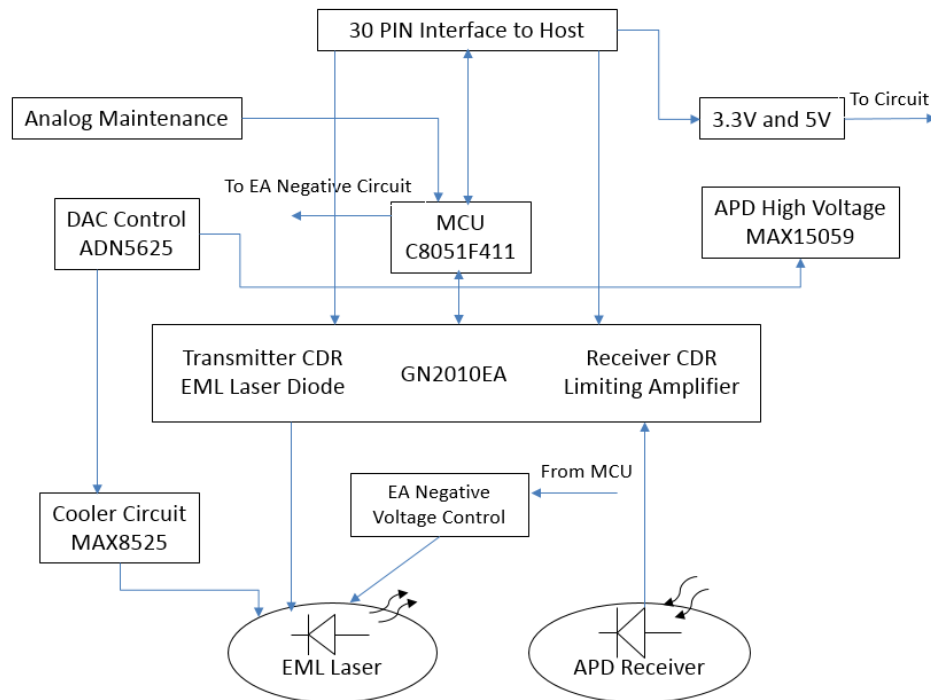
2.1.1 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver) SP-XF-10G-150-080-Dx XFP จากบริษัท Terrabit Networks ดังรูปที่ 2.3 [3]



รูปที่ 2.3 ตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver)

ซึ่งภายในตัวรับส่งแสงประกอบด้วยวงจรรออิเล็กทรอนิกส์และชิปต่างๆ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมภาคส่งสัญญาณแสงและภาครับสัญญาณแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [25]



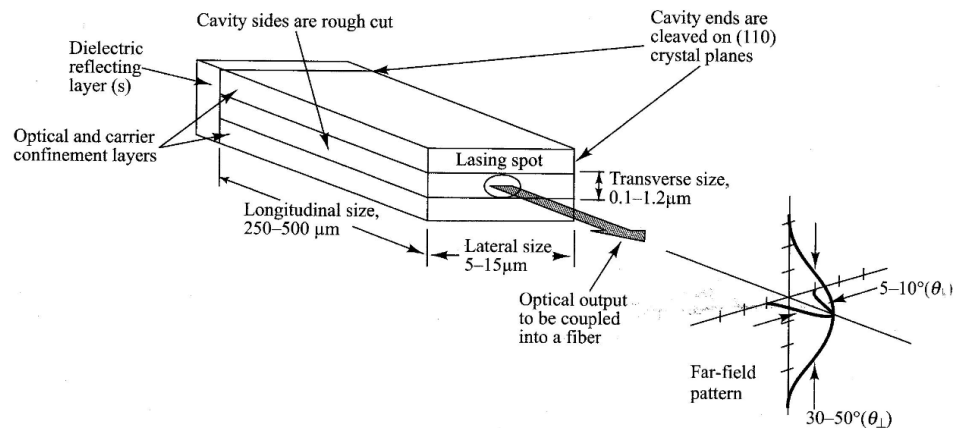
รูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อกภายในตัวรับส่งแสง

จากรูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อก (Block Diagram) แสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในตัวรับส่งแสงซึ่งมี 30 ขา ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด Timbercon [26] และมีชิป GN2010EA [25] ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรถักคืนสัญญาณนาฬิกาและสัญญาณข้อมูล (Clock and Data Recovery, CDR) ของฝั่งภาคส่ง ซึ่งควบคุมการทำงานของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นคลื่นไฟฟ้า และของฝั่งภาครับซึ่งควบคุมตัวขยายแบบจำกัด (Limiting Amplifier) ให้ขยายสัญญาณแสงที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับแสงแบบเอพดีและนำไปตัดสินใจตัดสินิจิตโดยการกู้คืนสัญญาณไฟฟ้ากลับมา

ทางภาคส่งสัญญาณแสงใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นคลื่นไฟฟ้า โดยภายในประกอบด้วย เลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed Feedback Laser, DFB Laser) และตัวกั้นสัญญาณแสงแบบดัดคลื่นคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) ดังจะกล่าวในหัวข้อย่อยดังนี้

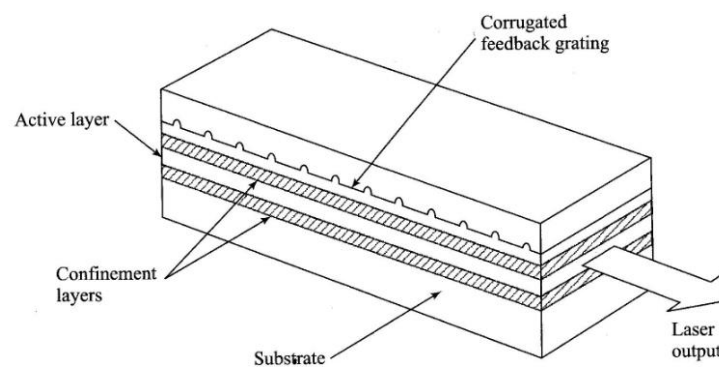
2.1.1.1 เลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed Feedback Laser, DFB Laser)

โครงสร้างของเลเซอร์ดีเอฟบีจะคล้ายกับของเลเซอร์ Fabry-Perot โดยโครงสร้างของเลเซอร์ Fabry-Perot แสดงในรูปที่ 2.5 [1]



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของเลเซอร์ Fabry-Perot

รูปที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของเลเซอร์ Fabry-Perot โดยด้านหลังและด้านหน้าของตัวเลเซอร์จะมีระนาบคริสตัล (Crystal Plane) ทำหน้าที่เสมือนกระจกสะท้อนแสงไป-มาภายในสารกึ่งตัวนำเป็นการเพิ่มอัตราการขยายและเพิ่มกำลังแสงอีกด้วย ส่วนชั้นสะท้อนไดอิเล็กทริก (Dielectric Reflecting Layer) ช่วยให้แสงไม่ทะลุออกไปด้านหลังของเลเซอร์ นอกจากนั้นขนาดตามแนวยาว (Longitudinal Size) ยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) และสัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ถ้าความถี่มีการเสริมกันแสงที่ความถี่นั้นก็จะเปล่งออกมา แต่ถ้าคลื่นความถี่หักล้างกันแสงที่ความถี่นั้นก็จะหายไป ซึ่งเลเซอร์ชนิดนี้เหมาะใช้งานกับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode Fiber) มากกว่า เพราะมีความถี่เรโซแนนซ์หลายค่าที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เลเซอร์ชนิดดีเอพีซึ่งเหมาะกับการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมากกว่า โดยองค์ประกอบของเลเซอร์ชนิดดีเอพี แสดงดังรูปที่ 2.6 [1]



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเลเซอร์ดีเอพี

จากรูปที่ 2.6 เลเซอร์ดีเอพีจะมีองค์ประกอบและหน้าที่ของแต่ละชั้นส่วนเหมือนกันกับเลเซอร์ Fabry-Perot แต่แตกต่างกันที่เลเซอร์ดีเอพีจะมีตัวสะท้อนแบร็ก (Bragg Reflector) หรือ

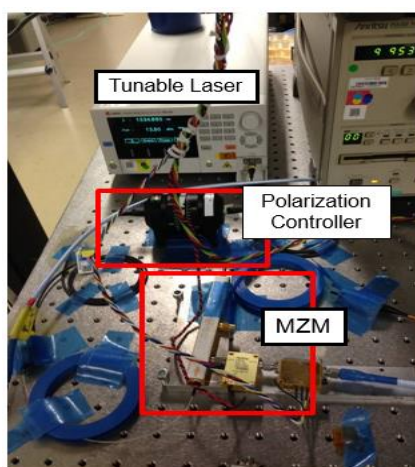
เกรตติง (Grating) ทำให้ค่าดรรชนีหักเหแสง (Refractive Index) แตกต่างกัน โดยเลือกจากค่าความถี่เรโซแนนซ์หลายค่าให้เหลือค่าเดียวได้และมีกำลังสูงสุดออกมาเพียงแค่อะไรเดียวเท่านั้น เมื่อเทียบกับเลเซอร์ Fabry-Perot ซึ่งมีหลายยอดเรโซแนนซ์ปล่อยแสงออกมาหลายโหมดพร้อมกัน

2.1.1.2 ตัวกล้ำสัญญาณแสงแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM)

ตัวกล้ำสัญญาณแสงแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าจัดเป็นการกล้ำสัญญาณรวม (Integrated Modulation) ในกรณีนี้อยู่ภายในตัวรับส่งแสง (Optical Transceiver) เช่นเดียวกับกับเลเซอร์ดีเอฟบี มีขนาดเล็ก มีวงจรถ่ายซัฟและราคาแพงกว่าเมื่อเทียบกับการกล้ำสัญญาณโดยตรง (Direct Modulation) ส่วนใหญ่แล้วตัวกล้ำสัญญาณแสงแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าใช้สารอินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide, InP) เจือกับสารตั้งต้นที่มีชนิดเดียวกับเลเซอร์ดีเอฟบี ซึ่งตัวกล้ำสัญญาณนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ (Reverse Bias Voltage) และเกิดการดูดกลืนแสงขึ้น ทำให้โปรไฟล์การดูดกลืน (Absorption Profile) เปลี่ยนและเกิดการกล้ำสัญญาณแสงแบบความเข้ม (Intensity Modulation) ทำให้มีการส่งสัญญาณแบบบิต 1 และบิต 0 โดยทั้ง 2 บิตจะมีความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

2.1.2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัท-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)

นอกจากตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัท-เซนเดอร์มาเปรียบเทียบกับสมรรถนะอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 2.7 [4]

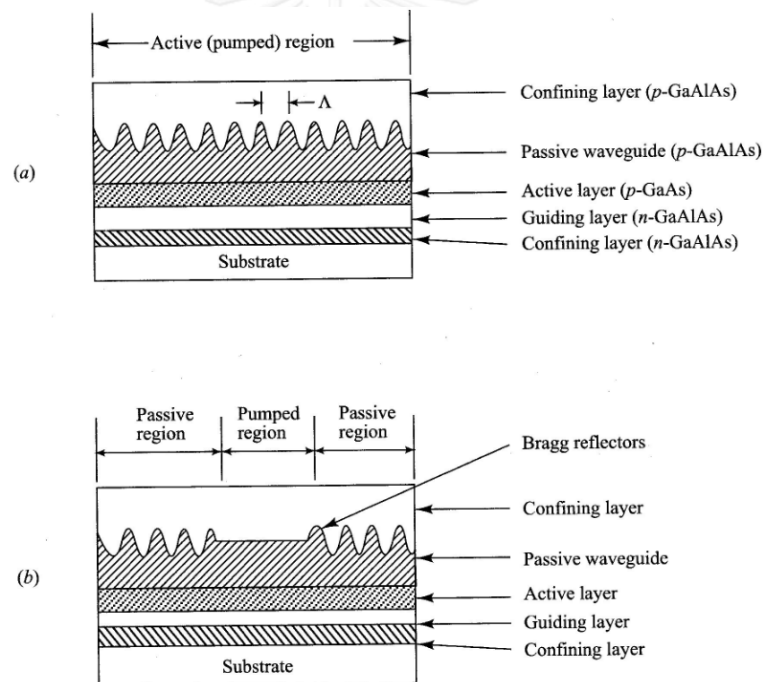


รูปที่ 2.7 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัท-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)

จากรูปที่ 2.7 ใช้เลเซอร์แบบปรับได้ (Tunable Laser) คือเลเซอร์ดีบีอาร์ (Distributed Bragg Reflector Laser, DBR Laser) เป็นตัวกำเนิดแสง และมีตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller, PC) เพื่อปรับสถานะโพลาไรเซชัน (State of Polarization, SOP) ของแสงให้ตรงกับสถานะโพลาไรเซชันตัวกล้าสัญญาณแบบมัท-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM) โดยจะอธิบายแต่ละอุปกรณ์ดังในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

2.1.2.1 เลเซอร์ดีบีอาร์ (Distributed Bragg Reflector Laser, DBR Laser)

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้คือเลเซอร์แบบปรับได้ซึ่งก็คือเลเซอร์ดีบีอาร์ ภายในเลเซอร์จะมีลักษณะคล้ายกับเลเซอร์ดีเอพี แต่มีช่วงปั๊ม (Pumped Region) ที่แคบกว่า ดังรูปที่ 2.8 (b) [1] โดยที่เลเซอร์จะต้องสามารถควบคุมและเลือกค่าความยาวคลื่นแสงได้อย่างแม่นยำไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรืออุณหภูมิ มีความกว้างสเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Width) จะแคบมาก



รูปที่ 2.8 (a) เลเซอร์ดีเอพี (b) เลเซอร์ดีบีอาร์

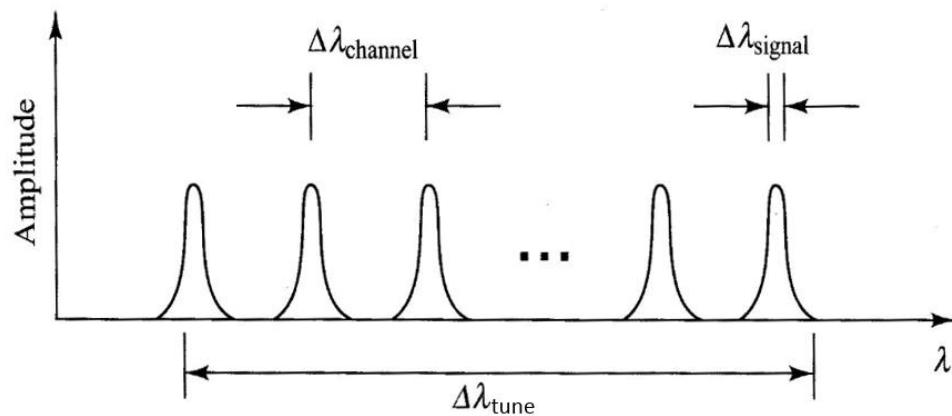
จากรูปที่ 2.8 (b) เลเซอร์ดีบีอาร์มีตัวสะท้อนแบร์ริ่ง (Bragg Reflector) หรือเกรตติงทำหน้าที่แทนกระจกที่ใช้ในเลเซอร์ Fabry-Perot เพื่อให้แสงสะท้อนกลับไป-มาภายในสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังใช้หลักการเปลี่ยนค่าความยาวของโพรง (Cavity) ทำให้ความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนไป หรือเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนไปโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $0.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ถ้าเปลี่ยนแปลงกระแสจะทำให้ค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) เปลี่ยน ส่งผลให้

ความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนเช่นเดียวกันโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.8×10^{-2} nm/mA ถึง 4×10^{-2} nm/mA หรือ 1 GHz/mA ถึง 5 GHz/mA ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีที่นิยมมากกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังมีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงช่วงแคบแบบปรับได้ (Tunable Narrow-Band Optical Filter) เพื่อกรองแสงเฉพาะความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ เป็นการหลีกเลี่ยงผลจากสัญญาณแทรกข้าม (Crosstalk) สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing) ได้ดังสมการ (2.1) [1] และมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.9 [1]

$$\Delta\lambda_{\text{channel}} \approx 10\Delta\lambda_{\text{signal}} \quad (2.1)$$

$\Delta\lambda_{\text{channel}}$ (nm): ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing)

$\Delta\lambda_{\text{signal}}$ (nm) : ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด (Source's Spectral Width)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงที่ปรับได้ (Tuning Range), ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing) และ ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด (Source's Spectral Width)

จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ, ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดและช่วงความยาวคลื่นแสงที่ปรับได้ สามารถคำนวณหาจำนวนช่องสัญญาณแสงที่ปรับได้ ดังสมการ (2.2) [1]

$$N \approx \frac{\Delta\lambda_{\text{tune}}}{\Delta\lambda_{\text{channel}}} \quad (2.2)$$

N : จำนวนช่องสัญญาณแสงที่ปรับได้

$\Delta\lambda_{\text{tune}}$ (nm): ช่วงความยาวคลื่นแสงที่ปรับได้

2.1.2.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller)

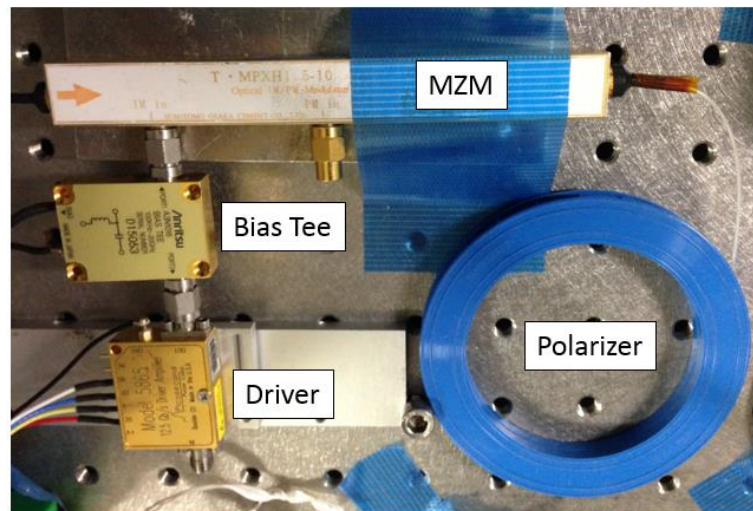
เนื่องจากตัวกล้าสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ซึ่งใช้กล้าสัญญาณแสงที่ออกมาจากเลเซอร์ดีบีอาร์มีสถานะโพลาไรเซชัน (State of Polarization, SOP) ที่สถานะแสงเดียว เพราะฉะนั้นก่อนที่แสงจะเข้าตัวกล้าสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ จำเป็นต้องมีการปรับสถานะแสงให้เหมาะสมก่อน ซึ่งสามารถหาสถานะแสงที่เหมาะสมได้โดยวัดกำลังแสงด้วยมิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter) (จะกล่าวในหัวข้อย่อยที่ 2.3.2) เพื่อวัดกำลังแสงหลังจากออกจากตัวกล้าสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ให้ได้ค่ามากที่สุด โดยทำการปรับสถานะแสงในระนาบครึ่งคลื่น (Half Wave Plate, HWP) และระนาบหนึ่งในสี่คลื่น (Quarter Wave Plate, QWP) ดังรูปที่ 2.10 [27]



รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller, PC)

2.1.2.3 ตัวกล้าสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM)

ตัวกล้าสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์เป็นแบบการกล้าสัญญาณภายนอก (External Modulation) ซึ่งตัวเลเซอร์จะแยกกันกับตัวกล้าสัญญาณแสง มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับตัวกล้าสัญญาณแสงแบบดุกคลื่นไฟฟ้าและยังมีสถานะโพลาไรเซชันที่สถานะแสงเดียว เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดคงค่าโพลาไรเซชัน (Polarization-Maintaining Fiber, PMF) หรือตัวควบคุมโพลาไรเซชันเพื่อปรับสถานะแสงให้เข้ากับตัวกล้าสัญญาณแสงนี้ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันดังที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อย่อย 2.1.2.2

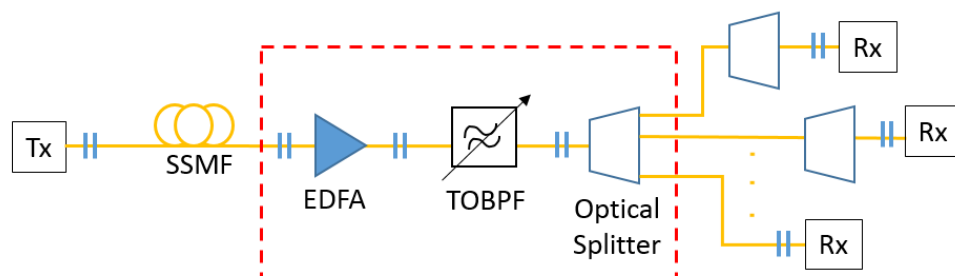


รูปที่ 2.11 ตัวกล้ำสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM)

จากรูปที่ 2.11 ตัวกล้ำสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ [4] ใช้ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Amplifier) มาขยายสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดแบบ (Pattern Generator) และผ่านไบแอสที (Bias Tee) ไปยังตัวกล้ำสัญญาณแบบมัค-เซนเดอร์ ภายในประกอบด้วยสารลิเทียมไนโอเบต (Lithium Niobate, LiNbO_3) ซึ่งเป็นสารที่ตอบสนองได้เร็วเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไป ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงเปลี่ยนไปด้วย ทำให้เกิดการกล้ำสัญญาณแสงแบบความเข้มและการส่งสัญญาณแบบบิต 1 และบิต 0 โดยทั้ง 2 บิตจะมีความเข้มแสงที่แตกต่างกันจากการให้แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

2.2 อุปกรณ์ภายในโครงข่าย

นอกเหนือจากอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณแสงที่ได้อธิบายไปแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์อื่นๆ ภายในโครงข่ายที่ใช้ประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ภายในโครงข่าย

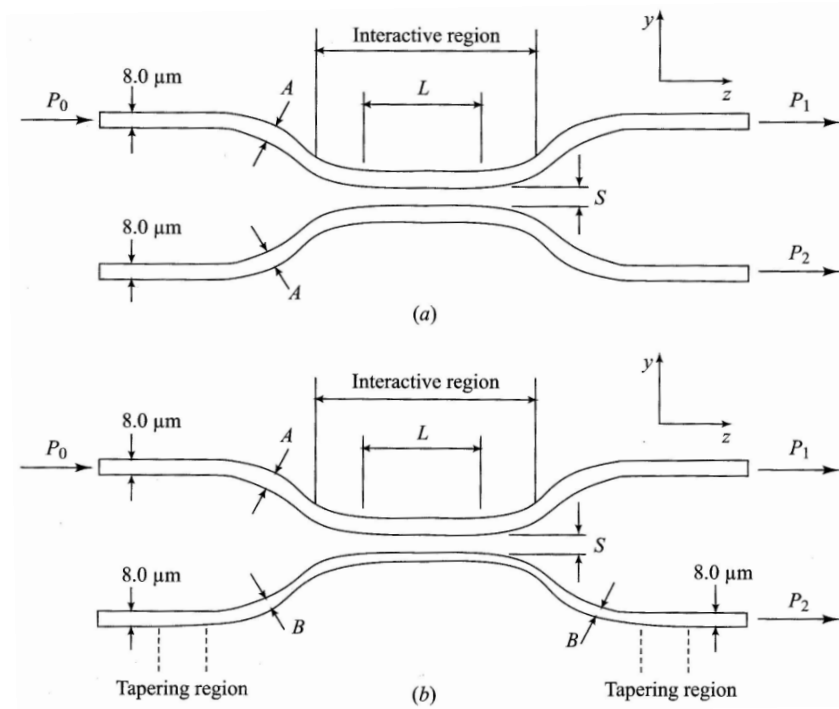
จากรูป 2.12 ตัวแยกแสง (Optical Splitter) ใช้ในการแยกแสงไปยังผู้รับบริการจำนวนมาก โดยใช้ตัวแยกแสงจำนวนหลายตัวทำให้เกิดกำลังสูญเสียแทรกภายในโครงข่าย เพราะฉะนั้นตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) จึงถูกแทรกเข้าไประหว่างโครงข่ายเพื่อเพิ่มงบกำลัง (Power Budget) ในโครงข่าย แต่ตัวขยายอีดีเอฟเอจะเกิดสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission, ASE) ค่อนข้างมาก จึงนำตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF) แทรกเข้าไปหลังจากตัวขยายอีดีเอฟเอเพื่อลดสัญญาณรบกวนเอเอสอี

2.2.1 ตัวแยกแสง (Optical Splitter)

ตัวแยกแสงเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive) ทำหน้าที่แยกแสงไปยังแต่ละช่องทางออก (Output Port) ซึ่งกำลังแสงจะถูกแบ่งไปเป็นสัดส่วนตามจำนวนช่องทางออก ตัวแยกแสงแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ 1. ตัวแยกแสงชนิดเส้นใยแก้วนำแสง 2. ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวม (Integrated Optical Waveguides) และ 3. ตัวแยกแสงชนิดไมโครออปติกขนาดใหญ่ (Bulk-Micro Optic) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวม โดยจะอธิบายในส่วนที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

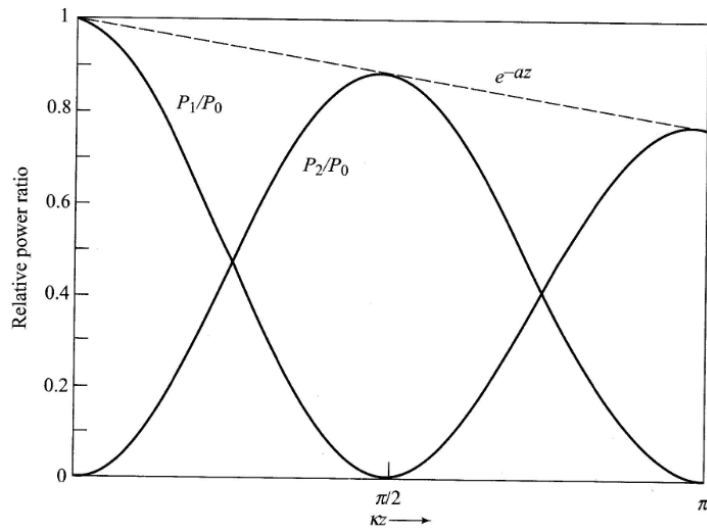
ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวม (Integrated Optical Waveguides)

ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมหรือเรียกอีกชื่อว่าตัวแยกแสงชนิดพีแอลซี (Planar Lightwave-Circuit Splitter, PLC Splitter) แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1. แบบสมมาตรเอกรูป (Uniformly Symmetric) และ 2. แบบไม่สมมาตรเอกรูป (Uniformly Asymmetric) ดังรูปที่ 2.13 [1]

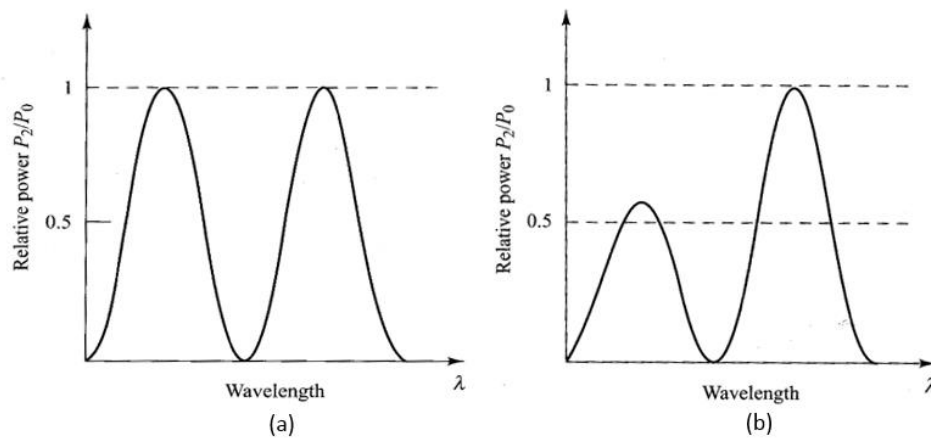


รูปที่ 2.13 ตัวแยกแสงแบบ (a) แบบสมมาตรเอกรูป (Uniformly Symmetric) (b) แบบไม่สมมาตรเอกรูป (Uniformly Asymmetric)

ตัวแยกแสงชนิดนี้มีโครงสร้างหลักเป็นท่อนำคลื่น (Waveguide) มีลักษณะคล้ายกับตัวแยกแสงชนิดเส้นใยแก้วนำแสงแต่การออกแบบจะแตกต่างกัน ซึ่งตัวแยกแสงชนิดนี้ออกแบบโดยคำนึงถึงความกว้างของท่อนำคลื่น (Waveguide Width) ในบริเวณเชิงโต้ตอบ (Interactive) ความห่างระหว่างท่อนำคลื่น (Waveguide Gap) และค่าดัชนีหักเหแสงในแกนกลางของเส้นใยแก้วนำแสง (Refractive Index: n_1) ดังรูปที่ 2.13 นอกจากนี้การออกแบบยังคำนึงถึงชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ คำนึงถึงกำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากการกระเจิงของแสง (Scattering) และกำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากความยาวของท่อนำคลื่นซึ่งลดทอนไปตามพารามิเตอร์ $e^{-\alpha z}$ เมื่อ z คือความยาวของท่อนำคลื่น ดังรูปที่ 2.14 [1] เมื่อความยาวของท่อนำคลื่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังแสงลดลงอย่างรวดเร็วตามเลขชี้กำลัง (Exponentially Decay)



รูปที่ 2.14 การลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากความยาวของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกและความยาวคลื่นแสงส่งผ่านตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 2.15 [1] (a) กราฟจะมีลักษณะคล้ายกับคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) โดยความยาวคลื่นแสงที่ตรงกับแต่ละจุดยอดของกราฟจะมีค่าอัตราส่วนกำลังแสงขาออกต่อกำลังแสงขาเข้าที่เท่ากันเนื่องจากความกว้างของท่อนำคลื่นมีขนาดเท่ากัน แตกต่างกับตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมแบบไม่สมมาตรเอกรูปซึ่งจะมีความกว้างของแต่ละท่อนำคลื่นแตกต่างกันทำให้ได้เส้นกราฟดังรูปที่ 2.15 (b) ซึ่งความยาวคลื่นแสงที่ตรงกับแต่ละจุดยอดของกราฟจะมีอัตราส่วนกำลังแสงขาออกต่อกำลังแสงขาเข้าที่ต่างกัน เนื่องจากมีความต่างเฟสกันระหว่างท่อนำคลื่น โดยตัวแยกแสงชนิดนี้ออกแบบมาเฉพาะเพื่อใช้ในแอปพลิเคชันที่ใช้งานที่ค่าความยาวคลื่นแสงในแต่ละค่า สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) [1]

$$\text{Excess Loss} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_0}{P_1 + P_2} \right) \quad (2.3)$$

Excess Loss (dB): กำลังแสงสูญเสียส่วนเกิน

P_0 (W) : กำลังแสงขาเข้า

P_1 (W) : กำลังแสงขาออกที่ช่องทาง 1

P_2 (W) : กำลังแสงขาออกที่ช่องทาง 2

$$\text{Insertion loss} = 10\log\left(\frac{P_i}{P_j}\right) \quad (2.4)$$

Insertion loss (dB): กำลังแสงสูญเสียแทรก

P_i (W) : กำลังแสงขาเข้าที่ช่องทาง i

P_j (W) : กำลังแสงขาออกที่ช่องทาง j

$$\text{Return loss} = 10\log\left(\frac{P_3}{P_0}\right) \quad (2.5)$$

Return loss (dB): กำลังแสงสูญเสียจากการสะท้อนกลับ

P_3 (W) : กำลังแสงสะท้อนกลับที่ช่องทาง 3

P_0 (W) : กำลังแสงขาเข้า



รูปที่ 2.16 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura

จากรูปที่ 2.16 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura [7] เป็นตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมซึ่งใช้ในการทำวิจัยนี้ โดยใช้ตัวแยกแสง 1:4 จำนวน 1 ตัว และตัวแยกแสง 1:8 จำนวน 2 ตัว ทำให้สามารถแยกแสงไปยังผู้รับบริการทั้งสิ้น 256 ผู้รับบริการ โดยแต่ละตัวจะสามารถวัดค่ากำลังแสงสูญเสียจากช่องทางขาเข้า (Input Port) ไปยังแต่ละช่องทางขาออก (Output Port) ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กำลังแสงสูญเสียในตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Fujikura

ตัวแยกแสง	ช่องทาง (Port)	กำลังแสงสูญเสียแทรก (dB)
1:4	1	7.55
	2	7.36
	3	7.58
	4	7.07
1:8	1	10.18
	2	10.24
	3	10.21
	4	10.47
	5	10.17
	6	10.37
	7	10.29
	8	10.34
1:8	1	10.36
	2	10.51
	3	10.44
	4	10.40
	5	10.49
	6	10.37
	7	10.40
	8	10.24



รูปที่ 2.17 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai

จากรูปที่ 2.17 ตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai [6] เป็นตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมซึ่งใช้ในการทำวิจัยนี้ โดยใช้ตัวแยกแสง 1:2 จำนวน 2 ตัว และตัวแยกแสง 1:16 จำนวน 1 ตัว ทำให้สามารถแยกแสงไปยังผู้รับบริการทั้งสิ้น 64 ผู้รับบริการ แต่ละตัวสามารถอ่านค่ากำลังแสงสูญเสียจากช่องทางขาเข้า ไปยังแต่ละช่องทางขาออก จากแผ่นข้อมูล (Data Sheet) ได้ตามตารางที่ 2.2 [6]

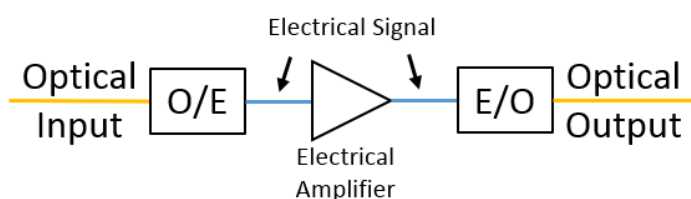
ตารางที่ 2.2 กำลังแสงสูญเสียในตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai

ตัวแยกแสง	ช่องทาง (Port)	กำลังแสงสูญเสียแทรก (dB)
1:2	1	3.81
	2	3.75
1:2	1	3.82
	2	3.65
1:16	1	12.91
	2	12.77
	3	12.71
	4	12.98
	5	12.93
	6	12.73
	7	12.83
	8	12.80
	9	12.97
	10	12.97

	11	12.73
	12	12.98
	13	12.81
	14	12.82
	15	12.79
	16	12.86

2.2.2 ตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA)

การส่งสัญญาณผ่านโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงถูกจำกัดด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ หนึ่งในนั้นคือ กำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากการลดทอน (Attenuation) ในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะจำกัดระยะทางในการส่งสัญญาณเพราะฉะนั้นจึงใช้เครื่องทวนสัญญาณ (Repeater) เพื่อทำหน้าที่ในการขยายกำลังของสัญญาณ โดยองค์ประกอบภายในเครื่องทวนสัญญาณจะแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 องค์ประกอบภายในเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater)

จากรูปที่ 2.18 เครื่องทวนสัญญาณใช้ตัวแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Optical to Electrical Converter, O/E Converter) ในการแปลงสัญญาณ ต่อมาใช้ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Amplifier) ขยายให้สัญญาณมีกำลังมากขึ้น แล้วจึงใช้ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง (Electrical to Optical Converter, E/O Converter) ในการแปลงสัญญาณกลับไปเป็นรูปสัญญาณแสงดั้งเดิม จะเห็นว่าเครื่องทวนสัญญาณค่อนข้างซับซ้อนและมีราคาแพง เพราะฉะนั้นในปัจจุบันจะนิยมใช้ตัวขยายแสงเพราะสามารถขยายแสงได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน

ตัวขยายแสงมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคืออัตราขยาย (Gain) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6) [28]

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.6)$$

G : อัตราขยาย (Gain)

P_{out} (W): กำลังแสงขาออก (Output Power)

P_{in} (W) : กำลังแสงขาเข้า (Input Power)

นอกจากนี้ตัวขยายแสงยังมีสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE Noise) ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ลดลง สามารถคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) ได้ดังสมการ (2.7) [28]

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} = \frac{2n_{sp}(G - 1)}{G} \approx 2n_{sp} \quad (2.7)$$

F_n : ตัวเลขสัญญาณรบกวน

$(SNR)_{in}$: อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนฝั่งขาเข้า (Input SNR)

$(SNR)_{out}$: อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนฝั่งขาออก (Output SNR)

n_{sp} : แฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission Factor)

G : อัตราการขยาย

จากสมการ (2.7) เมื่อค่าอัตราการขยายมีค่ามาก เช่น อัตราการขยายเท่ากับ 20 dB หรือ 100 เท่า จะสามารถคำนวณแบบประมาณค่าได้ และค่าแฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองคำนวณได้ดังสมการ (2.8) [28]

$$n_{sp} = \frac{N_2}{(N_2 - N_1)} \quad (2.8)$$

N_1 : ประชากรอะตอมมิกที่สถานะพื้น (Atomic Population for Ground State)

N_2 : ประชากรอะตอมมิกที่สถานะกระตุ้น (Atomic Population for Excited State)

ในกรณีอุดมคติ n_{sp} จะมีค่าเท่ากับ 1 จากสมการ (2.7) ทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนฝั่งขาออกลดลงไป 3 dB และตัวเลขสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น 3 dB ซึ่งตัวขยายแสงที่มีประสิทธิภาพควรจะมีค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนฝั่งขาออกค่ามากและมีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนต่ำ

ตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายจะส่งผลกับสัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise) เช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสง นอกจากนั้นสัญญาณรบกวนเอเอสอีจะบีต (Beat) กับสัญญาณขาเข้า ทำให้สัญญาณขาออกที่ถูกขยายแล้วไม่เสถียร สามารถคำนวณหาความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Spectral Density of Spontaneous-Emission Noise) ได้ดังสมการ (2.9) [28]

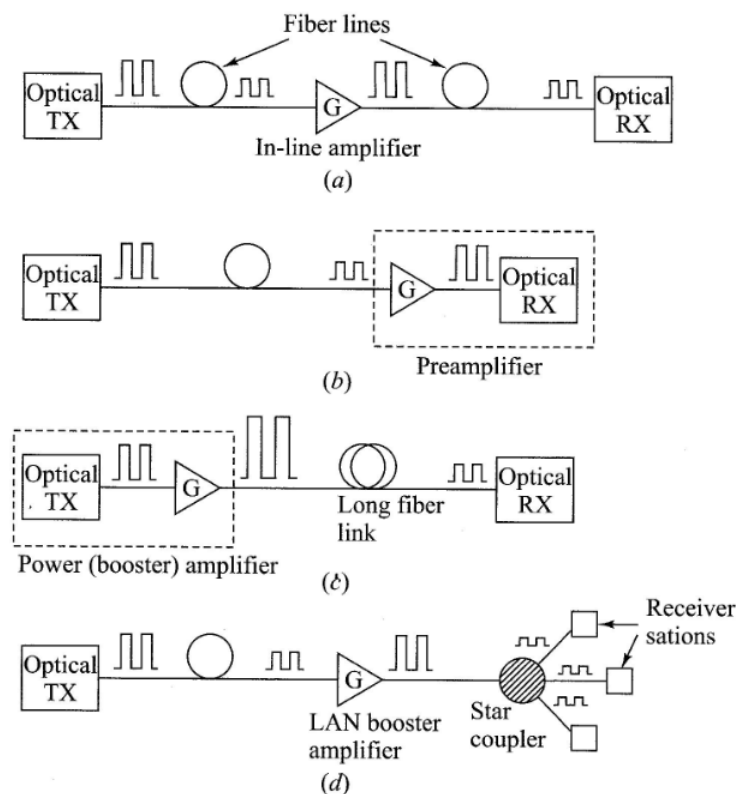
$$S_{sp}(\nu) = (G - 1)n_{sp}h\nu \quad (2.9)$$

$S_{sp}(\nu)$ (W/Hz): ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนแบบเอเอสอี

h (J-s) : ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) เท่ากับ 6.6256×10^{-34} J-s

ν (Hz) : ความถี่ (Frequency)

ตัวขยายแสงใช้ในแต่ละแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 2.19 [1]



รูปที่ 2.19 แอปพลิเคชันของตัวขยายแสง

จากรูปที่ 2.19 (a) In-Line Amplifier แทรกตัวขยายแสงไว้กึ่งกลางโครงข่าย เพื่อใช้ใน ระบบระยะทางไกล (Long-Haul System) โดยใช้แทนเครื่องทวนสัญญาณ จะต่อตัวขยายแสงแบบ อนุกรมหรือขนานภายในโครงข่าย และใช้ในโครงข่ายที่ไม่ไวต่อผลของดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ผล ไม่เชิงเส้น (Non-Linear effect) และผลของสัญญาณรบกวนรบกวนมากนัก ส่วนใหญ่มักใช้ในโครงข่ายการ รวมสัญญาณแบบความยาวคลื่นแสง (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

จากรูปที่ 2.19 (b) Preamplifier แทรกตัวขยายแสงไว้ก่อนหน้าตัวรับแสง (Optical Receiver) เพื่อทำให้ค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ (Optical Receiver's Sensitivity) ดีขึ้น สามารถเพิ่มงบกำลังในโครงข่ายได้เช่นเดียวกับ Power Amplifier

จากรูปที่ 2.19 (c) Power (Booster) Amplifier แทรกตัวขยายแสงไว้หลังตัวส่งแสง (Optical Transmitter) เพื่อเพิ่มกำลังส่งและงบกำลัง (Power Budget) ในโครงข่าย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ อัตราการขยายของตัวขยายแสงและกำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่าย

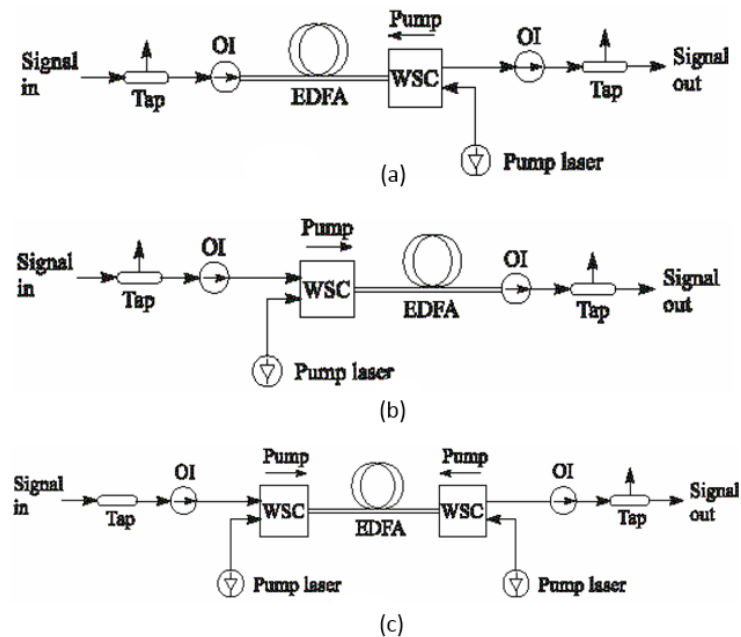
จากรูปที่ 2.19 (d) LAN Booster Amplifier จะแทรกตัวขยายแสงไว้กึ่งกลางของโครงข่าย เช่นเดียวกับ In-Line Amplifier แต่จะใช้ในแอปพลิเคชันที่มีการแยกสัญญาณไปยังผู้รับบริการจำนวนมาก โดยแอปพลิเคชันนี้เหมาะกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่สุด

ตัวขยายแสงในปัจจุบันมี 3 ชนิด ได้แก่ 1. ตัวขยายเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) 2. ตัวขยายรามาน (Raman Amplifier) และ 3. ตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวขยายอีดีเอฟเอ จึงจะอธิบายในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้

ตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA)

ตัวขยายอีดีเอฟเอเป็นตัวขยายที่นิยมใช้ในปัจจุบันมากที่สุด มีโครงสร้างและองค์ประกอบ คล้ายกับตัวขยายรามานแต่แตกต่างกันโดยตัวขยายอีดีเอฟเอ นำสารเออร์เบียม (Erbium, Er) มาเจือในแกนกลางของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เป็นตัวขยายแสงทำให้สามารถขยายแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง C-band: 1530 nm – 1565 nm และมีอัตราการขยาย (Gain) ที่สูง นอกจากนี้ยังมีสารชนิดอื่นที่สามารถนำมาเจือสารในเส้นใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน สเปกตรัมของอัตราการขยาย (Gain Spectrum) ขึ้นอยู่กับวิธีการปั๊มและสารที่ใช้ในการเจือ โดยปกติแล้วจะใช้เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser) เป็นแหล่งกำเนิดปั๊ม (Pumped Source) และใช้ความยาวคลื่นแสงปั๊ม (Pumped Wavelength) 2 ความยาวคลื่นแสงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ 980 nm และ 1480 nm ซึ่งให้อัตราการขยายสูงถึง 30 dB และมีกำลังปั๊ม (Pumped Power) เท่ากับ 15 mW

ตัวขยายอีดีเอฟเอแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามวิธีการปั๊ม ดังแสดงในรูปที่ 2.20 [28]



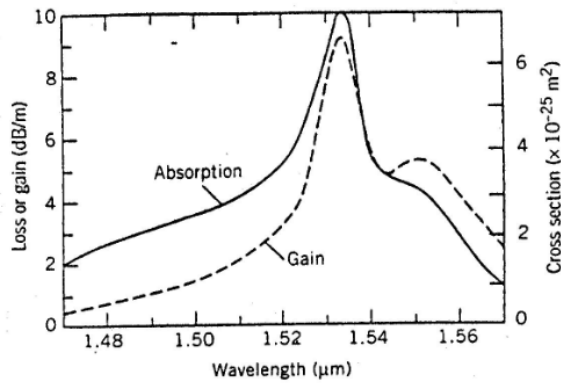
รูปที่ 2.20 ทิศทางการปั๊มแสงภายในตัวขยายอีดีเอฟเอ

จากรูปที่ 2.20 (a) Backward Pumping เป็นการปั๊มย้อนกลับโดยใช้เลเซอร์ปั๊มเพียง 1 ตัว คล้ายกับตัวขยายรามานทำให้ได้อัตราการขยายสูง แต่กำลังแสงขาเข้าจะต้องต่ำมากพอที่ขยายแสงแล้วอยู่ในช่วงอิ่มตัว (Saturation) โดยส่วนใหญ่เหมาะใช้เป็น Preamplifier

จากรูปที่ 2.20 (b) Forward Pumping เป็นการปั๊มไปในทิศทางเดียวกันกับสัญญาณขาเข้า โดยมีประสิทธิภาพดีกว่า Backward Pumping เนื่องจากสามารถขยายสัญญาณในช่วงไม่อิ่มตัวและลดสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission, ASE) ได้ดีกว่า

จากรูปที่ 2.20 (c) Bidirectional Pumping ใช้เลเซอร์ปั๊ม 2 ตัว แต่ละตัวจะปั๊มสวนทางกัน ทำให้การแปลงประชากร (Population Inversion) เพิ่มมากขึ้น มีค่าอัตราการขยายที่สูงกว่า Backward Pumping และมีความเป็นเอกรูป (Uniform) ตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน

รูปร่างสเปกตรัมของอัตราการขยายขึ้นอยู่กับแก้วซิลิกา (Silica, SiO_2) ในเส้นใยแก้วนำแสง และสารที่นำไปเจือในแกนกลางของเส้นใยแก้วนำแสง เช่น เยอรมันเนียม (Germanium, Ge) และ อลูมิเนียม (Aluminium, Al) โดยรูปร่างสเปกตรัมของอัตราการขยายที่เจือสารเยอรมันเนียมในแกนกลางของเส้นใยแก้วนำแสง แสดงดังรูปที่ 2.21 [28]



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของอัตราการขยายของตัวขยายอีดีเอฟเอ

จากรูปที่ 2.21 สเปกตรัมของอัตราการขยายจะกว้างและมี 2 จุดยอด โดยขึ้นอยู่กับ การดูดกลืน (Absorption) และหน้าตัดในการเปล่งแสงออก (Emission Cross Section) โดยปกติแล้ว แบนด์วิดท์ของอัตราการขยาย (Gain Bandwidth) มีความกว้างประมาณ 35 nm

อัตราการขยายของตัวขยายอีดีเอฟเอขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ความเข้มของสารเออร์เบียม (Erbium, Er) ที่ใช้เจือสารในแกนกลางของเส้นใยแก้วนำแสง ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการขยายแสง เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วนำแสง และกำลังปั๊ม โดยกำลังปั๊มและกำลังสัญญาณ (Signal Power) จะเปลี่ยนไปตามความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงที่ถูกปั๊มภายในจะเกิดการดูดกลืน, การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) และ การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวขยายอีดีเอฟเอ เนื่องจากใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1550 nm ส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวขยายอีดีเอฟเอสามารถทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 mEDFA-A1 จากบริษัท JDSU [8] และ รูปที่ 2.23 ErFA11023 จากบริษัท Fitel [9]



รูปที่ 2.22 ตัวขยายอีดีเอฟเอของบริษัท JDSU



รูปที่ 2.23 ตัวขยายอดีเอฟเอของบริษัท Fitel

2.2.3 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ (Tunable Optical Band Pass Filter, TOBPF)

ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มี 2 ชนิด คือ (1) Micro Electro-Mechanical Systems Device (MEMs-Based) และ (2) Bragg-Grating-Based Device

ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ชนิด MEMs-Based

องค์ประกอบภายในจะมีกระจกเป็นตัวยึดสำคัญทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ทำงานโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าแล้วทำให้กระจก 1 ใน 2 บานเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนทิศทางของแสงอย่างแม่นยำ เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะทางของแสงระหว่าง 2 โพรง ซึ่งจะเลือกความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน ข้อดีของตัวกรองสัญญาณชนิดนี้คือ สามารถปรับเลือกย่านความถี่ได้ในช่วงกว้างและมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ

ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ชนิด Bragg-Grating-Based Devices

องค์ประกอบภายในจะมีเส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงแบร์ก (Fiber Bragg Grating) อยู่ ทำงานโดยสามารถยืดหดได้เพื่อให้ค่าดรรชนีหักเหแสงเปลี่ยน ส่งผลให้ค่าความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนด้วยเช่นกัน ดังสมการที่ (2.10) [1]

$$\lambda_c = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.10)$$

λ_c (nm): ความยาวคลื่นแสงตรงกลาง

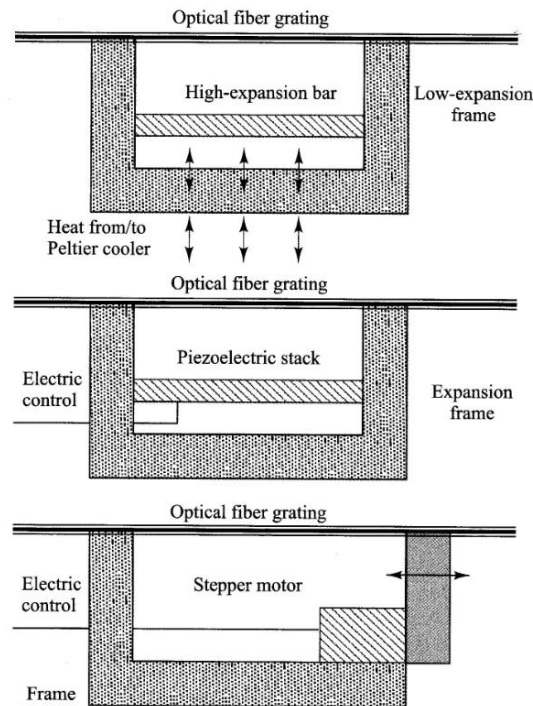
n_{eff} : ดรรชนีประสิทธิผล (Effective Index)

Λ (nm) : คาบดรรชนีการแปรผันของเกรตติง

เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงแบร์กยืดออกเป็นระยะทาง $\Delta\Lambda$ ทำให้ค่าความยาวคลื่นแสงตรงกลางเลื่อนไปจากค่าเดิมดังสมการ (2.11) [1]

$$\Delta\lambda_c = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2.11)$$

โดยตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ชนิดนี้สามารถใช้งานได้ในช่วง C-Band, L-Band, S-Band และ ช่วงความยาวคลื่นแสงที่ 1310 nm



รูปที่ 2.24 องค์ประกอบภายในตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ชนิด Bragg-Grating-Based Devices

ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ชนิด Bragg-Grating-Based สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังรูปที่ 2.24 [1] ตามวิธีการยึดเส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงแบร์ริค ได้แก่ (1) วิธี Thermo-Mechanical เป็นการเปลี่ยนรูปร่างและอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงแบร์ริค ข้อดีคือราคาไม่แพง แต่ข้อเสียคือตอบสนองช้า มีช่วงที่ปรับความยาวคลื่นแสงได้จำกัด (2) วิธี Piezoelectric ใช้วัสดุ Piezoelectric ที่สามารถเปลี่ยนความยาวเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุ ข้อดีคือมีความละเอียดในการปรับเลือกความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ แต่ข้อเสียคือราคาแพง การออกแบบค่อนข้างซับซ้อน และมีช่วงที่ปรับความยาวคลื่นแสงได้จำกัด (3) วิธี Stepper-Motor เปลี่ยนความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงแบร์ริคโดยการยึดหรือหดตัวของ Stepper Motor จากขอบหนึ่งของวัสดุไปยังอีกขอบหนึ่ง ข้อดีคือราคาไม่แพงมาก มีความน่าเชื่อถือ และมีความเร็วในการปรับค่าความยาวคลื่นแสงอย่างพอดี

โดยงานวิจัยนี้ใช้ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ตัว ดังรูปที่ 2.25 mTBF-A1 จากบริษัท JDSU [10] และรูปที่ 2.26 จากบริษัท OPTOQUEST [11]



รูปที่ 2.25 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU

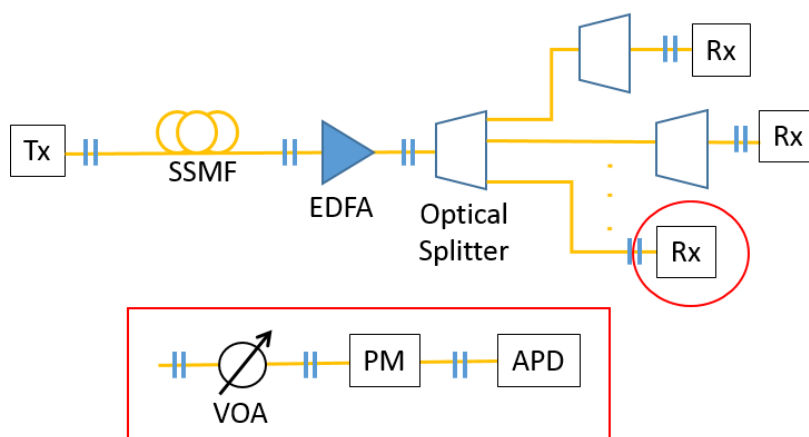


รูปที่ 2.26 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST

จากรูปที่ 2.25 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU มีวิธีการยืดเส้นใยแก้วนำแสงเกรตติงแบร์ริ่งแบบ Stepper-Motor แบบ Mechanical และรูปที่ 2.26 ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST เป็นแบบ Mechanical

2.3 อุปกรณ์ภาครับสัญญาณแสง

ในอุปกรณ์ภาครับสัญญาณแสงประกอบด้วยตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA) เพื่อลดทอนและปรับค่ากำลังแสง สามารถวัดค่ากำลังแสงด้วยมิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter) และรับแสงด้วยตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี้ (Avalanche Photo Diode, APD) แสดงแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 2.27 ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวจะอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป



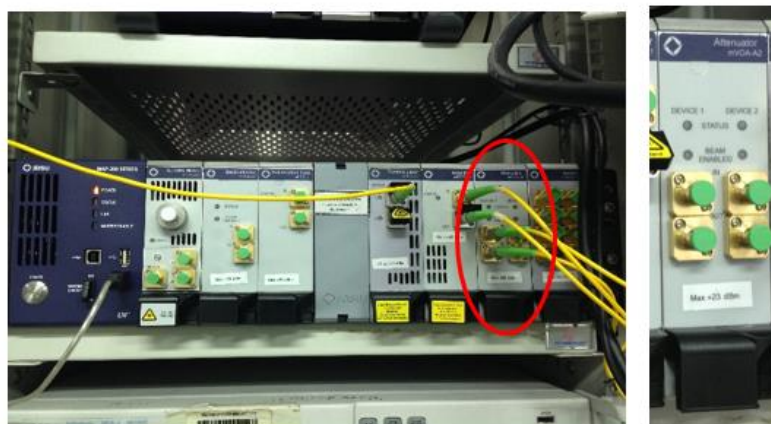
รูปที่ 2.27 แผนภาพบล็อกของภาครับสัญญาณแสง

2.3.1 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA)

ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ นำมาใช้เพื่อลดทอนกำลังแสงก่อนเข้าไปยังตัวรับแสง อุปกรณ์ หรือเครื่องมือวัด เพื่อป้องกันไม่ให้มีกำลังแสงมากเกินไป เพราะถ้ากำลังแสงสูงเกินค่ากำลังแสงสูงสุดที่อุปกรณ์สามารถรับได้ อาจทำให้อุปกรณ์นั้นเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ ทั้งนี้ยังใช้ในการปรับกำลังแสงไปยังค่าต่างๆ เพื่อวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ณ กำลังแสงค่านั้นๆ ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ สามารถปรับค่าได้อย่างแม่นยำ ไม่ควรขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน (Polarization Independent) สามารถใช้งานได้ทั้งความยาวคลื่นแสง กำลังแสงสูญเสียควรมีค่าน้อยมาก และช่วงในการปรับการลดทอนควรกว้างอย่างน้อยประมาณ 15 dB – 30 dB ขึ้นไป

ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้มี 3 แบบ [1] ได้แก่ (1) Mechanical มีข้อดีคือใช้งานได้สะดวก แต่ข้อเสียคือช่วงในการลดทอนไม่กว้างมากนักและตอบสนองช้า (2) Thermo-Optic ข้อดีคือมีช่วงในการลดทอนค่อนข้างกว้าง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermo-Electric Cooler, TEC) ซึ่งต้องเสียพลังงานเพิ่มขึ้น และ (3) Electro-Optic เป็นตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีคือคือประหยัดพลังงานและมีการตอบสนองเร็ว

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ 2 ตัว ดังรูปที่ 2.28 mVOA-A2 จากบริษัท JDSU [29] และรูปที่ 2.29 จากบริษัท OPTOQUEST [30]



รูปที่ 2.28 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท JDSU



รูปที่ 2.29 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท OPTOQUEST

จากรูปที่ 2.28 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท JDSU เป็นชนิด Electro-Optic และจากรูปที่ 2.29 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท OPTOQUEST เป็นชนิด Mechanical

2.3.2 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter)

มิเตอร์วัดกำลังแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ากำลังแสงโดยครอบคลุมเฉพาะช่วงความยาวคลื่นแสง ซึ่งจะใช้ตัวตรวจจับแสงแบบพิน (PIN Photodetector) หลายตัวในการตรวจจับสัญญาณแสง อีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญของมิเตอร์วัดกำลังแสงคือช่วงที่สามารถวัดกำลังได้ควรจะมีช่วงกว้าง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อมิเตอร์วัดกำลังแสงทำจากสารเจอร์เมเนียม (Germanium, Ge) จะสามารถวัดกำลังแสงได้ในช่วง +18 dBm ถึง -60 dBm ที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 840 nm – 1650 nm แต่ถ้าใช้สารอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) จะสามารถวัดกำลังแสงได้ในช่วง +3 dBm ถึง -73 dBm ที่ช่วงความยาวคลื่นแสงเดียวกันคือ 840 nm – 1650 nm เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันที่ใช้ว่า

ต้องการวัดกำลังแสงมากน้อยแค่ไหนในแต่ละกรณี โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้มิเตอร์วัดกำลังแสงอยู่ 2 เครื่อง ดังรูปที่ 2.30 คือมิเตอร์วัดกำลังแสง PM320E จากบริษัท THORLABS [31] แต่มิเตอร์วัดกำลังแสงจากบริษัท JDSU สามารถใช้งานจากโมดูลของตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท JDSU ดังรูปที่ 2.28 โดยการเลือกโหมดอ่านค่าเป็นแสดงค่ากำลังแสงที่หน้าจอได้



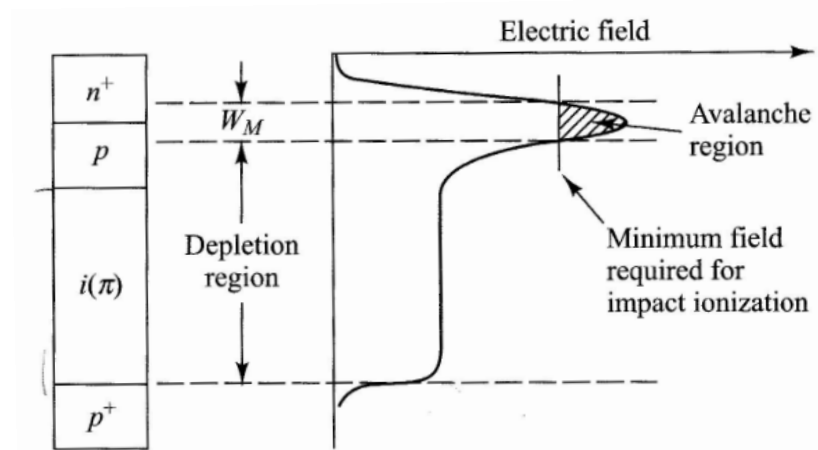
รูปที่ 2.30 มิเตอร์วัดกำลังแสงของบริษัท THORLABS

2.3.3 ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี (Avalanche Photo Diode, APD)

ตัวตรวจจับแสงเป็นตัวรับสัญญาณแสงและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ มีค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ (Optical Receiver's Sensitivity) ค่าต่ำ มีสัญญาณรบกวนต่ำเมื่อเทียบกับสัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้าที่แปลงไป โดยสัญญาณรบกวนอาจเกิดจากองค์ประกอบภายในตัวตรวจจับแสง เช่น ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Amplifier) เป็นต้น มีการตอบสนองเร็วในการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีแบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า (Electrical Bandwidth) กว้างพอที่จะรับสัญญาณด้วยอัตราบิตข้อมูลที่ส่งมาได้ สามารถทนกับสภาพแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องได้พอสมควร และมีอายุการใช้งานที่นาน มีราคาเหมาะสม ในปัจจุบันสามารถแบ่งตัวตรวจจับแสงที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำได้เป็น 2 ชนิด [1] ได้แก่ (1) ตัวตรวจจับแสงแบบพิน (PIN Photodetector) และ (2) ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี (Avalanche Photo Diode, APD) โดยจะอธิบายเพียงแค่ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เท่านั้น

ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี (Avalanche Photo Diode, APD)

ตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีมีค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ค่อนข้างต่ำมากซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับแสงแบบพิน เพราะเมื่อมีกำลังแสงที่ค่าต่ำเข้ามายังตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีก็สามารถตรวจจับแสงได้ โดยโครงสร้างจะเป็นดังรูปที่ 2.31 [1]



รูปที่ 2.31 โครงสร้างภายในตัวตรวจจับสนแสงแบบเอพิตี

จากรูปที่ 2.31 ตัวตรวจจับสนแสงแบบเอพิตีมีโครงสร้างคล้ายกับตัวตรวจจับสนแสงแบบพิน แต่มีการเจือสารให้เป็น p^+ -type และ n^+ -type มีการเพิ่มขึ้นของ p -type เพื่อทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นที่รอยต่อระหว่าง n^+ -type และ p -type ดังรูป เรียกว่า ปรากฏการณ์ถล่มทลาย (Avalanche Effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดก่อนที่สัญญาณจะเข้าไปยังตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ทำให้ลดสัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise) ไปได้ประมาณหนึ่ง เมื่อป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ (Reverse Bias Voltage) จะเกิดแรงดันที่รอยต่อระหว่าง n^+ -type และ p -type เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากพอ Avalanche Breakdown จะเกิดขึ้นที่บริเวณการถล่มทลาย (Avalanche Region) ทำให้บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) สามารถขยายเพิ่มเข้าไปยังสาร p -type ที่ติดกันด้วย ซึ่งบริเวณปลอดพาหะเป็นบริเวณที่ดูดกลืนพลังงานและสะสมพาหะแสงที่ถูกสร้างขึ้นมา เพราะฉะนั้นเมื่อบริเวณปลอดพาหะยังกว้างจะสามารถรับค่าพลังงานได้ในช่วงที่กว้างขึ้น สามารถรับค่ากำลังแสงต่ำได้

$$M = \frac{I_M}{I_p} \quad (2.12)$$

M : แฟคเตอร์การคูณ (Multiplication Factor)

I_M (A): กระแสคูณเพิ่ม

I_p (A) : กระแสโฟโต

เนื่องจากตัวตรวจจับสนแสงแบบเอพิตีจะทำให้เกิดการคูณเพิ่มหรือเกิดปรากฏการณ์ถล่มทลาย ทำให้ในสมการจะมีตัว M เพิ่มขึ้นดังสมการที่ (2.12) [1] เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับสนแสงแบบพิน ทั้งนี้มีค่าการตอบสนองดังสมการที่ (2.13) [1] โดยค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับสนแสงแบบเอพิตีมีค่าเป็น M เท่าของตัวตรวจจับสนแสงแบบพิน

$$R_{APD} = \frac{\eta q}{h\nu} M = RM \quad (2.13)$$

R_{APD} (A/W): ค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี

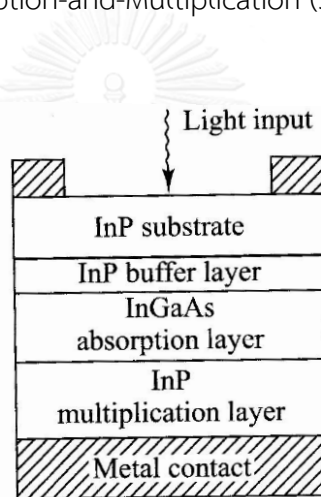
η : ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency)

q (C) : ค่าประจุอิเล็กตรอน (Electron Charge) เท่ากับ 1.60218×10^{-19} C

h (J·s) : ค่าคงที่ของพลังค์ เท่ากับ 6.6256×10^{-34} J·s

ν (Hz) : ความถี่

โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดีนิยมใช้สารกึ่งตัวนำ InGaAs เป็นองค์ประกอบ และมีโครงสร้างแบบ Separate-Absorption-and-Multiplication (SAM) ซึ่งแต่ละชั้นประกอบด้วย InP และ InGaAs ดังรูปที่ 2.32 [1]



รูปที่ 2.32 องค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำภายในตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี

จากรูปที่ 2.32 ชั้นสารกึ่งตัวนำ InP Substrate มีแถบความกว้างพลังงาน (Bandgap Energy) ที่กว้าง ให้ความยาวคลื่นแสงขาเข้าที่ยาวกว่าสามารถผ่านไปยังชั้น InGaAs ได้ ชั้น InGaAs บริเวณดูดกลืนจะเป็นบริเวณที่คู่อิเล็กตรอนโฮลถูกสร้างขึ้นมา ถัดไปชั้น InP บริเวณการคูณ (Multiplication Region) ต้องมีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดค่าอัตราการขยายและเกิดปรากฏการณ์ถล่มหลายขึ้น โดยไม่เกิดปัญหา Tunneling Breakdown

ตัวตรวจจับแสงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เป็นตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดี ซึ่งจะอยู่ภายใน
 ด้ ว รั บ ส ่ง แ ส ง ด้ ง ร ู ป ที่ 2. 3

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโครงข่าย จะอธิบายในแต่ละหัวข้อย่อยถัดไป

3.1 ผลกระทบจากการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF)

การส่งสัญญาณผ่านสายส่งไม่ว่าชนิดใดก็ตามทำให้มีผลกระทบเกิดขึ้นเสมอไม่มากก็น้อย ดังนั้นการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐานก็เช่นกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ ส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ระยะทางมากที่สุดเท่ากับ 62 Km จึงมีผลกระทบกับโครงข่าย คือ การลดทอน (Attenuation) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกำลังแสงสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง โดยจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ส่งสัญญาณและนำไปคำนวณในหัวข้อย่อยที่ 3.2 อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีผลกระทบที่สำคัญอีกคือ โครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD) เกิดขึ้นเมื่อส่งสัญญาณไปในระยะทางไกลส่งผลให้สัญญาณพัลส์ถ่างออกและไปแทรกสอดกับสัญญาณพัลส์ที่ติดกัน เมื่อสัญญาณเดินทางมาถึงตัวรับแสง (Optical Receiver) จะทำให้ตัดสินบิตผิดพลาดและเกิดเป็นอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ขึ้น

3.1.1 การลดทอน (Attenuation)

การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวเกิดจากการส่งสัญญาณไปในระยะทางหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดการลดทอนดังสมการที่ (3.1) [1]

$$\alpha_f = \frac{10}{L} \log_{10} \left[\frac{P(0)}{P(L)} \right] \quad (3.1)$$

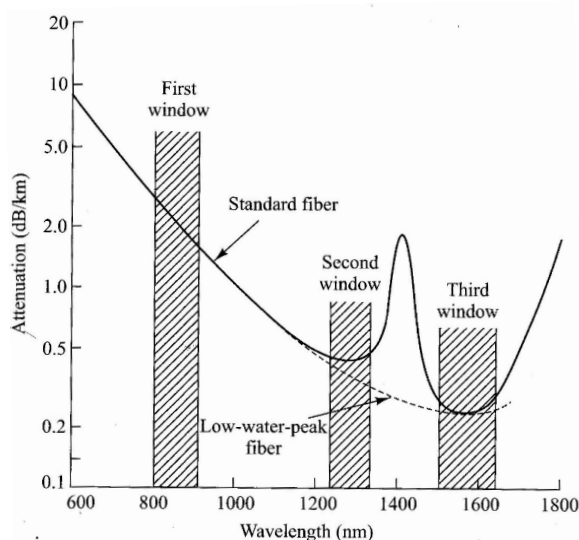
L (Km) : ระยะทาง

P(L) (W) : กำลังแสงที่ระยะทาง L Km

P(0) (W) : กำลังแสงที่ระยะทาง 0 Km

α_f (dB/Km): ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง

แต่ละความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.1 [1]



รูปที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง

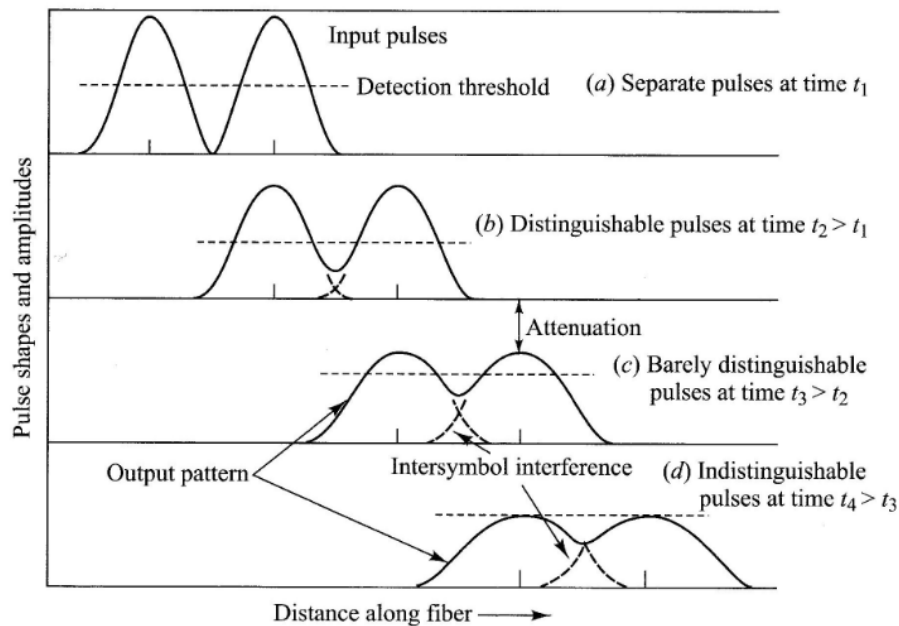
ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแต่ละความยาวคลื่นแสงหลักในการใช้งาน

หน้าต่าง	ความยาวคลื่นแสง (nm)	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (dB/Km)
หน้าต่างที่ 1	850 nm	2 dB/Km
หน้าต่างที่ 2	1310 nm	0.5 dB/Km
หน้าต่างที่ 3	1550 nm	0.2 dB/Km

จากรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1 [1] ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความยาวคลื่นแสงช่วง 1550 nm เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนน้อยที่สุดและยังเป็นความยาวคลื่นแสงตามมาตรฐาน ITU-T G.983.3 [24] อีกด้วย

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบโครงข่าย เนื่องจากการคำนวณสมการงบกำลังที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2 ใช้พารามิเตอร์นี้ในการคำนวณงบกำลังภายในโครงข่าย

3.1.2 โครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD)

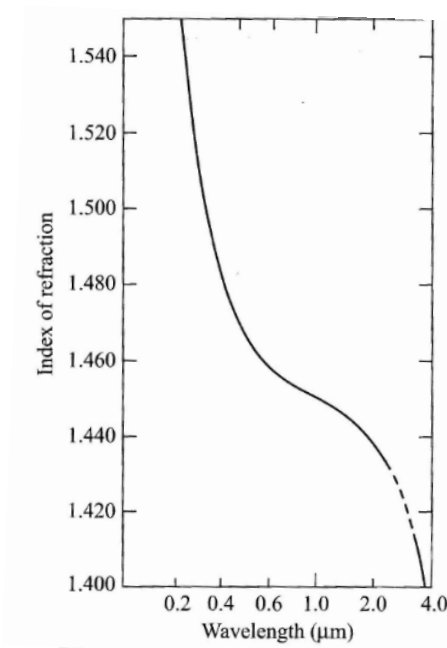


รูปที่ 3.2 การถ่างออกของสัญญาณตามระยะทาง

จากรูปที่ 3.2 [1] (a) คือสัญญาณพัลส์ที่ส่งออกจากตัวส่งแสง โดยทั้ง 2 สัญญาณพัลส์จะแยกกันอย่างชัดเจน รูปที่ 3.2 (b) เมื่อส่งสัญญาณผ่านไประยะทางหนึ่ง จะเห็นว่าสัญญาณพัลส์เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 3.2 (c) เมื่อส่งสัญญาณผ่านไประยะทางมากขึ้นทำให้ยอดของสัญญาณพัลส์ต่ำลงเนื่องจากการลดทอนและทำให้สัญญาณพัลส์ถ่างออกไปยังสัญญาณพัลส์ที่ติดกันดังรูป เรียกว่าการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference, ISI) รูปที่ 3.2 (d) เมื่อส่งสัญญาณไปในระยะทางไกล ยอดของสัญญาณพัลส์จะลดต่ำกว่าระดับตัดสินบิต (Detection Threshold) และเกิดการถ่างออกไปยังสัญญาณพัลส์ที่ติดกันอย่างมาก ทำให้ตัวรับแสงเกิดการตัดสินบิตผิดพลาดขึ้น เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ส่งสัญญาณระยะทางไกลสุดเท่ากับ 62 Km เพราะฉะนั้นจึงพิจารณาผลของโครมาติกดิสเพอร์ชันของสัญญาณด้วย

โครมาติกดิสเพอร์ชันเกิดจากการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวดังที่กล่าวข้างต้น โดยมี 2 ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดดิสเพอร์ชันชนิดนี้ คือ

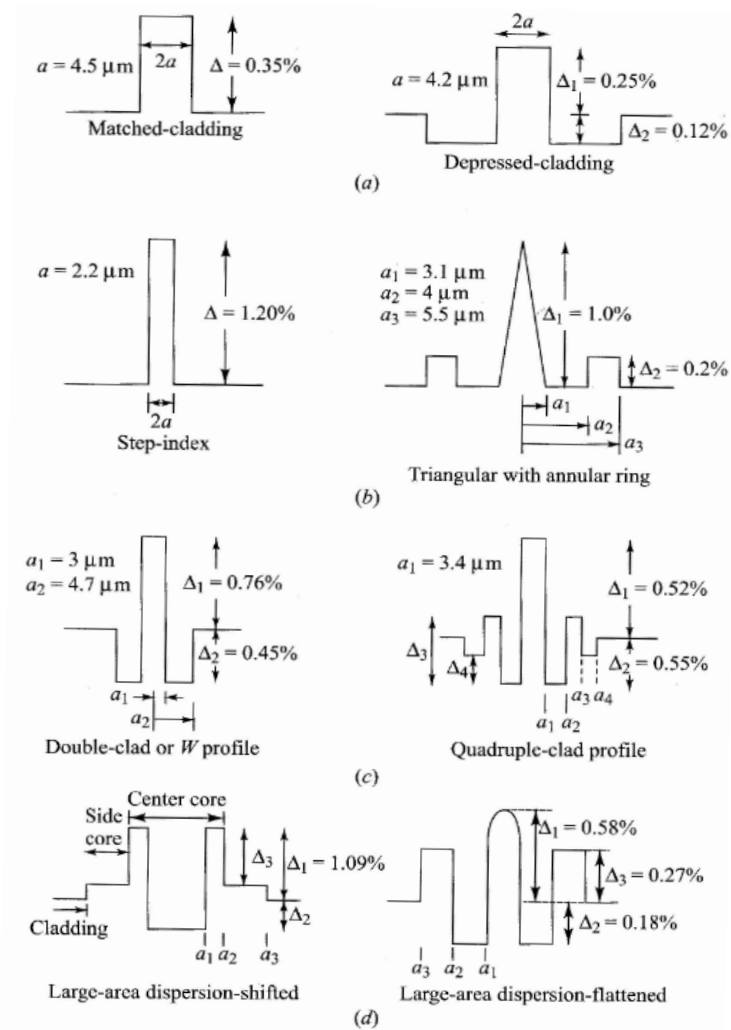
1. ดิสเพอร์ชันที่เกิดจากวัสดุ (Material Dispersion) โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดดิสเพอร์ชันคือความแตกต่างของค่าดรรชนีหักเหแสง (Refractive Index) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ดังรูปที่ 3.3 [1]



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงและความยาวคลื่นแสง

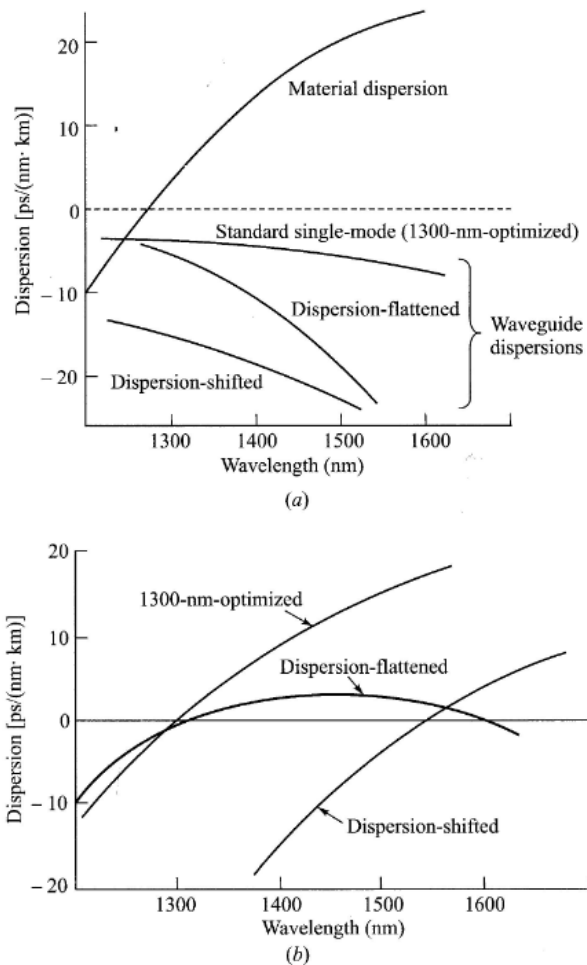
จากรูปที่ 3.3 เมื่อความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทำให้ค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน ส่งผลให้ความเร็วที่แสงใช้เดินทางแตกต่างกันด้วย เพราะฉะนั้นจะส่งผลให้เกิดดิสเพอร์ชันที่เกิดจากวัสดุขึ้น

2. ดิสเพอร์ชันที่เกิดจากท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion) เกิดจากการส่งสัญญาณแสงไปในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวซึ่งแสงส่วนใหญ่จะเดินทางภายในแกนกลาง (Core) ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว แต่มีแสงส่วนน้อยที่หักเหออกไปทำให้แสงเดินทางภายในวัสดุหุ้ม (Cladding) ด้วย โดยออกแบบท่อนำคลื่นให้มีสัดส่วนของแสงที่ในแกนกลางกับวัสดุหุ้มแตกต่างกันเพื่อลดดิสเพอร์ชันได้ ยกตัวอย่างการออกแบบดังรูปที่ 3.4 [1]



รูปที่ 3.4 พื้นที่หน้าตัดของโพรไฟล์ดรรชนี (Cross-Sections of Index Profile) (a) แบบค่าเหมาะสมที่ 1310 nm (1310-nm-Optimized) (b) แบบค่าดิสเพอร์ชันเปลี่ยน (Dispersion-Shifted) (c) แบบค่าดิสเพอร์ชันเรียบ (Dispersion-Flattened) และ (d) แบบพื้นที่แกนกลางประสิทธิภาพกว้าง (Large-Effective-Core-Area)

เพราะฉะนั้นการเกิดโครมาติกดิสเพอร์ชันจะเป็นผลรวมดิสเพอร์ชันที่เกิดจากวัสดุกับดิสเพอร์ชันที่เกิดจากท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 [1]



รูปที่ 3.5 (a) ดิสเพอร์ชันที่เกิดจากวัสดุและท่อนำคลื่น (b) ผลรวมดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดใหม่แต่ละแบบ

จากรูปที่ 3.5 (a) กราฟแสดงผลแยกแยะระหว่างดิสเพอร์ชันที่เกิดจากวัสดุและดิสเพอร์ชันที่เกิดจากท่อนำคลื่น และ (b) กราฟที่แสดงผลรวมดิสเพอร์ชันทั้งหมดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดใหม่ 3 แบบ คือ (1) เส้นใยแก้วนำแสงแบบค่าเหมาะสมที่ 1310 nm (2) เส้นใยแก้วนำแสงแบบค่าดิสเพอร์ชันเปลี่ยน และ (3) เส้นใยแก้วนำแสงแบบพื้นที่แกนกลางประสิทธิภาพกว้าง

การคำนวณค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน

การถ่างออกของสัญญาณในทอมเวลา (Pulse Broadening Time) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.2) [1]

$$t_{CD} \approx DL\sigma_\lambda \quad (3.2)$$

D (ps/(nm·Km)): โครมาติกดิสเพอร์ชัน

t_{CD} (ps) : การถ่วงออกของสัญญาณในเทอมเวลา
 σ_λ (nm) : ความกว้างสเปกตรัมแสง (Optical Spectral Width)

3.2 สมการงบกำลัง (Power Budget Equation)

เนื่องจากการส่งและรับสัญญาณแสงมีข้อจำกัดเรื่องกำลังของสัญญาณ โดยตัวส่งแสง (Optical Transmitter) จะมีกำลังแสงขาออกที่ค่าหนึ่ง ตัวรับแสง (Optical Receiver) สามารถรับกำลังแสงที่ต่ำสุดได้ค่าหนึ่งหรือเรียกว่าค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ (Optical Receiver's Sensitivity) เพราะฉะนั้นสมการงบกำลังจึงจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบโครงข่าย รวมทั้งยังต้องคำนึงถึงกำลังสูญเสียแทรก (Insertion Loss, IL) ที่เกิดจากหัวต่อหรืออุปกรณ์ที่แทรกอยู่ในโครงข่ายอีกด้วย โดยกำลังสูญเสียแทรกของแต่ละอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3) [1]

$$IL = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.3)$$

IL (dB) : กำลังสูญเสียแทรก

P_{out} (W): กำลังแสงที่ออกจากอุปกรณ์

P_{in} (W) : กำลังแสงที่เข้าอุปกรณ์

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ที่จะเพิ่มงบกำลังให้กับโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง จึงต้องพิจารณา กำลังสูญเสียแทรกในระบบ เพื่อที่จะวิเคราะห์ได้ว่าในโครงข่ายสามารถเพิ่มระยะทางและจำนวน ผู้รับบริการได้มากน้อยเพียงใด โดยสมการการงบกำลังสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4) [1]

$$P_T = P_S - P_R = \alpha_f L + \sum I_{COMP} + \sum I_{OS} + SM \quad (3.4)$$

P_T (dB) : งบกำลัง

P_S (dBm) : กำลังส่ง (Transmitted Power)

P_R (dBm) : กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้

α_f (dB/Km): ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

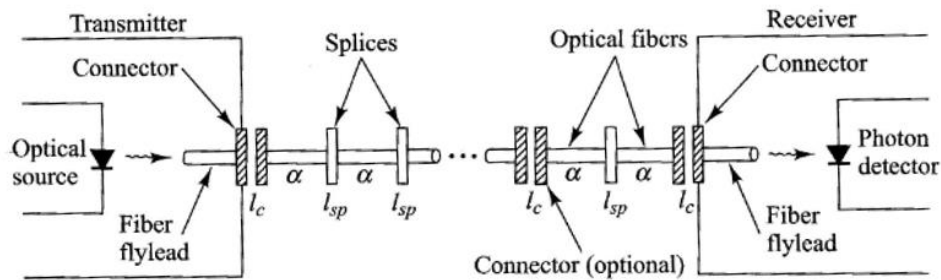
L (Km) : ระยะทาง

I_{COMP} (dB): กำลังสูญเสียแทรกในอุปกรณ์

I_{OS} (dB) : กำลังสูญเสียแทรกในตัวแยกแสง

SM (dB) : System Margin

จากสมการ (3.4) พบว่าบกำลังขึ้นอยู่กัพพารามิเตอร์ทั้งหลายของตัวส่งแสง ตัวรับแสง การลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง กำลังสูญเสียแทรกของหัวต่อและอุปกรณ์ภายในโครงข่าย นอกจากนี้โครงข่ายควรจะมีพารามิเตอร์ System Margin เพื่อออกแบบโครงข่ายโดยคำนึงถึงอนาคตเมื่อโครงข่ายเสื่อมสภาพอีกด้วย



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการเกิดกำลังสูญเสียแทรกภายในโครงข่าย

จากรูปที่ 3.6 [1] จะเห็นว่าการส่งสัญญาณจากตัวส่งแสงไปยังตัวรับแสงมีกำลังสูญเสียในหลายจุดภายในโครงข่าย เพราะฉะนั้นควรจะคำนวณสมการงบกำลัง เพื่อสามารถออกแบบโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 สมการงบประมาณเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Equation)

สมการงบประมาณเวลาขาขึ้น เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณการถ่วงออกของสัญญาณพัลส์ที่ส่งผลต่อสัญญาณพัลส์ที่ติดกัน ทั้งนี้ยังส่งผลกับการคำนวณหาข้อจำกัดที่เกิดจากโครมาติกดิสเพอร์ชันเพื่อพิจารณาควบคุมกับสมการงบกำลังอีกด้วย จึงพิจารณาแต่สมการที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวดังนี้ เวลาขาขึ้นของระบบ (Rise-Time System) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.5) [1]

$$t_{\text{sys}} = \left(\sum_i t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

t_{sys} (s) : เวลาขาขึ้นของระบบ (โดยปกติจะคิดที่ 10% และ 90% ของเวลาขาขึ้น)

t_i (s) : เวลาขาขึ้นแต่ละพจน์

เวลาขาขึ้นของแต่ละพจน์ที่นำมาคำนวณมีทั้งหมด 3 พจน์ดังนี้ เวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสง (t_{tx}) เวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง (t_{rx}) และการถ่วงออกของสัญญาณในเทอมเวลา (t_{CD}) โดยเวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสงขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในตัวส่งแสงซึ่งสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้จากแผ่นข้อมูล (Data Sheet) และคำนวณเวลาขาขึ้นของแต่ละพจน์จากสมการ (3.6) และ (3.7) [1]

$$t_{rx} = \frac{350}{B_{rx}} \quad (3.6)$$

t_{rx} (ns) : เวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง

B_{rx} (MHz): แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวรับแสง

จากสมการที่ (3.6) สามารถคำนวณหาเวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสงได้ ทั้งนี้ยังสามารถคำนวณค่าการถ่วงออกของสัญญาณในเทอมเวลาดังสมการที่ (3.7)

$$t_{CD} \approx |D|L\sigma_\lambda \quad (3.7)$$

t_{CD} (ps) : การถ่วงออกของสัญญาณในเทอมเวลา

D (ps/(nm.Km)): โครมาติกดิสเพอร์ชัน

L (Km) : ระยะทาง

σ_λ (nm) : ความกว้างสเปกตรัมแสง

จากสมการที่ (3.6) และ (3.7) สามารถนำมาคำนวณเวลารวมในระบบได้ดังสมการ (3.8) [1]

$$t_{sys} = \sqrt{t_{tx}^2 + t_{rx}^2 + t_{CD}^2} \quad (3.8)$$

จากสมการ (3.8) นำค่าเวลารวมในระบบมาคำนวณหาข้อจำกัดที่เกิดจากโครมาติกดิสเพอร์ชันได้ โดยสัญญาณที่ถ่วงออกไปยังสัญญาณพัลส์ที่ติดกันจะต้องมีค่าไม่เกิน 70% ของคาบสัญญาณเมื่อส่งแบบ Non-Return-to-Zero (NRZ) และมีค่าไม่เกิน 35% ของคาบสัญญาณ เมื่อส่งแบบ Return-to-Zero (RZ) คำนวณได้จากสมการ (3.9) และ (3.10) [1]

กรณี Non-Return-to-Zero

$$t_{sys} < 0.7T_b \quad (3.9)$$

กรณี Return-to-Zero

$$t_{sys} < 0.35T_b \quad (3.10)$$

T_b (s): คาบของสัญญาณพัลส์ที่ส่งไป

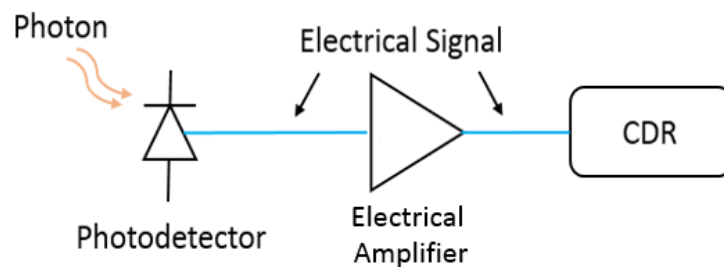
จากสมการ (3.9) และ (3.10) เป็นการคำนวณหาข้อจำกัดในโครงข่ายอันเนื่องมาจากผลของโครมาติกดิสเพอร์ชัน สามารถนำไปพิจารณาควบคู่กับสมการบังคับกำลังในการออกแบบโครงข่าย

3.4 ผลกระทบจากตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี

เนื่องจากตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีได้รับสัญญาณแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งมีกระบวนการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อย่อย 2.3.3 จะเกิดสัญญาณรบกวนที่มาจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในตัวตรวจจับแสงเอง โดยกล่าวถึงสมการของสัญญาณรบกวนที่เกี่ยวข้องในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

3.4.1 สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise)

สัญญาณรบกวนจากความร้อนโดยหลักแล้วเกิดจากความต้านทานซึ่งมีอยู่ในวงจรไฟฟ้าทุกส่วนทั้งในตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีและในตัวขยายสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical Amplifier) มีแผนภาพบล็อก (Block Diagram) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวรับแสง

โดยตัวขยายสัญญาณไฟฟ้านำมาใช้ในการขยายสัญญาณ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.11) [28] ซึ่งสัญลักษณ์ $\langle \sigma_T^2 \rangle$ จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยทางเวลาของความแปรปรวนในแต่ละพจน์ต่างๆ

$$\langle \sigma_T^2 \rangle = \left(\frac{4k_B T}{R_L} \right) F_n \Delta f \quad (3.11)$$

$\langle \sigma_T^2 \rangle$ (A^2): สัญญาณรบกวนจากความร้อน

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

T (K) : อุณหภูมิเคลวิน

R_L (Ω) : ความต้านทานโหลด (Load Resistance)

F_n : ตัวเลขสัญญาณรบกวน

Δf (Hz) : แบนด์วิธทางไฟฟ้า (Electrical Bandwidth)

3.4.2 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมเกิดจากโฟตอน (Photon) เดินทางมายังตัวตรวจจับแสงไม่พร้อมกัน ซึ่งตัวตรวจจับแสงจะแปลงโฟตอนที่ได้ไปเป็นกระแสโพลิต โดยขึ้นอยู่กับเวลาที่โฟตอนมาถึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนควอนตัม สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.12) [28]

$$\langle \sigma_{s_APD}^2 \rangle = 2qM^2F_A(RP_r)\Delta f \quad (3.12)$$

$\langle \sigma_{s_APD}^2 \rangle$ (A²): สัญญาณรบกวนควอนตัมของตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี

q (C) : ค่าประจุอิเล็กตรอน (Electron Charge) เท่ากับ 1.60218×10^{-19} C

M : แฟคเตอร์การคูณ (Multiplication Factor)

F_A : แฟคเตอร์สัญญาณรบกวนส่วนเกิน (Excess Noise Factor)

R (A/W) : ค่าการตอบสนอง (Responsivity)

P_r (W) : กำลังรับ (Received Power)

3.4.3 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise)

สัญญาณรบกวนกระแสมืดเกิดขึ้นทุกๆ ที่ยังไม่มีสัญญาณแสงส่งเข้ามายังตัวตรวจจับแสง แต่จะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนควอนตัม สามารถคำนวณสัญญาณรบกวนกระแสมืดได้ดังสมการ (3.13) [28]

$$\langle \sigma_{d_APD}^2 \rangle = 2qM^2F_A I_d \Delta f \quad (3.13)$$

$\langle \sigma_{d_APD}^2 \rangle$ (A²): สัญญาณรบกวนกระแสมืดของตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตี

I_d (A) : กระแสมืด

3.5 ผลกระทบจากตัวขยายอีดีเอฟเอ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier, EDFA) เพื่อเพิ่มกำลังหรือเพิ่มงบกำลังในโครงข่าย ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นหรือมีจำนวนผู้รับบริการมากขึ้น แต่ตัวขยายอีดีเอฟเอยังส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ทำให้สัญญาณที่ถูกขยายออกมามีผลของสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นในหัวข้อย่อยนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวขยายอีดีเอฟเอ ดังต่อไปนี้

3.5.1 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure)

ตัวเลขสัญญาณรบกวนทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ของสัญญาณที่ถูกขยายออกมามีค่าลดลง ถึงแม้ว่าจะได้กำลังแสงที่เพิ่มมากขึ้นก็ตาม สามารถคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนได้ดังสมการ (3.14) [28]

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (3.14)$$

F_n : ตัวเลขสัญญาณรบกวน

$(SNR)_{in}$: อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนขาเข้า (Input SNR)

$(SNR)_{out}$: อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนขาออก (Output SNR)

จากสมการ (3.14) เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนฝั่งขาออกมีค่าลดลงจะทำให้ตัวเลขสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ยังสามารถคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนที่สัมพันธ์กับอัตราขยาย (Gain) และแฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission Factor) ได้ในสมการที่ (3.15) [28]

$$F_n = 2n_{sp}(G - 1)/G \approx 2n_{sp} \quad (3.15)$$

n_{sp} : แฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

G : อัตราการขยาย

3.5.2 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมที่เกิดในตัวขยายอีดีเอฟเอเหมือนกับสัญญาณควอนตัมที่เกิดในตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดีในหัวข้อย่อยที่ 3.4.2 แต่แตกต่างกันที่ตัวขยายอีดีเอฟเอเกิดกำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Optical Power of ASE Noise) เพิ่มขึ้นมา เพราะฉะนั้นสมการได้เป็นสมการ (3.16) [28]

$$\langle \sigma_{s_ASE}^2 \rangle = 2qM^2F_A (R(P_r + P_{sp})) \Delta f \quad (3.16)$$

$\langle \sigma_{s_ASE}^2 \rangle$ (A²): สัญญาณรบกวนควอนตัมของตัวขยายอีดีเอฟเอ

q (C) : ค่าประจุอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.60218×10^{-19} C

M : แฟคเตอร์การคูณ

F_A : ปัจจัยสัญญาณรบกวนส่วนเกิน

R (A/W) : ค่าการตอบสนอง

- P_r (W) : กำลังรับ
 P_{sp} (W) : กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี
 Δf (Hz) : แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า

3.5.3 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise)

สัญญาณรบกวนกระแสมืดของตัวขยายอิตีเอฟเอเหมือนกันกับสัญญาณรบกวนกระแสมืดของตัวตรวจจับแสงแบบเอพีดีดั่งที่กล่าวไปในหัวข้อย่อย 3.4.3 และมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนควอนตัม สามารถคำนวณได้ดั่งสมการ (3.17) [28]

$$\langle \sigma_{d_ASE}^2 \rangle = 2qM^2F_A I_d \Delta f \quad (3.17)$$

$\langle \sigma_{d_ASE}^2 \rangle$ (A^2): สัญญาณรบกวนกระแสมืดของตัวขยายอิตีเอฟเอ

I_d (A) : กระแสมืด

3.5.4 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอี (Signal-ASE Noise)

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอี เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณเข้าไปยังตัวขยายอิตีเอฟเอจะไปตีกับสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดขึ้นภายในตัวขยายอิตีเอฟเอ สามารถคำนวณได้ดั่งสมการ (3.18) [28]

$$\langle \sigma_{s-sp}^2 \rangle = 4R^2M^4F_A^2P_rS_{sp}\Delta f \quad (3.18)$$

$\langle \sigma_{s-sp}^2 \rangle$ (A^2): สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอี

S_{sp} (W/Hz) : ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Spectral Density of Spontaneous-Emission Noise)

จากสมการ (3.18) สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอีขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่สามารถคำนวณได้ดั่งสมการ (3.19) [28]

$$S_{sp}(v) = (G - 1)n_{sp}hv \quad (3.19)$$

G : อัตราการขยาย

n_{sp} : แฟคเตอร์ของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

3.5.5 สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับสัญญาณเอเอสอี (ASE-ASE Noise)

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับสัญญาณเอเอสอี เกิดจากสัญญาณรบกวนเอเอสอีบีตซึ่งกันและกันทำให้เกิดสัญญาณรบกวนนี้ขึ้น โดยปกติมีค่าน้อยมาก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.20) [28]

$$\langle \sigma_{sp-sp}^2 \rangle = 4R^2 M^4 F_A^2 S_{sp}^2 \Delta v_{opt} \Delta f \quad (3.20)$$

$\langle \sigma_{sp-sp}^2 \rangle$ (A^2): สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับสัญญาณเอเอสอี

Δv_{opt} (Hz) : แบนด์วิดท์ทางแสง (Optical Bandwidth)

จากสมการ (3.20) แบนด์วิดท์ทางแสงมีความสัมพันธ์กับกำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีดังสมการที่ (3.21) [28]

$$P_{sp} = S_{sp} \Delta v_{opt} \quad (3.21)$$

P_{sp} (W) : กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี

3.6 ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)

เนื่องจากการส่งสัญญาณจะเกิดสัญญาณรบกวนภายในโครงข่ายค่อนข้างมากดังที่กล่าวมาในข้างต้น ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวตรวจจับแสงแบบเอพดีหรือตัวขยายอิตีเอฟเอ ส่งผลให้เกิดค่าอัตราความผิดพลาดบิตขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.22) [28]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.22)$$

BER : ค่าอัตราความผิดพลาดบิต

Q : แฟคเตอร์ Q (Q Factor)

จากสมการ (3.22) สามารถคำนวณหาค่าแฟคเตอร์ Q ได้ดังสมการ (3.23) [28]

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{I_1}{2\sigma_1} = \frac{1}{2} \sqrt{\text{SNR}} \quad (3.23)$$

I_1 (A) : กระแสบิต 1

I_0 (A) : กระแสบิต 0

σ_1 (A) : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 (Standard Deviation of Bit 1)

σ_0 (A) : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 (Standard Deviation of Bit 0)

SNR : อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน

จากสมการ (3.23) สามารถคำนวณหาค่าแพลคเตอร์ Q ได้ทั้ง 2 วิธี คือ การหาค่าจริงตั้งสมการที่ (3.24) ถึง (3.29) [28]

$$P_0 = \frac{2P_r}{\frac{ER}{10^{10}} + 1} \quad (3.24)$$

P_0 (W) : กำลังแสงของบิต 0

P_r (W) : กำลังรับ

ER (dB) : ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน

จากสมการ (3.24) สามารถคำนวณค่ากำลังแสงของบิต 0 ได้จากค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน เพราะฉะนั้นสามารถนำค่ากำลังแสงของบิต 0 มาแทนในสมการ (3.25) เพื่อหาค่ากำลังแสงของบิต 1 ได้ตั้งสมการที่ (3.25) [28]

$$P_1 = 2P_r - P_0 \quad (3.25)$$

P_1 (W) : กำลังแสงของบิต 1

จากสมการที่ (3.24) นำค่ากำลังแสงของบิต 0 มาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 ได้ตั้งสมการที่ (3.26) [28]

$$\sigma_0 = \sqrt{2qM^2F_A(RP_0 + I_d)\Delta f + \langle \sigma_T^2 \rangle} \quad (3.26)$$

q (C) : ค่าประจุอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.60218×10^{-19} C

M : แพลคเตอร์การคูณ

F_A : ปัจจัยสัญญาณรบกวนรบกวนส่วนเกิน

R (A/W) : ค่าการตอบสนอง

I_d (A) : กระแสมีด

Δf (Hz) : แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า

$\langle \sigma_T^2 \rangle$ (A^2): สัญญาณรบกวนจากความร้อน

จากสมการที่ (3.25) นำค่ากำลังแสงของบิต 1 มาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 ได้ตั้งสมการที่ (3.27) [28]

$$\sigma_1 = \sqrt{2qM^2F_A(RP_1 + I_d)\Delta f + \langle \sigma_T^2 \rangle} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.24) นำค่ากำลังแสงของบิต 0 มาคำนวณหากระแสบิต 0 ได้ตั้งสมการที่ (3.28) [28]

$$I_0 = MRP_0 \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.25) นำค่ากำลังแสงของบิต 1 มาคำนวณหากระแสบิต 1 ได้ดังสมการที่ (3.29) [28]

$$I_1 = MRP_1 \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.24) ถึง (3.29) สามารถนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ (3.23) เพื่อหาค่าแพคเตอร์ Q และค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่อไป นอกจากนี้ยังมีการคำนวณหาค่าแพคเตอร์ Q จากการประมาณค่า สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.30) ถึง (3.32) [28]

$$\langle I_p^2 \rangle = (MRP_r)^2 \quad (3.30)$$

$\langle I_p^2 \rangle$ (A²) : กระแสโฟโต (Photocurrent)

จากสมการที่ (3.30) สามารถคำนวณค่ากระแสโฟโตและนำมาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับแสงแบบเอพดีในสมการที่ (3.31) [28] และตัวขยายอีดีเอฟเอในสมการที่ (3.32) [28] ได้ดังต่อไปนี้

$$SNR_{APD} = \frac{\langle I_p^2 \rangle}{\langle \sigma_{s_APD}^2 \rangle + \langle \sigma_{d_APD}^2 \rangle + \langle \sigma_T^2 \rangle} \quad (3.31)$$

จากสมการ (3.31) สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดได้จากสมการที่ (3.11), (3.12), (3.13) และ (3.30)

$$SNR_{ASE} = \frac{\langle I_p^2 \rangle}{\langle \sigma_{s_ASE}^2 \rangle + \langle \sigma_{d_ASE}^2 \rangle + \langle \sigma_{s-sp}^2 \rangle + \langle \sigma_{sp-sp}^2 \rangle + \langle \sigma_T^2 \rangle} \quad (3.32)$$

จากสมการ (3.32) สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดได้จากสมการที่ (3.11), (3.16), (3.17), (3.18), (3.20) และ (3.30)

นำค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่ได้จากสมการ (3.31) และ (3.32) ไปแทนค่าในสมการ (3.23) เพื่อหาแพคเตอร์ Q และหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่อไป

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ห้งบกำลัง (Power Budget Analysis)

การวิเคราะห์ห้งบกำลังภายในโครงข่ายมีความสำคัญในการออกแบบให้โครงข่ายสามารถรับและส่งสัญญาณได้ จะพิจารณาจากกำลังแสงสูญเสียทั้งหมด โดยงานวิจัยนี้ใช้ตัวแยกแสง (Optical Splitter) ซึ่งเกิดกำลังแสงสูญเสียแทรกค่อนข้างมาก ทั้งนี้ยังมีกำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวอีกด้วย แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการที่จะใช้ห้งบกำลังทั้งหมดเพื่อวิเคราะห์หาความยาวที่มากที่สุดและจำนวนผู้รับบริการที่มากที่สุดในการส่งสัญญาณ จึงไม่นำพารามิเตอร์ System Margin มาคำนวณและเพื่อกำลังไว้ในโครงข่ายที่ทำการทดลอง โดยจะกล่าวถึงกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML)

รายละเอียดโครงข่าย

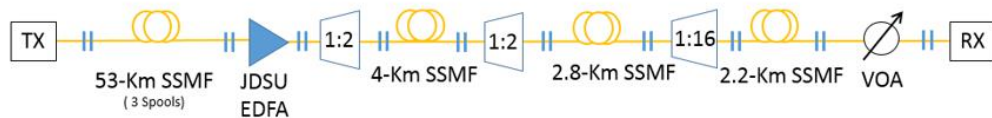
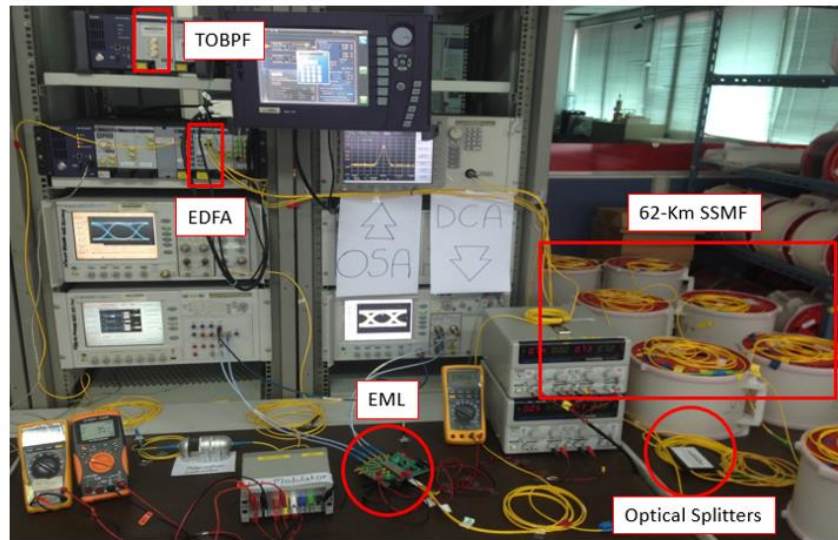
ตัวส่งแสง: ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

ระยะทาง: 62 Km

จำนวนผู้รับบริการ: 64 ผู้รับบริการ

แสดงแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 4.1

มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของผู้รับบริการจำนวน 64 ผู้รับบริการ

จากรูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพบล็อกที่มีจำนวนผู้รับบริการ 64 ผู้รับบริการ โดยสามารถคำนวณงบกำลังจากค่ากำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากการลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง กำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจากตัวแยกแสงและอุปกรณ์ภายในโครงข่าย ทั้งนี้ค่ากำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจากตัวแยกแสงชนิดท่อนำคลื่นรวมของบริษัท Huatai จะแสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีกำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจากตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA) เท่ากับ 1.49 dB และกำลังสูญเสียแทรกที่เกิดจากหัวต่อหลายๆ ตำแหน่งเท่ากับ 2.2 dB จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำค่ากำลังแสงสูญเสียมาคำนวณหางบกำลังในสมการที่ (3.4) จะแสดงการหางบกำลังทั้งหมดและกำลังแสงสูญเสียทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 งบกำลังและกำลังแสงสูญเสียทั้งหมดในกรณีระยะทาง 62 Km และ 64 ผู้รับบริการ

งบกำลัง		กำลังแสงสูญเสีย	
กำลังแสงออกจากตัวส่งแสง (dBm)	0.19	การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง (dB)	11.515
กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ (dBm)	-24	กำลังสูญเสียแทรกในตัวแยกแสง (dB)	20.44
อัตราการขยายของตัวขยายอีดีเอฟเอ (dB)	20	กำลังสูญเสียแทรกในอุปกรณ์ (dB)	3.69
งบกำลังทั้งหมด (dB)	44.19	กำลังแสงสูญเสียทั้งหมด (dB)	35.645

จากตารางที่ 4.1 ค่ากำลังแสงสูญเสียทั้งหมดภายในโครงข่ายจะมีค่ามากกว่างบกำลังในโครงข่ายถ้าไม่ใช้ตัวขยายอีดีเอฟเอ เพราะฉะนั้นการแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอเพื่อขยายสัญญาณแสงโดยมีอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 20 dB ทำให้สามารถเพิ่มงบกำลังทั้งหมดได้เท่ากับ 44.19 dB จะเห็นว่าค่ากำลังแสงสูญเสียทั้งหมดมีค่าน้อยกว่างบกำลังอยู่ 8.545 dB เพราะฉะนั้นโครงข่ายสามารถรับส่งสัญญาณได้ภายใต้ข้อจำกัดของงบกำลัง

กรณีที่ 2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัท-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)

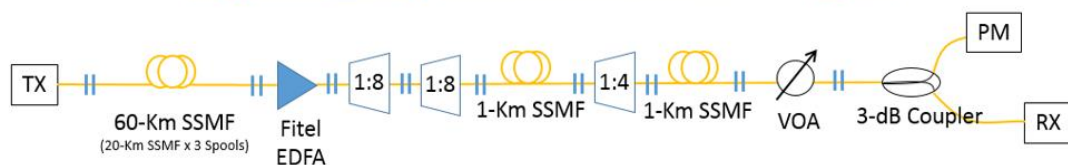
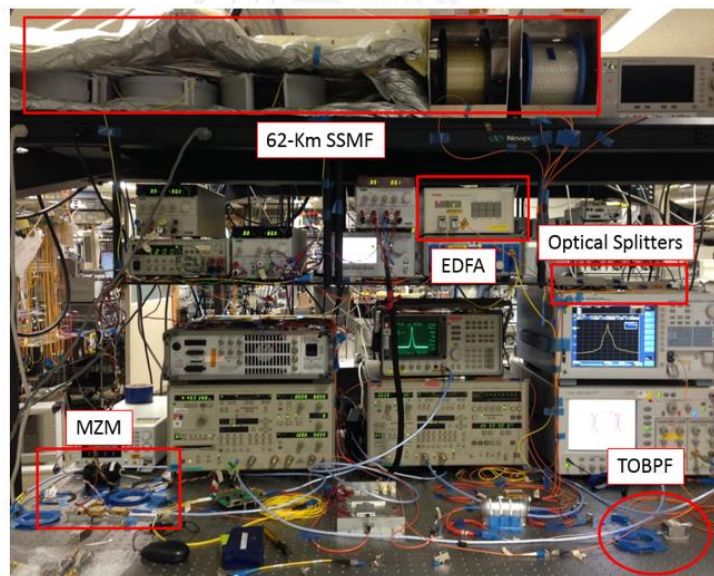
รายละเอียดโครงข่าย

ตัวส่งแสง: ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัท-เซนเดอร์

ระยะทาง: 62 Km

จำนวนผู้รับบริการ: 256 ผู้รับบริการ

แสดงแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกของผู้รับบริการจำนวน 256 ผู้รับบริการ

จากรูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพบล็อกที่มีจำนวนผู้รับบริการ 256 ผู้รับบริการ โดยสามารถคำนวณงบกำลังจากค่ากำลังแสงสูญเสียที่เกิดจากการลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง กำลังแสงสูญเสีย

แทรกที่เกิดจากตัวแยกแสงและอุปกรณ์ภายในโครงข่าย ซึ่งค่ากำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจากตัวแยกแสงชนิดพอนาคลิ่นรวมของบริษัท Fujikura แสดงดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีกำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจากตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้เท่ากับ 1.2 dB กำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจาก 3-dB Coupler เท่ากับ 2.91 dB และกำลังแสงสูญเสียแทรกที่เกิดจากหัวต่อเท่ากับ 2 dB จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำค่ากำลังแสงสูญเสียมาคำนวณหางบกำลังในสมการที่ (3.4) แสดงการหางบกำลังทั้งหมดและกำลังแสงสูญเสียทั้งหมดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 งบกำลังและกำลังแสงสูญเสียทั้งหมดกรณีระยะทาง 62 Km และ 256 ผู้รับบริการ

งบกำลัง		กำลังแสงสูญเสีย	
กำลังแสงออกจากตัวส่งแสง (dBm)	0.61	การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง (dB)	11.408
กำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ (dBm)	-24	กำลังแสงสูญเสียแทรกในตัวแยกแสง (dB)	27.48
อัตราการขยายของตัวขยายอดีไอเอฟเอ (dB)	24	กำลังแสงสูญเสียแทรกในอุปกรณ์ (dB)	6.11
งบกำลังทั้งหมด (dB)	48.61	กำลังแสงสูญเสียทั้งหมด (dB)	44.998

จากตารางที่ 4.2 พิจารณาเหมือนกันกับกรณีที่ 1 แต่มีอัตราการขยายของตัวขยายอดีไอเอฟเอเท่ากับ 24 dB เพราะฉะนั้นจะเพิ่มงบกำลังทั้งหมดได้มากกว่ามีค่าเท่ากับ 48.61 dB จะเห็นว่าค่ากำลังแสงสูญเสียทั้งหมดมีค่าน้อยกว่างบกำลังอยู่ 3.61 dB เพราะฉะนั้นโครงข่ายสามารถรับส่งสัญญาณได้ภายใต้ข้อจำกัดของงบกำลัง

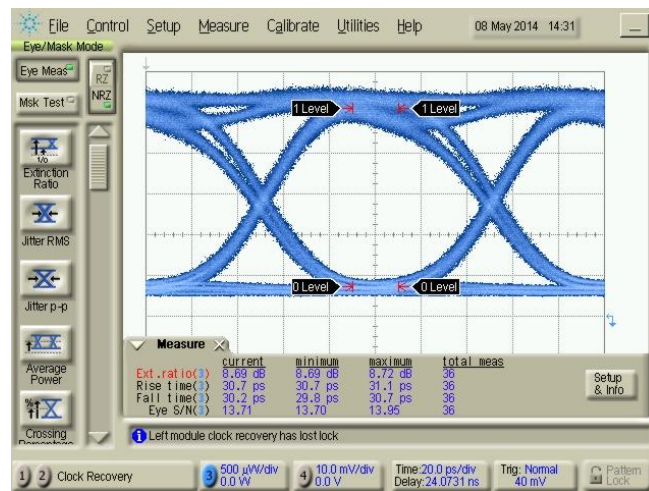
สรุปได้ว่าทั้ง 2 กรณีสามารถรับส่งสัญญาณในโครงข่ายได้โดยการแทรกตัวขยายอดีไอเอฟเอเพื่อเพิ่มอัตราการขยาย ส่งผลให้เพิ่มงบกำลังภายในโครงข่าย ทั้งนี้ควรวิเคราะห์ทั้งงบกำลังพร้อมกับวิเคราะห์ห้วงเวลาขาขึ้นตั้งหัวข้อย่อยถัดไป

4.2 การวิเคราะห์ห้วงเวลาขาขึ้น (Rise-Time Budget Analysis)

งบเวลาขาขึ้นเป็นอีกข้อจำกัดที่สำคัญของโครงข่ายนอกเหนือจากงบกำลัง เนื่องจากงบเวลาขาขึ้นเกี่ยวข้องกับผลกระทบที่เกิดจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion, CD) ดังที่กล่าวในหัวข้อย่อย 3.3 แบ่งการคำนวณเป็นกรณีดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

เวลาขาขึ้นของระบบ (Rise-Time System) ในโครงข่ายประกอบด้วย เวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสง เวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง และการถ่างออกของสัญญาณในเทอมเวลา ดังที่กล่าวในหัวข้อย่อย 3.3 ซึ่งงานวิจัยนี้วัดแผนภาพรูปตา (Eye Diagram) ด้วยเครื่องมือวัด 861004 Digital Communications Analyzer (DCA) จากบริษัท Keysight Technologies [32] เมื่อพิจารณาแผนภาพรูปตาจะรวมผลกระทบของเวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสงและเวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง โดยไม่คิดผลของโครมาติกดิสเพอร์ชัน แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพรูปตาของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

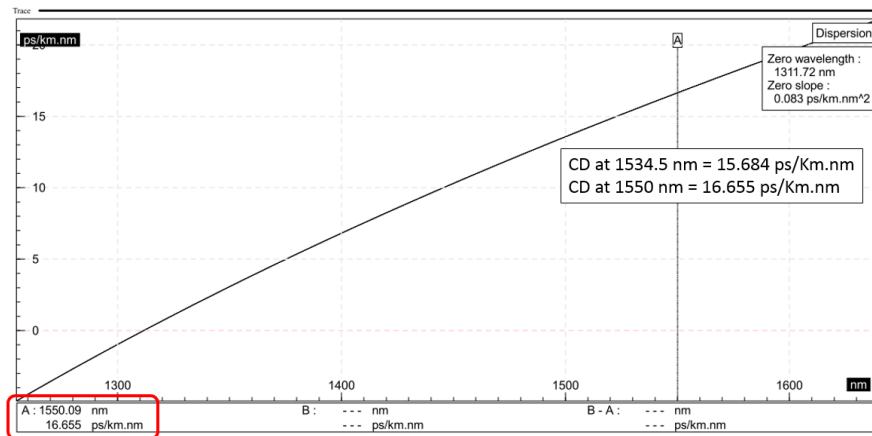
จากรูปที่ 4.3 โดยปกติแล้วจะวัดแผนภาพรูปตาที่เวลาขาขึ้น 20% ~ 80% เพราะเมื่อวัดแผนภาพรูปตาที่เวลาขาขึ้น 10% ~ 90% จะเป็นการวัดที่ขอบของสัญญาณจนเกินไป อาจทำให้ค่าที่วัดได้มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนของจิตเตอร์ (Noise Jitter) เข้ามาด้วย ดังนั้นใช้สมการที่ (4.1) [1] ในการแปลงค่าจากเวลาขาขึ้น 20% ~ 80% เป็นเวลาขาขึ้น 10% ~ 90% เพื่อใช้ในการคำนวณเวลาขาขึ้นของระบบ

$$t_{\text{sys}} (10\% \sim 90\%) = 1.25 t_{\text{sys}} (20\% \sim 80\%) \quad (4.1)$$

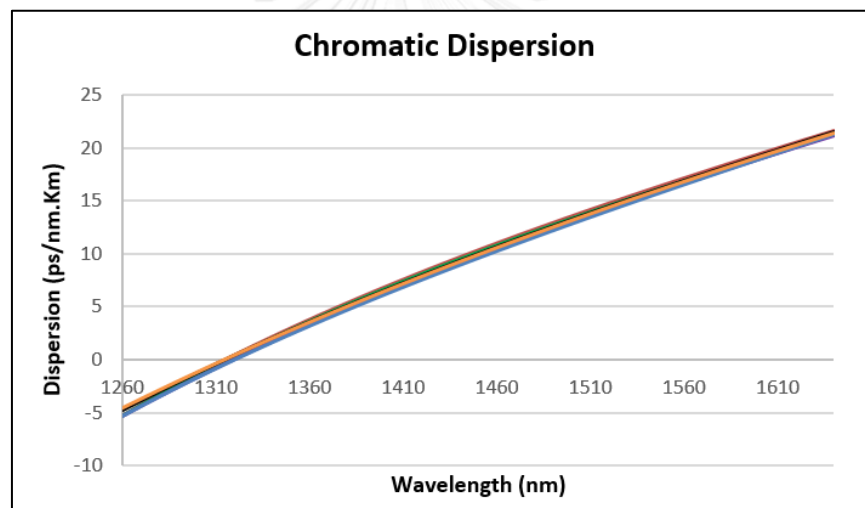
$$\sqrt{t_{\text{tx}}^2 + t_{\text{rx}}^2} = 1.25(30.7 \text{ ps}) = 38.38 \text{ ps}$$

จากสมการ (4.1) และรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณหา $\sqrt{t_{\text{tx}}^2 + t_{\text{rx}}^2}$ ได้เท่ากับ 38.38 ps ทั้งนี้เมื่อรวมผลจากโครมาติกดิสเพอร์ชันดังสมการที่ (3.7) ซึ่งสามารถวัดค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันได้จากเครื่องมือวัด AP/CD/PMD MTS8000 ของบริษัท JDSU [33] ยกตัวอย่างการวัดกราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของม้วนเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 3.374 Km จะมีค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันเท่ากับ 15.684

ps/(nm.Km) และ 16.655 ps/(nm.Km) ที่ความยาวคลื่น 1534.5 nm และ 1550 nm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของ 1 เส้น

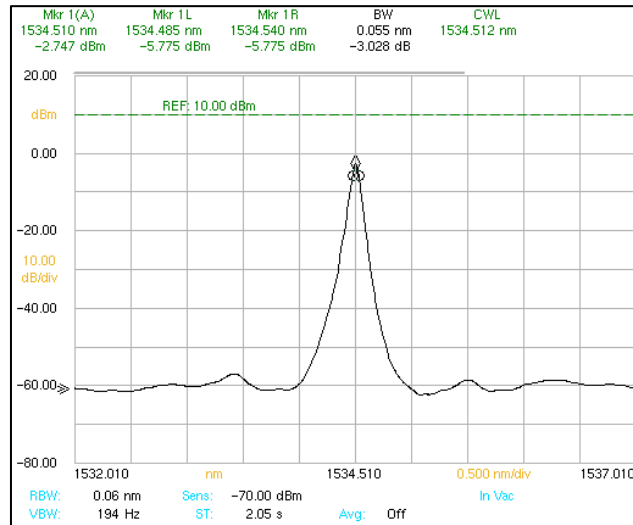


รูปที่ 4.5 กราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแก้วนำแสงที่ใช้ทั้งหมด 6 เส้น

เนื่องจากตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้าส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นแสงมีค่าเท่ากับ 1534.5 nm ดังรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.5 ใช้ม้วนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 6 ม้วน โดยมีความยาวดังต่อไปนี้ 25 Km จำนวน 2 ม้วน 4 Km, 3 Km, 2.8 Km และ 2.2 Km อย่างละ 1 ม้วน เพราะฉะนั้นจะคิดค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้โดยคิดค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 1534.5 nm ได้เท่ากับ 15.316 ps/(nm.Km) ดังสมการ (4.2)

$$\frac{15.678 + 15.459 + 15.364 + 15.1 + 14.97 + 15.326}{6} = 15.316 \text{ ps/(nm.Km)} \quad (4.2)$$

ทั้งนี้ค่าความกว้างสเปกตรัมแสง (Optical Spectral Width) จะวัดด้วยเครื่อง 86140E Optical Spectrum Analyzer (OSA) จากบริษัท Keysight Technologies [34] สามารถวัดสเปกตรัมแสงของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้าได้เท่ากับ 0.055 nm นำค่าที่ได้กับโครมาติกดิสเพอร์ชันไปแทนค่าในสมการที่ (3.7) เพื่อคำนวณหาการถ่างออกของสัญญาณเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชันที่ระยะทาง 62 Km ได้ดังสมการ (4.3)



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมแสงของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้า

$$t_{CD} \approx |D|L\sigma_{\lambda} = (15.316)(62)(0.055) = 52.23 \text{ ps} \quad (4.3)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อหาค่าเวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสง เวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง และการถ่างออกของสัญญาณเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชันได้แล้ว จึงนำไปแทนในสมการที่ (3.8) เพื่อหาเวลาขาขึ้นของระบบได้ดังสมการ (4.4)

$$t_{\text{sys}} = \sqrt{t_{\text{tx}}^2 + t_{\text{rx}}^2 + t_{\text{CD}}^2} = \sqrt{(38.38\text{ps})^2 + (52.23\text{ps})^2} = 64.82 \text{ ps} \quad (4.4)$$

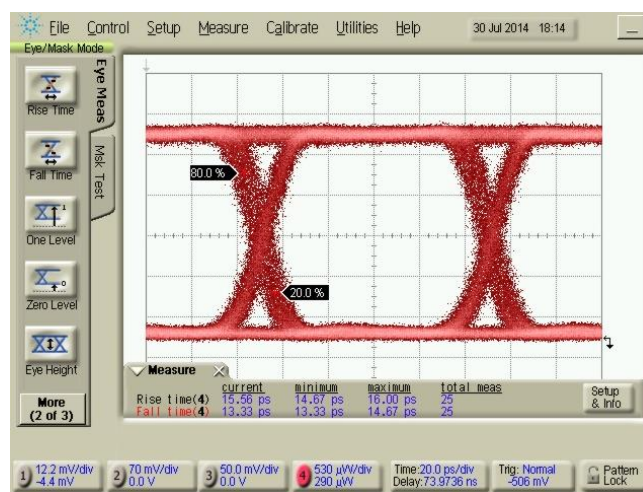
เวลารวมขาขึ้นทั้งหมดของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณแสงเป็นระยะทาง 62 Km มีค่าเท่ากับ 64.82 ps และพิจารณาเงื่อนไขจากสมการที่ (3.9) ในการส่งสัญญาณแสงแบบโอโอเค (OOK) กรณี Non-Return-to-Zero (NRZ) จะได้ดังสมการ (4.5)

$$64.82\text{ps} < 0.7(100\text{ps}) \quad (4.5)$$

โดย T_b มีค่าเท่ากับ 100 ps เมื่อส่งอัตราบิตข้อมูลที่ 10 Gb/s จากสมการที่ (4.5) เวลารวมขาขึ้นทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 70% ของคาบสัญญาณ เพราะฉะนั้นโครงข่ายนี้ยังสามารถทนต่อผลของโครมาติกดิสเพอร์ชันและอยู่ภายใต้ข้อจำกัดการถ่างออกของสัญญาณด้วย

กรณีศึกษาที่ 2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

เวลาขาขึ้นของระบบในโครงข่ายประกอบด้วย เวลาขาขึ้นที่ตัวส่งแสง เวลาขาขึ้นที่ตัวรับแสง และการถ่วงออกของสัญญาณเนื่องมาจากโครมาติกดิสเพอร์ชันดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งกรณีนี้จะวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 สามารถวัดแผนภาพรูปร่างตาของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์ได้ดังรูปที่ 4.7

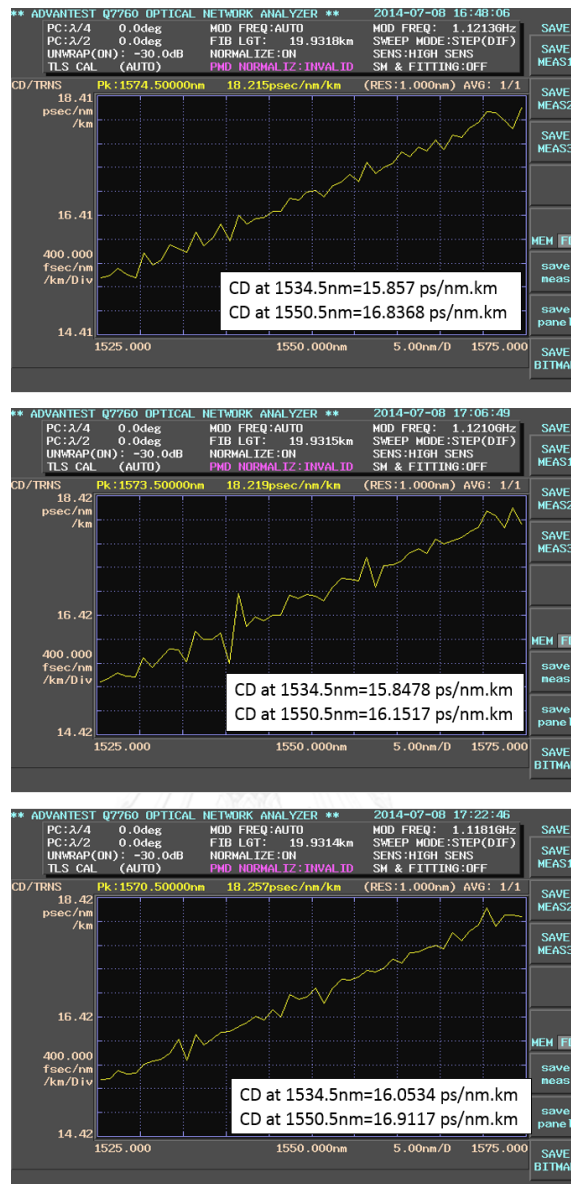


รูปที่ 4.7 แผนภาพรูปร่างตาของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.7 ค่าเวลาขาขึ้น 20% ~ 80% เท่ากับ 15.56 ps นำค่าที่ได้ไปคำนวณในสมการที่ (4.1) จะได้เวลาขาขึ้น 10% ~ 90% เท่ากับ 19.45 ps ดังสมการ (4.6)

$$\sqrt{t_{rx}^2 + t_{rx}^2} = 1.25(15.56\text{ps}) = 19.45\text{ ps} \quad (4.6)$$

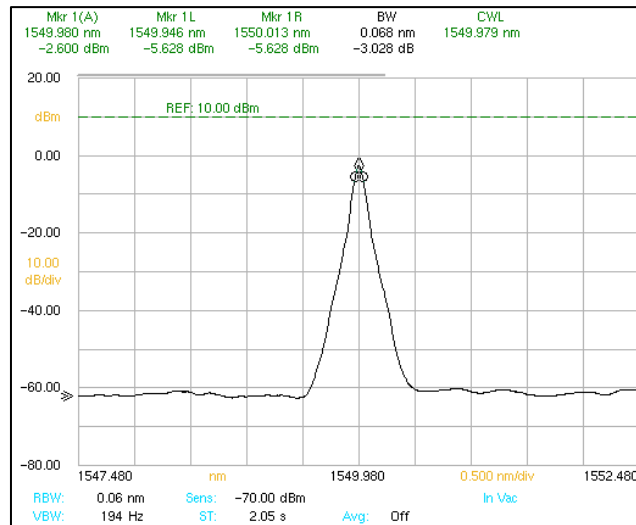
วัดค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันโดยเครื่อง Q7760 Optical Network Analyzer ของบริษัท Advantest [35] จะได้กราฟของทั้ง 3 ม้วนโดยแต่ละม้วนมีความยาว 20 Km ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 กราฟโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้

จากรูปที่ 4.6 ความยาวคลื่นแสงตรงกลางที่ใช้ในตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการ ดูดกลืนคลื่นไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1534.5 nm เพราะฉะนั้นจะหาค่าเฉลี่ยของค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันที่ ความยาวคลื่นแสง 1534.5 nm จากรูปที่ 4.8 มีค่าเท่ากับ 15.919 ps/(nm.Km) ดังสมการ (4.7)

$$\frac{15.857 + 15.8478 + 16.0534}{3} = 15.919 \text{ ps/(nm. Km)} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมแสงของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.9 ความกว้างสเปกตรัมแสงของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์มีค่าเท่ากับ 0.068 nm ที่ความยาวคลื่นแสง 1550 nm ซึ่งไม่ว่าความยาวคลื่นแสงใดก็ตามจะมีค่าความกว้างสเปกตรัมแสงเท่ากันรวมทั้งความยาวคลื่นแสง 1534.5 nm ที่ใช้ในการส่งสัญญาณด้วย สามารถนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ (3.7) เพื่อคำนวณหาการถ่างออกของสัญญาณเนื่องมาจากโครมาติกดิสเพอร์ชันที่ระยะทาง 62 Km ดังสมการ (4.8)

$$t_{CD} \approx |D|L\sigma_{\lambda} = (15.919)(62)(0.068) = 67.11 \text{ ps} \quad (4.8)$$

นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาคำนวณหาเวลารวมขาขึ้นทั้งหมดของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์เมื่อส่งสัญญาณแสงเป็นระยะทาง 62 Km ในสมการที่ (3.8) เพื่อหาเวลาขาขึ้นของระบบได้ดังสมการ (4.9)

$$t_{sys} = \sqrt{t_{tx}^2 + t_{rx}^2 + t_{CD}^2} = \sqrt{(19.45\text{ps})^2 + (67.11\text{ps})^2} = 69.87 \text{ ps} \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.9) เวลารวมขาขึ้นทั้งหมดเท่ากับ 69.87 ps และพิจารณาเงื่อนไขจากสมการที่ (3.9) ในการส่งสัญญาณแสงแบบโอไอเค (OOK) ในกรณี Non-Return-to-Zero (NRZ) ดังสมการ (4.10)

$$69.87\text{ps} < 0.7(100\text{ps}) \quad (4.10)$$

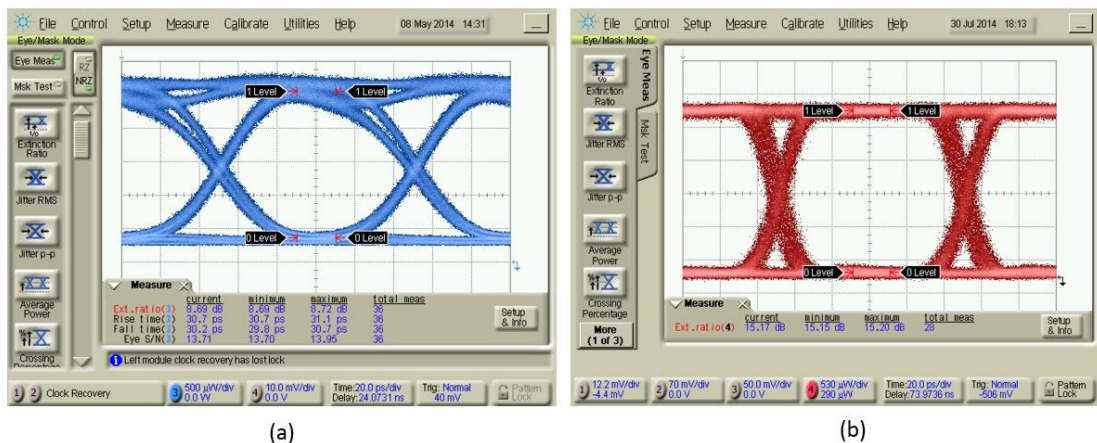
จากสมการ (4.10) เวลาขาขึ้นของระบบมีค่าน้อยกว่า 70% ของคาบสัญญาณ เพราะฉะนั้นโครงข่ายนี้ยังสามารถทนต่อโครมาติกดิสเพอร์ชันและอยู่ภายใต้ข้อจำกัดการถ่างออกของสัญญาณด้วย

4.3 การวิเคราะห์ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Analysis) กรณีต่างๆ

หัวข้อย่อเรื่องนี้จะวิเคราะห์ค่าอัตราความผิดพลาดบิตสัมพันธ์กับกำลังรับ (Received Power) โดยพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-12} ซึ่งวิเคราะห์ในกรณีต่างๆ ได้แก่ กรณีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันที่แตกต่างกัน กรณีตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด และตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ชนิด

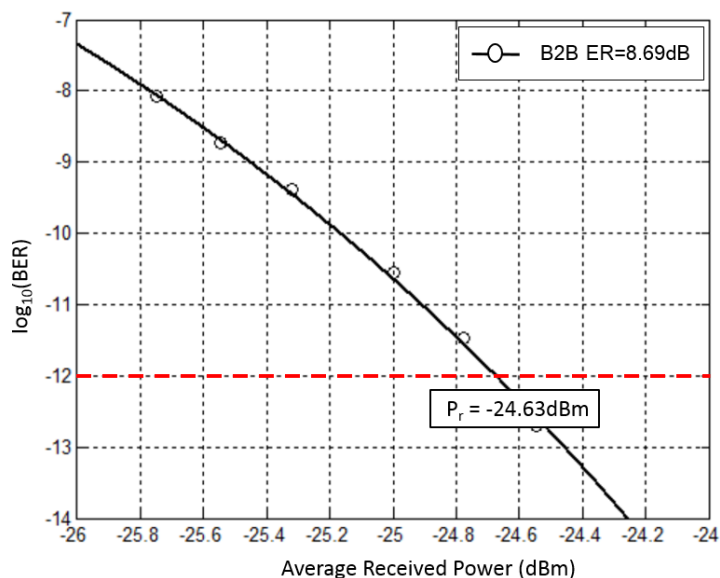
4.3.1 ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER)

พิจารณาการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตของตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด ที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน โดยตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้ามีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 8.69 dB และตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 11.18 dB และ 15.17 dB โดยแผนภาพรูปตาซึ่งมีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันต่ำที่สุดและดีที่สุดแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพรูปตาเมื่อมีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ (a) 8.69 dB และ (b) 15.17 dB

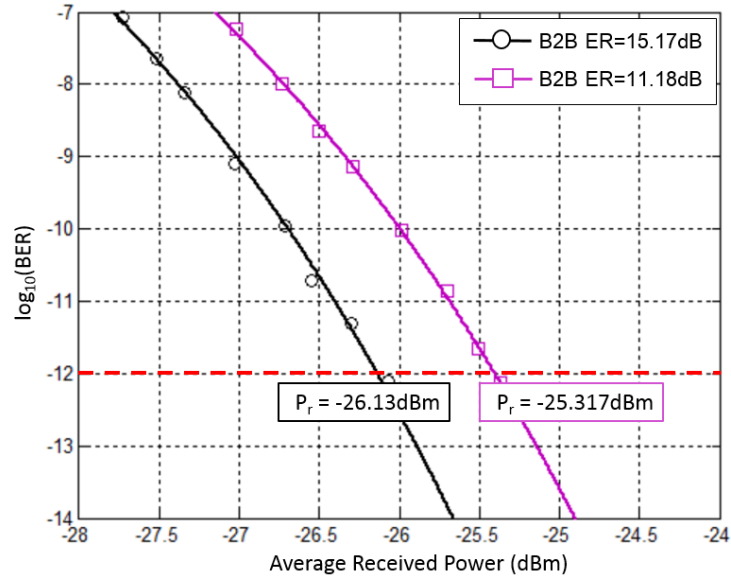
4.3.1.1 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML)



รูปที่ 4.11 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน 8.69 dB ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.11 เมื่อวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตด้วยเครื่อง N4901B Bit Error Rate Tester (BERT) ของบริษัท Keysight Technologies [36] กรณีนวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 8.69 dB ณ กำลังรับแตกต่างกัน ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-12} ได้กำลังรับเท่ากับ -24.63 dBm ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ (Optical Receiver's Sensitivity) ซึ่งในแผนข้อมูลระบุค่าสูงสุด (Maximum) ไว้เท่ากับ -24 dBm [3]

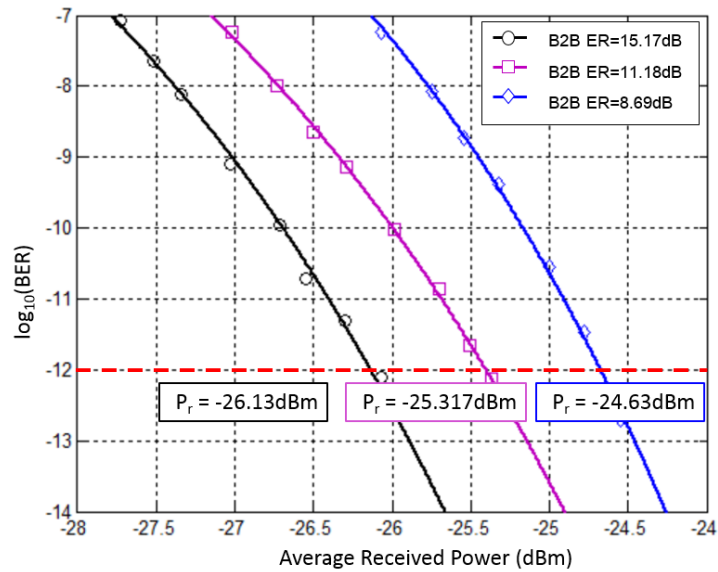
4.3.1.2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)



รูปที่ 4.12 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน 15.17 dB และ 11.18 dB ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.12 เมื่อวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตด้วยเครื่องมือวัด MP1762A Error Detector ของบริษัท Anritsu [37] กรณีนวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์ที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 15.17 dB และ 11.18 dB ณ กำลังรับค่าแตกต่างกัน ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-12} มีกำลังรับเท่ากับ -26.13 dBm และ -25.317 dBm ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากราฟจากทั้ง 3 ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน แสดงดังรูปที่ 4.13



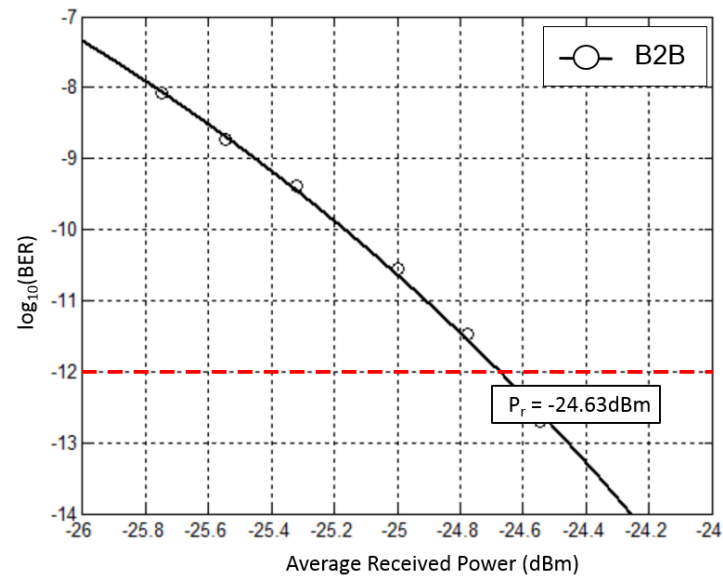
รูปที่ 4.13 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน 15.17 dB, 11.18 dB และ 8.69 dB

จากรูปที่ 4.13 แนวโน้มของกราฟที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันดีที่สุดเท่ากับ 15.17 dB จะมีอัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุดและกราฟจะอยู่ด้านซ้ายสุดดังรูป ในทางกลับกันแนวโน้มของกราฟที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันต่ำสุดเท่ากับ 8.69 dB จะมีอัตราความผิดพลาดบิตมากที่สุดและกราฟจะอยู่ด้านขวาสุดดังรูป เพราะฉะนั้นเมื่อส่งสัญญาณค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันสูงจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตต่ำ เนื่องจากแผนภาพรูปตาจะมีลักษณะที่เปิดกว้างกว่า ส่งผลให้มีบิตผิดพลาดที่กึ่งกลางของแผนภาพรูปตาน้อยกว่าทำให้ตัดสินบิตถูกต้องมากกว่า

4.3.2 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML)

วิเคราะห์ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-12} เมื่อใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าในกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

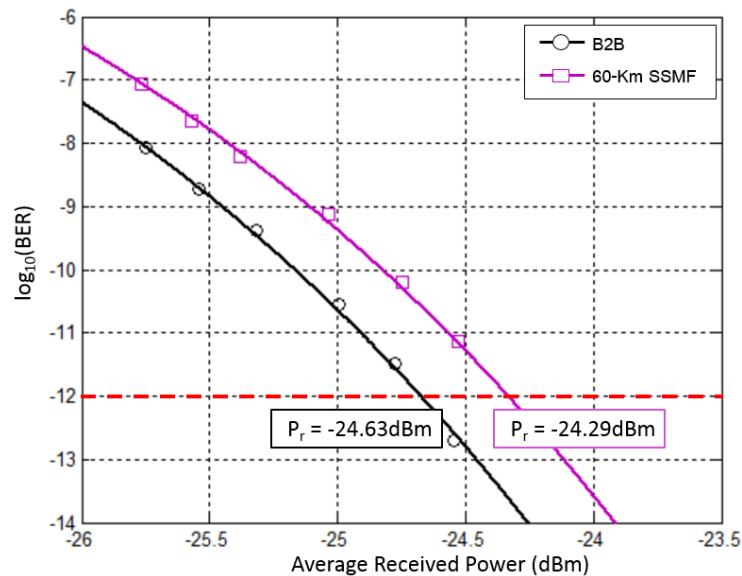
4.3.2.1 กรณีวนซ้ำกลับ (Loopback)



รูปที่ 4.14 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการ ดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

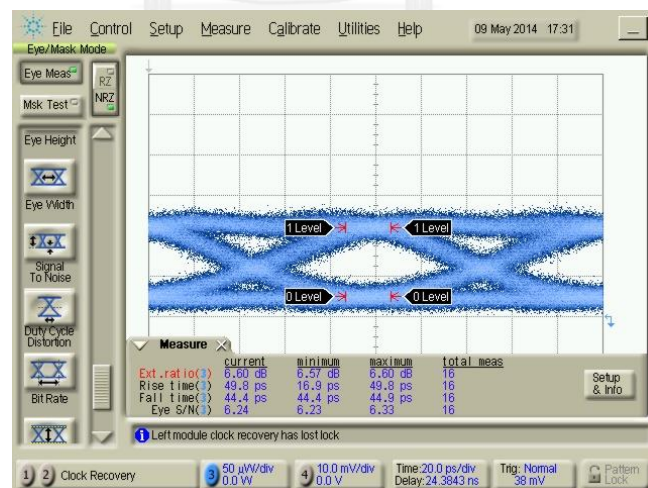
จากรูปที่ 4.14 คือกรณีวนซ้ำกลับ เมื่อพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-12} จะมีค่า กำลังรับเท่ากับ -24.63 dBm ซึ่งต่ำกว่าค่าสูงสุดของกำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ -24 dBm [3] โดยแสดงแผนภาพรูปตาดังรูปที่ 4.10 (a)

4.3.2.2 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมามาตรฐานระยะทาง 60 กิโลเมตร



รูปที่ 4.15 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 60 Km ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า

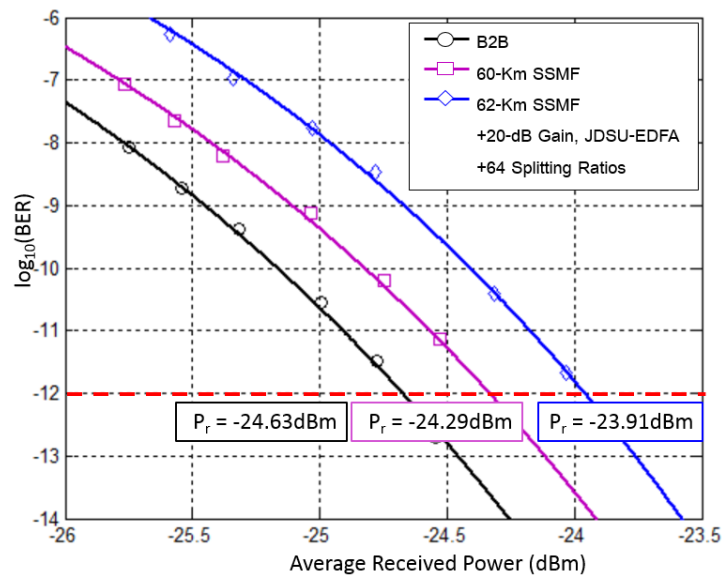
จากรูปที่ 4.15 คือกรณีส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวระยะทาง 60 Km เมื่อพิจารณาเส้นกราฟดังกล่าวจะเห็นว่าเส้นกราฟเลื่อนไปทางขวาของกรณีวนซ้ำกลับ มีค่ากำลังรับที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-12} เท่ากับ -24.29 dBm และมี Power Penalty เท่ากับ 0.34 dB



รูปที่ 4.16 แผนภาพรูปตาที่ระยะทาง 60 Km ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า

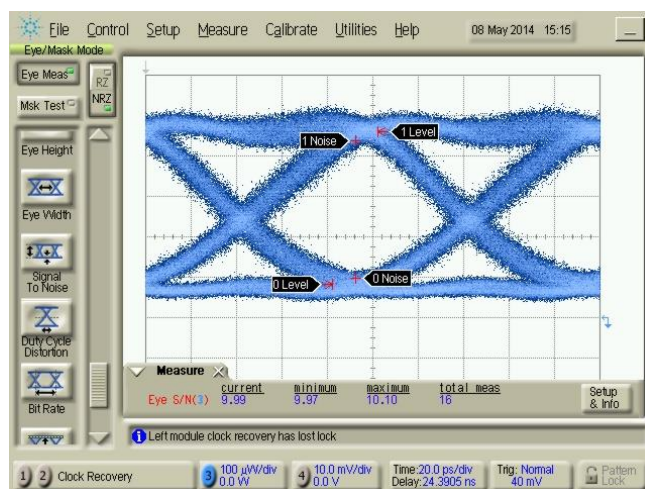
จากรูปที่ 4.16 แผนภาพรูปตาที่ระยะทาง 60 Km มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณีวนซ้ำกลับ มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันน้อยลงและเวลาขาขึ้นมากขึ้นเนื่องจากผลของโครมาติกดิสเพอร์ชัน ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่ง

4.3.2.3 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมาตรฐานระยะทาง 62 กิโลเมตร ใช้ตัวแยกแสงและตัวขยายอดีเอฟเอ



รูปที่ 4.17 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 62 Km ใช้ตัวแยกแสงและตัวขยายอดีเอฟเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดัดคลื่นไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.17 คือกรณีที่ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวระยะทาง 62 Km และแทรกตัวแยกแสงเข้าไปในโครงข่าย เพื่อเพิ่มจำนวนผู้รับบริการได้ 64 ผู้รับบริการ ส่งผลให้เกิดค่ากำลังแสงสูญเสียแทรกเป็นจำนวนมาก เพราะฉะนั้นจึงใช้ตัวขยายอดีเอฟเอเพื่อเพิ่มงบกำลังให้กับโครงข่าย ต่อมาเมื่อพิจารณาเส้นกราฟดังกล่าวจะพบว่าเส้นกราฟเลื่อนไปทางขวาของกรณี 4.3.2.2 และมีค่ากำลังรับที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-12} เท่ากับ -23.91 dBm มี Power Penalty เมื่อเทียบกับกรณี 4.3.2.2 เท่ากับ 0.38 dB



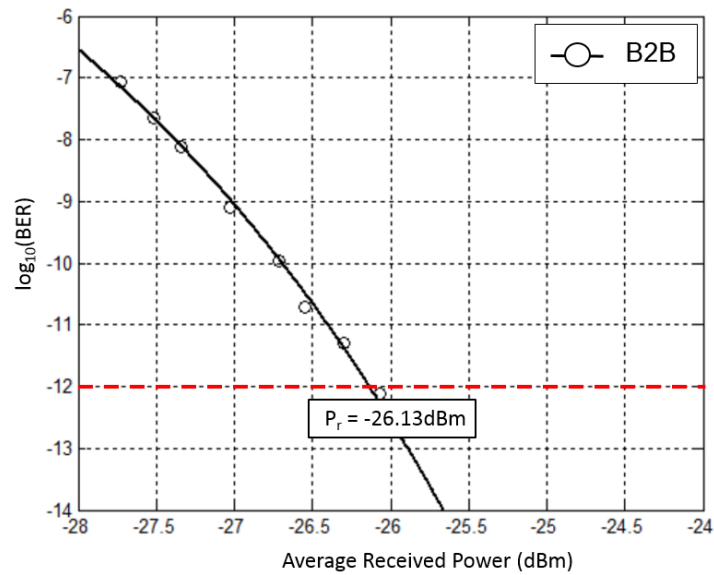
รูปที่ 4.18 แผนภาพรูปตาหลังจากออกจากตัวขยายอีดีเอฟเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการ ดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.18 เมื่อแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอจะทำให้กำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้นและแผนภาพรูปตาจะกว้างขึ้นเช่นกัน แต่ค่า Eye S/N หรืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีวนซ้ำกลับทั้งนี้เนื่องมาจากผลสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดจากตัวขยายอีดีเอฟเอ ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่ง

4.3.3 ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter)

วิเคราะห์ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-12} เมื่อใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัค-เซนเดอร์โดยพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิต ในกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

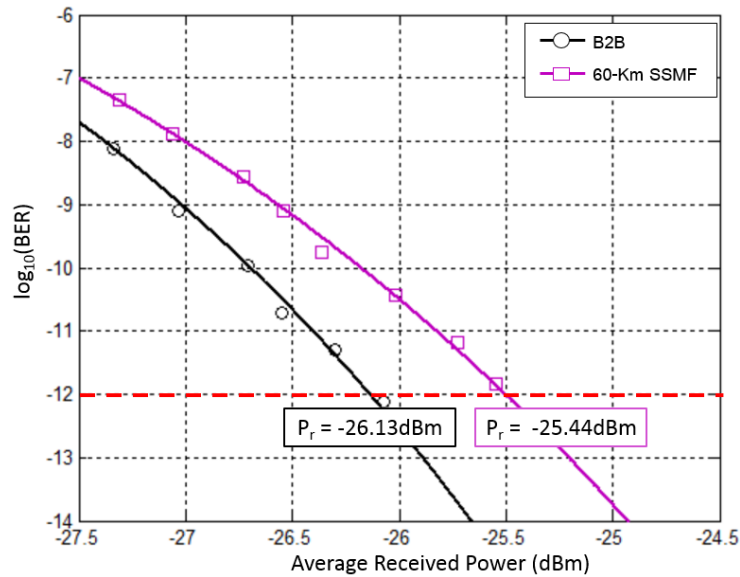
4.3.3.1 กรณีสวนซ้ำกลับ (Loopback)



รูปที่ 4.19 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

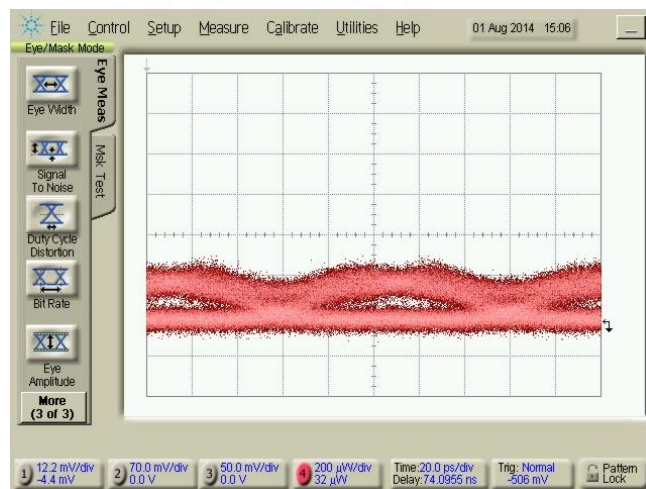
จากรูปที่ 4.19 ใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์ในกรณีวนซ้ำกลับที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 15.17 dB เมื่อพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ 10^{-12} จะมีค่ากำลังรับเท่ากับ -26.13 dBm ซึ่งต่ำกว่าค่าสูงสุดของกำลังแสงต่ำสุดที่ตัวรับแสงสามารถรับได้ -24 dBm [3] โดยแสดงแผนภาพรูปตาดังรูปที่ 4.10 (b)

4.3.3.2 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมามาตรฐานระยะทาง 60 กิโลเมตร



รูปที่ 4.20 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 60 Km ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.20 คือกรณีส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวระยะทาง 60 Km เมื่อพิจารณาเส้นกราฟดังกล่าวจะพบว่าเส้นกราฟเลื่อนไปทางขวาของกรณีวนซ้ำกลับ และมีค่ากำลังรับที่อัตราการความผิดพลาดบิต 10^{-12} เท่ากับ -25.44 dBm มี Power Penalty เท่ากับ 0.69 dB

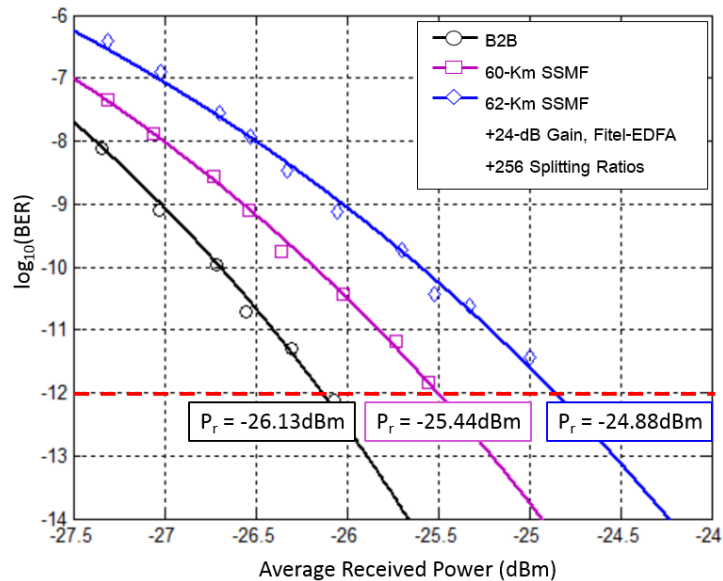


รูปที่ 4.21 แผนภาพรูปตาที่ระยะทาง 60 Km ของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.21 แสดงแผนภาพรูปตาที่ระยะทาง 60 Km ซึ่งจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณีวนซ้ำกลับ มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันน้อยลงและเวลาขาขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผลของโคร

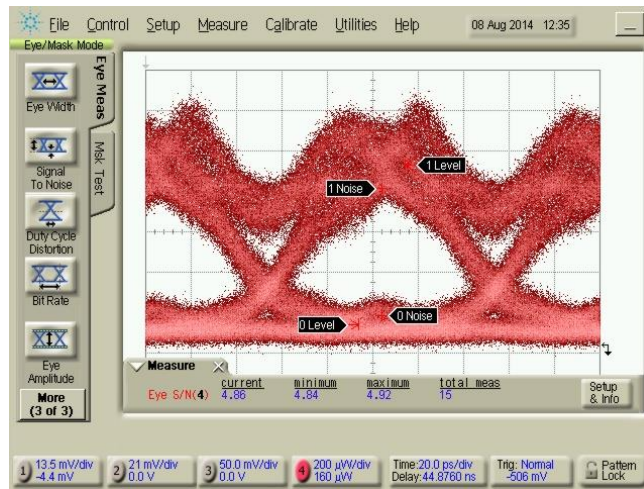
มาติกดิสเพอร์ชันทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิดเบ่ง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกรณีที่ใช้ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า

4.3.3.3 กรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 62 กิโลเมตร ใช้ตัวแยกแสงและตัวขยายอิตีเอฟเอ



รูปที่ 4.22 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 62 Km ใช้ตัวแยกแสงและตัวขยายอิตีเอฟเอของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.22 คือกรณีที่ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวระยะทาง 62 Km และแทรกตัวแยกแสงเข้าไปในโครงข่าย เพื่อเพิ่มจำนวนผู้รับบริการได้ 256 ผู้รับบริการ ทำให้เกิดค่ากำลังแสงสูญเสียแทรกเป็นจำนวนมาก เพราะฉะนั้นจึงใช้ตัวขยายอิตีเอฟเอเพื่อเพิ่มงบกำลังให้กับโครงข่ายเช่นเดียวกับกรณีที่ 4.3.2.3 ต่อมาเมื่อพิจารณาเส้นกราฟดังกล่าวจะพบว่าเส้นกราฟเลื่อนไปทางขวาของกรณี 4.3.3.2 และมีค่ากำลังแสงที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-12} เท่ากับ -24.88 dBm มี Power Penalty เมื่อเทียบกับกรณี 4.3.3.2 เท่ากับ 0.56 dB

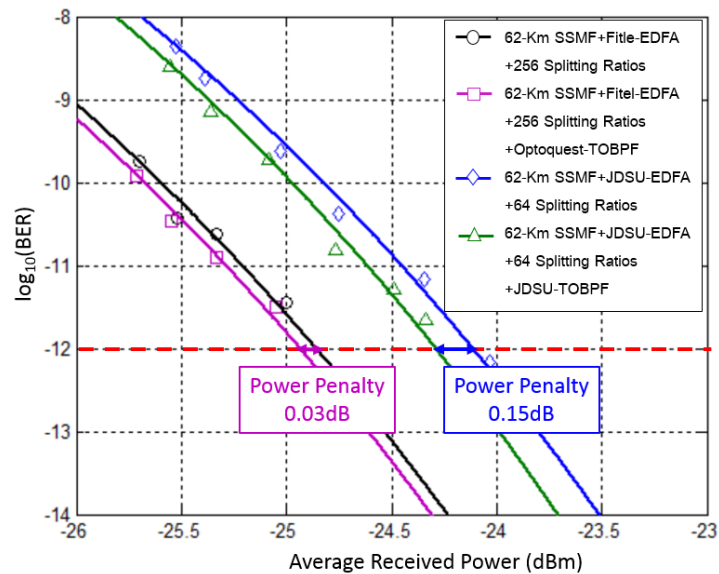


รูปที่ 4.23 แผนภาพรูปตาหลังจากตัวขยายอีดีเอฟของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

จากรูปที่ 4.23 เมื่อแทรกตัวขยายอีดีเอฟจะทำให้กำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้นและแผนภาพรูปตาจะเปิดกว้างขึ้นเช่นกัน แต่ค่า Eye S/N หรืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีวนซ้ำกลับ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลสัญญาณรบกวนเอเอสไอที่เกิดจากตัวขยายอีดีเอฟเอ ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่ง

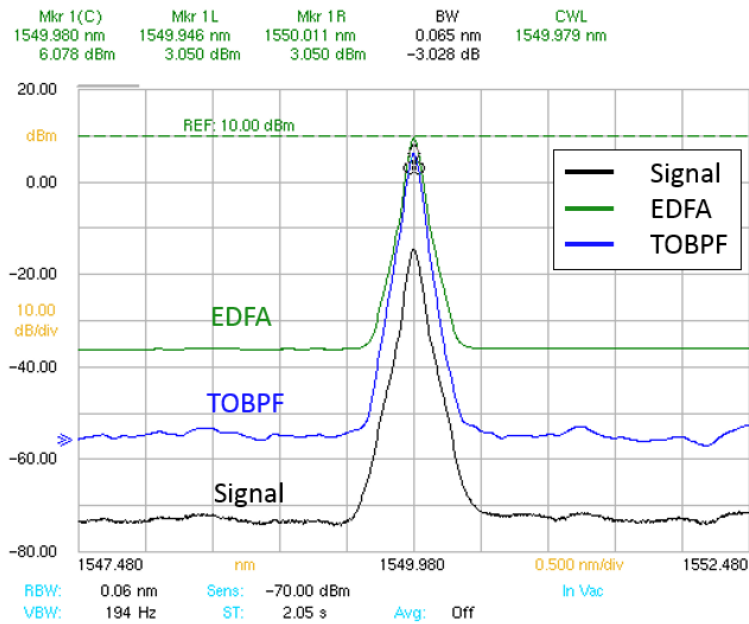
จากการใช้ตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าและตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์ จะได้ว่าแนวโน้มของเส้นกราฟที่เกิดจากผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยกราฟจะเลื่อนไปทางขวาเพราะค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่งเนื่องมาจากผลกระทบดังกล่าว แต่กรณีตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้ามีค่า Power Penalty น้อยกว่าเนื่องจากมีความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณที่แคบกว่าตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์ และมีแนวโน้มของเส้นกราฟที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเอเอสไอเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กราฟจะเลื่อนไปทางขวาเพราะค่าอัตราความผิดพลาดบิตแย่งเนื่องมาจากผลกระทบดังกล่าว แต่กรณีตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้ามีค่า Power Penalty น้อยกว่าเนื่องจากตัวขยายอีดีเอฟเอมีอัตราการขยายที่น้อยกว่าตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

4.3.4 กรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ชนิด



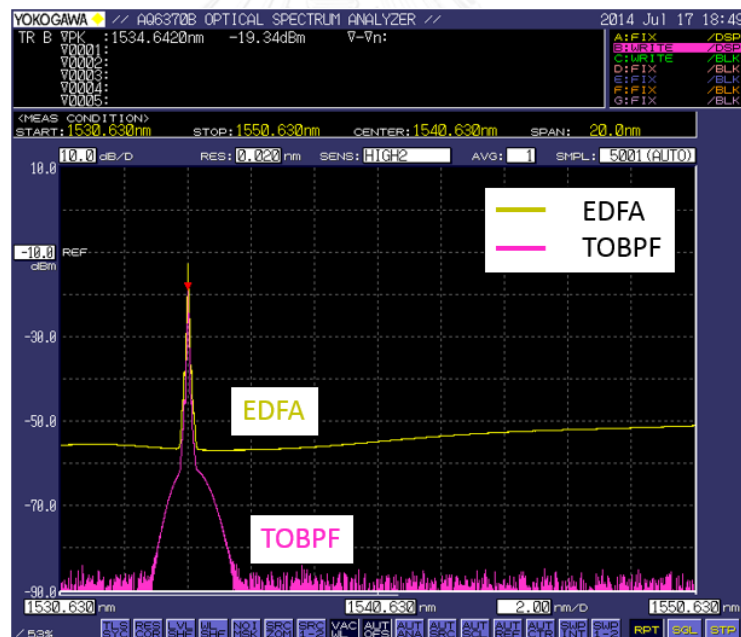
รูปที่ 4.24 กราฟอัตราการความผิดพลาดบิตกรณีใช้ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ชนิด

จากรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบอัตราการความผิดพลาดบิตเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ชนิด ได้แก่ (1) ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU [10] มีความกว้างสเปกตรัมแสงเท่ากับ 0.25 nm ส่งผลให้ค่าอัตราการความผิดพลาดบิตต่ำลงและกราฟเลื่อนไปทางซ้ายของกรณีที่แทรกตัวขยายอิตีเอฟเอและตัวแยกแสง มี Power Penalty เท่ากับ 0.15 dB ดังรูป และ (2) ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST [11] มีความกว้างสเปกตรัมแสงเท่ากับ 1 nm ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราการความผิดพลาดบิตต่ำลงเช่นเดียวกัน แต่ Power Penalty จะลดลงน้อยกว่ามีค่าเท่ากับ 0.03 dB เนื่องจากใช้ค่าอัตราการขยายเท่ากันทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 24 dB เพราะฉะนั้นการที่ค่าอัตราการความผิดพลาดบิตต่ำลงเกิดจากการแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ไว้หลังตัวขยายอิตีเอฟเอเพื่อลดสัญญาณรบกวนเอเอสอี นอกจากนี้เมื่อตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มีความกว้างสเปกตรัมแสงที่แคบกว่าจะทำให้อัตราการความผิดพลาดบิตดีขึ้นมากกว่า



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมแสงเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท

JDSU



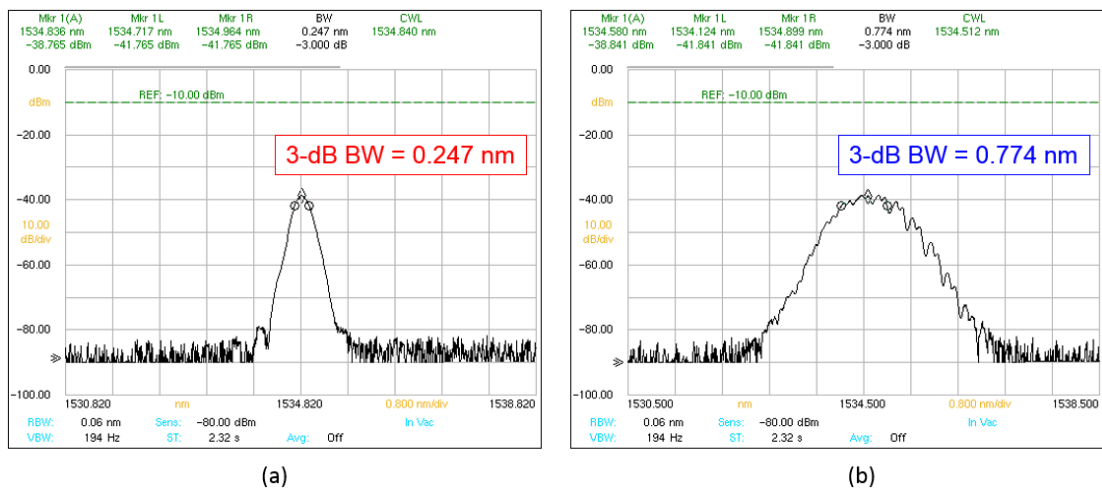
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมแสงเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท

OPTOQUEST

จากรูปที่ 4.25 เส้นของสัญญาณจะอยู่ต่ำสุด เมื่อมีการแทรกตัวขยายอีดีเอฟเข้าไปในโครงข่ายทำให้ระดับพื้นของสัญญาณรบกวน (Noise Floor) กระโดดขึ้นไปยังบนสุดซึ่งมีผลมาจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี เมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ ระดับพื้นของ

สัญญาณรบกวนจะลดระดับลงมาเนื่องจากตัวกรองสัญญาณมีความกว้างสเปกตรัมแสงที่แคบโดยจะกรองแต่สัญญาณเฉพาะความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน ทำให้สัญญาณรบกวนเอเอสอีลดลง

จากรูปที่ 4.26 วัดสเปกตรัมแสงโดยเครื่อง AQ6370B Optical Spectrum Analyzer ของบริษัท Yokogawa [38] จะเห็นว่าระดับของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแทรกตัวขยายอิตีเอฟเอลดลงเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้เพื่อลดสัญญาณรบกวนเอเอสอี ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมแสงของตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของ (a) จากบริษัท JDSU และ (b) จากบริษัท OPTOQUEST

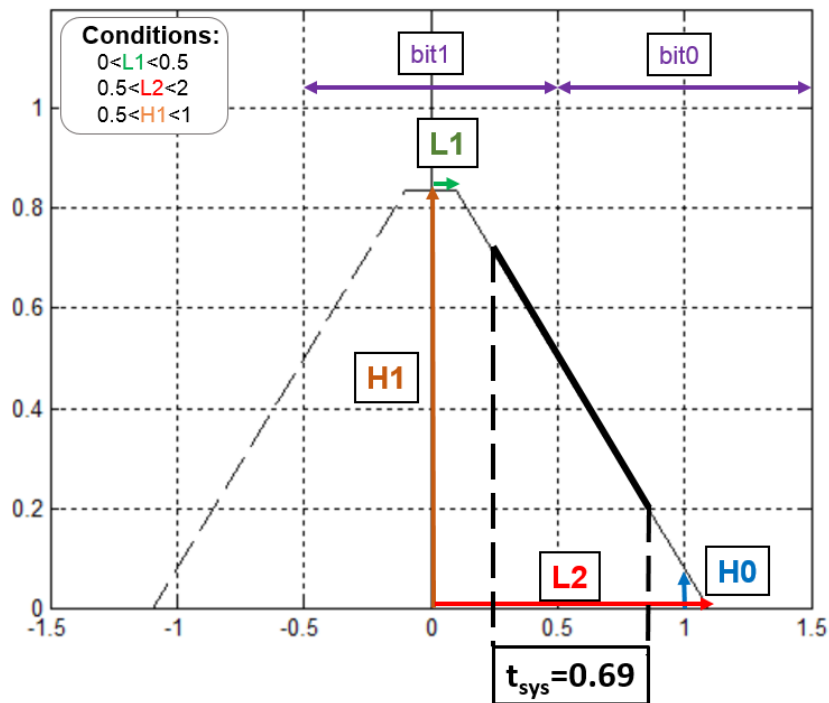
จากรูปที่ 4.27 สเปกตรัมของตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ทั้ง 2 ชนิด โดยตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU มีความกว้างสเปกตรัมแสงประมาณ 0.247 nm ดังรูปที่ 4.27 (a) และตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST มีความกว้างสเปกตรัมแสงประมาณ 0.774 nm ดังรูปที่ 4.27 (b) จะได้ว่าตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท JDSU สามารถลดสัญญาณรบกวนเอเอสอีได้มากกว่าเนื่องจากมีความกว้างสเปกตรัมแสงที่แคบกว่าตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ของบริษัท OPTOQUEST

บทที่ 5

การคำนวณผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB

5.1 การคำนวณโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion Computation)

เมื่อพิจารณาผลของโครมาติกดิสเพอร์ชันเมื่อส่งสัญญาณระยะทางไกล โดยในงานวิจัยนี้ส่งสัญญาณระยะทางไกลสุดเท่ากับ 62 Km พิจารณากรณีของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลเตอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter) จากหัวข้อย่อยที่ 4.2 จะได้เวลารวมขาขึ้นทั้งหมดเท่ากับ 69.87 ps สามารถนำมาวิเคราะห์ผลของโครมาติกดิสเพอร์ชันดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณ

จากรูปที่ 5.1 เมื่อพิจารณาสัญญาณที่เกิดจากการถ่วงออกจากโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยเปรียบเทียบให้ 1 คาบิตมีค่าเท่ากับ 1 หน่วย (จาก -0.5 หน่วย ถึง 0.5 หน่วย) และมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 1 ซึ่งมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ L1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5 เนื่องจาก L1 ห้ามมีความยาวเกินครึ่งคาบิต, H1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1 เนื่องจาก H1 ห้ามต่ำกว่า 0.5 เพราะจะทำให้ตัดคลื่นบิดผิดพลาดเป็นบิต 0 ได้, L2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 เนื่องจากถ้า L2 ยาวมากกว่านี้จะทำให้ H1 ต่ำกว่า 0.5 จากเวลารวมขาขึ้นทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 69.87 ps นำมาพิจารณาเป็น 0.69 หน่วย ดังรูปจะเห็นว่า เมื่อค่า t_{sys} ยิ่งมากขึ้นทำให้ H1 มีค่าต่ำลง และ H0 คือความสูงจากกึ่งกลาง

ของบิตที่อยู่ติดกันจะสูงขึ้น พิจารณาค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) ได้ดังสมการ (5.1) [1]

$$ER = 10\log_{10}\left(\frac{H_1}{H_0}\right) \quad (5.1)$$

จากสมการ (5.1) H_1 เปรียบเทียบได้กับระดับของบิต 1 และ H_0 เปรียบเทียบได้กับระดับของบิต 0 เพราะฉะนั้นจากผลกระทบของโครมาติกดิสเพอร์ชันจะทำให้ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันลดลงเมื่อค่า H_1 มีค่าลดลงและค่า H_0 มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตมีค่ามากขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความผิดพลาดบิตกับค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันที่แตกต่างกันจะวิเคราะห์ในหัวข้อย่อยถัดไป

5.2 การคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Computation)

การคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎีในกรณีต่างๆ ได้แก่ กรณีที่ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน กรณีวนซ้ำกลับ กรณีตัวขยายอิตีเอฟ และกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

5.2.1 กรณีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER)

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิด ที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน คือ 8.69 dB จากตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า 11.18 dB และ 15.17 dB จากตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัลติ-เซนเดอร์

โดยแสดงพารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราความผิดพลาดบิต ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER)	ER	8.69/11.18/15.17	dB
ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's Constant)	k_B	1.38054×10^{-23} [28]	J/K
อุณหภูมิเคลวิน	T	300	K
ความต้านทานโหลด (Load Resistance)	R_L	2.4×10^3 [39]	Ω
ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure)	F_n	2 [28]	-
แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้า (Electrical Bandwidth)	Δf	9×10^9 [39]	Hz
ค่าประจุอิเล็กตรอน (Electron Charge)	q	1.60218×10^{-19} [28]	C
แฟกเตอร์การคูณ (Multiplication Factor)	M	10 [39]	-
แฟกเตอร์สัญญาณรบกวนส่วนเกิน (Excess Noise Factor)	F_A	10 [28]	-
ค่าการตอบสนอง (Responsivity)	R	0.85 [39]	A/W

กำลังรับ (Received Power)	P_r	-26	dBm
กระแสมืด (Dark Current)	I_d	25×10^{-9} [39]	A

จากตารางที่ 5.1 แสดงพารามิเตอร์และค่าที่จะนำมาใช้คำนวณในสมการเพื่อหาอัตราความผิดพลาดบิต เมื่อพิจารณาอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันเท่ากับ 8.69 dB และกำลังรับเท่ากับ -26 dBm สามารถคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิตได้ดังสมการที่ (5.2) ถึง (5.11) โดยจะคำนวณจากวิธีการหาค่าจริง

จากสมการ (3.11) สัญญาณรบกวนจากความร้อน หาค่าได้ดังสมการ (5.2)

$$\langle \sigma_T^2 \rangle = \left(\frac{4k_B T}{R_L} \right) F_n \Delta f = 1.2425 \times 10^{-13} \text{ A}^2 \quad (5.2)$$

จากสมการ (5.2) สัญญาณรบกวนจากความร้อนมีค่าเท่ากับ $1.2425 \times 10^{-13} \text{ A}^2$ โดยปกติการคำนวณในสมการต่างๆ จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับในหน่วยวัตต์ เพราะฉะนั้นจึงต้องแปลงกำลังรับในหน่วยดีบีเอ็มเป็นหน่วยวัตต์ ดังสมการที่ (5.3)

$$P_{r_W} = 10^{\frac{P_{r_dBm}}{10}} \times 10^{-3} = 2.5119 \times 10^{-6} \text{ W} \quad (5.3)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อกำลังรับเท่ากับ -26 dBm จะแปลงเป็นกำลังรับในหน่วยวัตต์ได้เท่ากับ 2.512 uW นำค่ากำลังรับที่ได้ไปคำนวณในสมการที่ (5.4) และ (5.5) เพื่อหาค่ากำลังแสงของบิต 0 และกำลังแสงของบิต 1 ตามลำดับ

$$P_0 = \frac{2P_r}{\frac{ER}{10^{10}} + 1} = 5.9835 \times 10^{-7} \text{ W} \quad (5.4)$$

$$P_1 = 2P_r - P_0 = 4.4254 \times 10^{-6} \text{ W} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) ค่ากำลังแสงของบิต 0 มีค่าเท่ากับ 0.598 uW และค่ากำลังแสงของบิต 1 เท่ากับ 4.43 uW นำค่ากำลังแสงของบิตทั้ง 2 บิตดังกล่าว ไปคำนวณหากระแสบิต 1 และกระแสบิต 0 ได้ดังสมการที่ (5.6) และ (5.7)

$$I_0 = MRP_0 = 5.0860 \times 10^{-6} \text{ (A)} \quad (5.6)$$

$$I_1 = MRP_1 = 3.7616 \times 10^{-5} \text{ (A)} \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.6) และ (5.7) ค่ากระแสบิต 0 มีค่าเท่ากับ 5.086 uA และค่ากำลังแสงของบิต 1 มีค่าเท่ากับ 37.616 uA นำค่ากระแสบิตของทั้ง 2 บิตดังกล่าว ไปคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 ได้ดังสมการที่ (5.8) และ (5.9)

$$\sigma_0 = \sqrt{2qM^2F_A(RP_0 + I_d)\Delta f + \langle \sigma_T^2 \rangle} = 1.2896 \times 10^{-6} \text{ (A)} \quad (5.8)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{2qM^2F_A(RP_1 + I_d)\Delta f + \langle \sigma_T^2 \rangle} = 3.3233 \times 10^{-6} \text{ (A)} \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.8) และ (5.9) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 0 มีค่าเท่ากับ 1.29 uA และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 มีค่าเท่ากับ 3.323 uA นำค่าทั้ง 2 ไปคำนวณหาค่าแฟคเตอร์ Q ได้ดังสมการที่ (5.10)

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = 7.0519 \quad (5.10)$$

จากสมการที่ (5.10) ค่าแฟคเตอร์ Q มีค่าเท่ากับ 7.0519 สุดท้ายนำค่าแฟคเตอร์ Q ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตดังสมการที่ (5.11)

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = 8.8233 \times 10^{-13} \quad (5.11)$$

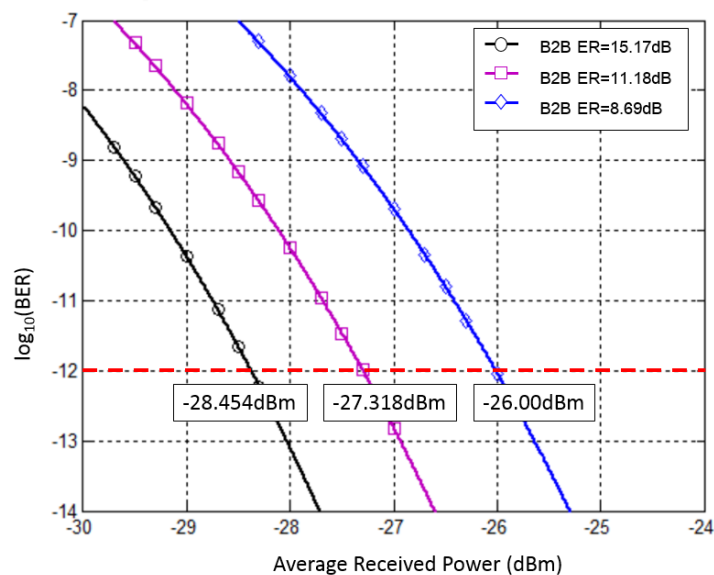
จากสมการ (5.11) ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเท่ากับ 8.823×10^{-13} โดยสามารถหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันทั้ง 3 ค่า ได้แก่ 8.69 dB, 11.18 dB และ 15.17 dB ได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 อัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน

กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต		
	ER = 8.69dB	ER = 11.18dB	ER = 15.17dB
-26	8.82E-13	8.21E-17	1.14E-21
-26.3	5.18E-12	9.32E-16	3.00E-20
-26.5	1.58E-11	4.31E-15	2.34E-19
-26.7	4.58E-11	1.86E-14	1.66E-18
-27	2.08E-10	1.47E-13	2.67E-17
-27.3	8.51E-10	1.02E-12	3.56E-16
-27.5	2.07E-09	3.44E-12	1.81E-15
-27.7	4.84E-09	1.10E-11	8.59E-15
-28	1.62E-08	5.71E-11	7.75E-14

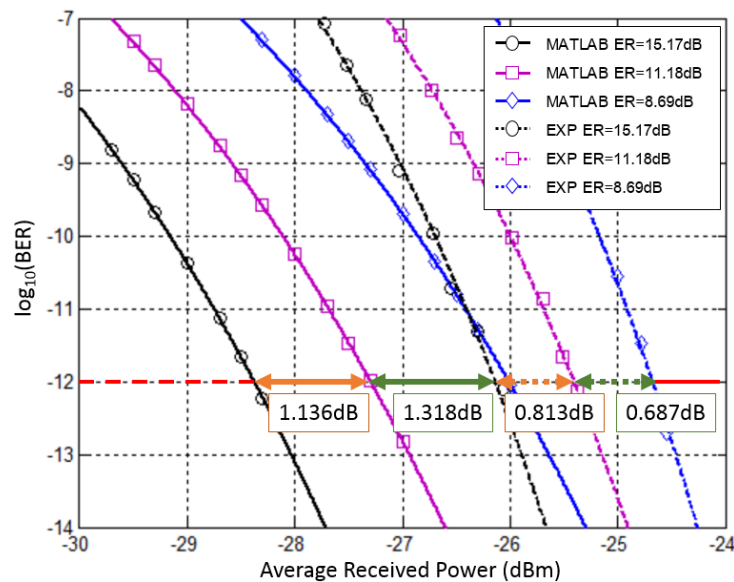
-28.3	4.98E-08	2.66E-10	6.02E-13
-28.5	1.01E-07	6.99E-10	2.18E-12
-28.7	1.99E-07	1.76E-09	7.47E-12
-29	5.21E-07	6.53E-09	4.26E-11
-29.3	1.28E-06	2.22E-08	2.15E-10
-29.5	2.26E-06	4.79E-08	5.97E-10
-29.7	3.87E-06	9.99E-08	1.58E-09
-30	8.35E-06	2.83E-07	6.24E-09
-30.5	2.69E-05	1.38E-06	5.01E-08
-31	7.65E-05	5.66E-06	3.19E-07
-31.5	0.00019471	1.99E-05	1.65E-06
-31.7	0.00027506	3.17E-05	3.01E-06
-32	0.00044898	6.12E-05	7.07E-06
-32.3	0.00070991	0.00011293	1.56E-05
-32.5	0.00094758	0.00016608	2.57E-05
-32.7	0.0012489	0.00024	4.13E-05
-33	0.0018477	0.00040419	8.07E-05
-33.3	0.002665	0.00065722	0.00015047

จากตารางที่ 5.2 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันที่แตกต่างกัน และสามารถวาดกราฟได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน

จากรูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและกำลังรับเฉลี่ย โดยแต่ละเส้นกราฟมีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันที่แตกต่างกัน ซึ่งกราฟที่อยู่ทางด้านซ้ายสุดจะมีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันมากที่สุดเท่ากับ 15.17 dB และมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุดในทางกลับกันเส้นกราฟที่อยู่ทางด้านขวาสุดจะมีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันต่ำที่สุดเท่ากับ 8.69 dB และมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตมากที่สุด จากสมการที่ (5.4) เมื่อค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันมากขึ้นจะได้ว่ากำลังแสงของบิต 0 มีค่าน้อยลง และกำลังแสงของบิต 1 มีค่ามากขึ้น ส่งผลเช่นเดียวกันกับกระแสบิต 0 และกระแสบิต 1 ทำให้อัตราความผิดพลาดบิตต่ำลง ทั้งนี้กราฟที่ได้จากการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มของกราฟที่ได้จากการทดลอง จะได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกราฟที่มาจากกรณาคำนวณและการทดลองในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันแตกต่างกัน

จากรูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกราฟที่มาจากกรณาคำนวณและการทดลอง โดยกราฟเส้นทึบเป็นกราฟที่ได้จากการคำนวณและกราฟเส้นประเป็นกราฟที่ได้จากการทดลอง จากรูปแนวโน้มของกราฟที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันมากที่สุดจากกราฟที่มาจากกรณาคำนวณและการทดลองจะอยู่ทางด้านซ้ายสุดเช่นเดียวกัน และแนวโน้มของกราฟที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันต่ำที่สุดจากกราฟที่มาจากกรณาคำนวณและการทดลองจะอยู่ด้านขวาสุดเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นกราฟจากกรณาคำนวณทางทฤษฎีและกราฟที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และสาเหตุที่ทำให้กราฟการทดลองมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตสูงกว่าเนื่องจากผลของสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise) ที่เกิดจาก Trans-Impedance Amplifier (TIA) ภายในตัวตรวจจับแสงซึ่งไม่ได้นำมาคำนวณในสมการ

5.2.2 กรณีวนซ้ำกลับ (Loopback)

กรณีนี้สามารถใช้ค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกันกับตารางที่ 5.1 โดยจะแตกต่างแค่ค่า F_A เนื่องจากคำนวณโดยวิธีการประมาณค่า ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 2 สามารถคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตตั้งสมการ (5.12) ถึง (5.17) คำนวณโดยใช้กำลังรับเท่ากับ -28 dBm แปลงเป็นหน่วยวัตต์ได้เท่ากับ 1.5849 uW โดยใช้สมการที่ (5.3)

จากสมการ (3.12) และ (3.13) สามารถคำนวณหาสัญญาณรบกวนควอนตัมและสัญญาณรบกวนกระแสมีดของตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีได้ตั้งสมการที่ (5.12) และ (5.13)

$$\langle \sigma_{s_APD}^2 \rangle = 2qM^2F_A(RP_T)\Delta f = 7.7702 \times 10^{-13} A^2 \quad (5.12)$$

$$\langle \sigma_{d_APD}^2 \rangle = 2qM^2F_AI_d\Delta f = 1.442 \times 10^{-14} A^2 \quad (5.13)$$

จากสมการที่ (5.12) และ (5.13) สัญญาณรบกวนควอนตัมมีค่าเท่ากับ $7.7702 \times 10^{-13} A^2$ และสัญญาณรบกวนกระแสมีดมีค่าเท่ากับ $1.442 \times 10^{-14} A^2$ และคำนวณกระแสโฟโตจากสมการที่ (3.30) ได้ตั้งสมการที่ (5.14)

$$\langle I_p^2 \rangle = (MRP_T)^2 = 1.8148 \times 10^{-10} A^2 \quad (5.14)$$

จากสมการที่ (5.14) กระแสโฟโตมีค่าเท่ากับ $1.8148 \times 10^{-10} A^2$ นำค่าที่ได้จากสมการ (5.2), (5.12), (5.13) และ (5.14) มาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนจากสมการที่ (3.31) ได้ตั้งสมการที่ (5.15)

$$SNR_{APD} = \frac{\langle I_p^2 \rangle}{\langle \sigma_{s_APD}^2 \rangle + \langle \sigma_{d_APD}^2 \rangle + \langle \sigma_T^2 \rangle} = 198.1937 \quad (5.15)$$

จากสมการที่ (5.15) ค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับแสงแบบเอพิตีมีค่าเท่ากับ 198.1937 จากสมการที่ (3.23) สามารถคำนวณค่าแฟคเตอร์ Q ได้ตั้งสมการที่ (5.16)

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{SNR} = 7.0391 \quad (5.16)$$

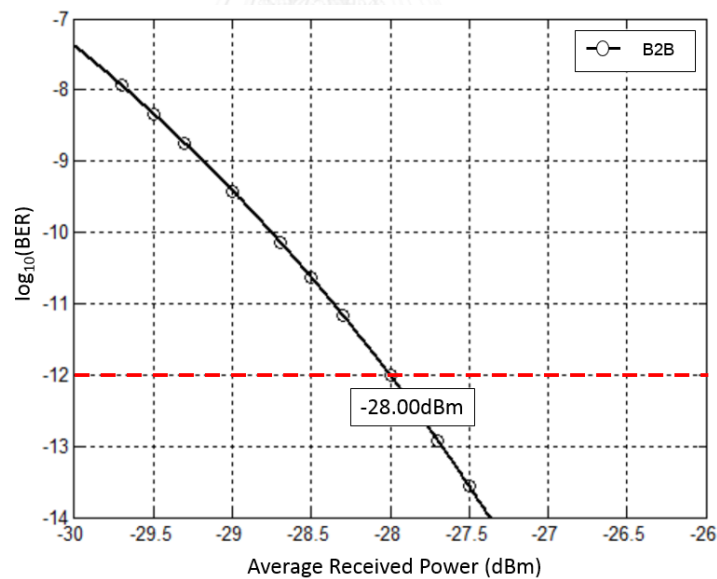
จากสมการที่ (5.16) ค่าแฟคเตอร์ Q มีค่าเท่ากับ 7.0391 นำไปคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิตได้ตั้งสมการที่ (5.17)

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = 9.6768 \times 10^{-13} \quad (5.17)$$

จากสมการที่ (5.17) ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเท่ากับ 9.6768×10^{-13} โดยสามารถหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สัมพันธ์กับกำลังรับในกรณีวนซ้ำกลับได้ดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.4

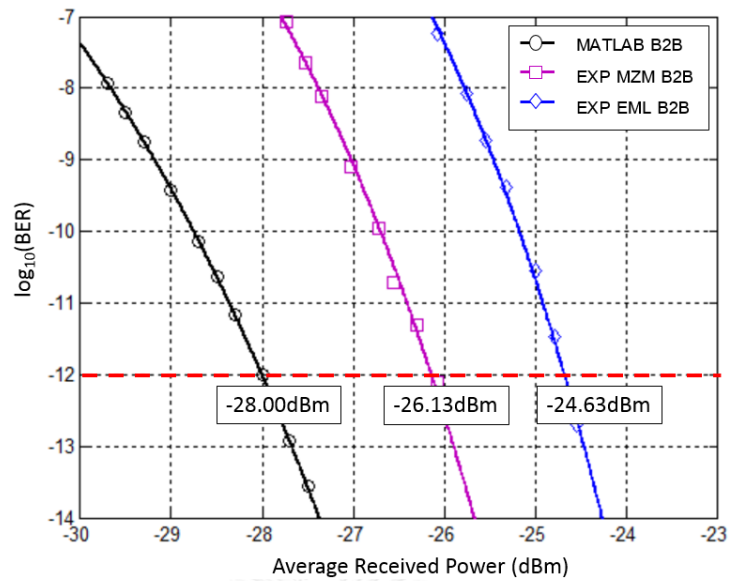
ตารางที่ 5.3 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีวนซ้ำกลับจากการคำนวณ

กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต	กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต
-27	5.12E-16	-29.5	4.57E-09
-27.3	5.94E-15	-29.7	1.14E-08
-27.5	2.77E-14	-30	4.18E-08
-27.7	1.21E-13	-30.5	2.98E-07
-28	9.68E-13	-31	1.70E-06
-28.3	6.73E-12	-31.5	7.91E-06
-28.5	2.28E-11	-32	3.08E-05
-28.7	7.29E-11	-32.5	0.00010251
-29	3.78E-10	-33	0.000296
-29.3	1.75E-09		



รูปที่ 5.4 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีวนซ้ำกลับจากการคำนวณ

นอกจากนี้เมื่อนำกราฟรูปที่ 5.4 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการคำนวณมาวาดกราฟเดียวกันกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการทดลอง จะแสดงดังรูปที่ 5.5



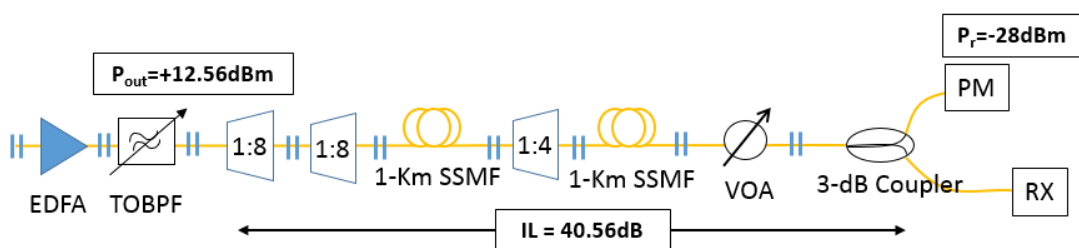
รูปที่ 5.5 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีวนซ้ำกลับจากการคำนวณและการทดลอง

จากรูปที่ 5.5 เส้นกราฟวงกลมด้านซ้ายสุดจะเป็นกราฟที่ได้จากการคำนวณ ส่วนเส้นกราฟสี่เหลี่ยมจัตุรัสถัดมาทางด้านขวาเป็นเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองกรณีวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลเตอร์ และเส้นกราฟสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนด้านขวาสุดเป็นเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองกรณีวนซ้ำกลับของตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

5.2.3 กรณีตัวขยายอิตีเอฟเอ

กรณีตัวขยายอิตีเอฟเอมีการคำนวณคล้ายกันกับกรณีวนซ้ำกลับ แต่แตกต่างกันที่กรณีนี้จะมีผลของสัญญาณรบกวนของอิตีเอฟเอเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย สามารถคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตได้ดังต่อไปนี้

พิจารณากำลังสูญเสียที่เกิดหลังจากผ่านตัวขยายอิตีเอฟเอดังแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนภาพบล็อกแสดงกำลังสูญเสียหลังตัวขยายอิตีเอฟเอ

จากรูปที่ 5.6 เป็นแผนภาพบล็อกกรณีใช้ตัวขยายอดีเอฟเอในกรณีที่มีจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด 256 ผู้รับบริการ สามารถคำนวณกำลังสูญเสียหลังจากตัวขยายอดีเอฟเอจนถึงมีเตอร์วัดกำลังแสงที่มีกำลังรับเท่ากับ -28 dBm ได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงกำลังสูญเสียหลังตัวขยายอดีเอฟเอ

กำลังแสงสูญเสีย	
การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง 2 Km (dB)	0.37
กำลังสูญเสียแทรกในตัวแยกแสง (dB)	27.48
กำลังสูญเสียแทรกในอุปกรณ์ (dB)	5.31
กำลังแสงสูญเสียจนถึงตัวรับแสงที่กำลังรับเท่ากับ -28 dBm	7.4
กำลังแสงสูญเสียหลังตัวขยายอดีเอฟเอ (dB)	40.56

จากตารางที่ 5.4 ค่ากำลังแสงสูญเสียมียค่าเท่ากับ 40.56 dB นำไปคำนวณหาแพคเตอร์การลดทอนได้ดังสมการที่ (5.18)

$$AF = 10^{\frac{-IL}{10}} = 8.7902 \times 10^{-5} \quad (5.18)$$

จากสมการที่ (5.18) ค่าแพคเตอร์การลดทอนมีเท่ากับ 8.7902×10^{-5} นำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Spectral Density of Spontaneous Emission Noise) ได้ดังสมการ (5.19)

$$S_{sp} = \frac{P_{read}}{ResBW} \times AF = 6.8831 \times 10^{-23} \text{ W/Hz} \quad (5.19)$$

จากสมการที่ (5.19) ค่า P_{read} คือ กำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 4.26 จะได้เส้นอดีเอฟเอของสเปกตรัมแสงเมื่อแทรกตัวขยายแสงอดีเอฟเอมีค่าเท่ากับ -57 dBm หรือ 2 nW และมีความละเอียดแบนด์วิดท์ของเครื่องวัด (Resolution Bandwidth) เท่ากับ 0.02 nm [38] โดยสามารถแปลงความละเอียดแบนด์วิดท์ของเครื่องวัดในหน่วย nm เป็นหน่วย GHz ได้ดังสมการ (5.20)

$$ResBW = \frac{c}{|\lambda^2|} \Delta\lambda = 2.5481 \text{ GHz} \quad (5.20)$$

จากสมการที่ (5.20) เมื่อค่า λ เท่ากับ 1534.5 nm ดังรูปที่ 4.6 และ $\Delta\lambda$ เท่ากับค่า 0.02 nm เพราะฉะนั้นความละเอียดแบนด์วิดท์ของเครื่องวัดมีค่าเท่ากับ 2.5481 GHz นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่อ่านได้จากกราฟ (P_{read}) ดังสมการที่ (5.21)

$$P_{\text{read}} = 10^{-55} \times 10^{-3} = 1.9953 \text{ nW} \quad (5.21)$$

จากสมการที่ (5.18), (5.20) และ (5.21) สามารถนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสไอในสมการ (5.19) ได้ มีค่าเท่ากับ $6.8831 \times 10^{-23} \text{ W/Hz}$ และคำนวณค่ากำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสไอได้ตั้งสมการที่ (5.22)

$$P_{\text{sp}} = S_{\text{sp}} \times \Delta v_{\text{opt}} = 2.6308 \times 10^{-10} \text{ W} \quad (5.22)$$

จากสมการที่ (5.22) ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสไอมีค่าเท่ากับ $2.6308 \times 10^{-10} \text{ W}$ และนำมาคำนวณค่าสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสมการที่ (3.16) ได้ดังนี้

$$\langle \sigma_{\text{s_ASE}}^2 \rangle = 2qM^2 F_A (R(P_r + P_{\text{sp}})) \Delta f = 7.7715 \times 10^{-13} \text{ A}^2 \quad (5.23)$$

จากสมการที่ (5.23) สัญญาณรบกวนควอนตัมมีค่าเท่ากับ $7.7715 \times 10^{-13} \text{ A}^2$ ต่อมาคำนวณค่าสัญญาณรบกวนกระแสมีดจากสมการที่ (3.17) ได้ดังนี้

$$\langle \sigma_{\text{d_ASE}}^2 \rangle = 2qM^2 F_A I_d \Delta f = 1.442 \times 10^{-14} \text{ A}^2 \quad (5.24)$$

จากสมการที่ (5.24) ค่าสัญญาณรบกวนกระแสมีดมีค่าเท่ากับ $1.442 \times 10^{-14} \text{ A}^2$ ต่อมาคำนวณค่าสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสไอจากสมการที่ (3.18) ได้ดังนี้

$$\langle \sigma_{\text{r-sp}}^2 \rangle = 4R^2 M^4 F_A^2 P_r S_{\text{sp}} \Delta f = 1.135 \times 10^{-13} \text{ A}^2 \quad (5.25)$$

จากสมการที่ (5.25) ค่าสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสไอมีค่าเท่ากับ $1.135 \times 10^{-13} \text{ A}^2$ และสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสไอและสัญญาณเอเอสไอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.20) ดังต่อไปนี้

$$\langle \sigma_{\text{sp-sp}}^2 \rangle = 4R^2 M^4 F_A^2 S_{\text{sp}}^2 \Delta v_{\text{opt}} \Delta f = 1.884 \times 10^{-17} \text{ A}^2 \quad (5.26)$$

แบนด์วิดท์ทางแสงสามารถคำนวณได้จากช่วงของความยาวคลื่นแสงที่ตัวขยายอิตีเอฟเอสามารถขยายได้มีค่าเท่ากับ 30 nm โดยแปลงจากหน่วย nm เป็น Hz ได้ตั้งสมการที่ (5.27)

$$\Delta v_{\text{opt}} = \frac{c}{|\lambda^2|} \Delta \lambda = 3.8222 \times 10^{12} \text{ Hz} \quad (5.27)$$

จากสมการที่ (5.27) แบนด์วิดท์ทางแสงมีค่าเท่ากับ $3.8222 \times 10^{12} \text{ Hz}$ สามารถคำนวณสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสไอและสัญญาณเอเอสไอจากสมการที่ (5.26) ได้เท่ากับ $1.884 \times 10^{-17} \text{ A}^2$ ทั้งนี้จากสมการที่ (5.14) จะได้ว่ากระแสโฟโตมีค่าเท่ากับ $1.8148 \times 10^{-10} \text{ A}^2$

จากสมการที่ (3.32) อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนสามารถคำนวณจากสมการ (5.2), (5.14), (5.23), (5.24), (5.25) และ (5.26) โดยนำมาแทนค่าจะได้ดังต่อไปนี้

$$\text{SNR}_{\text{ASE}} = \frac{\langle I_p^2 \rangle}{\langle \sigma_{s_ASE}^2 \rangle + \langle \sigma_{d_ASE}^2 \rangle + \langle \sigma_{s-sp}^2 \rangle + \langle \sigma_{sp-sp}^2 \rangle + \langle \sigma_T^2 \rangle} = 176.3119 \quad (5.28)$$

จากสมการที่ (5.28) สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนได้เท่ากับ 176.3119 และแฟคเตอร์ Q สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.23) ดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\text{SNR}} = 6.6391 \quad (5.29)$$

จากสมการ (5.29) ค่าแฟคเตอร์ Q เท่ากับ 6.6391 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราความผิดพลาดจากสมการ (3.22) ดังต่อไปนี้

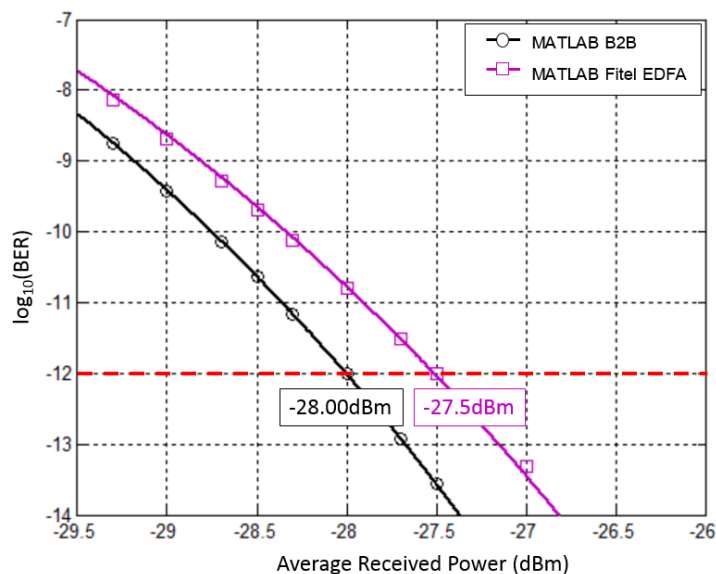
$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = 1.5778 \times 10^{-11} \quad (5.30)$$

จากสมการที่ (5.30) ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเท่ากับ 1.5778×10^{-11} โดยสามารถหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สัมพันธ์กับกำลังรับในกรณีตัวขยายอดีเอฟเอได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีตัวขยายอดีเอฟเอจากการคำนวณ

กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต	กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต
-27	4.81E-14	-29.5	1.68E-08
-27.3	3.03E-13	-29.7	3.68E-08
-27.5	9.84E-13	-30	1.13E-07
-27.7	3.07E-12	-30.5	6.38E-07
-28	1.58E-11	-31	3.02E-06
-28.3	7.45E-11	-31.5	1.22E-05
-28.5	2.00E-10	-32	4.28E-05
-28.7	5.20E-10	-32.5	1.31E-04
-29	2.03E-09	-33	0.00035483
-29.3	7.39E-09		

นอกจากนี้เมื่อนำกราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณของกรณีวนซ้ำกลับและกรณีตัวขยายอดีเอฟเอมาวางตลงบนกราฟเดียวกัน จะได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอ

จากรูปที่ 5.7 เส้นกราฟวงกลมคือกรณีวนซ้ำกลับจะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่าเส้นกราฟสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งเป็นกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอ เมื่อเปรียบเทียบกราฟกรณีที่มาจากการทดลองพบว่ามีความโน้มเอียงเหมือนกันคือเส้นกราฟจะเลื่อนไปทางด้านขวาและมีอัตราความผิดพลาดบิตที่สูงกว่าเนื่องมาจากผลของสัญญาณรบกวนเอเอสไอที่เกิดจากตัวขยายอีดีเอฟเอ

5.2.4 กรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้

กรณีที่ใช้ตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ มีการคำนวณที่เหมือนกันกับกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอ แต่แตกต่างกันที่กำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสไอที่อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 4.26 จะได้เส้นตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงของสเปกตรัมแสงเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มีค่าเท่ากับ -62 dBm หรือ 6.3096×10^{-10} W และมีความละเอียดแบนด์วิดท์ของเครื่องวัดเช่นเดียวกับกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอเท่ากับ 0.02 nm [38] สามารถคำนวณกำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสไอที่อ่านได้จากกราฟ ดังสมการที่ (5.31)

$$P_{\text{read}} = 10^{\frac{-62}{10}} \times 10^{-3} = 6.3096 \times 10^{-10} \text{ W} \quad (5.31)$$

ทั้งนี้ยังมีความแตกต่างกันที่แบนด์วิดท์ทางแสง ซึ่งกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอมีช่วงความยาวคลื่นแสงที่สามารถขยายสัญญาณได้ 30 nm แต่เมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้หลังตัวขยายอีดีเอฟเอ จะทำให้ช่วงความยาวคลื่นแสงลดลงเท่ากับค่าความกว้างสเปกตรัมแสงตามแผ่นข้อมูลของตัวกรองสัญญาณแสงของแต่ละตัว ในที่นี้จะพิจารณาตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่าน

ความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมแสงเท่ากับ 1 nm [11] ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.32)

$$\Delta v_{\text{opt}} = \frac{c}{|\lambda^2|} \Delta \lambda = 1.2741 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (5.32)$$

จากสมการ (5.32) ค่าแบนด์วิดท์ทางแสงมีค่าเท่ากับ 1.2741×10^{11} Hz เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีและค่ากำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสอีได้ดังสมการที่ (5.33) และ (5.34)

$$S_{\text{sp}} = \frac{P_{\text{read}}}{\text{ResBW}} \times \text{AF} = 2.6533 \times 10^{-23} \text{ W/Hz} \quad (5.33)$$

จากสมการที่ (5.33) ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี มีค่าเท่ากับ 2.6533×10^{-23} W/Hz

$$P_{\text{sp}} = S_{\text{sp}} \times \Delta v_{\text{opt}} = 3.3804 \times 10^{-12} \text{ W} \quad (5.34)$$

จากสมการที่ (5.34) กำลังของสัญญาณรบกวนเอเอสอี มีค่าเท่ากับ 3.3804×10^{-12} W ทั้งนี้ยังคำนวณสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้ดังสมการที่ (5.35) ถึง (5.38)

$$\langle \sigma_{\text{s_ASE}}^2 \rangle = 2qM^2 F_A (R(P_r + P_{\text{sp}})) \Delta f = 7.7702 \times 10^{-13} \text{ A}^2 \quad (5.35)$$

จากสมการที่ (5.35) สัญญาณรบกวนควอนตัมมีค่าเท่ากับ 7.7702×10^{-13} A² ต่อมาคำนวณค่าสัญญาณรบกวนกระแสมีดจากสมการที่ (3.17) ได้ดังนี้

$$\langle \sigma_{\text{d_ASE}}^2 \rangle = 2qM^2 F_A I_d \Delta f = 1.442 \times 10^{-14} \text{ A}^2 \quad (5.36)$$

จากสมการที่ (5.36) ค่าสัญญาณรบกวนกระแสมีดมีค่าเท่ากับ 1.442×10^{-14} A² ต่อมาคำนวณค่าสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอีจากสมการที่ (3.18) ได้ดังนี้

$$\langle \sigma_{\text{s-sp}}^2 \rangle = 4R^2 M^4 F_A^2 P_r S_{\text{sp}} \Delta f = 4.375 \times 10^{-14} \text{ A}^2 \quad (5.37)$$

จากสมการที่ (5.37) ค่าสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณเอเอสอีมีค่าเท่ากับ 4.375×10^{-14} A² และสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีและสัญญาณเอเอสอีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.20) ดังต่อไปนี้

$$\langle \sigma_{\text{sp-sp}}^2 \rangle = 4R^2 M^4 F_A^2 S_{\text{sp}}^2 \Delta v_{\text{opt}} \Delta f = 9.3315 \times 10^{-20} \text{ A}^2 \quad (5.38)$$

จากสมการที่ (5.38) สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีและสัญญาณเอเอสอีมีค่าเท่ากับ 9.3315×10^{-20} A² ทั้งนี้จากสมการที่ (5.14) จะได้ว่ากระแสโฟโตมีค่าเท่ากับ 1.8148×10^{-10} A²

จากสมการที่ (3.32) อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนสามารถคำนวณจากสมการ (5.2), (5.14), (5.35), (5.36), (5.37) และ (5.38) โดยนำมาแทนค่าได้ดังต่อไปนี้

$$\text{SNR}_{\text{ASE}} = \frac{\langle I_p^2 \rangle}{\langle \sigma_{s_{\text{ASE}}}^2 \rangle + \langle \sigma_{d_{\text{ASE}}}^2 \rangle + \langle \sigma_{s_{\text{sp-sp}}}^2 \rangle + \langle \sigma_{\text{sp-sp}}^2 \rangle + \langle \sigma_T^2 \rangle} = 189.1557 \quad (5.39)$$

จากสมการที่ (5.39) สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนได้เท่ากับ 189.1557 และแฟคเตอร์ Q สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.23) ดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\text{SNR}} = 6.8767 \quad (5.40)$$

จากสมการ (5.40) ค่าแฟคเตอร์ Q มีค่าเท่ากับ 6.8767 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราความผิดพลาดจากสมการ (3.22) ดังต่อไปนี้

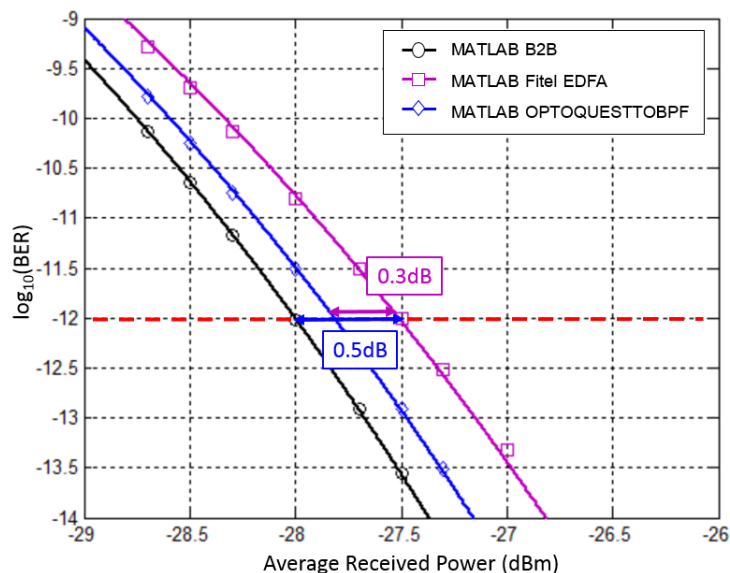
$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = 3.0629 \times 10^{-12} \quad (5.41)$$

จากสมการที่ (5.41) ค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเท่ากับ 3.0629×10^{-12} โดยสามารถหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่สัมพันธ์กับกำลังรับในกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ซึ่งกว้าง 1 nm ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้จากการคำนวณ

กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต	กำลังรับ (dBm)	ค่าอัตราความผิดพลาดบิต
-27	3.46E-15	-29.5	7.72E-09
-27.3	3.08E-14	-29.7	1.83E-08
-27.5	1.23E-13	-30	6.24E-08
-27.7	4.63E-13	-30.5	4.04E-07
-28	3.06E-12	-31	2.13E-06
-28.3	1.81E-11	-31.5	9.40E-06
-28.5	5.55E-11	-32	3.51E-05
-28.7	1.62E-10	-32.5	1.13E-04
-29	7.49E-10	-33	0.000317
-29.3	3.13E-09		

นอกจากนี้เมื่อนำกราฟค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการคำนวณของกรณีวนซ้ำกลับ กรณีตัวขยายอีดีเอฟเอ และกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มาวาดกราฟเดียวกัน จะได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้

จากรูปที่ 5.8 เส้นกราฟวงกลมคือกรณีวนซ้ำกลับจะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่าเส้นกราฟสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอและเส้นกราฟสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนเป็นกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่วัดจากการทดลองจะพบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันคือเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเข้าไปแล้ว ทำให้เส้นกราฟจากกรณีตัวขยายอีดีเอฟเอเลื่อนมาทางซ้ายซึ่งหมายความว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตปรับดีขึ้น เนื่องจากการลดสัญญาณรบกวนเอเอสอีจากตัวขยายอีดีเอฟเอ โดยกรณีของตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มีอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดลองเนื่องจากโปรไฟล์สเปกตรัมแสงของตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ไม่มีความเป็นอูทมคติ เส้นกราฟจะคดโค้งบ้างดังรูปที่ 4.27 (b)

จากการคำนวณในกรณีตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ จะได้ว่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีผลทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าค่าแบนด์วิดท์ทางแสง

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสง (Optical Access Network) ซึ่งพัฒนาแนวคิดมาจากโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบพาสซีฟ (Passive Optical Network, PON) โดยส่งสัญญาณที่อัตราบิตข้อมูลเท่ากับ 9.95328 Gb/s ตามมาตรฐาน XG-PON ITU-T G.987 [2] จุดประสงค์หลักของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบพาสซีฟคือส่งที่ระยะทางไกลและมีจำนวนผู้รับบริการมากในโครงข่าย เพราะฉะนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพัฒนาโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบพาสซีฟ แต่ส่งข้อมูลเฉพาะขาลง (Downstream) ที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 1550 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงสำหรับการกระจายภาพเคเบิลทีวี (Broadcast CATV) ตามมาตรฐาน ITU-T G.983.3 [24] และเนื่องจากข้อจำกัดของตัวรับส่งสัญญาณแสงเชิงพาดิซัยยังไม่มีมีความยาวคลื่นแสงตามมาตรฐาน XG-PON อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้จะแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอ (Erbium Doped-Fiber Amplifier) เข้าไปในโครงข่ายเพื่อเพิ่มงบกำลัง ทำให้ส่งได้ระยะทางไกลมากขึ้นและมีจำนวนผู้รับบริการมากขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากตัวขยายอีดีเอฟเอเป็นอุปกรณ์แบบแอคทีฟ เพราะฉะนั้นจะเรียกเป็นโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงแทนโครงข่ายแบบพาสซีฟ

จากการคำนวณงบกำลังภายในโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวที่มีระยะทางไกล 62 Km และจำนวนผู้รับบริการมากถึง 256 ผู้รับบริการ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียแทรกภายในตัวแยกแสง (Optical Splitter) อย่างมาก และค่ากำลังแสงสูญเสียทั้งหมดมีค่ามากกว่างบกำลัง แต่เมื่อแทรกตัวขยายอีดีเอฟเอด้วยอัตราการขยายเท่ากับ 24 dB ทำให้งบกำลังภายในโครงข่ายเพิ่มมากขึ้นและมีค่ามากกว่ากำลังสูญเสียทั้งหมด จึงสามารถส่งสัญญาณภายใต้ข้อจำกัดของงบกำลังได้ ทั้งนี้ยังพิจารณาควบคู่กับช่วงเวลาขาขึ้นเมื่อส่งระยะทางไกลจะทำให้เกิดปัญหาโครมาติกดิสเพอร์ชันส่งผลให้สัญญาณพัลส์เกิดการถ่างออกและเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference, ISI) กับสัญญาณที่อยู่ติดกัน จากการคำนวณในกรณีของสัญญาณข้อมูลแบบ Non-Return-to-Zero (NRZ) จะได้เวลาขาขึ้นของระบบเท่ากับ 69.71 ps ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 70 % ของ 1 คาบบิต เพราะฉะนั้นสามารถส่งสัญญาณได้ภายใต้ข้อจำกัดของงบเวลาขาขึ้น

นอกจากนี้ยังพิจารณาค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆ ได้แก่ กรณีที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) ที่แตกต่างกัน เมื่อค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันที่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 15.17 dB จากตัวส่งสัญญาณแสงแบบมัทค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Modulation Transmitter, MZM Transmitter) ทำให้มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่

ดีกว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันต่ำกว่าเท่ากับ 8.69 dB จากตัวส่งสัญญาณแสงแบบมอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation Laser, EML) เมื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและการทดลองจะได้ว่ากราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กรณีที่ใช้ตัวส่งสัญญาณแสง 2 ชนิดที่กล่าวข้างต้น ทดลองผลกระทบจากโครมาติกดิสเพอร์ชันและสัญญาณรบกวนเอเอสอี ซึ่ง 2 ปัจจัยนี้ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตสูงขึ้นทั้ง 2 ตัวส่งสัญญาณแสง และเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจะได้ว่ากราฟทั้ง 2 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กรณีแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ 2 ชนิด ซึ่งมีค่าความกว้างสเปกตรัมที่แตกต่างกันคือ 0.25 nm และ 1 nm โดยเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะได้ว่าเมื่อตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้มีค่าความกว้างสเปกตรัมแสงที่แคบกว่า จะทำให้ลดสัญญาณรบกวนเอเอสอีจากตัวขยายอิตีเอฟเอได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตของตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ที่มีความกว้างสเปกตรัมกว้างกว่า เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจะได้ว่าเมื่อแทรกตัวกรองสัญญาณเฉพาะย่านความถี่แสงแบบปรับได้ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตดีขึ้นและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Spectral Density of Spontaneous-Emission Noise) จะส่งผลต่ออัตราความผิดพลาดบิตมากกว่าแบนด์วิดท์ทางแสง (Optical Bandwidth)

สรุปได้ว่าจากที่กล่าวมาข้างต้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประกอบโครงข่ายเข้าถึงข้อมูลแสงที่อัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s ด้วยเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 62 Km และมีจำนวนผู้รับบริการ 256 ผู้รับบริการได้ โดยวิเคราะห์ผลการทดลองและวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตเป็นหลัก ทั้งนี้ยังวิเคราะห์จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB วาดกราฟเปรียบเทียบอีกด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการวิจัยตามมาตรฐานของ XG-PON [2] โดยใช้ความยาวคลื่นแสงขาลง (Downstream Wavelength) เท่ากับ 1577 nm และความยาวคลื่นแสงขาขึ้น (Upstream Wavelength) เท่ากับ 1270 nm ตามมาตรฐาน และมีการพัฒนาให้ส่งได้ระยะทางไกลและมีจำนวนผู้รับบริการจำนวนมาก โดยใช้ตัวขยายแสงที่สามารถขยายแสงได้ในช่วง O-Band และ L-Band ตามความยาวคลื่นแสงขาลงและขาขึ้นตามลำดับตามมาตรฐานดังกล่าว

รายการอ้างอิง

- [1] G. Keiser, *Optical Fiber Communication*. Singapore: McGraw-Hill, 2010.
- [2] ITU Telecommunications Standardization, "ITU-T G.987, 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms " in ed, 2012.
- [3] Terrabit Networks. *SP-XF-10G-150-080-Dx Transceiver Datasheet*. Available: www.terrabitnet.com
- [4] Sumitomo. *Phase Modulator Integrated Intensity Modulator T-MPXH1.5-10 Datasheet*. Available: <http://www.sumitomocorp.co.jp/english/>
- [5] OKI. *Photodetector OD9245N Datasheet*. Available: <http://www.oki.com/>
- [6] Hangzhou Huatai Optical Tech. *PLC Splitter Datasheet*. Available: <http://cncatvworld.en.made-in-china.com>
- [7] Fujikura. *Optical Splitter Datasheet*. Available: <http://www.fujikura.com/>
- [8] JDSU. *mEDFA-A1 Datasheet*. Available: www.jdsu.com
- [9] Fitel. *ErFA11023 EDFA Datasheet*. Available: http://www.fitel.com/index_f.htm
- [10] JDSU. *mTBF-A1 Datasheet*. Available: www.jdsu.com
- [11] Optoquest. *Tunable Band Pass Filter Datasheet*. Available: <http://www.optoquest.co.jp/en>
- [12] IEEE Standard, "IEEE 802.3bk, Physical Layer Specifications and Management Parameters for Extended Ethernet Passive Optical Networks," ed.
- [13] IEEE Standard, " IEEE 802.3av, Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks," ed.
- [14] ITU Telecommunications Standardization, "ITU-T G.983.1, Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)," ed, 2005.
- [15] ITU Telecommunications Standardization, " ITU-T G.984.2, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification," ed.
- [16] ITU Telecommunications Standardization, " ITU-T G.984.6, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension," ed.

- [17] ITU Telecommunications Standardization, "ITU-T G.989.1, 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements," ed.
- [18] Ken-Ichi Suzuki, Youichi Fukada, Takashi Nakanishi, and Y. Nakanishi, "60 km, 256-split Optically-amplified PON Repeated Transmission using 1.24 Gbit/s Upstream and 2.5 Gbit/s Downstream PON system," presented at the ECOC, 2006.
- [19] Ken-Ichi Suzuki, Masamichi Fujiwara, Takeshi Imai, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "128 x 8 split and 60 km Long-reach PON Transmission using 27 dB-gain Hybrid Burst-mode Optical Fiber Amplifier and Commercial Gigabit PON System," presented at the OSA/OFC/NFOEC, 2010.
- [20] Masamichi Fujiwara, Takeshi Imai, Katsuhisa Taguchi, Ken-Ichi Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Field Trial of 79.5-dB Loss Budget, 100-km Reach 10G-EPON System Using ALC Burst-Mode SOAs and EDC," presented at the OSA/OFC/NFOEC, 2012.
- [21] Masaki Noda, Naoki Suzuki, Satoshi Yoshima, Takeshi Suehiro, Susumu Ihara, Satoshi Shirai, *et al.*, "Super-splits 10G-EPON System: 256 ONU Passive Splits with 240 ns Dual-rate Burst-mode 3R Synctime and Bi-directionally Extended 35.9 dB Loss Budgets," presented at the OSA/OFC/NFOEC, 2012.
- [22] Susumu Ihara, Satoshi Yoshima, Takeshi Suehiro, Masaki Noda, Eitetsu Igawa, Masamichi Nogami, *et al.*, "Experimental Demonstration of C-band Burst-mode Transmission for High Power Budget (64-split with 40km distance) TWDM-PON Systems," presented at the ECOC, 2013.
- [23] H. H. Lee, K. C. Reichmann, P. P. Iannone, X. Zhou, and B. Pálsdóttir, "A hybrid-amplified PON with 75-nm downstream band-width, 60 km reach, 1:64 split, and multiple video services," presented at the OSA/OFC/NFOEC, 2007.
- [24] ITU Telecommunications Standardization, "ITU-T G.983.3, A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation," ed, 2001.
- [25] Gennum. *GN2010EA Datasheet*. Available: <http://www.gennum.com/>

- [26] Timbercon. *High-Frequency XFP Host Test Board (HTB) Datasheet*. Available: <http://www.timbercon.com>
- [27] Optoquest. *Polarization Controller Datasheet*. Available: <http://www.optoquest.co.jp/en/>
- [28] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*. Canada: Wiley-Interscience, 2002.
- [29] JDSU. *mVOA-A2 Datasheet* Available: www.jdsu.com
- [30] Optoquest. *Variable Optical Attenuator Datasheet*. Available: <http://www.optoquest.co.jp/en>
- [31] THORLABS. *Power Meter PM320E Datasheet*. Available: <https://www.thorlabs.com/>
- [32] Keysight Technologies. *86105B Digital Communication Analyzer (DCA-J) Datasheet*. Available: <http://www.keysight.com/>
- [33] JDSU. *AP/CD/PMD MTS8000 Datasheet*. Available: www.jdsu.com
- [34] Keysight Technologies. *86140B Optical Spectrum Analyzer (OSA) Datasheet*. Available: <http://www.keysight.com/>
- [35] Advantest. *Q7760 Optical Network Analyzer*. Available: www.advantest.com
- [36] Keysight Technologies. *N4901B Serial BERT 13.5 Gb/s Datasheet*. Available: <http://www.keysight.com/>
- [37] Anritsu. *MP1762A Error Detector*. Available: www.anritsu.com
- [38] Yokogawa. *AQ6370B Optical Spectrum Datasheet*. Available: <http://www.yokogawa.com/>
- [39] Kyosemi. *10Gbps APD-TIA Receiver Datasheet*. Available: <http://www.kyosemi.co.jp/en>



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



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

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



Features

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

0 Channel, 10.3125 Gbps
106 Channels, 10.3125 Gbps
106 Channels, 10.3125 Gbps

Applications

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

Specification

Table 1: Absolute Maximum Ratings*

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

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

Table 2: Recommended Operating Conditions

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

Table 3: Electrical Characteristics

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



For enquiries, please email to sales@terrabit.net

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

Single-Mode XFP 10-300ps
Copyright © 2011 Terrabit Networks Ltd. Ver 7.3



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

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

Module Total Power	P			4.5	W	
Transmitter						
Input Differential Impedance	Rin		100		Ω	3
Differential Data Input Swing	Vin, pp	120	500	820	mV	
Transmit Disable Voltage	Vd	2.0		Vcc	V	
Transmit Enable Voltage	Ven	GND		GND+0.8	V	
Transmit Disable Assert Time				10	us	
Receiver						
Differential Data Output Swing	Vout, pp	340	650	850	mV	3
Data Output Rise Time	Tr			38	PS	
Data Output Fall Time	Tf			38	PS	
LOS Fault	VLOS Fault	Vcc-0.5		VccHOST	V	4
LOS Normal	VLOS Nom	GND		GND+0.5	V	4

Note 3: After internal AC coupling.

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

Table 4: Optical Characteristics

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Transmitter					
Output Opt. Pwr: 9/125 SMF	Pout	0		+4	dBm
Optical Wavelength	λc	1530	1534.5	1565	nm
Spectral Width (-20dB)	Δλ			1	nm
Optical Extinction Ratio	ER	9			dB
Average Launch Power of OFF Transmitter	Poff			-30	dBm
TX Jitter Generation(peak-to-peak)	Txj			0.1	UI
TX Jitter Generation (RMS)	TXjRMS			0.01	UI
Relative Intensity Noise	RIN			-130	dB/Hz
Eye Mask	Compliant with ITU-T G691				
Receiver					
Receiver Sensitivity @9.95Gb/s	Pmin			-24	dBm
Receiver Sensitivity @10.7Gb/s	Pmin			-24	dBm
Maximum Input Power	Pmax				dBm
Optical Center Wavelength	λc	1270	1550	1600	nm
Receiver Reflectance	Rf			-27	dB
LOS De-Assert	LOSD			-30	dBm
LOS Assert	LOSA	-37			dBm
LOS Hysteresis		0.5			dB

Ordering Information

Part Number	Rate	Form Factor	Connector	Distance	Mounting	Environment
SP-XF-10G-150-080-Dx	10Gbps	EML	SMF	80km	LC	Standard
SI-XF-10G-150-080-Dx	10Gbps	EML	SMF	80km	LC	Industrial

Specifications (SP) 10-40199
 Copyright © 2014 Terabit Networks, Inc. All rights reserved.



For enquiries, please email to sales@terabitnet.com

www.terabitnet.com | Tel: 65 6741 3232 | Fax: 65 6748 0670

1*2

Splitter Module Inspection Report

Customer	
Part Description	1*2 Module
Model No.	13471
Serial No.	20130822102002
Connector	SC/APC

Grade	S
Inspected Temp	20°C
Inspected Date	2013-8-22
Inspected By	
Approved By	91

Item	IL (dB) ①			PDL (dB) ①			RL (dB) ②			Directivity (dB) ②		
	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550
Wavelength (nm)	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550
Customer Req.	MAX 4.0			MAX 0.2			≥60			≥60		
Port 1	3.71	3.65	3.82	0.08	0.07	0.08	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 2	3.73	3.67	3.65	0.12	0.06	0.03	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Input	N/A						Pass	Pass	Pass	N/A		
MAX	3.73	3.67	3.82	0.12	0.07	0.08	N/A					
MIN	3.71	3.65	3.65	0.08	0.06	0.03	N/A					
Average	3.72	3.66	3.73	0.10	0.07	0.05	N/A					
Port Uniformity (Spec. ≤0.6dB)	0.02	0.03	0.17	N/A								
Visual Inspection	Input Fiber			Output Fiber			Module Box			Connector		
	Pass			Pass			Pass			Pass		

①Maximum Value

②Minimum Value

Checked By:



1*2

Splitter Module Inspection Report

Customer	
Part Description	1*2 Module
Model No.	13471
Serial No.	20130822102001
Connector	SC/APC

Grade	S
Inspected Temp	20°C
Inspected Date	2013-8-22
Inspected By	
Approved By	91

Item	IL (dB) ①			PDL (dB) ①			RL (dB) ②			Directivity (dB) ②		
	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550
Wavelength (nm)	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550
Customer Req.	MAX 4.0			MAX 0.2			≥60			≥60		
Port 1	3.74	3.74	3.81	0.11	0.09	0.12	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 2	3.64	3.76	3.75	0.09	0.12	0.06	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Input	N/A						Pass	Pass	Pass	N/A		
MAX	3.74	3.76	3.81	0.11	0.12	0.12	N/A					
MIN	3.64	3.74	3.75	0.09	0.09	0.06	N/A					
Average	3.69	3.75	3.78	0.10	0.10	0.09	N/A					
Port Uniformity (Spec. ≤0.6dB)	0.10	0.02	0.05	N/A								
Visual Inspection	Input Fiber			Output Fiber			Module Box			Connector		
	Pass			Pass			Pass			Pass		

①Maximum Value

②Minimum Value

Checked By:

1008

1*16
Splitter Module Inspection Report

Customer	
Part Description	1*16 Module
Model No.	13471
Serial No.	20130822116001
Connector	SC/APC

Grade	S
Inspected Temp	20°C
Inspected Date	2013-8-22
Inspected By	
Approved By	91

Item	IL(dB) ^①			PDL(dB) ^①			RL(dB) ^②			Directivity(dB) ^③		
	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550	1310	1490	1550
Customer Req.	MAX 13.7			MAX 0.3			≥60			≥60		
Port 1	12.90	12.99	12.91	0.09	0.13	0.12	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 2	12.96	12.91	12.77	0.06	0.12	0.07	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 3	12.88	12.99	12.71	0.03	0.05	0.10	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 4	12.91	12.71	12.98	0.07	0.06	0.12	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 5	12.79	12.72	12.93	0.06	0.07	0.11	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 6	12.93	12.74	12.73	0.11	0.04	0.09	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 7	12.74	12.96	12.83	0.13	0.07	0.10	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 8	12.96	12.72	12.80	0.10	0.13	0.11	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 9	12.82	12.73	12.97	0.04	0.12	0.08	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 10	12.71	12.80	12.97	0.09	0.06	0.03	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 11	12.76	12.75	12.73	0.11	0.13	0.08	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 12	12.91	12.81	12.98	0.08	0.06	0.09	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 13	12.94	12.82	12.81	0.07	0.10	0.05	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 14	12.93	12.72	12.82	0.07	0.12	0.04	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 15	12.76	12.92	12.79	0.10	0.06	0.05	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Port 16	12.79	13.00	12.86	0.11	0.07	0.09	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Input	N/A						Pass	Pass	Pass	N/A		
MAX	12.96	12.99	12.98	0.09	0.13	0.12	N/A					
MIN	12.88	12.71	12.71	0.03	0.05	0.07	N/A					
Average	12.91	12.90	12.84	0.06	0.09	0.10	N/A					
Port Uniformity (Spec. ≤0.6dB)	0.07	0.27	0.26	N/A								
Visual Inspection	Input Fiber			Output Fiber			Module Box			Connector		
	Pass			Pass			Pass			Pass		

①Maximum Value

②Minimum Value

Checked By: [1008]



MAP Erbium-Doped Fiber Amplifier (mEDFA-A1)



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

Applications

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

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

Safety Information

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



MAP ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER

2

Specifications

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

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

1. Saturated Output Power measured:

- at 1550 nm at $P_{in} = -4$ dBm
- at 1550 nm at $P_{in} = -4$ dBm (mid-span) for models 1550, 1552, 1554, 1558
- at 1590 nm at $P_{in} = 0$ dBm (mid-span) for models 1590, 1592, 1594

2. Noise figure measured:

- at $P_{in} = -30$ dBm for model 1550
- at $P_{in} = -4$ dBm for models 1552, 1558, 1592
- at $P_{in} = -20$ dBm for models 1554, 1590, 1594

3. Small signal gain measured:

- at $P_{in} = -30$ dBm for model 1550
- at $P_{in} = -20$ dBm for model 1552, 1554, 1590, 1592, 1594
- at $P_{in} = -4$ dBm for model 1558

4. Flatness optimized:

- for $P_{in} = -4$ dBm for model 1558

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



3

Ordering Information

For more information on this or other products and their availability, please contact your local JDSU account manager or JDSU directly at 1-800-498-JDSU (5378) in North America and +800-5378-JDSU worldwide or via e-mail at customer.service@jdsu.com.

Product Code	Description
Base Options (Required, select one)	
MEDFA-A15500	14 dBm C-band, Single Channel, Pre-amp
MEDFA-A15520	17 dBm C-band, Single Channel, Booster
MEDFA-A15522	20 dBm C-band, Single Channel, Booster
MEDFA-A15540	17 dBm C-band, Single Channel, In-Line Booster
MEDFA-A15580	21 dBm C-band, DWDM, Booster
MEDFA-A15900	15 dBm L-band, Single Channel, Pre-amp
MEDFA-A15920	15 dBm L-band, Single Channel, Booster
MEDFA-A15940	20 dBm L-band, Single Channel, In-Line Booster
Connector Options (Required, select one)	
MFP	FC/PC connector type
MFA	FC/APC connector type

UL is a registered trademark of Underwriters Laboratories, inc.





MAP Tunable Filter (mTBF-A1)



Key Features

- -3 dB bandwidth available at 0.11, 0.25, 0.55 nm
- Low polarization dependent loss (PDL) (<0.3 dB)
- Wide wavelength range (1520 to 1630 nm)
- Can be automated when used with MAP-200 LXI-compliant interfaces and IVI drivers

Applications

- Spontaneous emission suppression
- Amplifier characterization (Up to 1 W of input power)
- BER testing
- Tunable laser-based testing

Safety Information

- The MAP Tunable Filter, when installed in a MAP chassis, complies to CE, CSA/UL/IEC61010-1, plus LXI Class C requirements.

The Multiple Application Platform (MAP) Tunable Filter (mTBF-A1) is optimized for the industry-leading JDSU MAP-200 platform. Based on the previous-generation MAP, the MAP-200 is the first photonic layer lab and manufacturing platform that is LAN Extensions for Instrumentation (LXI)-compliant by conforming to the required physical attributes. Ethernet connectivity, and interchangeable virtual instrument (IVI) drivers. The MAP-200 platform is optimized for density and maximum configurability to meet specific application requirements in the smallest possible foot print. The MAP Tunable Filter is a tunable bandpass filter that offers continuous wavelength tuning from 1520 to 1630 nm. It is used for applications requiring low insertion loss (IL), high rejection, narrow bandwidth and wavelength tuning resolution of 0.005 nm. The standard model has a maximum input power of 300 mW and the high power option provides a maximum input power of 1000 mW.

Two options are available:

- the peak search option, used to find the absolute maximum transmission power within the filter's wavelength tuning range or a local maximum transmission power within a user-defined wavelength range
- 10% tap option for power monitoring

MAP Tunable Filter is ideal for applications where the user needs to suppress amplified spontaneous emissions (ASE) or isolate specific wavelengths. These applications include amplifier characterization, bit error rate (BER) testing and optical signal-to-noise ratio (OSNR) measurement.



2

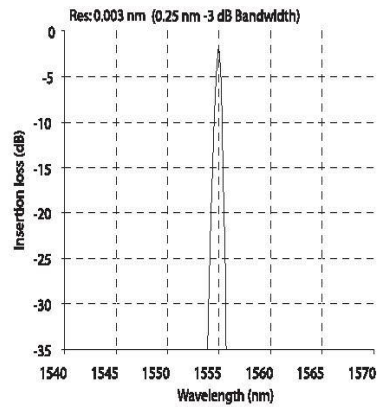


Figure 1. Model "G" filter shape shows the low IL and sharpness of the filter.

The filter makes use of a diffraction grating to separate the input light along several discrete paths. A stepper-motor rotates the grating to transmit the desired wavelength along the output fiber.



Figure 2. mTBF GUI - detailed view

MAP TUNABLE FILTER

3

Specifications

Parameter	Model C	Model G	Model K
Wavelength range	1520 to 1630 nm	1520 to 1630 nm	1520 to 1630 nm
Optical shape	Gaussian	Gaussian	Gaussian
-3 dB bandwidth ¹	0.11 nm ±15%	0.25 nm ±15%	0.55 nm ±15%
3/20 dB ratio ¹	0.40 ±0.05	0.31 ±0.05	0.31 ±0.05
Insertion loss (IL) ²			
1520 to 1610 nm	<6.0 dB	<5.8 dB	<5.8 dB
1610 to 1630 nm	<8.0 dB	<8.0 dB	<8.0 dB
Input power ³	300 mW or 1 W	300 mW or 1 W	300 mW
Return loss (RL) ⁴		>45 dB	
Wavelength resolution		0.005 nm	
Polarization dependent loss (PDL) ⁵ , 1520 to 1630 nm		<0.3 dB	
Tuning speed		>5 nm/s	
Peak to average background noise		>45 dB	
Accuracy		±0.2 nm	
Peak search accuracy		<0.2 dB from output peak power	
Polarization mode dispersion (PMD)		<0.3 ps	
Group delay variation within a -3 dB bandwidth		<5 ps	
Recommended calibration period		1 year	
Operating temperature		10 to 35°C	
Storage temperature		-10 to 60°C	
Dimensions (W x H x D)		8.1 x 13.26 x 37.03 cm (3.19 x 5.22 x 14.58 in)	
Weight		2.3 kg (5.07 lb)	

1. Measured at 1550 nm
2. Add 1.2 dB for tap or peak search option
3. At 23°C ±5°C
4. At selected wavelength
5. Input power is within the range of -20 dBm to +20 dBm. Excludes PDL effect



MAP TUNABLE FILTER
Ordering Information

For more information on this or other products and their availability, please contact your local JDSU account manager or JDSU directly at 1-800-498-JDSU (5378) in North America and +800-5378-JDSU worldwide or via e-mail at customer.service@jdsu.com.

Product Code	Description
Base Options (Required, select one)	
MTBF-A1CS0	Tunable Filter, C Model, 0.11 nm –3 dB Bandwidth, Standard Power (300 mW)
MTBF-A1GS0	Tunable Filter, G Model, 0.25 nm –3 dB Bandwidth, Standard Power (300 mW)
MTBF-A1KS0	Tunable Filter, K Model, 0.55 nm –3 dB Bandwidth, Standard Power (300 mW)
MTBF-A1CH0	Tunable Filter, C Model, 0.11 nm –3 dB Bandwidth, High Power (1 W)
MTBF-A1GH0	Tunable Filter, G Model, 0.25 nm –3 dB Bandwidth, High Power (1 W)
MTBF-A1KH0	Tunable Filter, K Model, 0.55 nm –3 dB Bandwidth, High Power (1 W)
Built-in Options (Optional, select one)	
M10SPLITTER	10% Output Tap option
MPOWMON	Power Monitor option
Connector Options (Required, select one)	
MFP	FC/PC connector type
MFA	FC/APC connector type (M100 only)
MSC	SC/PC connector type
MSU	SC/APC connector type (M100 only)

Test & Measurement Regional Sales

NORTH AMERICA TEL: 1 866 228 3762 FAX: +1 301 353 9216	LATIN AMERICA TEL: +1 954 688 5660 FAX: +1 954 345 4668	ASIA PACIFIC TEL: +852 2892 0990 FAX: +852 2892 0770	EMEA TEL: +49 7121 86 2222 FAX: +49 7121 86 1222	WEBSITE: www.jdsu.com/test
---	--	---	---	--

Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice. © 2011 JDS Uniphase Corporation 30149435 002 1111 MAPTBEDSLAB.TM.AE January 2011



MAP Variable Optical Attenuator (mVOA-A2)



Key Features

- Ultra low insertion loss (<1.0 dB) and outstanding spectral uniformity
- Fastest transition speed in its class (up to 25 dB/s)
- Configurable by user at time of order (fiber type, density, built-in options, high power option)
- Optional built-in power monitor provides comprehensive closed-loop power control settings
- Optional higher power capability can withstand up to 2W input power for single-mode fiber (500 mW for MMF)
- Can be automated when used with MAP-200 LXI-compliant interfaces and IVI drivers

Applications

- Transmitter dispersion testing and eye mask testing
- Receiver sensitivity testing
- EDFA noise figure and gain flatness testing
- Power meter calibration
- Loss simulation

Safety Information

- The MAP Variable Optical Attenuator, when installed in a MAP chassis, complies to CE, CSA/UL/IEC61010-1, plus LXI Class C requirements.

The Multiple Application Platform (MAP) Variable Optical Attenuator (mVOA-A2) is optimized for the industry-leading JDSU MAP-200 platform. Based on the previous-generation Multiple Application Platform (MAP), the MAP-200 is the first photonic layer lab and manufacturing platform that is LAN Extensions for Instrumentation (LXI)-compliant by conforming to the required physical attributes, Ethernet connectivity, and interchangeable virtual instrument (IVI) drivers. The MAP-200 platform is optimized for density and maximum configurability to meet specific application requirements in the smallest possible foot print.

The mVOA-A2 is a stepper motor and filter based attenuator that takes advantage of the latest available technologies to provide the highest performance optical power level control solution with the lowest optical impairments.

- Ultra low insertion loss to minimize loss budget utilization
- High accuracy and high repeatability to reduce measurement uncertainty
- Fast transition speed to reduce testing time
- Flat spectral response to reduce wavelength dependent uncertainty in multi-wavelength applications (CWDM, DWDM)
- Low backreflection to reduce instabilities due to reflected light
- Optional built-in wavelength calibrated power meter reduces the uncertainty by reducing external connections
- High input power capability for EDFA testing and multi-wavelength applications

MAP VARIABLE OPTICAL ATTENUATOR

2

The MAP Variable Optical Attenuator is a hot-pluggable cassette designed for use within the Multiple Application Platform (MAP). The MAP is a general purpose high density test and measurement platform for lab or production environments. Up to 16 independently controlled attenuators can be installed in a single MAP chassis.



Figure 1: Example of insertion loss of the MAP Variable Optical Attenuator with single-mode fiber

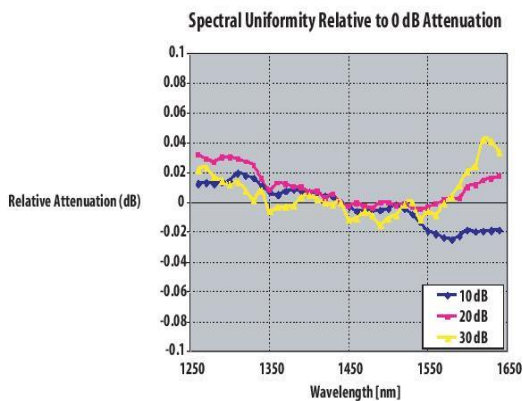


Figure 2: Example of spectral uniformity relative to 0 dB attenuation



MAP VARIABLE OPTICAL ATTENUATOR

3

Optical Specifications

Parameter	Single-mode		Multimode ¹⁰	
	No power control	With power control	No power control	With power control
Insertion loss at minimum attenuation ^{1,2,3}	≤1.0 dB ^{4,5}	≤1.7 dB ⁵	≤1.5 dB ⁴	≤2.2 dB
Maximum input power (Standard power/High power option) ¹³	+23 dBm/+33 dBm		+23 dBm/+27 dBm	
Wavelength range	1260 to 1650 nm		750 to 1350 nm	
Attenuation range ⁴	70 dB		65 dB	
Attenuation flatness ^{8,9}	±0.04 dB from 0 to 30 dB		N/A	
Attenuation slew rate (nominal)	25 dB/s typical		20 dB/s typical	
Attenuation setting resolution	0.001 dB		0.001 dB	
Attenuation accuracy ^{7,5,12,14}	±0.1 dB		±0.1 dB	
Attenuation repeatability, 2σ ^{5,11,12,14}	±0.01 dB		±0.01 dB	
Closed loop output power range (In-line power monitor option)	N/A	-49 to +11 dBm @ 1310/1550 ±15 nm	N/A	-40 to +5 dBm @ 850/1310 ±15 nm
Relative power meter uncertainty ^{3,5,9}	N/A	±0.03 dB	N/A	±0.03 dB
Power setting repeatability ^{5,9}	N/A	±0.015 dB	N/A	±0.015 dB
Power setting resolution	N/A	0.001 dBm	N/A	0.001 dBm
Polarization dependent loss (from 0 to 25 dB) ^{5,6}	<0.08 dB	<0.15 dB	N/A	N/A
Return loss ⁷	>55dB typical APC/45dB typical PC		>30 dB typical (PC connector)	
Shutter isolation	100 dB typical			
Warm up time	30 minutes			
Calibration period	2 years			
Operating temperature	0 to 50°C			
Storage temperature	-30 to 60°C			
Operating humidity (relative, non-condensing)	<90% @ 23°C, <20% @ 50°C			
Dimensions (W x H x D)	4.06 x 13.26 x 37.03 cm (1.6 x 5.22 x 14.58 in)			
Weight	1.1 kg (2.43 lb) single/1.3 kg (2.87 lb) dual			

1. At 1310 ±15 nm and 1550 ±15 nm for SM unit and at 850 ±15 nm and 1300 ±15 nm for MM unit

2. Including one mated pair of connectors

3. At 23 ±5°C

4. Not including tap coupler loss, if installed. Add 0.7 dB for tap coupler option

5. Value shown is for 1550 nm. For 1300/1310 nm the value is typical

6. At 1550 nm ±15 nm only

7. At 1550 nm ±15 nm for SMF, 1300 nm ±15 nm for MMF

8. From 1480 nm to 1640 nm relative to 0 dB attenuation

9. For unpolarized light

10. Multimode specifications are valid for category 4 CPR

11. Constant wavelength, constant temperature, constant state of polarization

12. Measured using low coherence laser source

13. Damage at high optical power due to scratched or poorly cleaned connectors may result. For high power applications, incident light must be applied from "IN" port to "OUT" port. JDSU assumes no responsibility for these user conditions

14. From 0 to 45 dB attenuation



MAP VARIABLE OPTICAL ATTENUATOR

4

Ordering Information

For more information on this or other products and their availability, please contact your local JDSU account manager or JDSU directly at 1-800-498-JDSU (5378) in North America and +800-5378-JDSU worldwide or via e-mail at customer.service@jdsu.com.

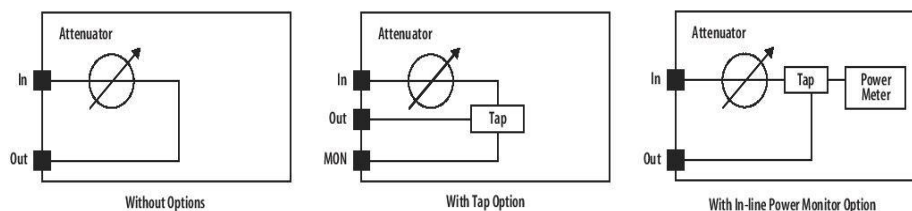
The MAP Variable Optical Attenuators are defined by selecting the required options from the product configurator in the table below. Select one option from each of the three categories (Base, Fiber Type, and Connector Type Options).

Product Code	Description
Base Options (Required, select one)	
MVOA-A2SS0	Single Attenuator, standard power, no built-in options
MVOA-A2SS1	Single Attenuator, standard power, 10/90 splitter for external power monitor
MVOA-A2SSM	Single Attenuator, standard power, with integrated power monitor
MVOA-A2SH0	Single Attenuator, high power, no built-in options
MVOA-A2SH1	Single Attenuator, high power, 10/90 splitter
MVOA-A2SHM	Single Attenuator, high power, with integrated power monitor
MVOA-A2DS0	Dual Attenuator, standard power, no built-in options
MVOA-A2DS1	Dual Attenuator, standard power, 10/90 splitter
MVOA-A2DSM	Dual Attenuator, standard power, with integrated power monitor
MVOA-A2DH0	Dual Attenuator, high power, no built-in options
MVOA-A2DH1	Dual Attenuator, high power, 10/90 splitter
MVOA-A2DHM	Dual Attenuator, high power, with integrated power monitor
Fiber Type Options (Required, select one)	
M100	9/125 fiber type
M101	50/125 fiber type
M102	62.5/125 fiber type
Connector Type Options (Required, select one)	
MFP	FC/PC connector type
MFA	FC/APC connector type
MSC	SC/PC connector type
MSU	SC/APC connector type

Sample Configuration

The following configuration specifies a single attenuator, standard power, no built-in options, 9/125 fiber type, and FC/PC connector type.

MVOA-A2SS0 with options M100 and MFP



UL is a registered trademark of Underwriters Laboratories Inc.

Test & Measurement Regional Sales

NORTH AMERICA	LATIN AMERICA	ASIA PACIFIC	EMEA	www.jdsu.com/test
TOLL FREE: 1 866 228 3762 FAX: +1 301 353 9216	TEL: +1 954 688 5660 FAX: +1 954 345 4668	TEL: +852 2892 0990 FAX: +852 2892 0770	TEL: +49 7121 86 2222 FAX: +49 7121 86 1222	

Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice. © 2010 JDS Uniphase Corporation 30149437 002 0210 MAPVOA2.DS.LAB.TM.AE February 2010



High-Frequency XFP Host Test Board (HTB)

(Includes Integrated RS-232 to I²C Conversion)

High-Frequency XFP Host Test Board (HTB)

1. Overview	3
2. Design Details.....	4
3. Typical XFP HTB Performance.....	5
4. XFP HTB Characteristic Graphs.....	6
5. Application Information	7
6. I/O and Control Description.....	8
7. XFP Signal Definitions	9
8. Schematic	10
9. Operating the GUI Software.....	11-15
10. Notes/Options	16

Ordering & Company Contact Information

Timbercon, Inc.
17387 SW 63rd Avenue
Lake Oswego, Oregon 97035

503.827.8141
800.221.6992
503.228.6747 fax

info@timbercon.com
www.timbercon.com

17387 SW 63rd Avenue • Lake Oswego, OR 97035 • USA
800-221-6992 • 503-827-8141 • 503-228-6747 Fax
www.timbercon.com • info@timbercon.com

Page 2 of 16
Rev. 1, 08/08

1 Overview

The XFP Host Test Board (referenced throughout as XFP HTB) is based on a reference design from Maxim Integrated Products, the HFRD – 18.0. The Timbercon XFP HTB is an XFP host board designed on Rogers 3003 material. The host board can be used to test XFP fiber optic / copper transceiver modules in a clean test environment to more accurately define the modules' performance. The host board also includes an RS-232 to I²C conversion controller to simplify communication and control of the XFP modules from a computer. The XFP HTB is designed to provide an efficient and easy method of programming and testing XFP Electrical Loopbacks and Transceivers.

XFP HTB provides micro-strip transmission lines and SMA connectors for transmitted and received data. Jumpers and LED's are used for monitoring and changing the low-speed digital I/O. Connections to the module board are made through a 30-pin XFP connector.

1.1 Applications

- Custom XFP Loopback and Transceiver Memory Map Programming
- XFP Loopback Testing
- Incoming Inspection of XFP Transceivers
- Analysis and Testing of XFP Transceiver Modules

1.2 Features

- XFP MSA Compliant
- Built with Rogers 3003 PC Board Material
- SMA Connectors for High-Speed data
- Integrated RS-232 to I²C Converter
- Power Supply Port
- Transmit and Receive Ports
- Reference Clock Port
- Operations Software and Schematics Provided

1.3 Benefits

- Allows Customization of XFP Loopback and Transceiver Memory Maps
- Enables Low Loss Testing and Evaluation of XFP Transceiver Modules

2 Design Details

The Timbercon XFP HTB was engineered to test fiber optic / copper transceivers that comply with the XFP Multisource Agreement (MSA). The XFP MSA sets guidelines for the package outline, pin function, I/O interface and other aspects of the module design as well as the host board requirements and interface parameters. By complying with the standard, modules are mechanically and functionally interchangeable.

The XFP HTB is designed to simulate an ideal environment for XFP module testing using Rogers 3003 material and single-ended micro-strip transmission lines. These properties make the host board as electrically transparent as possible, allowing a more accurate assessment of the modules' actual performance. SMA connectors, jumpers and status LEDs are provided to simplify the testing and interfacing of XFP modules.

XFP HTB also integrates an RS-232 to I²C converter to provide software access and control of the modules memory, diagnostic and status information. Additionally, resistor jumpers can be placed to control / monitor the low speed digital control signals (LOS, TX_DISABLE, etc.) with a computer through the RS-232 serial port and the appropriate software.

The XFP HTB RS232 to I²C converter is compatible with software written for the Dallas Semiconductor DS3900 (see section 5.3). The XFP HTB can therefore be used with existing software that is often provided by Dallas Semiconductor for their XFP controller ICs.

Note: The microcontroller is pre-programmed with the firmware listed in the application note.

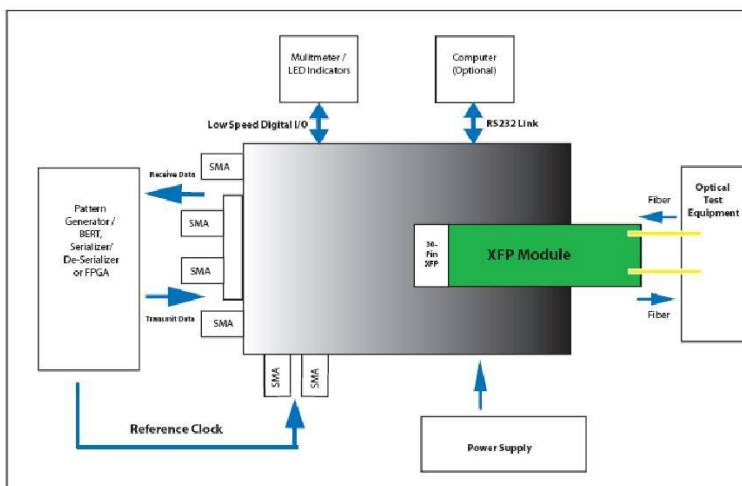


Figure 1. XFP Test Setup (Block Diagram)

3 Typical XFP HTB Performance

(Typical values are measured at $T_A = +25^{\circ}\text{C}$)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	TYP	UNITS
Transmission line Characteristic Impedance	Z	Odd Mode Impedance	50 ±10%	Ω
Differential S11 Magnitude (Notes 1, 2)		f < 7.5GHz (notes 1, 2)	-10	dB
		f < 10GHz (notes 1, 2)	-5	
S21 f_{3dB} Point	f_{3dB}	Notes 1, 3	8	GHz
S21 f_{6dB} Point	f_{6dB}	Notes 1, 3	11	GHz

*Measurement courtesy of Maxim Integrated Products

Note 1: S-Parameter measurements were made using a four-port network analyzer operating in differential mode.

Note 2: Measured at RD- and RD+ or TD+ and TD-SMA connections. Measurement includes the XFP connector with a 50 Ω termination at end of an XFP adaptor test board (Figure 2).

Note 3: S21 measurement path includes the transmission loss added by the adaptor test board.

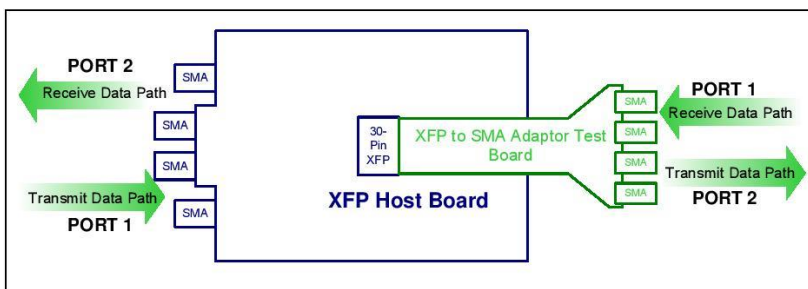


Figure 2. S11 and S21 Measurement Setup

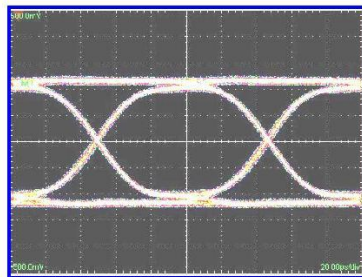
Note: XFP to SMA Adaptor Test Board not supplied with the Timbercon XFP Host Test Board

4 XFP HTB Characteristic Graphs

(Eye diagram was generated using a pattern generator input signal and an XFP to SMA adaptor test board. Tests and measurements performed by Maxim Integrated Products).

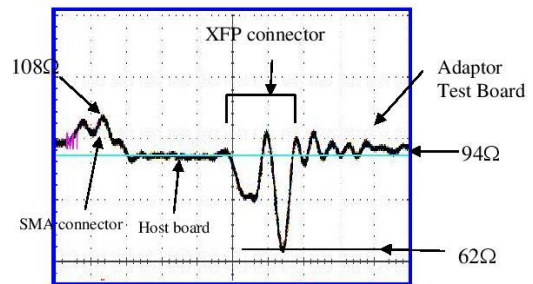
EYE DIAGRAM

(10.3125Gbps, Transmit or Receive Data Path)



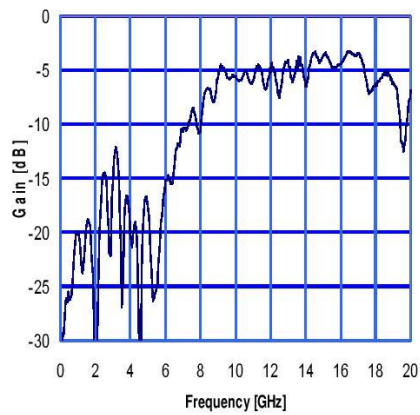
TDR

(Transmit or Receive Data Path)



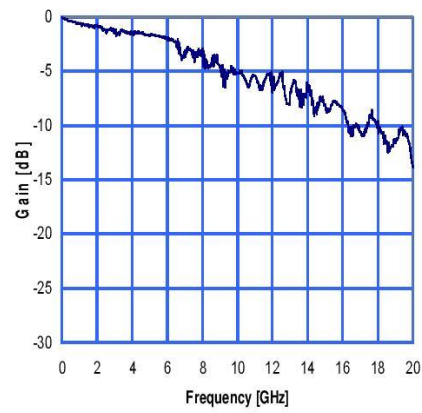
Differential S11 Magnitude

(Measured at Transmit or Receive Data ports)



Differential S21 Magnitude

(Measured on Transmit or Receive Data Path)



5 Application Information

5.1 RS-232 Cable

A RS-232 cable with DB9 male/female connectors is included with the Timbercon XFP HTB to allow connection from the HTB to a standard desktop PC running the programming software.

5.2 Status LEDs

Status LEDs are connected to the low-speed output signals from the XFP module. (RX_LOS, MOD_NR, MOD_ABS, INT_BAR) The LED will illuminate when the signal is asserted. See sections [6.0](#) and [7.0](#) for more information.

5.3 DS3900 Compatibility

The DS3900 is a serial to I²C converter developed by Dallas Semiconductor. The DS3900 is frequently used for programming digital potentiometer and controller ICs that are often used in optical modules. XFP HTB uses similar hardware and the same firmware as the DS3900 for the serial to I²C conversion. Therefore, the same software that was used with the DS3900 to control digital diagnostic ICs can be used with the XFP HTB.

5.4 Supply Filter

The host board is required to provide power supply decoupling for transmitter and receiver supply voltages. The XFP HTB is designed with the recommend filters as per the XFP MSA.

6 I/O and Control Description

Component	NAME	FUNCTION
J2	REFCLK+	Reference Clock Non-Inverted Input, SMA Connector
J3	REFCLK-	Reference Clock Inverted Input, SMA Connector
J4	+5V	+5V Supply. Connect a +5V supply to J6.
J5	GND	Supply Ground
J6	+3.3V	+3.3V Supply. Connect a +3.3V supply to J6.
J7	+1.8V	+1.8V Supply. Connect a +1.8V supply to J7.
J8	-5.2V	-5.2V Supply. Connect the optional -5.2V supply to J8.
J9/J15		Optional V _{CC} SMA connections for 3.3 and 5.2 volts.
J10	RD-	Received Data Inverted Output, SMA Connector
J11	RD+	Received Data Non-Inverted Output, SMA Connector
J12	TD-	Transmitted Data Inverted Input, SMA Connector
J13	TD+	Transmitted Data Non-Inverted Input, SMA Connector
JU1		Placing a shunt on JU1 connects the digital power connections (V _{DDIN}) to the +3.3V supply voltage.
JU2	TX_Dis	Placing a shunt on JU2 enables the XFP module.
JU3	MOD_DESEL	Leaving JU3 open allows the XFP module to respond to the 2-Wire interface commands.
JU4	P_Down/RST	Leaving JU4 open places the module in power down mode. Placing the jumper will cause the device to operate in normal mode.
JP3		Micro programming jumper. For normal operation position 1/8 and 2/7 should be connected. Position 3/6 should be open. Position 4/5 may be open or short.
D1	RX_LOS	LED illuminates when RX_LOS asserts.
D2	MOD_NR	LED illuminates when MOD_NR asserts.
D3	MOD_ABS	LED illuminates when MOD_ABS asserts.
D4	INTERRUPT	LED illuminates when INTERRUPT asserts.
D6		Led blinks when communication is established between the PC and the Host board.
TP5	V _{DDIN}	+3.3V Host Board Digital Supply Voltage. Use JU1 to connect V _{DDIN} to +3.3V supply.
TP7	MOD_ABS	Monitoring Test Point for Mod_ABS signal.
TP8	MOD_NR	Monitoring Test Point for Mod_NR signal.
TP9	RX_LOS	Monitoring Test Point for RX_LOS signal.
TP11	INTERRUPT	Monitoring Test Point for INTERRUPT signal.
TP12	MOD_DESEL	Test point for MOD_DESEL signal
TP14	SDA	Test Point for SDA signal. This test point can be used to apply and read the SDA signal to the module or monitor the SDA signal when using the DS3900.
TP15	SCL	Test Point for SCL signal. This test point can be used to apply the SCL signal to the module or monitor the SCL signal when using the DS3900.

7 XFP Signal Definitions (30-Pin XFP Connector, J1)

I/O Direction assumes the XFP module as the reference. See XFP MSA section 2.3: *Pin Definitions* for the official definitions and more detailed information.

Connector Pin (J1)	I/O Type	NAME	Definition
1, 7, 15, 16, 19, 23, 26, 27, 30		GND	Module Ground
2		VEE5	Optional -5.2V Power Supply Connection
3	LVTTL INPUT	MOD_DESEL	Module De-select. Asserting this pin to a logic zero allows the module to respond to 2-wire serial interface commands.
4	LVTTL OUTPUT	INTERRUPT	INTERRUPT. When asserted, Indicates the presence of an important condition that can be read over the 2-Wire serial interface (Note 1).
5	LVTTL INPUT	TX_Dis	Transmitter Disable. When high the transmitter optical output is disabled.
6		VCC5	+5V Power Supply Connection
8, 9		VCC3	+3.3V Power Supply Connection
10	LVTTL INPUT	SCA	2-Wire Serial Interface Clock Line (Note 1)
11	LVTTL INPUT / OUTPUT	SDA	2-Wire Serial Interface Bi-Directional Data Line (Note 1)
12	LVTTL OUTPUT	MOD_ABS	Module Absent. Indicates that the module is not present. MOD_ABS is connected to GND inside the module (Note 1).
13	LVTTL OUTPUT	MOD_NR	Module Not Ready. Indicates there is an operational fault in the module (Note 1).
14	LVTTL OUTPUT	RX_LOS	Receiver Loss of Signal. Indicates the received optical power has dropped below a defined level. (Note 1)
17	CML OUTPUT	RD-	Inverted Received Data Output
18	CML OUTPUT	RD+	Non-Inverted Received Data Output
20, 22		VCC2	+1.8V Power Supply Connection
21	LVTTL INPUT	P_Down/RST	Power Down. Module is required to limit power consumption to 1.5W or below when this pin is high. 2-Wire serial interface must be functional in power down mode. Reset. The falling edge initiates a complete reset of the XFP module including the serial interface. Equivalent to a power cycle.
24	PECL INPUT	REFCLK+	Non-Inverted Reference Clock Input, AC-coupled on host board.
25	PECL INPUT	REFCLK-	Inverted Reference Clock Input, AC-coupled on host board.
28	CML INPUT	TD-	Inverted Transmitter Data Input
29	CML INPUT	TD+	Non-Inverted Transmitter Data Input

Note 1: Open collector outputs that must be pulled high (+3 to +3.6V) on host board through a 4.7kΩ to 10 kΩ resistor

8 Schematic

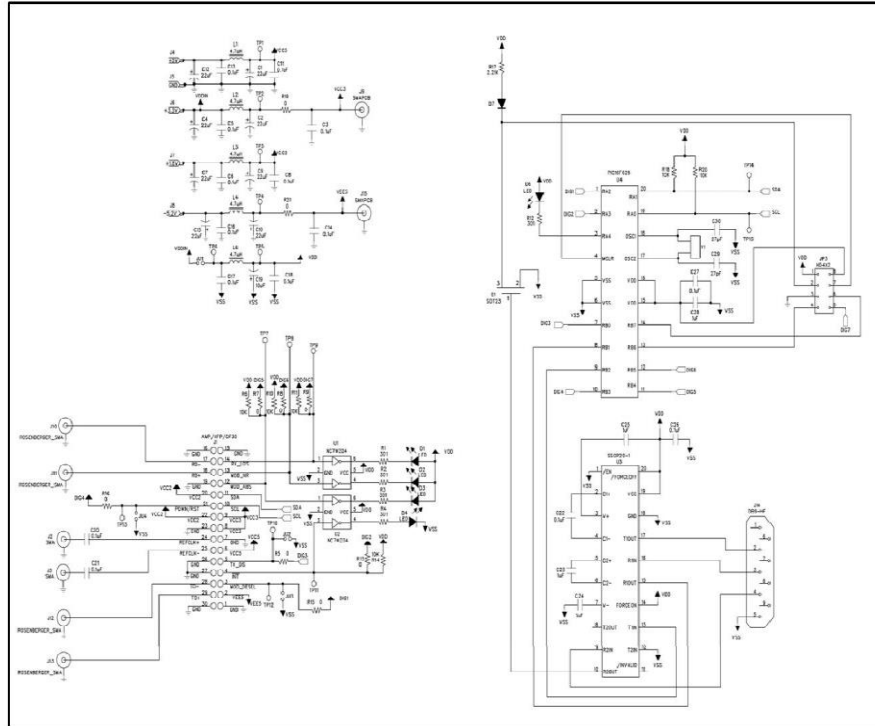


Figure 3. XFP HTB Schema

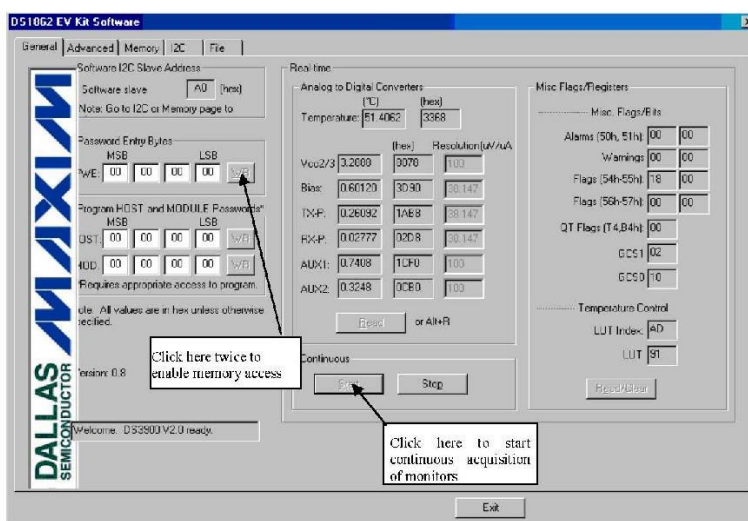
17387 SW 63rd Avenue • Lake Oswego, OR 97035 • USA
800-221-6992 • 503-627-8141 • 503-228-6747 Fax
www.timbercon.com • info@timbercon.com

9 Operating the GUI Software

To facilitate interface with the XFP module and XFP Host Test Board a GUI software package is available. This software permits the user to:

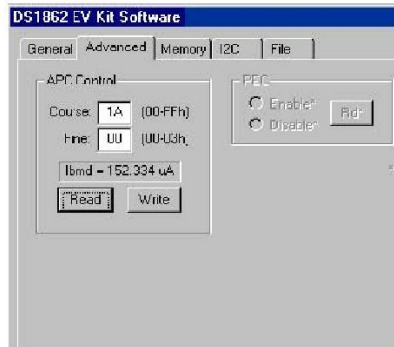
- Read monitor levels
- Access registers
- Modify Look up tables
- Dump or fill memory tables

9.1



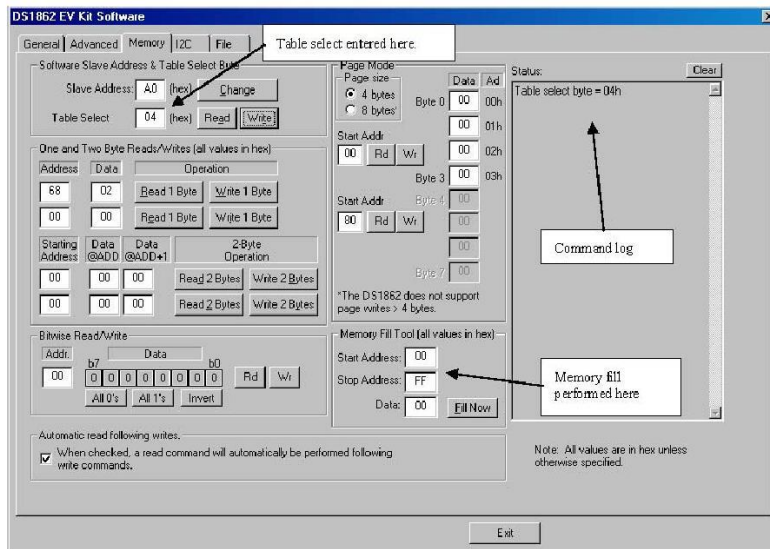
9.1 shows the General page of the GUI. This page is where the password is entered (default is all zeros) and the real time monitoring is accessed. After the module has been powered up, the password WR button should be depressed twice to permit access to the DS 1862 registers. Pressing the start button under the real time display function will then activate a repetitive update of the monitor levels.

9.2



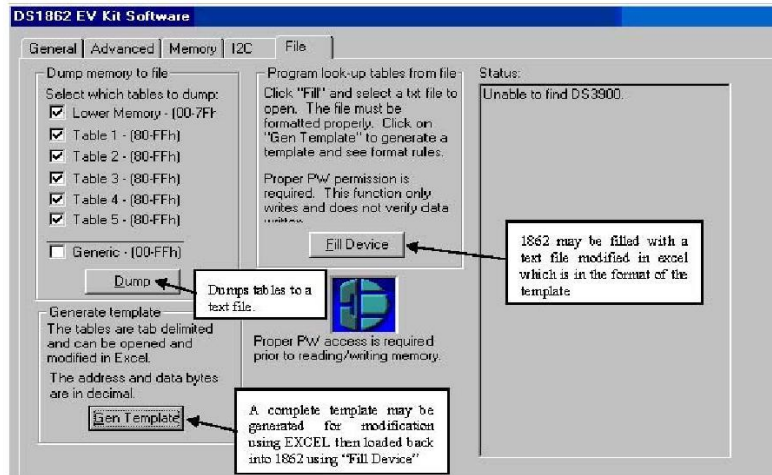
9.2 shows the Advanced page display. This page is used to enter the APC control setting that establishes the average monitor photo current. There is both a coarse and fine setting provided. Values entered here are in hex. The computed monitor current is displayed just below the coarse and fine entry settings.

9.3



9.3 shows the Memory Map page. This page is used for setting and reading the numerous memory locations. The table to be accessed is first entered into the Table Select field. One or two byte read or writes can then be performed. A page mode function is also available. In addition a memory fill may be performed by entering the start and end addresses along with the hex value.

9.5

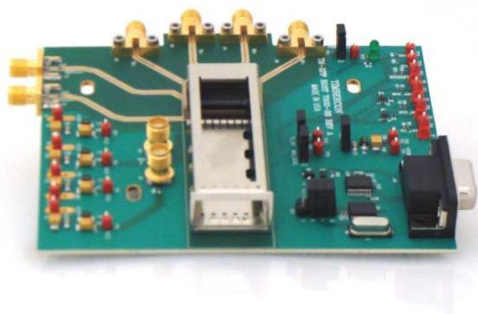


9.5 shows the page used for the reading and writing of complete tables into the DS 1862.

10 Notes/Options

10.1

The Timbercon XFP HTB is available with a housing cage that is soldered to the board to protect the connection of the XFP module to the board. The XFP HTB and optional cage can be ordered with the part number **EL-10-07005-112**.



Timbercon XFP HTB with optional cage

10.2

Timbercon cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Timbercon product. No circuit patent licenses are implied. Timbercon reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

10.3

Original testing and measurements provided by Maxim Integrated Products on original design of the Maxim High Frequency XFP Host Board per HRFD – 18.0 Rev. 3; 04/08 published by Maxim Integrated Products.



Cartridge Series Polarization Controller/Attenuator

Key Features and Appearance

- Cassette module enables easy assembly and offers multi-function
- Applicable to S, C, L-band
- Function as tunable filter
- Function as variable optical attenuator
- Low price



Polarizer



λ /4-plate



λ /2-plate



Variable Attenuator



3-stage-polarization controller (PCUA)



Tunable Filter





**FC receptacle type
PCMB15-S/F**




**SC receptacle type
PCMB15-S/S**

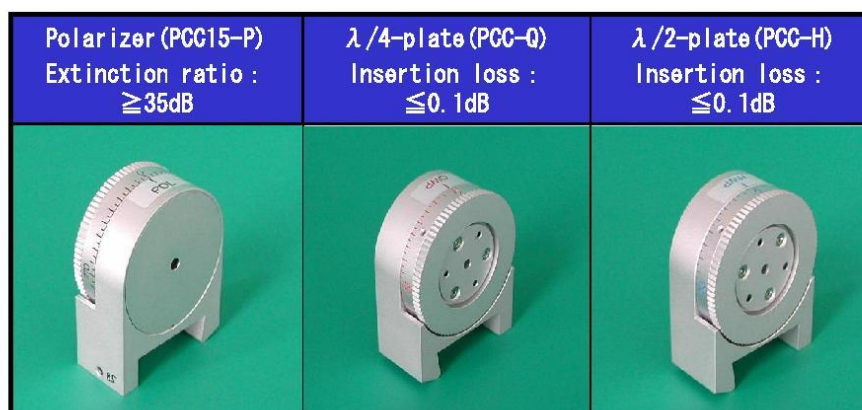
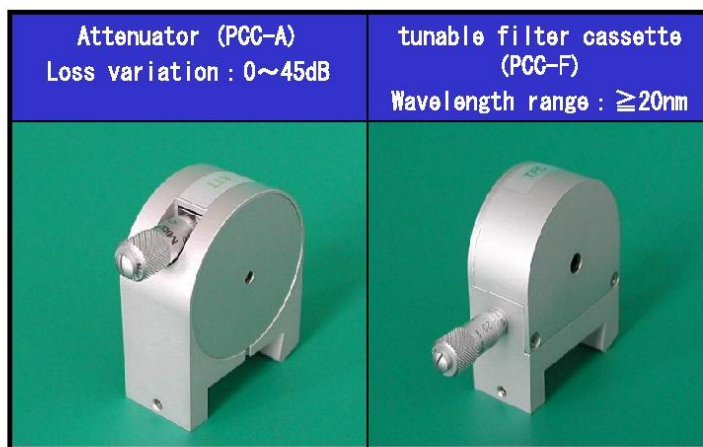
Specifications

3-stage-polarization controller Model : PCUA		
Model : PCUA15-S/F(P/Q/H) Model : PCUA15-D/F(P/Q/H)		
Insertion Loss	$\leq 0.9\text{dB}$	
Loss Variation	$\leq 0.1\text{dB}$	
Extinction ratio	$\geq 35\text{dB}$	
Return Loss	$\geq 50\text{dB}$	
Optical fiber	SMF or DSF (ϕ 3mm cord)	
Optical connector	FC/SPC or SC/SPC	

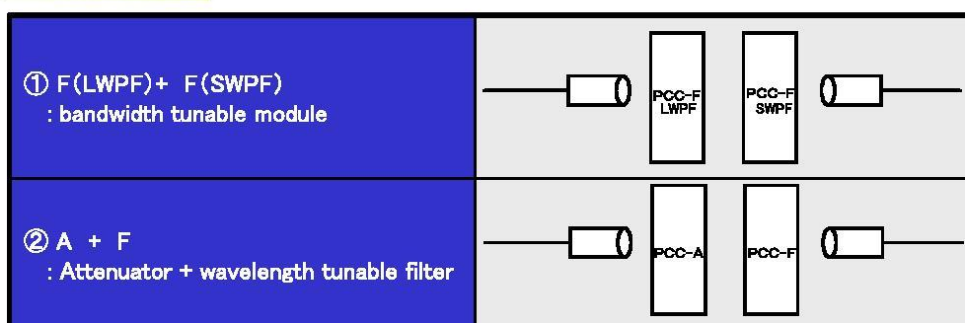
2-stage-polarization controller Model : PCUB		
Model : PCUB15-S/F(Q/H) Model : PCUB15-D/F(Q/H)		
Insertion Loss	$\leq 0.7\text{dB}$	
Loss Variation	$\leq 0.1\text{dB}$	
Return Loss	$\geq 50\text{dB}$	
Optical fiber	SMF or DSF (ϕ 3mm cord)	
Optical connector	FC/SPC or SC/SPC	

Rotating Polarizer Model : PCUC		
Model : PCUC15-S/F(P) Model : PCUC15-D/F(P)		
Insertion Loss	$\leq 0.7\text{dB}$	
Loss Variation	$\leq 0.1\text{dB}$	
Extinction ratio	$\geq 35\text{dB}$	
Return Loss	$\geq 50\text{dB}$	
Optical fiber	SMF or DSF (ϕ 3mm code)	
Optical connector	FC/SPC or SC/SPC	

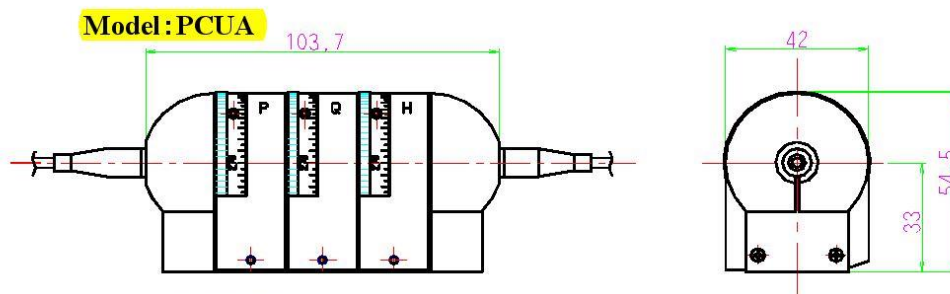
Single-stage Cassette



Example of Cassette Combination



Dimensions



Order Form

- 1) Product: 3-stage-polarization controller Model: PCUA
 Case: Polarizer(PCC15-P)/ $\lambda/4$ -plate(PCC-Q)/ $\lambda/2$ -plate(PCC-H) / Fiber pigtail(PCMA)
 Order form: PCUA 15- S / F (P/Q/H)
 ① ② ③ ④
- 2) Product: 2-stage-polarization controller Model: PCUB
 Case: $\lambda/4$ -plate(PCC-Q)/ $\lambda/2$ -plate(PCC-H)/ Fiber pigtail (PCMA)
 Order form: PCUB 15- S / F (Q / H)
 ① ② ③ ④
- 3) Product: Rotating polarizer module Model: PCUC
 Case: Polarizer(PCC15-P)/ Fiber pigtail(PCMA)
 Order form: PCUC 15 - S / F (P)
 ① ② ③ ④
- 4) Product: Attenuator module Model: PCUD
 Case: Attenuator(PCC-A)/ Fiber pigtail(PCMA)
 Order form: PCUD 15 - S / F - (A)
 ① ② ③ ④

PCMA	Pig-tail type
PCMB	Receptacle type
① Wavelength	15:1550nm 13:1310nm
② Optical fiber	S:SMF D:DSF P:PMF SP:SMF-PMF M:MMF
③ Optical connector	F:FC/SPC S:SC/SPC FA:FC/APC SA:SC/APC
④ Cassette (PCC)	P: Polarizer 5Q: $\lambda/4$ -plate (1.55 μ m) 3Q: $\lambda/4$ -plate (1.31 μ m) 5H: $\lambda/2$ -plate (1.55 μ m) 3H: $\lambda/2$ -plate (1.31 μ m) A:attenuator F:tunable filter cassette

Contact

I-WAVE Corporation.

UT-Building 2F, 2-21-13, Higashi-Ueno, Taito-ku, Tokyo, 110-0015, JAPAN

TEL: +81-3-5812-7401 FAX: +81-3-5812-7402

E-mail: sales@i-waveco.com URL: <http://www.i-waveco.com>

OPQ-EC(06/9-1)

Data Sheet
ErFA 11000 Series
 Mar. 2010



Desktop type Erbium doped fiber amplifier



Applications

- Suitable for lab applications, test-bed experiments
- C-band
- L-band

**Product type: ErFA 11021B,11022,11023,
 11031B,11032,11101,
 11501,11053**

Descriptions

ErFA11000 series are desktop type Erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) for experimental use. ErFA11000 series can be operated with commercial AC power. Various models are lined up according to the output power level, gain and noise figure.

Features

- Both of EDFAs pumped by 1480nm laser diodes and 980nm laser diodes are available.
- Following three operating modes are available
 - (1) ACC : Automatic pump laser current control
Pump laser current is controlled to stabilize pump laser power.
 - (2) APC : Automatic pump power control
Pump power is monitored and controlled using photo diode in pump laser.
 - (3) ALC : Automatic amplified output power control
Output power level of the amplifier is monitored and controlled.
- Pump laser current, pump laser power, temperature of pump laser, input power output power and returned power from output terminal are monitored.
- (Input power monitor and returned power monitor are optional for ErFA11031B)
- Pump laser current, pump laser power, temperature of pump laser and output power are displayed on front panel.
- Maximum output power level is over +24dB.(ErFA11023)
- Maximum gain is over 45dB.(ErFA11023)
- Noise figure is less than 5.5dB.(ErFA11031B and ErFA11032 pumped by 980nm laser diode(s).)

Data Sheet
ErFA 11000 Series

Mar. 2010



Specifications

Table1 Line-up of EDFAs for single channel application pumped by 1480 nm laser diodes

Items	ErFA11021B	ErFA11022	ErFA11023
Signal wavelength	1530 - 1565 nm		
Maximum output power (*1)	> +18 dBm	> +21 dBm	> +24 dBm
Gain (*2)	> 35 dB	> 40 dB	> 45 dB
Gain (*3)	> 30 dB	> 35 dB	> 40 dB
Noise figure (*2)	< 7.5 dB		
Polarization dependence of output power	< 0.15 dB		
Wavelength of pump laser	1480nm band		
Number of pump laser	1 pc.	2 pcs.	4 pcs.
Dimensions (*4)	190 x 270 x 96 mm	190 x 270 x 96 mm	220 x 355 x 116 mm
Optical interfaces	See "Ordering information"		
Optical fiber	SMF (DSF can be supported.) See " Ordering information"		
Power voltage	100-240VAC +4% / -10%		
Operating temperature	0 - 40 deg.C		

Table 2 Line-up of EDFAs for single channel application pumped by 980 nm laser diodes

Items	ErFA11031B	ErFA11032
Signal wavelength	1530 - 1565 nm	
Maximum output power (*1)	> +15 dBm	> +18 dBm
Gain (*3)	> 35 dB	> 40 dB
Noise figure (*3)	< 5.5 dB	
Polarization dependence of output power	< 0.15 dB	
Wavelength of pump laser	980nm band	
Number of pump laser	1 pc.	2 pcs.
Dimensions (*4)	190 x 270 x 96 mm	190 x 270 x 96 mm
Optical interfaces	See "Ordering information"	
Optical fiber	SMF (DSF can be supported.) See " Ordering information"	
Power voltage	100-240VAC +4% / -10%	
Operating temperature	0 - 40 deg.C	

*1 : Input power > 0dBm

*2 : Input power = -35 dBm @ 1530 – 1560 nm

*3 : Input power = -35 dBm @ 1530 – 1565 nm

*4 : Excluding protrusions

Data Sheet
ErFA 11000 Series

Mar. 2010



Table3 C band EDFA for WDM application

Items	ErFA11101	Note
Signal wavelength	1534 - 1563 nm	-
Maximum output power	+22 dBm	Input power=-8 dBm (total)
Gain	30 dB	-
Noise figure	< 6.5 dB	Input power=-8 dBm (total), Output power = +22 dBm
Gain flatness	< 2.0 dBpp (Typ. 1.0 dB)	Input power=-8 dBm (total), Output power = +22 dBm
Polarization dependence of output power	< 0.2 dB	-
Wavelength of pump laser	980nm and 1480nm band	-
Number of pump laser	4 pcs.	-
Dimensions	220 x 355 x 116 mm	Excluding protrusions
Optical interfaces	See "Ordering information"	
Optical fiber	SMF (DSF can be supported.) See " Ordering information"	
Power voltage	100-240VAC +4% / -10%	-
Operating temperature	0 - 40 deg.C	-

Table4 L band EDFA for WDM application

Items	ErFA11501	Note
Signal wavelength	1570 - 1600 nm	-
Maximum output power	+22 dBm	Input power=-8 dBm (total)
Gain	30 dB	-
Noise figure	< 7.0 dB	Input power=-8 dBm (total), Output power = +22 dBm
Gain flatness	< 2.0 dBpp (Typ. 1.0 dB)	Input power=-8 dBm (total), Output power = +22 dBm
Polarization dependence of output power	< 0.2 dB	-
Wavelength of pump laser	1480nm band	-
Number of pump laser	4 pcs.	-
Dimensions	220 x 355 x 116 mm	Excluding protrusions
Optical interfaces	See "Ordering information"	
Optical fiber	SMF (DSF can be supported.) See " Ordering information"	
Power voltage	100-240VAC +4% / -10%	-
Operating temperature	15 - 35 deg.C	-

Table5 EDFAs for single channel application pumped by High power 1480nm laser diodes

Items	ErFA11053	Note
Signal wavelength	1530 - 1565 nm	-
Maximum output power	> +27 dBm	Input power>0 dBm
Gain	> 45 dB	-
Noise figure	< 7.5 dB	Input power=-35 dBm, 45dB Gain
Polarization dependence of output power	< 0.15 dB	-
Wavelength of pump laser	1480nm band	-
Number of pump laser	4 pcs.	-
Dimensions	483 x 434.5 x 149 mm	Excluding protrusions
Optical interfaces	SC super PC	
Optical fiber	SMF (DSF can be supported.) See " Ordering information"	
Power voltage	100-240VAC +10% / -10%	-
Operating temperature	0 - 40 deg.C	-

P10CA750-04

Data Sheet
ErFA 11000 Series

Mar. 2010



General specifications

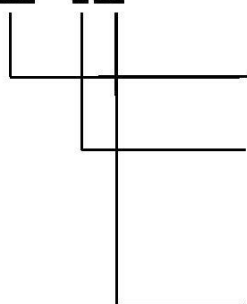
Items	Specification	Note
Pump LD Control mode	ACC / APC / ALC	-
Display	Pump laser current / Pump laser power / Temperature of pump laser / Amplified output power	Displayed on front panel
Alarm	Pump LD current alarm	-
	Temperature alarm	When temperature of pump LD is over 30 deg.C.
	Input power alarm (*1)	When Pin is under -10dBm. (*2)
	Reflection alarm (*1)	When returned power from output terminal is over about +3dBm. (*2)
Shut down	Temperature of pump LD	When temperature of pump LD is over 35 deg.C, pump LDs are automatically shut down.

*1 : Optional for ErFA11031B.

*2 : At the same time, pump LDs are automatically shut down.

Ordering information

ErFA 11XXX - X YY



Model number

See Table1, 2, 3, 4, and 5.

Fiber for optical interfaces

S SMF
D DSF

Optical connector

FS FC super PC
SS SC super PC
SA SC angled PC

High power output

If you need higher output power, we can support up to +27.0 dBm.

This products is not approved for RoHS directive

Data Sheet
ErFA 11000 Series
 Mar. 2010



Safety information



Furukawa Electric reserves the right to improve, enhance and modify the features and specifications of FITEL products without prior notifications.

FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.

Japan
Head Office
 2-2-3, Marunouchi
 Chiyoda-ku
 Tokyo 100-8322, JAPAN
 Tel: + 81-3-3286-3253
 Fax: + 81-3-3286-3978
<http://www.furukawa.co.jp>
 Email: comsales@ho.furukawa.co.jp

North America
OFS Fitel, LLC
 Specialty Photonics Division
 25 Schoolhouse Road
 Somerset, NJ 08873 USA
 Tel: +1-732-748-7402
 Fax: +1-732-748-7436
<http://www.SpecialtyPhotonics.com>
 E-mail: info@SpecialtyPhotonics.com

Europe
Furukawa Electric Europe Ltd.
 3rd Floor, Newcombe House
 43-45 Notting Hill Gate
 London W11 3FE, UK
 Tel: +44-20-7221-6000
 Fax: +44-20-7313-5310
<http://www.furukawa-fitel.co.uk>
 E-mail: sales@furukawa-fitel.co.uk

ASIA
Furukawa Electric Hong Kong Ltd.
 Suite 2606, Shell Tower,
 Times Square, 1 Matheson Street,
 Causeway Bay, Hong Kong
 Tel: 852-2512-8938
 Fax: 852-2512-9717
<http://www.fehk.com.hk/>
 E-mail: guest@fehkc.hk

Phase Modulator Integrated Intensity Modulator for Controlled Chirp

Specifications

Model		T-MPXH1.5-10PD-R-Y-Z	
Operating wavelength		1550±20nm	
Insertion loss		$\leq 6.5\text{dB}$	
ON/OFF extinction ratio		>math>\geq 20\text{dB}</math> (@DC)	
Polarization extinction ratio		>math>\geq 20\text{dB}</math>	
Optical return loss		>math>\geq 30\text{dB}</math>	
Electrical characteristics		IM part	PM part
Optical bandwidth		>math>\geq 8.0\text{GHz}^{*1}</math>	-
Drive Voltage(V π)		$\leq 5\text{V}$ p-p@10Gbps	$\leq 10.5\text{V}$ @10GHz
Parasitic intensity modulation		-	$\leq \pm 1.0\%^{*2}$
Maximum RF input power		+27dBm	+27dBm
Termination		AC coupled	DC coupled
Electrical return loss (S11)		$\leq -10\text{dB}$ (~10GHz)	$\leq -10\text{dB}$ (@10GHz)
α Parameter		≤ 0.2	-
RF connector		K connector (SMA)	
Optical fiber	Input	0.4mm Φ PMF	
	Output	0.4mm Φ PMF or SMF	
Fiber lead length		at each port 1.0~2.0m	
Operating temperature		0~70°C	
PD Characteristics			
Sensitivity		0.04~0.40mA/mW	
Extinction ratio		>math>\geq 10\text{dB}</math>	

*1: 3dB down (1GHz reference)

*2: Vpp=15V@1KHz

Ordering Information

T-MPXH1.5-10PD-R **Y** **Z**

Y: Output Optical fiber ^{*1}	
0.4mm Φ PMF	P
0.4mm Φ SMF	S
Other	O

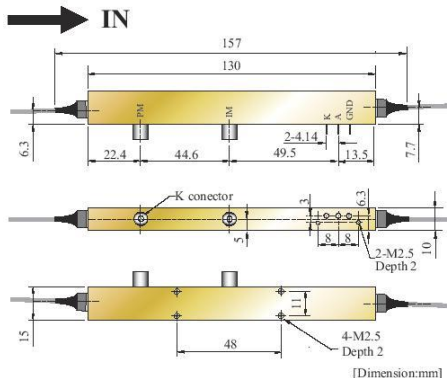
Z: Connector ^{*1,2}	
FC/SPC without key ring	FN
FC/SPC with key ring	FK
SC/SPC	SC
FC/APC (Angled PC)	FA
Other	O

*1: When Other **O** is selected in the above ordering code, please specify your requirements with as much detail as possible.

*2: The Polarization state of input and/or output PMF is slow axis aligned.

2003 JULY

Package size(Hermetically-sealed)



Manufactured by :



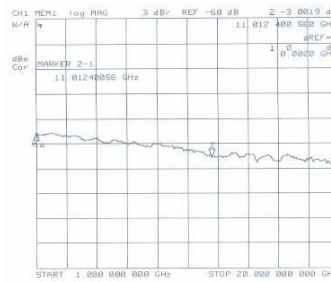
SUMITOMO OSAKA CEMENT CO.,LTD.
OPTOELECTRONICS BUSINESS DIVISION

LN MODULATORS
SUMITOMO OSAKA CEMENT CO.,LTD.

**Phase Modulator Integrated Intensity Modulator
for Controlled Chirp**

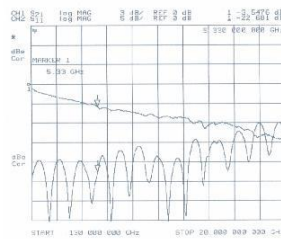
Typical Data

1, Optical Bandwidth of Phase modulator Integrated Intensity modulator

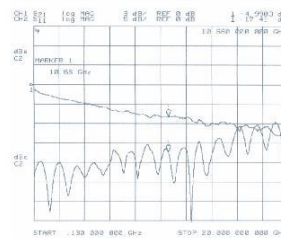


**2, Electrical Characteristics of Phase modulator Integrated Intensity modulator
(S11, S21)**

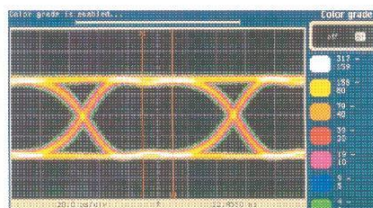
(Intensity Part)



(Phase Part)



3, Eye Pattern of Phase modulator Integrated Intensity modulator



2003 JULY

Manufactured by :
 **SUMITOMO OSAKA CEMENT CO.,LTD.**
 OPTOELECTRONICS BUSINESS DIVISION

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวบุษรา บริบูรณ์ เกิดวันที่ 6 มิถุนายน 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการจำนวน 1 ฉบับ

บทความวิชาการในงานประชุม The 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology จัดขึ้นที่โรงแรมโนโวเทล หัวหิน ชะอำบีช รีสอร์ท แอนด์ สปา (Hotel Novotel Hua Hin Cha Am Beach Resort and Spa) จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย ในวันที่ 24 – 26 มิถุนายน 2558 ในชื่อบทความเรื่อง Computation and Experiments of 10 Gb/s Optical Access Network with Long Reach and A Large Number of Subscribers