

การวางตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของตัวขยายแสงเอสโอเอสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูลอีเทอร์  
เน็ต 100 กิกะบิต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Optimal Placement of SOA Optical Amplifier For 100 Gigabit Ethernet Data Center  
Interconnection



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวางตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของตัวขยายแสงเอสโอเอ สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูลอินเทอร์เน็ต 100 กิกะ บิต
โดย	นายพิชชากรณ์ สวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัครกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุกฤษฏ์ มั่นคง)

พิชชาภรณ์ สวัสดิ์ : การวางตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของตัวขยายแสงเอสโอเอสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูลอีเทอร์เน็ต 100 กิกะบิต. ( Optimal Placement of SOA Optical Amplifier For 100 Gigabit Ethernet Data Center Interconnection) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ดวงฤดี วรรณสุชีพ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวางตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวขยายแสงเอสโอเอเพื่อขยายระยะทางของการสื่อสารทางแสงในการเชื่อมต่อโครงข่ายศูนย์ข้อมูล 100 กิกะบิต โดยใช้ดับเบิลยูดีเอ็ม 4 ช่องสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ (1295 nm, 1300 nm, 1305 nm, และ 1310 nm) ด้วยอัตราการส่งข้อมูลช่องสัญญาณละ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาทีตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 คุณภาพสัญญาณภายหลังการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอจะได้รับผลกระทบจาก (1) การเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์เมื่อกำลังขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าต่ำ, (2) ผลกระทบรูปแบบบิดเมื่อกำลังขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าสูง, และ (3) เอ็กซีจีเอ็มเมือใช้ขยายหลายช่องดับเบิลยูดีเอ็ม เพื่อระบุการวางตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวขยายแสงเอสโอเอ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประเมินคุณภาพสัญญาณจากแผนภาพรูปตาและรูปคลื่นของสัญญาณแสงรวมทั้งกราฟอัตราความผิดพลาดบิตและกราฟช่วงไดนามิก ซึ่งวัดจากการทดลองสองชุดคือ (1) ชุดแรกใช้อุปกรณ์วิจัยเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB ได้ และ (2) ชุดสองใช้อุปกรณ์เชิงพาณิชย์เพื่อป้องกันความรุนแรงของผลกระทบทั้งสามในลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้จริง ผลการทดลองชุดแรกสรุปได้ว่า (1) ผลการทดลองใกล้เคียงกับผลการคำนวณอัตราความผิดพลาดบิตภายใต้ผลกระทบหลักของการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ (2) ผลกระทบรูปแบบบิดไม่สามารถถูกคำนวณได้เนื่องจากเป็นผลกระทบแบบไม่เชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับเวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอและลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียมที่ใช้งาน, และ (3) การวางตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวขยายแสงเอสโอเอคือ 40 กิโลเมตรจากภาคส่ง อีกทั้งผลการทดลองชุดสองสรุปได้ดังนี้ผลกระทบทั้งสามก่อให้เกิดโทษกำลังที่ต่างกันในการส่งข้อมูลอย่างไรก็ตามการวางตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวขยายแสงเอสโอเอในการทดลองนี้คือระยะทาง 40 กิโลเมตรเช่นเดียวกับการทดลองแรก ทำยสุดเมื่อส่งข้อมูลทั้งสี่ช่องสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทางดังกล่าวและตัวขยายแสงเอสโอเอ พบว่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าต่ำกว่า  $10^{-12}$  พิสูจน์การรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170224521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Semiconductor Optical Amplifier (SOA), Data Center Interconnection (DCI), Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) degradation, Data pattern effect, 100G Data Center Interconnection (DCI)

Pichakorn Sawatdee : Optimal Placement of SOA Optical Amplifier For 100 Gigabit Ethernet Data Center Interconnection. Advisor: Assoc. Prof. Duang-rudee Worasuchep, Ph.D.

This thesis shows the optimal placement of a Semiconductor Optical Amplifier (SOA) to extend communication distances between 100G Data Center Interconnection (DCI) that uses 4 Wavelength Division Multiplexing (WDM) channels in O-band wavelength range and has 25.78125 Gbps bitrate per channel according to the 100GBASE-LR4 standard, at range of wavelength in O-band (1295 nm, 1300 nm, 1305 nm, and 1310 nm). The signal quality after inserting SOA is effected by (1) Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) degradation during low SOA's power, (2) Data pattern effect during high SOA's optical input power, and (3) Cross Gain Modulation (XGM) when amplifying multiple WDM channels. To identify optimal placement of SOA, this thesis evaluates the signal quality from eye diagrams and waveforms of optical signal as well as Bit Error Rate (BER) plot and dynamic range plot measured from two sets of experiments: (1) First set uses research equipment to compare between the experimental results and calculations via MATLAB program, and (2) Second set uses commercial equipment to indicate the severity of three effects in actual WDM link. The experimental results of the First set are as follows: (1) the experimental results are similar to calculation results of BER under the dominance of OSNR degradation, (2) Data pattern effect cannot be calculated due to its non-linearity effect, depending on SOA's recovery time and chosen Pseudo Random Binary Sequence (PRBS), and (3) Optimal placement of SOA is 40 km from a transmitter side. The experimental results of the Second set are as follows: Despite the three effects cause different power penalties in data transmission, the optimal placement of SOA in this experiment is at a distance of 40 km, same as in the First set. Finally, when transmitting 4 channels thru 40-km Single Mode Fiber (SMF) and SOA, the BER is lower than  $10^{-12}$ , proving the data transmission according to 100GBASE-LR4 standard.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา มอบความรู้ ประสบการณ์ และความเอาใจใส่ตั้งแต่ข้าพเจ้า ศึกษาในระดับอุดมศึกษา อีกทั้งอาจารย์ยังติดตามดูแลข้าพเจ้าเป็นอย่างดี ทำให้ข้าพเจ้าสามารถปรึกษา การทำวิทยานิพนธ์ได้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบและอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และความเข้าใจในวิชาที่ เปิดสอน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ International Affairs Department ที่มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้มีประสบการณ์ ในการใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Photonic Network System Laboratory ภายใต้ National Institute of Information and Communications Technology of Japan (NICT) ที่ประเทศญี่ปุ่นในโครงการฝึกงานภาคฤดูร้อนเป็นเวลา 3 เดือน

ขอขอบพระคุณ Dr. Naoya Wada ที่สนับสนุนอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ใน ห้องปฏิบัติการวิจัย NICT ที่ประเทศไทย และ Dr. Satoshi Shinada ที่เป็นผู้ดูแลข้าพเจ้าขณะเข้าร่วม โครงการฝึกงานภาคฤดูร้อน

ขอขอบคุณบริษัท IRCT ที่ได้กรุณาให้ข้าพเจ้ายืมใช้เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลใน การสาธิตเพื่อเก็บผลการทดลอง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ได้รับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า ที่สนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาในระดับปริญญาโทมาจนบัดนี้

พิชชาภรณ์ สวัสดิ์

## สารบัญ

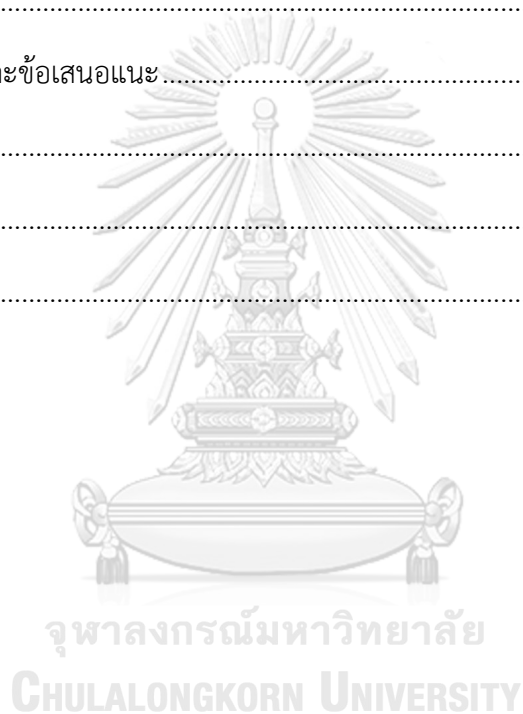
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	3
1.3 วัตถุประสงค์.....	7
1.4 เป้าหมายและขอบเขตงานวิจัย.....	7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในลิงก์.....	9
2.1 อุปกรณ์ภาคส่ง.....	10
2.1.1 เลเซอร์ (Laser).....	11
2.1.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller, PC).....	14
2.1.3 ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM).....	15
2.1.4 มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 (QSFP28 Module) กับบอร์ดประเมินผล.....	16
2.1.5 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA).....	18
2.1.6 ตัวคู่ต่อสามดีบี (3dB-Coupler).....	18

2.2	ตัวกลาง .....	19
2.2.1	เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว (Single Mode Fiber, SMF) .....	19
2.3	อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์ .....	20
2.3.1	ตัวขยายแสงเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA).....	20
2.3.2	ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติ (Auto Polarization Controller, APC) .....	23
2.3.3	ตัวกรองแสงปรับค่าได้ (Tunable Optical Bandpass Filter, TOBF) .....	23
2.4	อุปกรณ์ภาครับ .....	24
2.4.1	ตัวตรวจจับแสง (Photo Detector).....	25
2.4.2	ตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรง (DC Block).....	26
2.4.3	ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Amplifier).....	26
2.5	เครื่องมือวัดทดสอบ (T&M Equipment).....	27
2.5.1	เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT).....	28
2.5.2	เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA) .	29
2.5.3	มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter).....	30
2.5.4	เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA).....	31
บทที่ 3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	32
3.1	สัญญาณรบกวนภายในลิงก์ .....	32
3.1.1	สัญญาณรบกวนความร้อน.....	36
3.1.2	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลัก.....	36
3.1.3	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากกระแสมีด.....	37
3.1.4	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี .....	37
3.1.5	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบิตกั้รหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอี..	38
3.1.6	สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบิตกั้รหว่างสัญญาณเอเอสอีกับตัวมันเอง.....	38
3.1.7	สัญญาณรบกวนจากตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า.....	39



3.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์ .....	39
3.2.1 การคำนวณเอสเอ็นอาร์กรณีติด ๆ กัน.....	41
3.2.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ .....	42
3.3 การคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ.....	42
3.4 การคำนวณอัตราความผิดพลาดบิต .....	43
3.5 การวัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิต และกราฟช่วงไดนามิก.....	47
3.6 สมการบกกำลัง .....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองเบื้องต้น .....	52
4.1 ผลการวัดค่าคุณลักษณะของตัวขยายแสงเอสโอเอ.....	52
4.1.1 ช่วงความยาวคลื่นที่ตัวขยายแสงเอสโอเอทำงาน.....	52
4.1.2 ผลการวัดอัตราขยาย.....	53
4.1.3 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ .....	54
4.1.4 ผลการวัดตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ.....	56
4.1.5 เวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอ.....	58
4.2 การหาค่ากำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ $10^{-12}$ .....	59
4.3 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR4 โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก.....	61
4.3.1 การวิเคราะห์บกกำลังของการทดลองชุดแรก.....	62
4.3.2 ผลการวัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงของการทดลองชุดแรก .....	63
4.3.3 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกระหว่างการคำนวณกับการทดลองของชุดแรก .....	65
4.3.4 เปรียบเทียบผลอัตราความผิดพลาดบิตระหว่างการคำนวณกับการทดลอง.....	66
4.4 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก .....	70
4.4.1 ผลการวัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสง .....	70
4.4.2 ผลการวัดกราฟช่วงไดนามิกของการทดลองชุดแรกที่มีมาตรฐาน 10GBASE-LR.....	71
4.5 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR4 โดยใช้ชุดอุปกรณ์ชุดสอง.....	73

4.5.1 การวิเคราะห์ห้วงกำลังของการทดลองชุดสอง .....	74
4.5.2 ผลการวัดแผนภาพรูปตากรณีติด ๆ กัน.....	75
4.5.3 ผลการวัดรูปคลื่นในการทดลองชุดสอง.....	76
4.5.4 ผลการทดลองวัดกราฟช่วงไดนามิกของการทดลองชุดสอง.....	78
4.5.5 ผลการทดลองวัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิต.....	80
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลวิจัย.....	84
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	87
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	107



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รายชื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	9
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าคุณลักษณะที่ใช้หาความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน .....	33
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและค่าคุณลักษณะใช้หาเอสเอ็นอาร์.....	40
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและค่าคุณลักษณะใช้หาอัตราความผิดพลาดบิต.....	43
ตารางที่ 3.4 ค่าคุณลักษณะที่ใช้กับสมการบังคับกำลังในการทดลอง.....	48
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบงบกำลังในกรณีต่าง ๆ ในการทดลองชุดแรก .....	62
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต $10^{-9}$ จากกรณีใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7, 23, และ 31 ในการส่งสัญญาณแสงหนึ่งและสี่ช่องสัญญาณ.....	69
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบงบกำลังในกรณีต่าง ๆ ในการทดลองชุดสอง.....	75
ตารางที่ 4.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฮิสโตแกรมที่ตำแหน่งตัดสินบิต 1 และ 0 การทดลองชุดสอง.....	77
ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต $10^{-9}$ ในกรณีต่าง ๆ.....	83

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนภาพจำลองระบบสื่อสารทางแสงในบทความ 4x25-Gb/s 40-km PHY at 1310 nm for 100 GbE Using SOA-Based Pre-amplifier [4] .....	3
รูปที่ 1.2 ผลการวัดอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะทางก่อนถึงตัวขยายแสงในบทความ 4x25-Gb/s 40-km PHY at 1310 nm for 100 GbE Using SOA-Based Pre-amplifier [4].....	4
รูปที่ 1.3 แผนภาพจำลองระบบสื่อสารทางแสงในบทความ Nonlinear Dynamics of Semiconductor Optical Amplifiers [5] .....	5
รูปที่ 1.4 (ซ้าย) รูปคลื่นของสัญญาณแสงขาเข้าตัวขยายแสง (กลาง) รูปคลื่นของสัญญาณแสงขาออกตัวขยายแสงที่มีเวลาฟื้นฟูเท่ากับความยาวหนึ่งคาบบิต (ขวา) รูปคลื่นของสัญญาณแสงขาออกตัวขยายแสงที่มีเวลาฟื้นฟูมากกว่าความยาวหนึ่งคาบบิตในบทความ Nonlinear Dynamics of Semiconductor [5].....	5
รูปที่ 1.5 โทษกำลังเมื่อเทียบกับค่าลดทอนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่ระยะห่างช่องสัญญาณ ในบทความ Nonlinear Dynamics of Semiconductor Optical Amplifiers [5].....	6
รูปที่ 2.1 แผนภาพภาคส่งจากอุปกรณ์ชุดแรก .....	11
รูปที่ 2.2 รอยต่อพีเอ็นในสถานะ (ซ้าย) เมื่อไม่ป้อนแรงดันไบแอส และ (ขวา) เมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้า.....	12
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอน (ก) กระบวนการดูดกลืน, (ข) กระบวนการปลดปล่อยแบบเกิดเอง และ (ค) กระบวนการปลดปล่อยแบบกระตุ้น ....	13
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสเปกตรัมของเลเซอร์ดีเอฟบี .....	13
รูปที่ 2.5 เลเซอร์ดีเอฟบีของบริษัท Optilab รุ่น DFB-4-B-1310-CWDM .....	14
รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมโพลาริเซชันของบริษัท Fiberpro รุ่น PC-1200 .....	15
รูปที่ 2.7 ตัวควบคุมโพลาริเซชันของบริษัท Optoquest รุ่น PCUB13-S/S (13Q/13H).....	15
รูปที่ 2.8 ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซทน์เดอร์ของบริษัท SHF รุ่น 46123 A.....	16
รูปที่ 2.9 (ซ้าย) มอดูเลตอร์ส่งควิเอสเอฟพี 28 และ (ขวา) บอร์ดประเมินผล .....	17

รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของมัลติเพล็กซ์เซอร์ และดีมัลติเพล็กซ์เซอร์ ตามข้อกำหนดของ ดับเบิลยูดีเอ็มแลน.....	17
รูปที่ 2.11 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest รุ่น VOAA13-40-S/S.....	18
รูปที่ 2.12 ตัวคู่ต่อสามดีบีของบริษัท Hongking Communication Technology รุ่น wfc-2x2- 1310/1550-2.....	19
รูปที่ 2.13 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว .....	19
รูปที่ 2.14 แผนภาพอุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์.....	20
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของตัวขยายแสงเอสไอชนิดคลื่นเดินทาง .....	21
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราและกำลังแสงขาเข้าของตัวขยายแสงเอสไอเอ [17] .	22
รูปที่ 2.17 ตัวขยายแสงเอสไอเอของบริษัท Optoquest รุ่น ASOA-07-M-SC.....	22
รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติของบริษัท Optoquest รุ่น ALP05C.....	23
รูปที่ 2.19 (ซ้าย) มอดูลสำหรับใส่ตัวกรองแสงปรับค่าได้ และ (ขวา) ตัวกรองแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest รุ่น 10G51 และรุ่น PCC-FH-1317-2.7/2 ตามลำดับ.....	24
รูปที่ 2.20 (บน) แผนภาพการต่ออุปกรณ์ภาครับ และ (ล่าง) รูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าขาออกแต่ละ อุปกรณ์.....	24
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็น.....	25
รูปที่ 2.22 ตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็นของบริษัท Agilent รุ่น HP 83440D .....	25
รูปที่ 2.23 ไบแอสทีของบริษัท AEROFLEX รุ่น 8810EFF1-50 .....	26
รูปที่ 2.24 ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าของบริษัท SHF รุ่น SHF810 .....	27
รูปที่ 2.25 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (ซ้าย) ของบริษัท Anritsu รุ่น MP1800A และ (ขวา) ของบริษัท Optohub รุ่น EV-L001 .....	29
รูปที่ 2.26 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Agilent รุ่น 86100A.....	29
รูปที่ 2.27 (ซ้าย) มอดูลวัดสัญญาณแสง และ (ขวา) มอดูลวัดสัญญาณไฟฟ้า ของบริษัท Agilent รุ่น 86109A และ 83484A ตามลำดับ .....	30
รูปที่ 2.28 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Keysight รุ่น N1092C .....	30

รูปที่ 2.29 มิเตอร์วัดกำลังแสงของบริษัท Thorlabs รุ่น PM320E.....	30
รูปที่ 2.30 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Advantest รุ่น Q8384.....	31
รูปที่ 2.31 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D.....	31
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์และตัวแปรต่าง ๆ (บน) กรณีติด ๆ กัน และ (ล่าง) กรณีแทรกตัว ขยายแสงเอสไอเอ.....	35
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงค่ากำลังแสงของสัญญาณหลัก, เอสเอ็นอาร์ และความแปรปรวน ณ ตำแหน่งหลังตัวตรวจจับแสง และหลังตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข ของบิต 1 บิต 0 ที่เข้าตัวตรวจจับความ ผิดพลาดบิต.....	44
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงวิธีการวัดกราฟช่วงไดนามิกของตัวขยายแสงเอสไอเอ.....	48
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยคุณภาพ กับอัตราความผิดพลาดบิต [34].....	50
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมขาออกของเอสไอเอเมื่อป้อนด้วยกระแสไฟ 200 mA.....	53
รูปที่ 4.2 อัตราขยายของตัวขยายแสงเอสไอเอทั้งสี่ความยาวคลื่นตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4..	54
รูปที่ 4.3 (ซ้าย) สเปกตรัมแสงขาเข้า&ขาออกเอสไอเอ และ (ขวา) กราฟกำลังแสงขาออกเอสไอเอ และกำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสไอเทียบกับกำลังแสงขาเข้าเอสไอเอ.....	54
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโอเอสเอ็นอาร์และกำลังแสงขาเข้าเอสไอเอ.....	55
รูปที่ 4.5 การคำนวณความแปรปรวนสัญญาณรบกวนทั้งหมด.....	57
รูปที่ 4.6 ผลการทดลองเทียบกับการคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสไอเอ.....	57
รูปที่ 4.7 ผลการวัดเวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสไอเอ.....	58
รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ $10^{-12}$ ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสไอเอ.....	60
รูปที่ 4.9 แผนภาพการทดลองชุดแรกที่ประเทศญี่ปุ่น.....	61
รูปที่ 4.10 ผลการวัดค่ากำลังแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ และผลการวัดกำลังสูญเสียแทรกของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองชุดแรก.....	62
รูปที่ 4.11 แผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กัน ในการทดลองมาตรฐาน 100GBASE-LR4 โดยใช้อุปกรณ์ ชุดแรก.....	63

รูปที่ 4.12 แผนภาพรูปตาแสดงผลกระทบรูปแบบข้อมูลเมื่อใช้รูปแบบบิตที่ต่างกัน ด้วยกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอเท่ากับ -5 dBm .....	64
รูปที่ 4.13 ฮิสโตแกรมแผนภาพรูปตาในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอเมื่อจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40.0 กิโลเมตร (ซ้าย) กำลังแสงที่บิต 1 และ (ขวา) ที่บิต 0.....	65
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ในการทดลองของชุดแรก .....	66
รูปที่ 4.15 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จาก (บน) การคำนวณ และ (ล่าง) การทดลอง .....	67
รูปที่ 4.16 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ ที่หนึ่งช่องสัญญาณแสงโดยใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7, 23, และ 31 .....	68
รูปที่ 4.17 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ เมื่อส่งสี่ช่องสัญญาณแสงโดยใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7, 23, และ 31 .....	69
รูปที่ 4.18 แผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กันในการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก .....	70
รูปที่ 4.19 ฮิสโตแกรมแผนภาพรูปตาในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอเมื่อจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40.0 กิโลเมตรที่บิต 1 ในการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR โดยอุปกรณ์ชุดแรก .....	71
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกที่ได้จากการทดลองตามมาตรฐาน 10GBASE-LR4 และ 10GBASE-LR.....	72
รูปที่ 4.21 แผนภาพการทดลองชุดสองที่ประเทศไทย .....	74
รูปที่ 4.22 ผลการวัดค่ากำลังแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ และผลการวัดกำลังสูญเสียแทรกของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองชุดสอง .....	74
รูปที่ 4.23 แผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กันในการทดลองชุดสอง .....	76
รูปที่ 4.24 กราฟช่วงไดนามิกจากการทดลองชุดสองในกรณีลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7 และ 31 .....	79
รูปที่ 4.25 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีติด ๆ กัน และกรณีจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตรก่อนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอ.....	79
รูปที่ 4.26 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 10 กิโลเมตร.....	81

รูปที่ 4.27 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 20 กิโลเมตร..... 81

รูปที่ 4.28 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 30 กิโลเมตร..... 82

รูปที่ 4.29 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 40 กิโลเมตร..... 82





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ศูนย์ข้อมูล (Data Center) คือสถานที่จัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ขององค์กรใดองค์กรหนึ่ง โดยองค์กรเหล่านั้นต่างมีศูนย์ข้อมูลติดตั้งที่สำนักงานใหญ่ (Headquarters Office) และสำนักงานสาขา (Branch Office) กระจายอยู่ตามภูมิภาค การเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูล (Data Center Interconnect, DCI) คือการทำให้สำนักงานต่าง ๆ ในองค์กรสามารถสื่อสารกันได้ด้วยระบบเครือข่าย (Network) ขององค์กร ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูลมีความสำคัญอย่างยิ่งเช่น

- (1) ในการเรียกใช้ข้อมูลขนาดใหญ่จากสำนักงานอื่น
- (2) ใช้ขับเคลื่อนระบบคลาวด์ (Cloud) ในองค์กร
- (3) มีความปลอดภัยในการส่งข้อมูลเนื่องจากเป็นระบบโครงข่ายภายในขององค์กร
- (4) ใช้สำรองข้อมูลในกรณีฉุกเฉิน เช่นเมื่อเกิดภัยพิบัติ

ในปัจจุบันการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูลมีการเติบโตอย่างรวดเร็วในเชิงอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) เนื่องจากรูปแบบของสื่อสิ่งพิมพ์มีขนาดข้อมูลที่ใหญ่ขึ้น อีเทอร์เน็ต 100 กิกะบิต (100 Gigabit Ethernet) จึงถูกพัฒนาขึ้น โดยมีหลายมาตรฐานดังต่อไปนี้

- (1) มาตรฐาน 100GBASE-CR10 (IEEE 802.3ba-2010) [1] เชื่อมต่อผ่านสายทวินแอกซ์เซล (twinaxial balanced) จำนวน 10 ช่องสัญญาณขนานไปพร้อมกัน อัตราการส่งข้อมูลต่อช่องเท่ากับ 10.3125 กิกะบิตต่อวินาที ระยะทางการเชื่อมต่อไม่เกิน 7 เมตรกล่าวคือเป็นการเชื่อมต่อภายในศูนย์ข้อมูลในชั้นเดียวกันเท่านั้น
- (2) มาตรฐาน 100GBASE-SR10 (IEEE 802.3ba-2010) [1] เชื่อมต่อผ่านเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multi Mode Fiber, MMF) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm ส่งข้อมูลด้วยลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็ม (Wavelength Division Multiplexing Link, WDM-Link) จำนวน 10 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลต่อช่องเท่ากับ 10.3125 กิกะบิตต่อวินาที ระยะทางการเชื่อมต่อไม่เกิน 150 เมตรกล่าวคือไม่สามารถเชื่อมต่อออกนอกสำนักงานได้แต่ยังสามารถเชื่อมต่อระหว่างตึกในสำนักงานได้

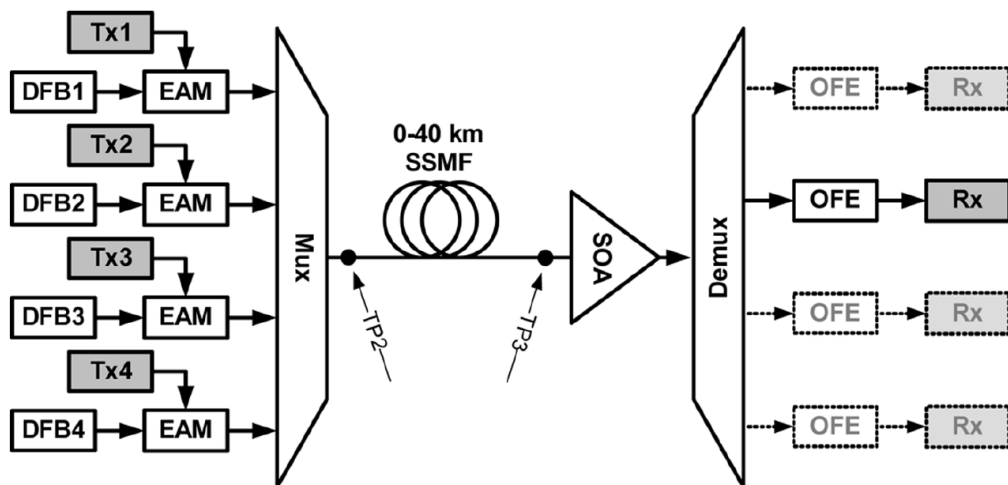
- (3) มาตรฐาน 100GBASE-CR4 (IEEE 802.3bj-2014) [2] มีรูปแบบและระยะทางการเชื่อมต่อ เช่นเดียวกับมาตรฐาน 100GBASE-CR10 แตกต่างที่มาตรฐานนี้ส่งข้อมูลจำนวน 4 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลต่อช่องเท่ากับ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที
- (4) มาตรฐาน 100GBASE-SR4 (IEEE 802.3bm-2015) [3] มีรูปแบบและระยะทางการเชื่อมต่อ เช่นเดียวกับมาตรฐาน 100GBASE-SR10 แตกต่างที่มาตรฐานนี้ส่งข้อมูลจำนวน 4 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลต่อช่องเท่ากับ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที
- (5) มาตรฐาน 100GBASE-LR4 (IEEE 802.3ba-2010) [1] เชื่อมต่อผ่านเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว (Single Mode Fiber, SMF) ที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ (Original Band, O-band) มีความยาวคลื่นได้แก่ 1295 nm, 1300 nm, 1305 nm, และ 1310 nm อัตราการส่งข้อมูลต่อช่อง 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที ระยะทางการเชื่อมต่อ 10 กิโลเมตรกล่าวคือสามารถเชื่อมต่อข้ามไปยังสำนักงานภายนอกได้ แต่หากสำนักงานดังกล่าวอยู่ห่างเกิน 10 กิโลเมตร ทางองค์กรต้องแทรกอุปกรณ์ระหว่างทางได้แก่เราท์เตอร์ (Router) และตัวรับ-ส่งแสง (Optical Transceiver) สองตัวเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณ (Repeater) เพื่อขยายระยะทางการเชื่อมต่อได้
- (6) มาตรฐาน 100GBASE-ER4 (IEEE 802.3ba-2010) [1] มีรูปแบบการเชื่อมต่อเหมือนกับมาตรฐาน 100GBASE-LR4 แต่มีระยะทางการเชื่อมต่อได้ไกลถึง 40 กิโลเมตรกล่าวคือสามารถเชื่อมต่อข้ามไปยังสำนักงานภายนอกที่อยู่ไกลขึ้นได้โดยไม่ต้องแทรกตัวทวนสัญญาณดังมาตรฐาน 100GBASE-LR4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการขยายระยะทางการเชื่อมต่อระหว่างศูนย์ข้อมูลด้วยมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ให้ไกลขึ้นไปเทียบเท่ามาตรฐาน 100GBASE-ER4 กล่าวคือจาก 10 กิโลเมตรไปเป็น 40 กิโลเมตร โดยการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) แทนที่ตัวทวนสัญญาณ ทำให้สามารถปลดเราท์เตอร์หนึ่งเครื่อง และตัวรับ-ส่งแสงสองตัวไปใช้ในศูนย์ข้อมูลอื่นได้ อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอจะถูกกล่าวในหัวข้อ **1.2 การทบทวนวรรณกรรม**

## 1.2 การทบทวนวรรณกรรม

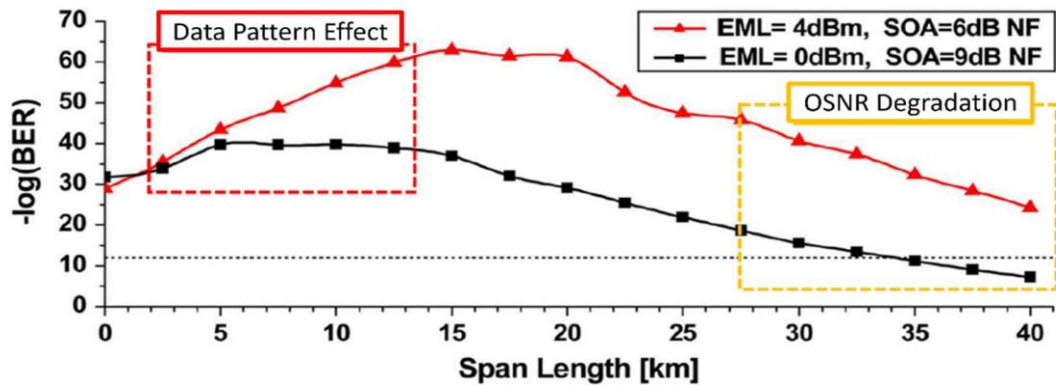
1. ในปี 2008 [4] กลุ่มวิจัย Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM) จากประเทศเม็กซิโกได้จำลองระบบสื่อสารทางแสงที่ช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ 4 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลช่องสัญญาณละ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที โดยระบบสื่อสารทางแสงที่ถูกจำลองมีการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอเป็นตัวขยายหลัง (Preamplifier) ด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW™ ดังรูปที่ 1.1 เพื่อจำลองการขยายระยะทางเชื่อมต่อจาก 10 กิโลเมตรเป็น 40 กิโลเมตร และศึกษาผลกระทบจากระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงกับตัวขยายแสงเอสโอเอ ผลการจำลองสามารถสรุปได้ว่า

- (1) หากเส้นใยแก้วนำแสงก่อนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอมีระยะทาง 0 ถึง 14 กิโลเมตร อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) และคุณภาพสัญญาณจะได้รับผลกระทบหลักจากผลกระทบรูปแบบข้อมูล (Data Pattern Effect) ซึ่งเป็นหนึ่งในผลไม่เชิงเส้น (Non-linearity effect) ดังรูปที่ 1.2
- (2) หากเส้นใยแก้วนำแสงก่อนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอมีระยะทาง 28 ถึง 40 กิโลเมตร อัตราความผิดพลาดบิตและคุณภาพสัญญาณจะได้รับผลกระทบหลักจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR Degradation) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 แผนภาพจำลองระบบสื่อสารทางแสงในบทความ

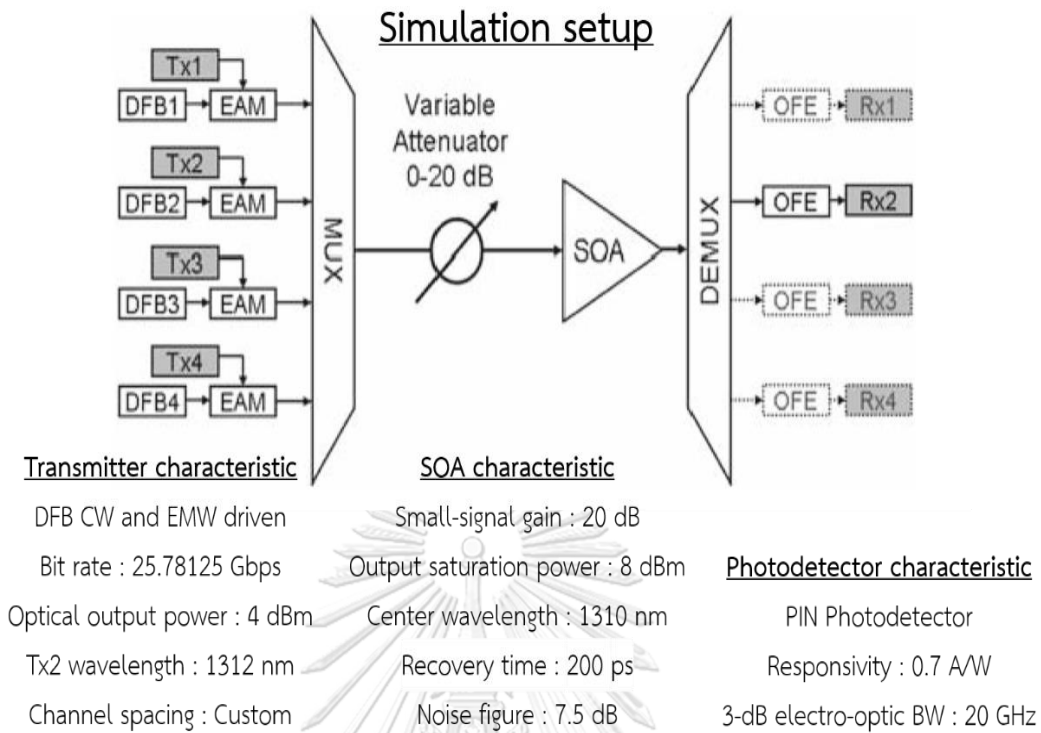
4x25-Gb/s 40-km PHY at 1310 nm for 100 GbE Using SOA-Based Preamplifier [4]



รูปที่ 1.2 ผลการวัดอัตราความผิดพลาดบิตเทียบกับระยะทางก่อนถึงตัวขยายแสงในบทความ 4x25-Gb/s 40-km PHY at 1310 nm for 100 GbE Using SOA-Based Pre-amplifier [4]

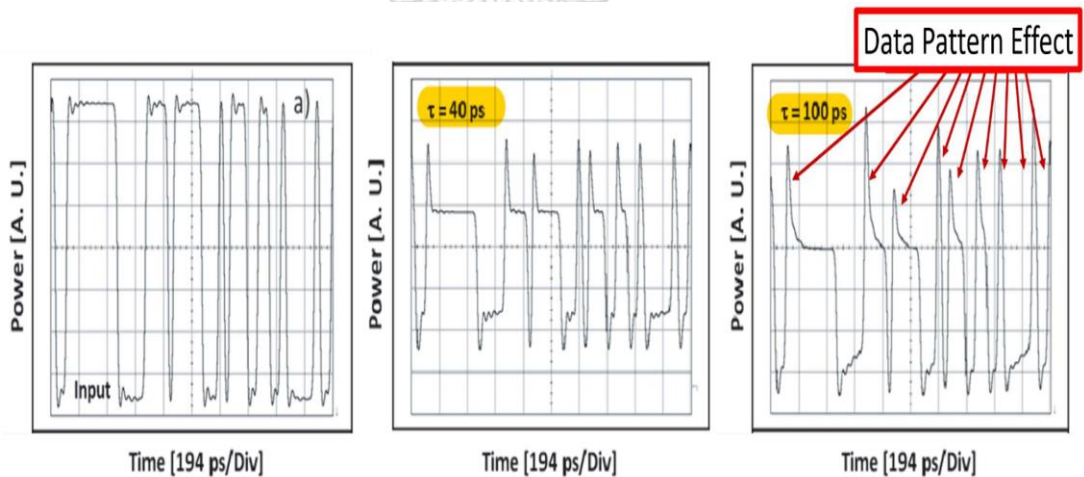
2. ในปี 2012 [5] กลุ่มวิจัย Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM) จากประเทศเม็กซิโกได้ทำการศึกษาปัจจัยความรุนแรงของผลกระทบรูปแบบข้อมูล โดยกลุ่มวิจัยได้ทำการจำลองระบบสื่อสารทางแสงด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW™ ซึ่งมีรูปแบบการทดลองคล้ายคลึงกับบทความที่ 1 ต่างเพียงในบทความนี้เลือกจำลองตัวลดทอนกำลังแสง 0 – 20 dB แทนการจำลองเส้นใยแก้วนำแสง 40 กิโลเมตรดังรูปที่ 1.3 และรูปคลื่นขาเข้าตัวขยายแสงแสดงโดยรูปที่ 1.4 (ซ้าย) จากการศึกษาในบทความนี้พบว่า

- (1) ความรุนแรงของผลกระทบรูปแบบข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าเวลาฟื้นฟู (Recovery time) ของตัวขยายแสงเอสโอเอ และความยาวคาบบิต (Bit Period) โดยผลกระทบรูปแบบข้อมูลจะส่งผลกระทบต่อเมื่อค่าเวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอมากกว่าความยาวคาบบิต โดยรูปที่ 1.4 (กลาง) แสดงรูปคลื่นของสัญญาณแสงที่ได้รับผลกระทบจากผลกระทบรูปแบบข้อมูลเล็กน้อย และ รูปที่ 1.4 (ขวา) แสดงรูปคลื่นของสัญญาณแสงที่ได้รับผลกระทบจากผลกระทบรูปแบบข้อมูลอย่างมาก โดยสามารถสังเกตผลกระทบนี้ได้จากความไม่คงที่ของการแกว่งขึ้น (Overshoot)
- (2) จากการวัดค่าโทษกำลัง (Power Penalty) ที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในรูปที่ 1.5 ความรุนแรงของผลกระทบรูปแบบข้อมูลแปรผันตรงกับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงสูง นอกจากนี้ความรุนแรงของผลของการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์แปรผกผันกับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงต่ำ ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ 1 ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.3 แผนภาพจำลองระบบสื่อสารทางแสงในบทความ

*Nonlinear Dynamics of Semiconductor Optical Amplifiers [5]*

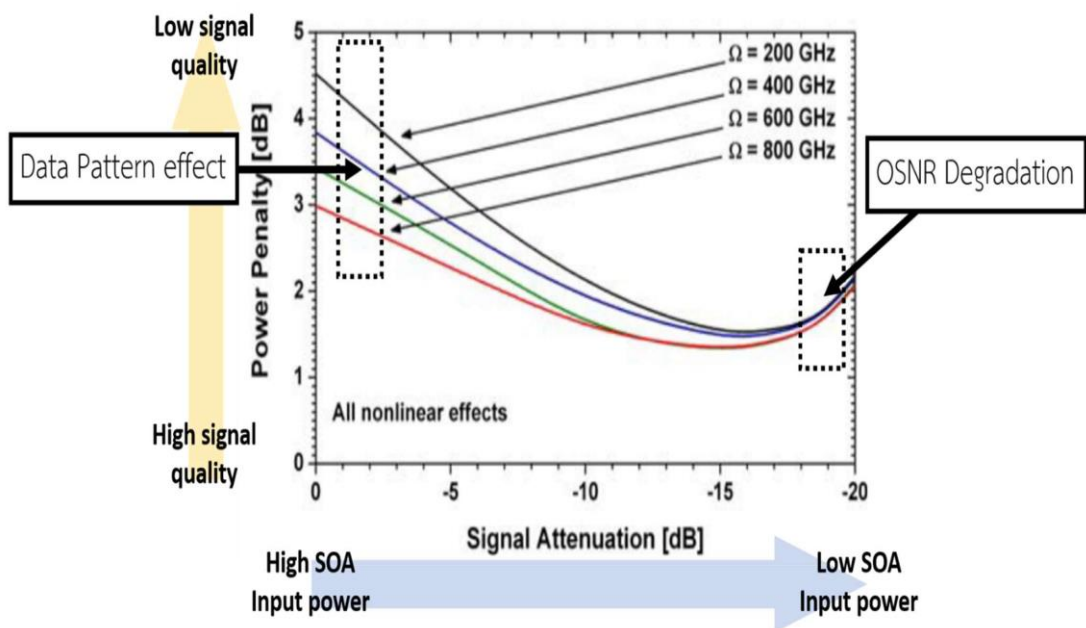


รูปที่ 1.4 (ซ้าย) รูปคลื่นของสัญญาณแสงขาเข้าตัวขยายแสง

(กลาง) รูปคลื่นของสัญญาณแสงขาออกตัวขยายแสงที่มีเวลาฟื้นฟู่เท่ากับความยาวหนึ่งคาบบิต

(ขวา) รูปคลื่นของสัญญาณแสงขาออกตัวขยายแสงที่มีเวลาฟื้นฟู่มากกว่าความยาวหนึ่งคาบบิตใน

บทความ *Nonlinear Dynamics of Semiconductor [5]*



รูปที่ 1.5 โทษกำลังเมื่อเทียบกับค่าลดทอนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่ระยะห่างช่องสัญญาณ  
ในบทความ *Nonlinear Dynamics of Semiconductor Optical Amplifiers* [5]

3. ในปี 2006 [6] กลุ่มวิจัย Groupement d'Intérêt Scientifique Foton Laboratoire RESO จากประเทศฝรั่งเศสได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการส่งสัญญาณถึงกับเบิ้ลยูดีเอ็มผ่านตัวขยายแสงเอสโอเอ โดยกลุ่มวิจัยนี้ได้ทำการขยายระยะทางเชื่อมต่อระบบสื่อสารทางแสงจำนวนสองช่องสัญญาณอัตราส่งข้อมูลช่องสัญญาณละ 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีด้วยตัวขยายแสงเอสโอเอ จากการศึกษาในบทความนี้พบว่าโทษกำลังเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกรณีขยายระยะทางหนึ่งช่องสัญญาณกับสองช่องสัญญาณด้วยตัวขยายแสงเอสโอเอ ผลกระทบดังกล่าวถูกเรียกว่าเอ็กซ์จีเอ็ม (Cross-Gain Modulation, XGM)

จากบทความที่ (1) และ (2) พบว่าการเลือกวางตำแหน่งของตัวขยายแสงมีผลอย่างมากกับคุณภาพสัญญาณ โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอกับผลกระทบรูปแบบข้อมูล และการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์เช่นกัน จากบทความที่ (3) พบว่าการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอในลิงก์กับเบิ้ลยูดีเอ็มจะเกิดเอ็กซ์จีเอ็ม โดยผลกระทบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะเกิดขึ้นในการขยายระยะทางการเชื่อมต่อสื่อสารทางแสงมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. เปรียบเทียบการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอที่มีเวลาฟื้นฟู 60 ps ในมาตรฐาน 10GBASE-LR (ความยาวคาบิตเท่ากับ 100 ps) และมาตรฐาน 100GBASE-LR4 (ความยาวคาบิตเท่ากับ 40 ps)
2. เพื่อหาระยะทางที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอ เมื่อได้รับผลกระทบจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ และผลกระทบรูปแบบข้อมูล

### 1.4 เป้าหมายและขอบเขตงานวิจัย

1. เปรียบเทียบการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอในลิงก์ที่ใช้มาตรฐาน 10GBASE-LR และ 100GBASE-LR4 ด้วยกราฟช่วงไดนามิก
2. วิเคราะห์ผลกระทบเมื่อส่งสัญญาณเข้าตัวขยายแสงด้วยกำลังแสงที่แตกต่างกัน ในการสื่อสารทางแสงตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 เพื่อหาระยะทางที่เหมาะสมด้วยกราฟอัตราความผิดพลาดบิต และกราฟช่วงไดนามิก

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. วัดค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของตัวขยายแสงเอสโอเอได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นที่ทำงาน, อัตราขยาย (Gain), ตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure, NF), โอเอสเอ็นอาร์, และช่วงเวลาฟื้นฟู
3. วัดและวิเคราะห์ระบบสื่อสารทางแสงในกรณีต่าง ๆ ตามมาตรฐาน 10GBASE-LR และ 100GBASE-LR4 ที่ห้องปฏิบัติการ Photonic Network System Laboratory ภายใต้ National Institute of Information and Communication Technology (NICT) สำนักงานใหญ่ โตเกียวประเทศญี่ปุ่น เป็นเวลา 3 เดือน
4. วิเคราะห์ผลการทดลองจากผลการคำนวณค่าสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิตด้วยโปรแกรม MATLAB
5. เปรียบเทียบผลกระทบรูปแบบข้อมูลจากการใช้ตัวขยายแสงเอสโอเอกับระบบสื่อสารทางแสงตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 กับ 10GBASE-LR
6. วิเคราะห์ผลกระทบจากช่องสัญญาณอื่นในลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็มเมื่อขยายสัญญาณด้วยตัวขยายแสงเอสโอเอพร้อมกันทั้งสองช่องสัญญาณตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4

7. ขยายระยะทางการเชื่อมต่อมาตรฐาน 100GBASE-LR4 จาก 10 กิโลเมตร เป็น 40 กิโลเมตร และวิเคราะห์ผลการทดลองดังกล่าวด้วยกราฟอัตราความผิดพลาดบิตและกราฟช่วงไดนามิก

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวัดและวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของตัวขยายแสงเอสโอเอ
2. เรียนรู้การใช้งานโปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์ค่าสัญญาณรบกวน, เอสเอ็นอาร์ (Signal to Noise Ratio, SNR) และอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีต่าง ๆ
3. สามารถวัดและวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณของระบบสื่อสารทางแสงความเร็วสูงมากถึง 100 กิกะบิตต่อวินาที
4. เข้าใจปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบสื่อสารทางแสงเมื่อแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ





## บทที่ 2

### อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในลิงก์

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ทุกชิ้นที่ใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้ 2.1 อุปกรณ์ภาคส่ง, 2.2 ตัวกลาง, 2.3 อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์, 2.4 อุปกรณ์ภาครับ, และ 2.5 เครื่องมือวัดทดสอบ (T&M Equipment) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายชื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

	ชื่ออุปกรณ์	ชื่ออุปกรณ์ในภาษาอังกฤษ และตัวย่อ	หัวข้อ
ภาคส่ง	เลเซอร์	Laser	2.1.1
	ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน	Polarization Controller, PC	2.1.2
	ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์	Mach-Zehnder Modulator, MZM	2.1.3
	มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28	QSFP28 Module	2.1.4
	บอร์ดประเมินผล	Evaluation board	2.1.4
	ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้	Variable Optical Attenuator, VOA	2.1.5
	ตัวคู่ต่อสามดีบี	3dB-Coupler	2.1.6
ตัวกลาง	เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว	Single Mode Fiber, SMF	2.2.1
อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์	ตัวขยายแสงเอสโอเอ	Semiconductor Optical Amplifier, SOA	2.3.1
	ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติ	Auto Polarization Controller, APC	2.3.2
	ตัวกรองแสงปรับค่าได้	Tunable Optical Bandpass Filter, TOBF	2.3.3
ภาครับ	ตัวตรวจจับแสง	Photo detector	2.4.1
	ตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรง	DC Block	2.4.2
	ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	Electrical Amplifier	2.4.3
	มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28	QSFP28 Module	2.1.4
เครื่องมือวัดทดสอบ	เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต	Bit Error Rate Tester, BERT	2.5.1
	เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล	Digital Communication Analyzer, DCA	2.5.2
	มิเตอร์วัดกำลังแสง	Optical Power Meter	2.5.3
	เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง	Optical Spectrum Analyzer, OSA	2.5.4

ทั้งนี้ อุปกรณ์ส่วนหนึ่งเป็นของห้องปฏิบัติการวิจัย Photonic Network System Laboratory ภายใต้ National Institute of Information and Communication Technology (NICT) สำนักงานใหญ่ ณ โตเกียวประเทศญี่ปุ่น ซึ่งข้าพเจ้าไปฝึกงานภาคฤดูร้อนเป็นระยะเวลา 3 เดือนตั้งแต่วันที่ 16 พฤษภาคม 2562 ถึง วันที่ 13 สิงหาคม 2562 และอุปกรณ์อีกส่วนเป็นของห้องปฏิบัติการวิจัย NICT Asia Center อาคารวิศวะฯ 100 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยประเทศไทย อุปกรณ์ทั้งสองชุดใช้ในการทดลองตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ซึ่งจะได้รับการขยายระยะทางจาก 10 กิโลเมตรเป็น 40 กิโลเมตรด้วยการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ มาตรฐานดังกล่าวเป็นการส่งข้อมูลด้วยลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็มทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณ โดยค่าคุณลักษณะในลิงก์มีดังนี้ [1]

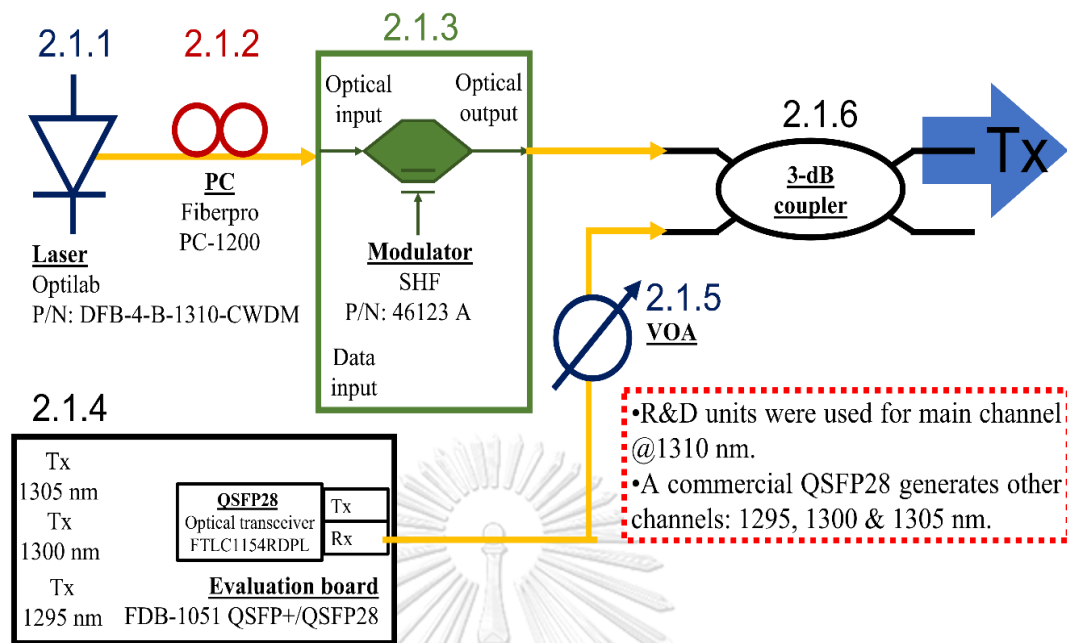
- (1) ส่งข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 1295 nm, 1300 nm, 1305 nm, และ 1310 nm
- (2) อัตราการส่งข้อมูล 25.78125 Gbps ต่อช่องสัญญาณ
- (3) กำลังแสงขาออก (Optical output power) ต่อช่องเท่ากับ -4.3 dBm ถึง 4.5 dBm
- (4) ความไวแสง (Sensitivity) ของตัวรับแสงต่อช่องสัญญาณน้อยกว่า -8.6 dBm

เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในข้อที่ 1 คือการเปรียบเทียบการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอในมาตรฐาน 100GBASE-LR4 และ 10GBASE-LR อุปกรณ์ชุดแรกบางชิ้นสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลลดลงจาก 25.78125 Gbps เป็น 10.3125 Gbps ให้เป็นตามมาตรฐาน 10GBASE-LR ได้ โดยมาตรฐานดังกล่าวมีค่าคุณลักษณะในลิงก์ดังนี้ [7]

- (1) ส่งข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 1310 nm
- (2) อัตราการส่งข้อมูล 10.3125 Gbps ต่อช่องสัญญาณ
- (3) กำลังแสงขาออกต่อช่องเท่ากับ -8.2 dBm ถึง -0.5 dBm
- (4) ความไวแสงของตัวรับแสงต่อช่องสัญญาณน้อยกว่า -14.4 dBm

## 2.1 อุปกรณ์ภาคส่ง

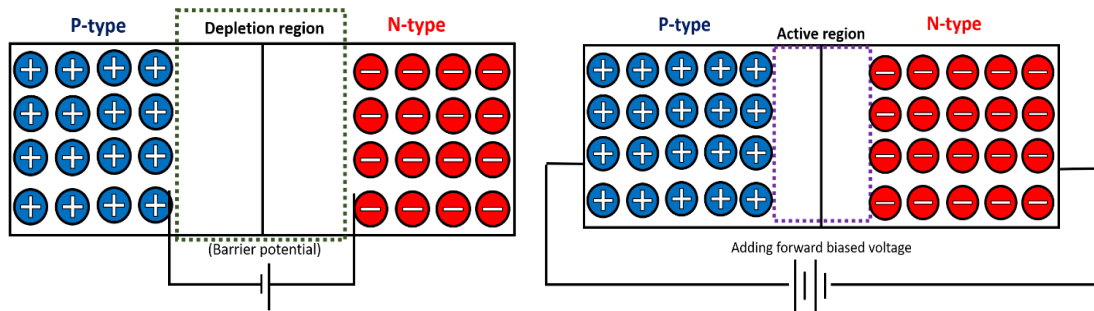
ภาคส่งของลิงก์มีหน้าที่สร้างสัญญาณข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ในกรณีของอุปกรณ์ชุดแรกมีแผนภาพดังรูปที่ 2.1 เพื่อสามารถปรับอัตราการส่งข้อมูลได้ ส่วนอุปกรณ์ชุดที่สองจะใช้เพียงมอดูรับส่งคิวเอสเอฟพี 28 และบอร์ดประเมินผลดังที่อธิบายในหัวข้อ 2.1.4



รูปที่ 2.1 แผนภาพภาคส่งจากอุปกรณ์ชุดแรก

### 2.1.1 เลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง (Light source) โดยประกอบจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด คือ (1) ชนิดพี (Positive, P-type) ซึ่งเกิดจากการเจือสารกึ่งตัวนำด้วยธาตุหมู่ 3 ทำให้เกิดการแจกแจงความหนาแน่นของประจุบวกจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ (2) ชนิดเอ็น (Negative, N-type) ซึ่งเกิดจากการเจือสารกึ่งตัวนำด้วยธาตุหมู่ 5 จึงทำให้เกิดการแจกแจงความหนาแน่นของประจุลบจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อปลูกสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดมาติดกันจะเกิดรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) ส่งผลให้ประจุบวกและลบที่ขอบของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นแผ่กระจายไปยังฝั่งตรงข้ามของกันและกัน จึงเกิดเป็นบริเวณหมดสิ้น (Depletion region) ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่เหลือประจุใด ๆ ให้เคลื่อนที่ไปมาได้ ดังรูปที่ 2.2 (ซ้าย) ต่อมาหากป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้า (Forward biased voltage) กล่าวคือต่อความต่างศักย์ขั้วบวกไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี และขั้วลบไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะส่งผลให้เป็นบริเวณแอ็กทีฟ (Active region) ซึ่งสามารถเปล่งแสงได้ ดังรูปที่ 2.2 (ขวา)



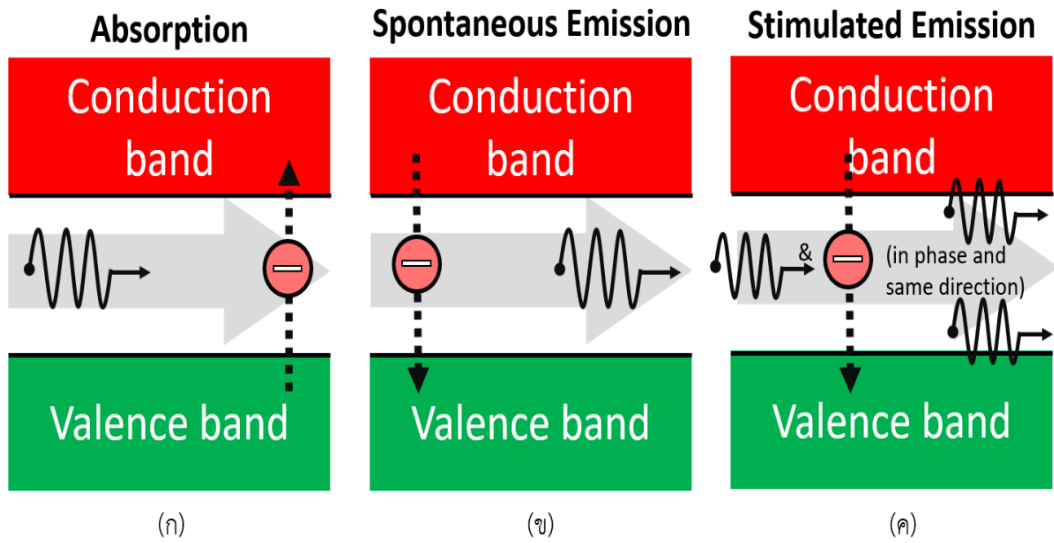
รูปที่ 2.2 รอยต่อพีเอ็นในสถานะ (ซ้าย) เมื่อไม่ป้อนแรงดันไบแอส และ (ขวา) เมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้า

ทั้งนี้บริเวณแฉกทิฟจะมีปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอนในแถบการนำ (Conduction band) กับ แถบวาเลนซ์ (Valence band) โดยมีทั้งหมด 3 กระบวนการดังต่อไปนี้

(1) กระบวนการดูดกลืน (Absorption) คือการกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นไปอยู่ในแถบการนำด้วยโฟตอนที่เข้ามายังบริเวณแฉกทิฟดังรูปที่ 2.3 (ก) โดยกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้ในแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ เช่น แอลอีดี (Light Emitting Diode, LED) และเลเซอร์ แต่ไม่สำคัญว่าในกรณีของตัวตรวจจับแสง กระบวนการนี้สำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงาน

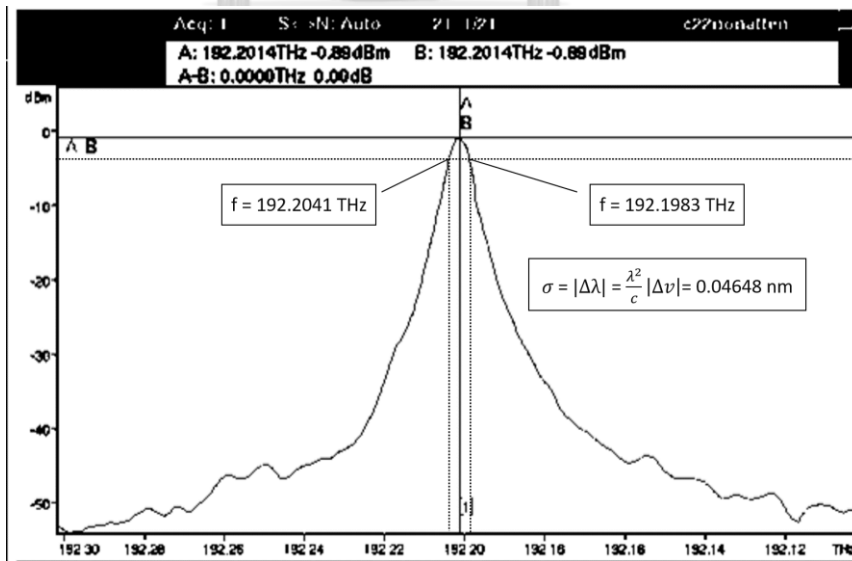
(2) กระบวนการปลดปล่อยแบบเกิดเอง (Spontaneous Emission) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบการนำมีความไม่เสถียร จึงลดระดับพลังงานลงมาอยู่ในแถบวาเลนซ์พร้อมกับปลดปล่อยโฟตอนออกมา ดังรูปที่ 2.4 (ข) ผลลัพธ์คือบริเวณแฉกทิฟจะเปล่งแสงที่มีกำลังแสงต่ำและมีความกว้างสเปกตรัม (Spectral width) ที่กว้างมากออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถพบได้ในแหล่งกำเนิดแสงชนิดแอลอีดีและเลเซอร์

(3) กระบวนการปลดปล่อยแบบกระตุ้น (Stimulated Emission) มาจากการที่อิเล็กตรอนในแถบการนำเกิดการกระตุ้นจากโฟตอนที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณแฉกทิฟจึงร่วงลงมาที่แถบวาเลนซ์ส่งผลให้เกิดโฟตอนที่มีเฟสเดียวกันกับโฟตอนที่เข้ามากระตุ้น ดังรูปที่ 2.4 (ค) ผลลัพธ์บริเวณแฉกทิฟจะเปล่งแสงที่มีกำลังแสงสูง ด้วยความกว้างสเปกตรัมที่แคบมากออกมา โดยกระบวนการนี้มีความจำเป็นต้องป้อนกระแสขับไปข้างหน้า (Forward Biased Current) หรือเรียกว่ากระแสปั๊ม (Pump Current) ที่มากพอเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนในแถบการนำจำนวนมากพอที่จะเกิดกระบวนการปลดปล่อยแบบกระตุ้นกับโฟตอนที่เคลื่อนที่ในบริเวณแฉกทิฟ โดยแอลอีดีจะใช้กระบวนการนี้เป็นหลักในการเปล่งแสง ตัวขยายแสงเอสโอเอก็ใช้กระบวนการนี้เช่นกันในการขยายสัญญาณแสง



รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอน  
 (ก) กระบวนการดูดกลืน, (ข) กระบวนการปลดปล่อยแบบเกิดเอง  
 และ (ค) กระบวนการปลดปล่อยแบบกระตุ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้เลเซอร์ดีเอฟบี (Distributed Feed-back Laser, DFB Laser) เนื่องจากมีความกว้างสเปกตรัมแคบกว่าของเลเซอร์ฟาบริเพอร์ท (Fabry-Perot, FP) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 คือกว้าง 0.046 nm จึงเหมาะใช้งานที่อัตราการส่งข้อมูลสูงกับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวในลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็มตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ซึ่งมีความห่างระหว่างช่องสัญญาณ 5 nm



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสเปกตรัมของเลเซอร์ดีเอฟบี

อุปกรณ์ชุดแรกที่ใช้งานในประเทศญี่ปุ่น ใช้เลเซอร์ดีเอฟบีของบริษัท Optilab รุ่น DFB-4-B-1310-CWDM ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [8]

- (1) กำลังแสงขาออกต่อหนึ่งช่องสัญญาณอยู่ในช่วง 5 mW ถึง 10 mW (7 dBm ถึง 10 dBm)
- (2) 4 ช่องสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1270 nm, 1290 nm, 1310 nm, และ 1330 nm

โดยใช้งานเฉพาะความยาวคลื่น 1310 nm ที่ค่ามาตรฐาน ส่วนความยาวคลื่น 1295 nm, 1300 nm, และ 1305 nm ใช้งานมอดูลรับส่งควเอสเอฟพี 28 ติดตั้งบนบอร์ดประเมินผลซึ่งสั่งซื้อตามมาภายหลัง ค่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ดังกล่าวจะอธิบายในหัวข้อ **2.1.4 มอดูลรับส่งควเอสเอฟพี 28 (QSFP28 Module) กับบอร์ดประเมินผล (Evaluation board)**

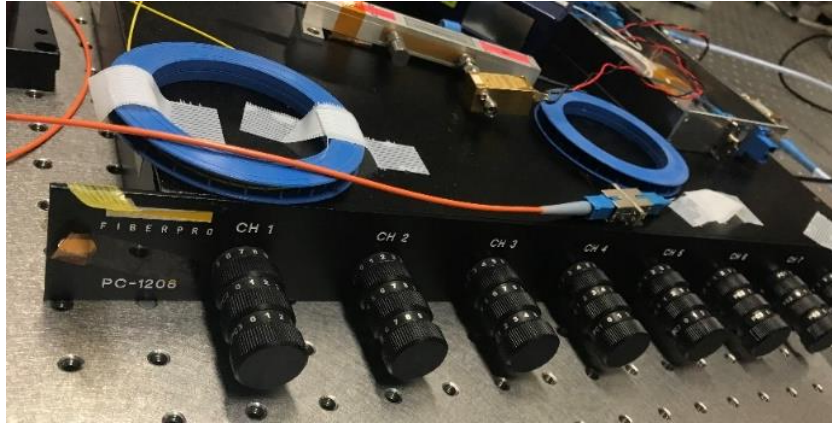


รูปที่ 2.5 เลเซอร์ดีเอฟบีของบริษัท Optilab รุ่น DFB-4-B-1310-CWDM

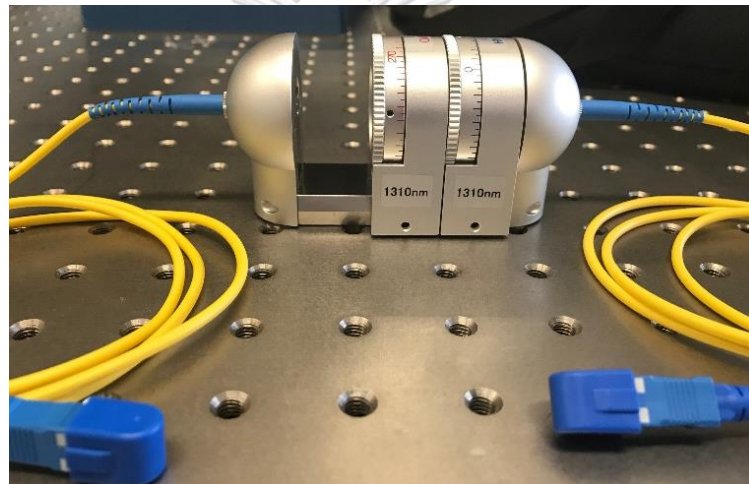
### 2.1.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization Controller, PC)

เนื่องจากตัวกล้าสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์มีโครงสร้างเป็นท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยม จึงต้องแทรกตัวควบคุมโพลาไรเซชันระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับตัวกล้าสัญญาณเสมอ เพื่อกำหนดให้โพลาไรเซชันของแสงขาเข้าเป็นโพลาไรเซชันแบบเส้นตรง (Linear Polarization) นอกจากนี้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันยังจำเป็นต้องแทรกก่อนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอด้วย เนื่องจากตัวขยายแสงดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน

อุปกรณ์ชุดแรกที่ใช้งานในประเทศญี่ปุ่นจะเป็นตัวควบคุมโพลาไรเซชันของบริษัท Fiberpro รุ่น PC-1200 ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีค่ากำลังสูญเสียแทรก (Insertion loss) น้อยกว่า 0.5 dB [9] ที่เชื่อมต่อระหว่างเลเซอร์ดีเอฟบีกับตัวกล้าสัญญาณแสง ส่วนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอเป็นตัวควบคุมโพลาไรเซชันของบริษัท Optoquest รุ่น PCUB13-S/S (13Q/13H) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีค่ากำลังสูญเสียแทรกน้อยกว่า 0.7 dB [10]



รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมโพลาไรเซชันของบริษัท Fiberpro รุ่น PC-1200



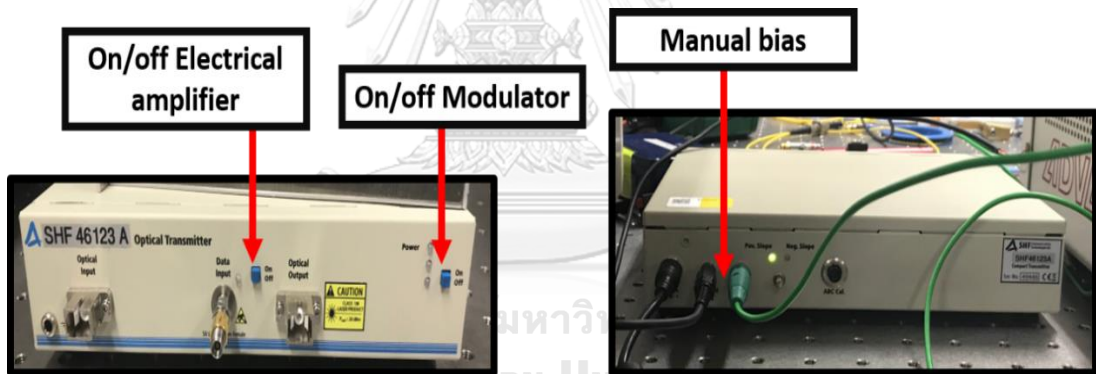
รูปที่ 2.7 ควบคุมโพลาไรเซชันของบริษัท Optoquest รุ่น PCUB13-S/S (13Q/13H)

### 2.1.3 ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM)

การกล้ำสัญญาณแสงคือการแปลงสัญญาณข้อมูลไฟฟ้าเป็นสัญญาณข้อมูลแสง โดยแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ (1) การกล้ำสัญญาณข้อมูลโดยตรง (Direct Modulation), (2) การใช้ตัวกล้ำสัญญาณแสงดูดกลืนไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) และ (3) การใช้ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ (Mach-Zehnder Modulator, MZM) โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวกล้ำสัญญาณแสงดูดกลืนไฟฟ้าในการสร้างสัญญาณแสง 25 กิกะบิตต่อวินาที แต่ในกรณีนี้ด้วยข้อจำกัดด้านอุปกรณ์จึงต้องใช้ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ อีกทั้งต้องการให้สัญญาณแสงขาเข้าตัวขยายแสงมีรูปคลื่น (Waveform) ที่สมบูรณ์ที่สุด โดยมีลักษณะเป็นเส้นบางนึ่งต่างระดับบิตศูนย์กับบิตหนึ่ง เพื่อที่จะได้เห็นผลกระทบรูปแบบข้อมูลที่เกิดขึ้นในรูปคลื่นขาออกตัวขยายแสงเอสโออย่างชัดเจน

ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาเซห์นเตอร์เป็นตัวกล้ำสัญญาณชนิดภายนอกอยู่แยกจากแหล่งกำเนิดแสง โดยผลิตมาจากลิเทียมไนโอเบต (Lithium Niobate, LiNbO<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นสารไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ค่าดัชนีหักเหของสารชนิดนี้จะเปลี่ยนไปตามแรงดันตกคร่อม ในที่นี้ใช้ตัวกล้ำสัญญาณแสงของบริษัท SHF รุ่น 46123 A ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [11]

- (1) ทำงานในช่วงความยาวคลื่น 1260 nm ถึง 1360 nm และช่วง 1530 nm ถึง 1625 nm
- (2) ทำงานในช่วงอัตราการส่งข้อมูลตั้งแต่ 2 Gbps ถึง 56 Gbps
- (3) แบนด์วิดท์ของตัวกล้ำสัญญาณแสง 35 GHz
- (4) รับกำลังแสงขาเข้าในช่วง 6 dBm ถึง 15 dBm
- (5) กำลังสูญเสียแทรกในช่วงความยาวคลื่น 1260 nm ถึง 1360 nm เท่ากับ 6 dB
- (6) อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER) ของสัญญาณแสงขาออกสูงสุดที่ 12 dB
- (7) รับแรงดันขอดีถึงยอดของสัญญาณข้อมูลไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด 2 V
- (8) รับแรงดันไบแอสกระแสตรงได้ตั้งแต่ -9 V ถึง 9 V



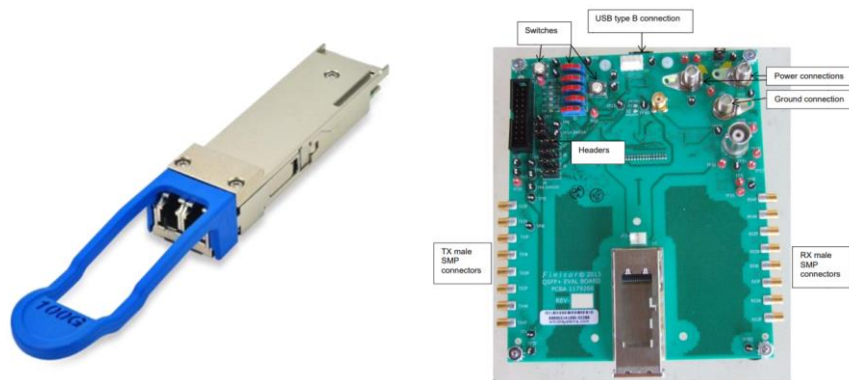
รูปที่ 2.8 ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาเซห์นเตอร์ของบริษัท SHF รุ่น 46123 A

#### 2.1.4 มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 (QSFP28 Module) กับบอร์ดประเมินผล (Evaluation board)

สำหรับอุปกรณ์ชุดแรกที่ทดลองตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ในประเทศญี่ปุ่น ใช้มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 กับ บอร์ดประเมินผลของบริษัท Finisar รุ่น FTLC1154RDPL และ FDB-1051 ตามลำดับดังรูปที่ 2.9 เพื่อสร้างอีกสามช่องสัญญาณความยาวคลื่น 1295 nm, 1300 nm และ 1305 nm ดังที่ได้อธิบายในย่อหน้าสุดท้ายหัวข้อ แต่สำหรับการทดลองในประเทศไทยจะใช้สำหรับสร้างทั้งสี่ช่องสัญญาณแสง โดยภาคส่งของมอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 กับบอร์ดประเมินผลมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [ภาคผนวก 1] [12, 13]

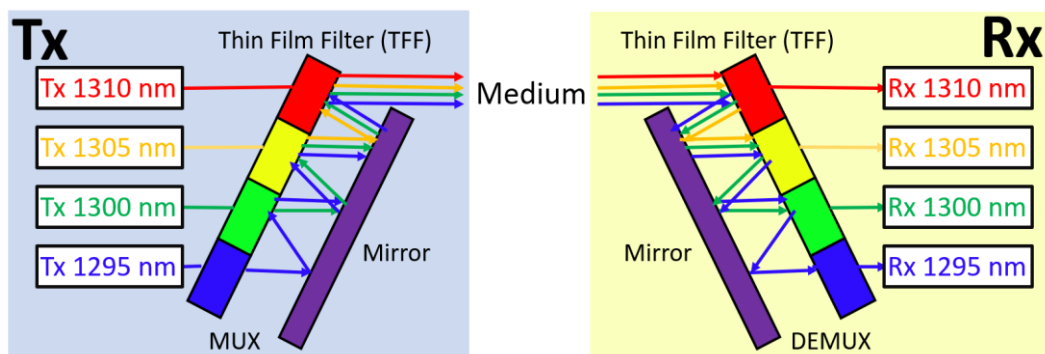


- (1) ส่งข้อมูลตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 อัตราการส่งข้อมูล 25.12578 Gbps ต่อช่อง
- (2) รับแรงดันยออดถึงยออดของสัญญาณไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด 900 mV
- (3) กำลังแสงขาออก -4.3 dBm ถึง 4.5 dBm
- (4) อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันของสัญญาณแสงขาออกต่ำสุดที่ 4 dB
- (5) แรงดันไฟฟ้าที่รับได้ 3.135 V ถึง 3.465 V กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่รับได้ 1.12 A
- (6) ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.5 Watt



รูปที่ 2.9 (ซ้าย) มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 และ (ขวา) บอร์ดประเมินผล

ในภาคส่งของลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็มจำเป็นต้องใช้มัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer: MUX) และในภาครับต้องใช้ดีมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Demultiplexer: DEMUX) ซึ่งมีหน้าที่รวม และแยกช่องสัญญาณแสงตามลำดับ มอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 ใช้งานตัวกรองเยื่อบาง (Thin Film Filter, TFF) เป็นมัลติเพล็กซ์เซอร์และดีมัลติเพล็กซ์เซอร์ตามข้อกำหนดของดับเบิลยูดีเอ็มแลน (Local Area Network - Wavelength Division Multiplexing, LAN-WDM) [12] ตัวกรองเยื่อบางทำหน้าที่ส่งผ่านความยาวคลื่นที่เลือก และสะท้อนความยาวคลื่นอื่นออก โดยมีแผนภาพดังรูปที่ 2.10

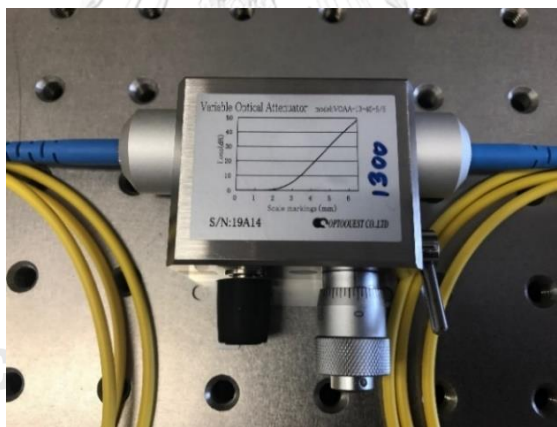


รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของมัลติเพล็กซ์เซอร์ และดีมัลติเพล็กซ์เซอร์  
ตามข้อกำหนดของดับเบิลยูดีเอ็มแลน

### 2.1.5 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ (Variable Optical Attenuator, VOA)

ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ทำหน้าที่ลดกำลังแสงในตำแหน่งที่ต้องการ ในกรณีของอุปกรณ์ชุดแรกต้องแทรกตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้หลังมอดูรับส่งคิวเอสเอฟพี 28 เพื่อปรับลดกำลังแสงที่ความยาวคลื่น 1295 nm, 1300 nm, และ 1305 nm ให้เท่ากับกำลังแสงขาออก จากตัวกล้าสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้จำลองค่าลดทอน (Attenuation) ของเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อใช้วัดกราฟช่วงไดนามิก (Dynamic range plot) และใช้สำหรับปรับค่ากำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงเพื่อใช้วัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate plot) ในที่นี้ใช้ตัวลดทอนกำลังแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest รุ่น VOAA13-40-S/S ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้ [14]

- (1) ลดทอนกำลังแสงที่ความยาวคลื่น 1310 nm
- (2) กำลังแสงขาเข้าสูงสุด 2 Watt (33 dBm)
- (3) มีการลดทอนแสงสูงสุด 40 dB

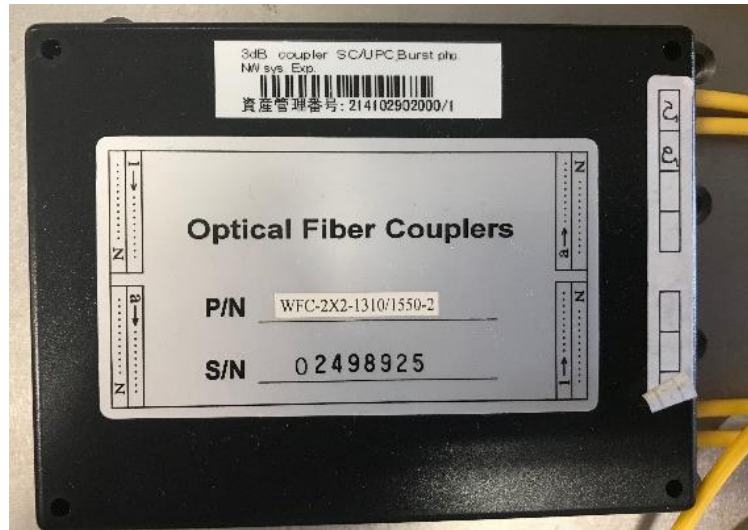


รูปที่ 2.11 ตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest รุ่น VOAA13-40-S/S

### 2.1.6 ตัวคู่ต่อสามติบี (3dB-Coupler)

อุปกรณ์ชุดแรกที่ใช้งานในประเทศญี่ปุ่นมีตัวคู่ต่อสามติบีทำหน้าที่เป็นมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยรวมสัญญาณแสง 1310 nm ที่ออกจากตัวกล้าสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ และอีกสามความยาวคลื่นขาออกจากตัวลดทอนกำลังแสงแบบปรับค่าได้ ในที่นี้ใช้ตัวคู่ต่อสามติบีของบริษัท Hongking Communication Technology รุ่น wfc-2x2-1310/1550-2 ดังรูปที่ 2.12 มีคุณลักษณะดังนี้ [15]

- (1) ทำงานที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm
- (2) กำลังสูญเสียแทรกของช่องสัญญาณขาออก 3.4 dB



รูปที่ 2.12 ตัวคู่ต่อสามดีบีของบริษัท Hongking Communication Technology รุ่น wfc-2x2-1310/1550-2

## 2.2 ตัวกลาง

### 2.2.1 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว (Single Mode Fiber, SMF)

ในมาตรฐาน 100GBASE-LR4 และ 10GBASE-LR ใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว มาตรฐาน ITU-T G.652 ดังรูปที่ 2.13 โดยความยาวคลื่น 1310 nm มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ประมาณ 0.3 dB/km [16] เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 คือการหา ระยะทางที่เหมาะสมกับการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอ วิทยาลัยนิพนธ์ฉบับนี้จึงทดลองใช้เส้นใย แก้วนำแสงโหมดเดี่ยวสี่ระยะทางได้แก่ 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตร

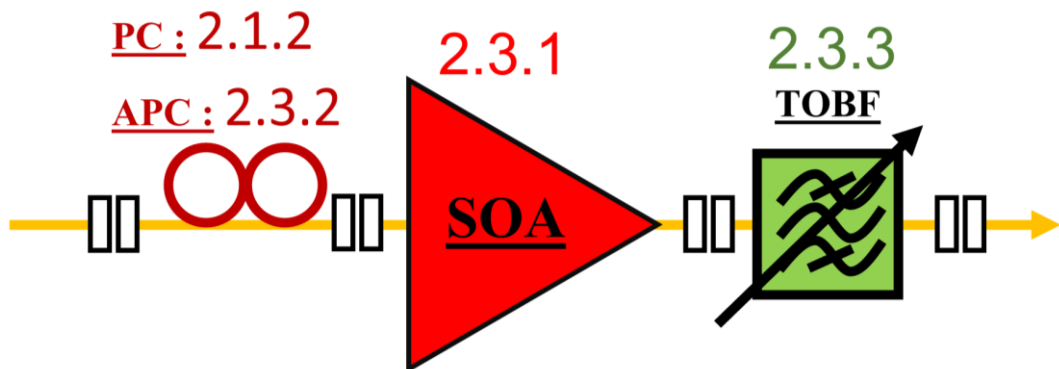


รูปที่ 2.13 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว

## 2.3 อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์

การขยายระยะทางการเชื่อมต่อของระบบสื่อสารทางแสงสามารถทำได้โดยการแทรกตัวทวนสัญญาณแสง (Optical repeater) ซึ่งมีราคาแพงเนื่องจากประกอบด้วยตัวรับแสงและตัวส่งแสง อีกทั้งยังใช้งานได้เพียงที่ละหนึ่งความยาวคลื่นด้วยอัตราการส่งข้อมูลคงที่ ตัวขยายแสงจึงถูกนำมาใช้งานเนื่องจาก (1) ราคาถูกกว่าตัวทวนสัญญาณแสง, (2) ขยายสัญญาณแสงได้หลายความยาวคลื่นพร้อมกัน, (3) ทำงานได้โดยไม่ขึ้นกับอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณแสง, และ (4) เพิ่มจำนวนช่องสัญญาณหรือเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลในแต่ละช่องดับเบิลยูดีเอ็มได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนตัวขยายแสง

อุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์ที่เป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ **2.3.1 ตัวขยายแสงเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)** ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาการแกว่งโพลาไรเซชันจึงจำเป็นต้องแทรก **2.3.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติ (Auto Polarization Controller, APC)** ไว้ข้างหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอ นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE noise) โดยลดปัญหานี้ได้ด้วยการแทรก **2.3.3 ตัวกรองแสงปรับค่าได้ (Tunable Optical Bandpass Filter, TOBF)** ทั้งนี้แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในหัวข้อนี้เป็นดังรูปที่ 2.14

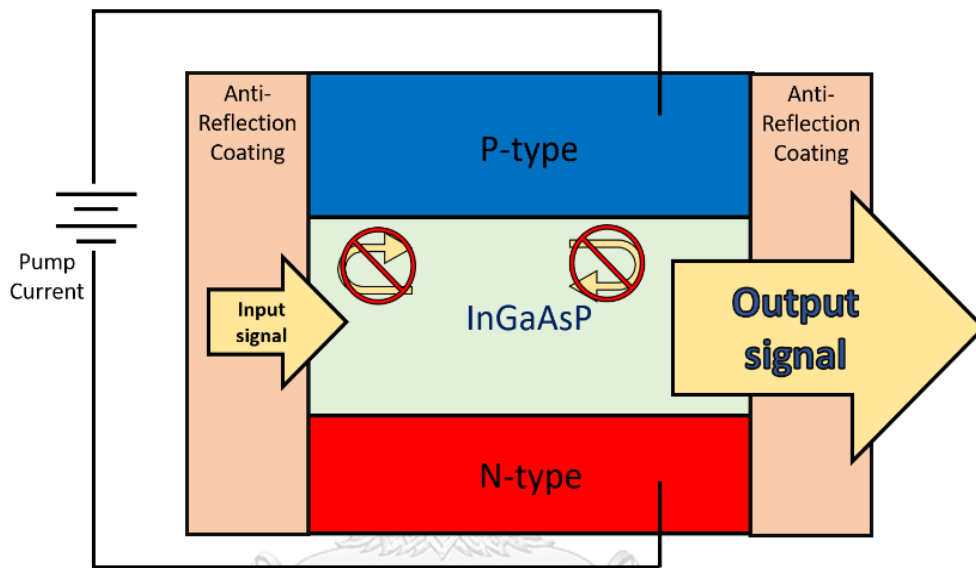


รูปที่ 2.14 แผนภาพอุปกรณ์เพิ่มสมรรถนะของลิงก์

### 2.3.1 ตัวขยายแสงเอสโอเอ (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)

ตัวขยายแสงเอสโอเอทำจากสารกึ่งตัวนำ โดยมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเลเซอร์ ในปัจจุบันตัวขยายแสงเอสโอเอส่วนมากเป็นชนิดตัวขยายแสงคลื่นเดินทาง (Traveling-Wave Amplifier, TWA) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.15 ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

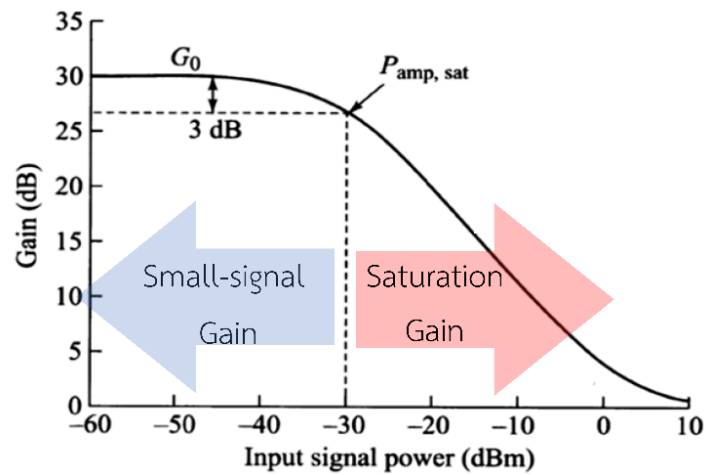
- (1) หากไม่มีสัญญาณแสงขาเข้าขณะป้อนกระแสปั๊ม ตัวขยายแสงเอสไอเอจะเปล่งแสงออกมาด้วยกระบวนการปลดปล่อยแบบเกิดเอง
- (2) เมื่อมีสัญญาณแสงขาเข้านั้นจะถูกขยายด้วยกระบวนการปลดปล่อยแบบกระตุ้นในบริเวณแอ็กทิฟ
- (3) สารต้านการสะท้อน (Anti-Reflection Coating) ทำหน้าที่ให้สัญญาณแสงเดินทางผ่านตัวขยายแสงเพียงครั้งเดียว และไม่เกิดการสะท้อน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของตัวขยายแสงเอสไอเอชนิดคลื่นเดินทาง

อัตราการขยายของตัวขยายแสงมีความสัมพันธ์กับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง ดังรูปที่ 2.16 โดยแบ่งช่วงการขยายออกเป็น 2 ช่วงคือ

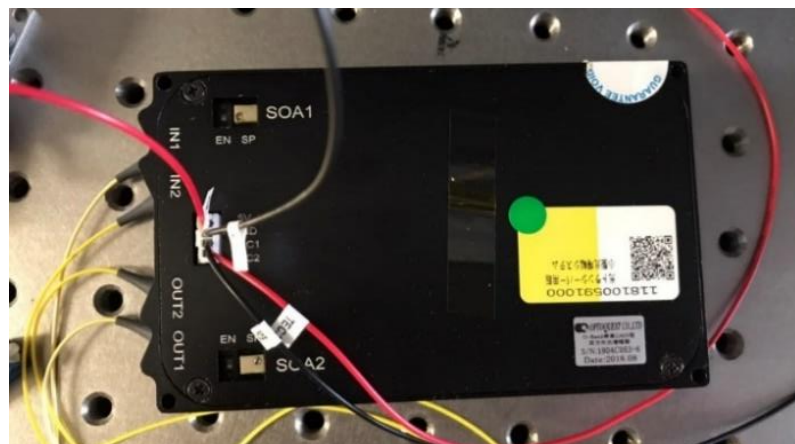
- (1) ช่วงอัตราขยายเมื่อสัญญาณขาเข้าต่ำ (Small-signal Gain) คือช่วงที่อัตราขยายมีค่าสูงสุดจนถึงครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ซึ่งเป็นค่าคงที่ไม่แปรผันกับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง
- (2) ช่วงอัตราขยายอิ่มตัว (Saturation Gain) คือช่วงที่อัตราขยายมีความสัมพันธ์กับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงแบบผกผันเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของโฟตอนอิ่มตัว (Saturation Photon Density) ในโครงสร้างตัวขยายแสง



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างความล้มพันธ์ระหว่างอัตราและกำลังแสงขาเข้าของตัวขยายแสงเอเลโอเอ [17]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวขยายแสงเอเลโอเอของบริษัท Optoquest รุ่น ASOA-07-M-SC ดังรูปที่ 2.17 ตัวขยายแสงชนิดนี้มีความพิเศษคือเป็นตัวขยายแสงประเภทสองทาง (Duplex) ซึ่งประกอบด้วยตัวขยายแสง 2 ตัวในมอดูลเดียว เพื่อขยายสัญญาณแสงสำหรับการส่งข้อมูลขาขึ้น (Upstream) และการส่งข้อมูลขาลง (Downstream) พร้อมกัน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าคุณลักษณะ ดังนี้ [ภาคผนวก 2]

- (1) ทำงานในช่วงความยาวคลื่น 1300 nm ถึง 1320 nm
- (2) กำลังแสงขาเข้าที่เหมาะสม -20 dBm
- (3) กำลังแสงขาออกต่ำที่สุด 7 dBm
- (4) กำลังขยายต่ำที่สุด 12 dB
- (5) ใช้งานกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 V



รูปที่ 2.17 ตัวขยายแสงเอเลโอเอของบริษัท Optoquest รุ่น ASOA-07-M-SC

### 2.3.2 ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติ (Auto Polarization Controller, APC)

ในระบบสื่อสารทางแสงที่แทรกตัวขยายแสงจำเป็นต้องแทรกตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติ เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้าซึ่งมีการสั่นไหว และส่งผลต่อแกนโพลาไรเซชันของสัญญาณขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเออย่างมาก สำหรับอุปกรณ์ชุดสองที่ใช้งานในประเทศไทยจึงใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติ เพื่อกำหนดแกนโพลาไรเซชันของสัญญาณขาเข้าตัวขยายแสงให้ได้อัตราขยายสูงสุดและคงที่เสมอ ในที่นี้ใช้อุปกรณ์ของบริษัท Optoquest รุ่น ALP05C ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งมีค่ากำลังสูญเสียแทรกน้อยกว่า 1.5 dB [18] [ภาคผนวก 3]



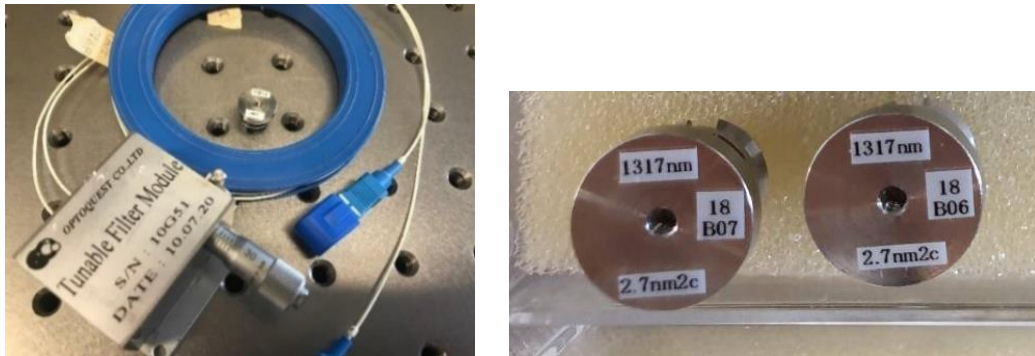
รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติของบริษัท Optoquest รุ่น ALP05C

### 2.3.3 ตัวกรองแสงปรับค่าได้ (Tunable Optical Bandpass Filter, TOBF)

ตัวกรองแสงปรับค่าได้มีหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เกิดจากตัวขยายแสง โดยมีคุณลักษณะที่สำคัญอยู่ 2 ค่าคือ (1) ความยาวคลื่นกึ่งกลาง (Center Wavelength) โดยทั่วไปจะปรับให้ตรงกับความยาวคลื่นของสัญญาณแสงที่ต้องการส่งผ่านในขณะที่กรองสัญญาณรบกวนด้านข้างทั้งสองฝั่งออกให้ได้มากที่สุดและไม่ทำให้สเปกตรัมของสัญญาณบิดเบือน และ (2) แบนด์วิดท์สามติปีคือ ความกว้างของช่วงความยาวคลื่นที่ตัวกรองแสงยอมให้กำลังแสงผ่านได้ครึ่งหนึ่ง ดังนั้นควรเลือกช่วงที่ไม่กว้างเกินไปจนทำให้สัญญาณรบกวนรบกวนผ่านเข้ามาปริมาณมาก และไม่แคบเกินไปจนสัญญาณข้อมูลบิดเบือน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้มอดูลสำหรับใส่ตัวกรองแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest รุ่น 10G51 ดังรูปที่ 2.19 และใช้ตัวกรองแสงรุ่น PCC-FH-1317-2.7/2 ซึ่งมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [19]

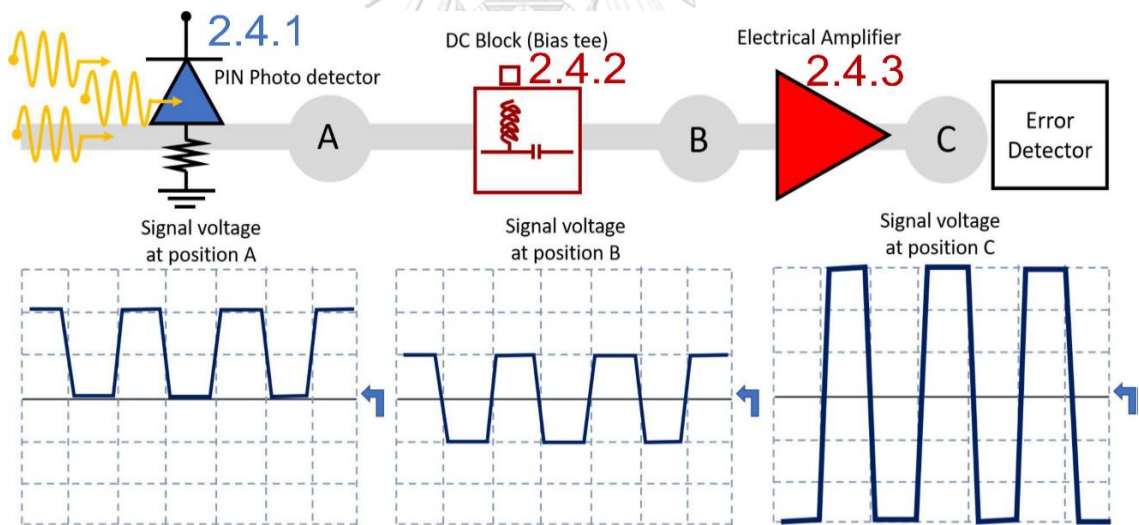
- (1) แบนด์วิดท์สามติปีกว้าง 2.7 nm
- (2) ความยาวคลื่นกึ่งกลางปรับได้ตั้งแต่ 1297 ถึง 1317 nm



รูปที่ 2.19 (ซ้าย) มอดูลสำหรับใส่ตัวกรองแสงปรับค่าได้ และ (ขวา) ตัวกรองแสงปรับค่าได้ของบริษัท Optoquest รุ่น 10G51 และรุ่น PCC-FH-1317-2.7/2 ตามลำดับ

### 2.4 อุปกรณ์ภาครับ

ภาครับของระบบสื่อสารทางแสงมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลแสงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลไฟฟ้า กรณีของอุปกรณ์ชุดแรกที่ใช้งานในประเทศญี่ปุ่นมีองค์ประกอบของภาครับดังรูปที่ 2.20 (บน) และลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าขาออกของแต่ละอุปกรณ์เป็นดังรูปที่ 2.20 (ล่าง)



รูปที่ 2.20 (บน) แผนภาพการต่ออุปกรณ์ภาครับ และ (ล่าง) รูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าขาออกแต่ละอุปกรณ์

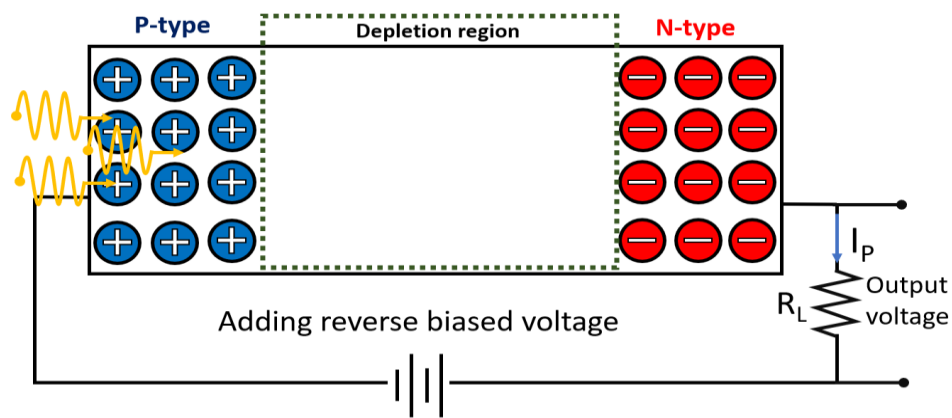
ส่วนอุปกรณ์ชุดสองที่ใช้งานในประเทศไทยใช้มอดูลรับส่งคิวเอสเอฟพี 28 และบอร์ดประเมินผลเป็นภาครับ โดยมีค่าคุณลักษณะดังต่อไปนี้ [12, 13]

- (1) รับข้อมูลตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 อัตราการรับข้อมูล 25.12578 Gbps ต่อช่อง
- (2) ความไวแสงต่อช่องสัญญาณน้อยกว่า -8.6 dBm



### 2.4.1 ตัวตรวจจับแสง (Photo Detector)

ภาครับของระบบสื่อสารทางแสงใช้ตัวตรวจจับแสงที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำและมีโครงสร้างคล้ายกับเลเซอร์ โดยใช้กระบวนการตุ่ดกลืนด้วยการป้อนแรงดันขั้วย้อนกลับ (Reverse Bias Voltage) ส่งผลให้บริเวณหมดสิ้นในรอยต่อพีเอ็นมีความหนาขึ้นเพื่อทำหน้าที่สร้างกระแสแสง (Photocurrent) ไหลผ่านตัวต้านทาน กรณีของอุปกรณ์ชุดแรกที่ประเทศญี่ปุ่นใช้ตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็น (Positive Intrinsic Negative, PIN) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็น

สำหรับอุปกรณ์ชุดแรกที่ประเทศญี่ปุ่นใช้ตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็นของบริษัท Agilent รุ่น HP 83440D ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [20]

- (1) ค่าการตอบสนอง (Responsivity) ที่ความยาวคลื่น 1300 nm เท่ากับ 0.47 A/W
- (2) แบนด์วิดท์ของตัวตรวจจับแสง 30 GHz
- (3) สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise) 4 nA ถึง 20 nA
- (4) ความต้านทานที่กระแสแสงไหลผ่าน 50 Ohm
- (5) กำลังแสงสูงสุดที่เหมาะสมกับการทำงาน 2 dBm



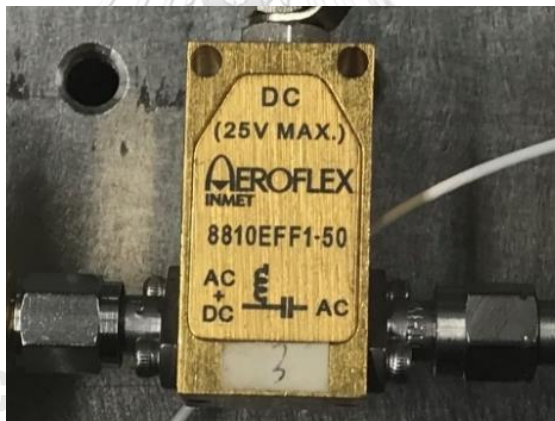
รูปที่ 2.22 ตัวตรวจจับแสงพีไอเอ็นของบริษัท Agilent รุ่น HP 83440D

### 2.4.2 ตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรง (DC Block)

เนื่องจากตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าเป็นแบบตัวขยายคู่ต่อกระแสสลับ (AC Coupled amplifier) จึงจำเป็นต้องใช้ตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรงแทรกระหว่างตัวตรวจจับแสงฟิโอะเอ็น และตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณขาออกจากตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรงมีลักษณะแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแอมพลิจูดใกล้เคียงกับสัญญาณขาออกจากตัวตรวจจับแสงแสดงดังรูปที่ 2.20 (กลาง)

สำหรับอุปกรณ์ชุดแรกที่ใช้งานในประเทศญี่ปุ่นใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่อยู่ในไบแอสที (Bias-T) เป็นตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรง ซึ่งเป็นของบริษัท AEROFLEX รุ่น 8810EFF1-50 ดังรูปที่ 2.23 และมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [21]

- (1) ทำงานในช่วงความถี่ 50 kHz ถึง 50 GHz
- (2) ความต้านทานอิมพีแดนซ์ 50 Ohm
- (3) กำลังสูญเสียทางไฟฟ้า 1 dB



รูปที่ 2.23 ไบแอสทีของบริษัท AEROFLEX รุ่น 8810EFF1-50

### 2.4.3 ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Amplifier)

ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้ามีหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มาจากตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรงให้มีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับการขยายดังรูปที่ 2.20 (ขวา) และสัญญาณที่ได้รับการขยายจะส่งต่อไปยังตัวตรวจจับความผิดพลาดบิต (Error Detector, ED) แต่การแทรกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าจะทำให้สัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 3

สำหรับอุปกรณ์ชุดแรกที่ใช้งานในประเทศญี่ปุ่นใช้ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าของบริษัท SHF รุ่น SHF810 ดังรูปที่ 2.24 และมีค่าคุณลักษณะดังนี้ [22]

- (1) อัตราการขยายทางไฟฟ้า 29 dB
- (2) สัญญาณไฟฟ้าขาออกแบบผกผัน (Inverting)
- (3) ตัวเลขสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise Figure) 6 dB
- (4) ใช้ไฟเลี้ยง 5.2 Volt
- (5) ใช้กำลังไฟฟ้า 2.44 Watt



รูปที่ 2.24 ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าของบริษัท SHF รุ่น SHF810

## 2.5 เครื่องมือวัดทดสอบ (T&M Equipment)

ในการทดลองสามารถประเมินคุณภาพสัญญาณได้จาก (1) ค่าอัตราความผิดพลาดบิต, (2) แผนภาพรูปตา (Eye diagram), (3) กำลังแสง, และ (4) สเปกตรัมแสง ซึ่งวัดได้ด้วย 2.5.1 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT), 2.5.2 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA), 2.5.3 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter), และ 2.5.4 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA) ตามลำดับ

### 2.5.1 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT)

เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตประกอบด้วยสามส่วนหลักดังนี้

(1) ตัวก่อกำเนิดรูปแบบบิตแบบตั้งโปรแกรมได้ (Programable Pattern Generator, PPG) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณข้อมูลรูปแบบต่าง ๆ ให้กับตัวกล้ำสัญญาณแสง และบอร์ดประเมินผลที่ภาคส่ง โดยมีรูปแบบที่นิยมใช้คือลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม (Pseudo Random Binary Sequence, PRBS) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7, 23, และ 31 เพื่อศึกษาผลกระทบรูปแบบข้อมูล

(2) วงจรถักคืนสัญญาณข้อมูลเวลาและสัญญาณข้อมูล (Clock and Data Recovery, CDR) ทำหน้าที่กู้คืนสัญญาณข้อมูลเวลา (Clock Signal) ในรูปแบบสัญญาณชีพจร (Pulse) ให้กับตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตทำให้วัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ของลิงก์ได้ อีกทั้งหากเชื่อมต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารสัญญาณทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA) จะทำให้เห็นรูปคลื่น และแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงกับสัญญาณไฟฟ้า

(3) ตัวตรวจจับความผิดพลาดบิต (Error Detector, ED) มีหน้าที่วัดอัตราความผิดพลาดบิต โดยนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากภาครับไปเทียบกับสัญญาณที่สร้างจากตัวก่อกำเนิดรูปแบบบิตแบบตั้งโปรแกรมได้ สัญญาณข้อมูลไฟฟ้าที่เข้าตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตมีจุดตัดบิต (Bit Crossing) อยู่ที่ 0 Volt ดังนั้นแรงดันขีดแบ่ง (Threshold Voltage) จึงควรตั้งเป็น 0 Volt เพื่ออัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุด

สำหรับการทดลองชุดแรกในประเทศญี่ปุ่นใช้เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Anritsu รุ่น MP1800A [23] ดังรูปที่ 2.25 (ซ้าย) ส่วนการทดลองชุดสองในประเทศไทยใช้ของบริษัท Optohub รุ่น EV-L001 [ภาคผนวก 4] [24] ดังรูปที่ 2.25 (ขวา) โดยทั้งสองเครื่องมีคุณสมบัติในการป้อนสัญญาณรูปแบบบิต และวัดอัตราความผิดพลาดบิตพร้อมกันสี่ช่องสัญญาณ

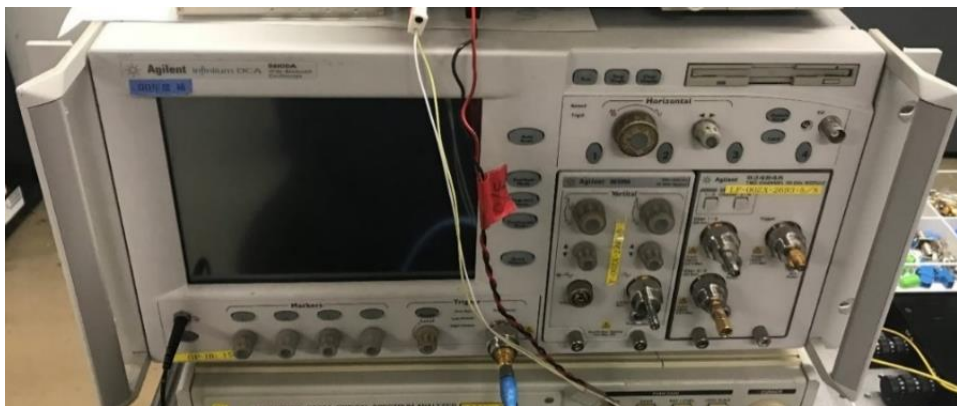


รูปที่ 2.25 เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิต (ซ้าย) ของบริษัท Anritsu รุ่น MP1800A และ (ขวา) ของบริษัท Optohub รุ่น EV-L001

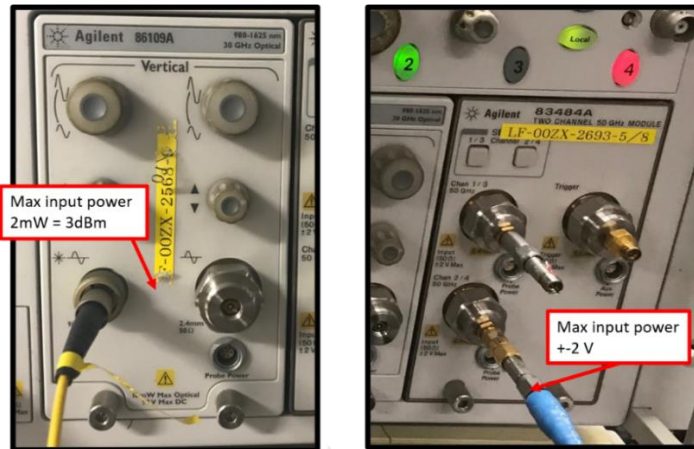
### 2.5.2 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA)

เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลทำหน้าที่แสดงรูปคลื่น และแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงกับไฟฟ้า โดยการซูมจุดและสร้างเป็นรูปที่แสดงระดับของสัญญาณที่เข้ามา ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากฮิสโตแกรม (Histogram) ของสัญญาณข้อมูลในการทดลองจริง

สำหรับการทดลองชุดแรกในประเทศญี่ปุ่นใช้เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Agilent รุ่น 86100A [25] ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งมีมอดูลวัดสัญญาณแสงรุ่น 86109A [26] และมอดูลวัดสัญญาณไฟฟ้ารุ่น 83484A [27] เสียอยู่ในช่องซ้าย-ขวาดังรูปที่ 2.27 ส่วนการทดลองชุดสองใช้เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Keysight รุ่น N1092C [28] ดังรูปที่ 2.28 โดยทางบริษัท IRCT ได้กรุณาให้ข้าพเจ้ายืมใช้เครื่องมือสาธิตเพื่อเก็บผลการทดลองเป็นเวลา 1 สัปดาห์



รูปที่ 2.26 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Agilent รุ่น 86100A



รูปที่ 2.27 (ซ้าย) มอดูลวัดสัญญาณแสง และ (ขวา) มอดูลวัดสัญญาณไฟฟ้า  
ของบริษัท Agilent รุ่น 86109A และ 83484A ตามลำดับ



รูปที่ 2.28 เครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Keysight รุ่น N1092C

### 2.5.3 มิเตอร์วัดกำลังแสง (Optical Power Meter)

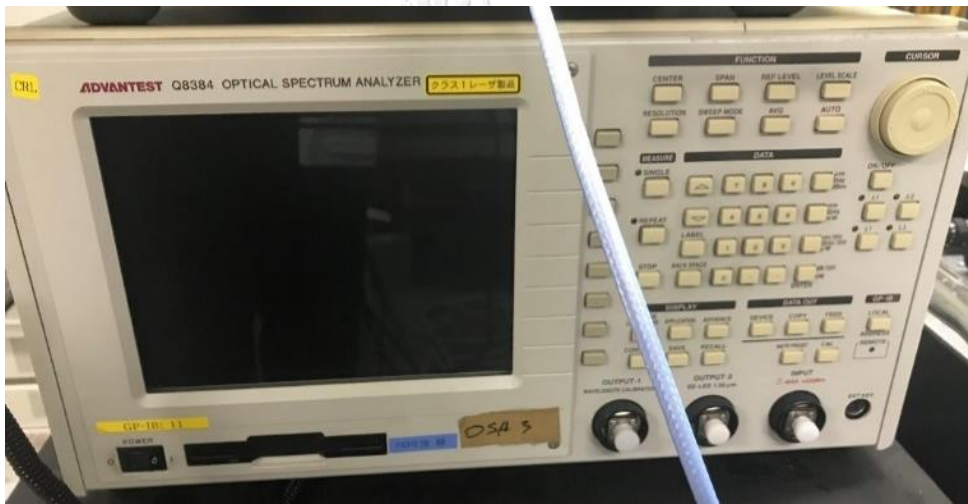
มิเตอร์วัดกำลังแสงมีหน้าที่วัดกำลังแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลอง โดยใช้ตัวตรวจจับแสงเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือดังกล่าว สำหรับการทดลองทั้งสองชุดใช้มิเตอร์วัดกำลังแสงของบริษัท Thorlabs รุ่น PM320E [29] ดังรูปที่ 2.29



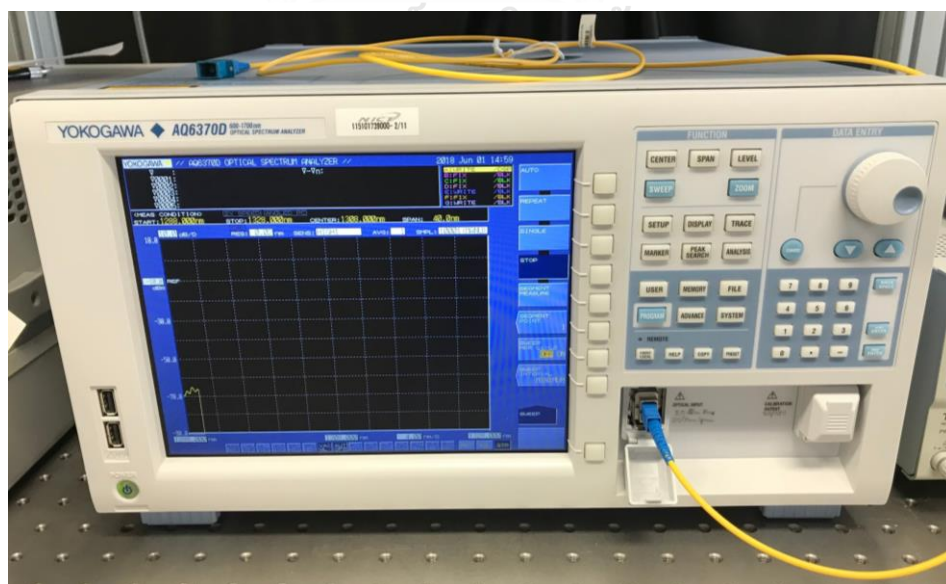
รูปที่ 2.29 มิเตอร์วัดกำลังแสงของบริษัท Thorlabs รุ่น PM320E

#### 2.5.4 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA)

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงใช้หลักการทำงานของตัวสะท้อนเลือกความถี่ (Frequency selective reflector) ในการวัดสเปกตรัมแสง สำหรับการทดลองชุดแรกในประเทศญี่ปุ่นใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Advantest รุ่น Q8384 [30] ดังรูปที่ 2.30 ส่วนการทดลองชุดสองในประเทศไทยใช้ของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D [31] ดังรูปที่ 2.31 โดยทั้งสองเครื่องมีความไวแสงต่ำประมาณ  $-70$  dBm เพื่อให้ได้สเปกตรัมแสงที่ถูกต้อง และมีค่าความละเอียด (Resolution) สูงประมาณ  $0.02$  nm เพื่อให้เห็นองค์ประกอบของสเปกตรัมแสงครบถ้วน



รูปที่ 2.30 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Advantest รุ่น Q8384



รูปที่ 2.31 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D

### บทที่ 3

#### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ เพื่อสะท้อนคุณภาพสัญญาณข้อมูลที่ส่งผ่านระบบสื่อสารทางแสงทั้งก่อนและหลังแทรกตัวขยายแสงเอสไอเอ โดยเริ่มจากสมการความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ในหัวข้อ 3.1 สัญญาณรบกวนภายในลิงก์ จากนั้นนำค่าที่ได้เหล่านั้นไปแทนตัวแปรในหัวข้อ 3.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์, 3.3 การคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวน, และ 3.4 การคำนวณอัตราความผิดพลาดบิต จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าอัตราความผิดพลาดบิตกับตัวแปรอื่นได้แก่ กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  และกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสไอเอ  $P_{in\_SOA}$  ในหัวข้อ 3.5 การวัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิต และกราฟช่วงไดนามิก เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทถัดไป นอกจากนี้คำนวณระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวที่เพิ่มขึ้นภายหลังการแทรกตัวขยายแสงเอสไอเอในหัวข้อ 3.6 สมการบอกกำลัง

#### 3.1 สัญญาณรบกวนภายในลิงก์

โดยทั่วไปสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารทางแสงจะสนใจที่อุปกรณ์ภาครับ เนื่องจากสัญญาณรบกวนจากเลเซอร์ที่ภาคส่งนั้นมีน้อยมากจึงละเลยในการคำนวณ การแทรกตัวขยายแสงเอสไอเอส่งผลให้ค่าสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารทางแสงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในหัวข้อนี้จึงจะทำการอธิบายสัญญาณรบกวนพจน์ต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังแทรกตัวขยายแสงเอสไอเอ ส่วนเส้นใยแก้วนำแสงนั้นไม่สร้างสัญญาณรบกวนแต่มีค่าลดทอนซึ่งจะอธิบายต่อในหัวข้อ 3.6 สมการบอกกำลัง

สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารทางแสงประกอบด้วย 3.1.1 สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal Noise) และ 3.1.2 - 3.1.6 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise) โดยสัญญาณรบกวนควอนตัมเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณแสงแปลงเป็นกระแสแสงที่ตัวตรวจจับแสง สัญญาณรบกวนควอนตัมในกรณีติด ๆ กัน (Back-to-back case) กล่าวคือเป็นกรณีที่ภาคส่งต่อกับภาครับโดยตรงประกอบด้วย 3.1.2 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลัก และ 3.1.3 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากกระแสมีด แต่เมื่อแทรกตัวขยายแสงส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนเอเอสอี (Amplified Spontaneous Emission Noise, ASE noise) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดสนามการปลดปล่อยแบบเกิดเอง (Spontaneous Emission Field) รวมเข้ากับสนามสัญญาณหลัก (Signal Field)  $E_s$  จึงเกิดเป็นกำลังแสง 3 พจน์ที่กระแสแสง  $i_p$  ขาออกจากตัวตรวจจับแสงดัง (3.1) [17, 32] ได้แก่



(1) กำลังแสงของสัญญาณหลัก  $E_s^2$ , (2) กำลังแสงของสัญญาณรบกวน  $E_n^2$ , และ (3) กำลังแสงของสัญญาณบีต (Beat signal) ระหว่างสัญญาณหลักกับสัญญาณรบกวน  $2E_s \cdot E_n$  จึงเกิดสัญญาณรบกวนควอนตัมเพิ่มเติมดังนี้ 3.1.4 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี, 3.1.5 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบีตกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอี, และ 3.1.6 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบีตกันระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับตัวมันเอง

$$i_p \propto (E_s + E_n)^2 = E_s^2 + E_n^2 + 2E_s \cdot E_n \quad (3.1)$$

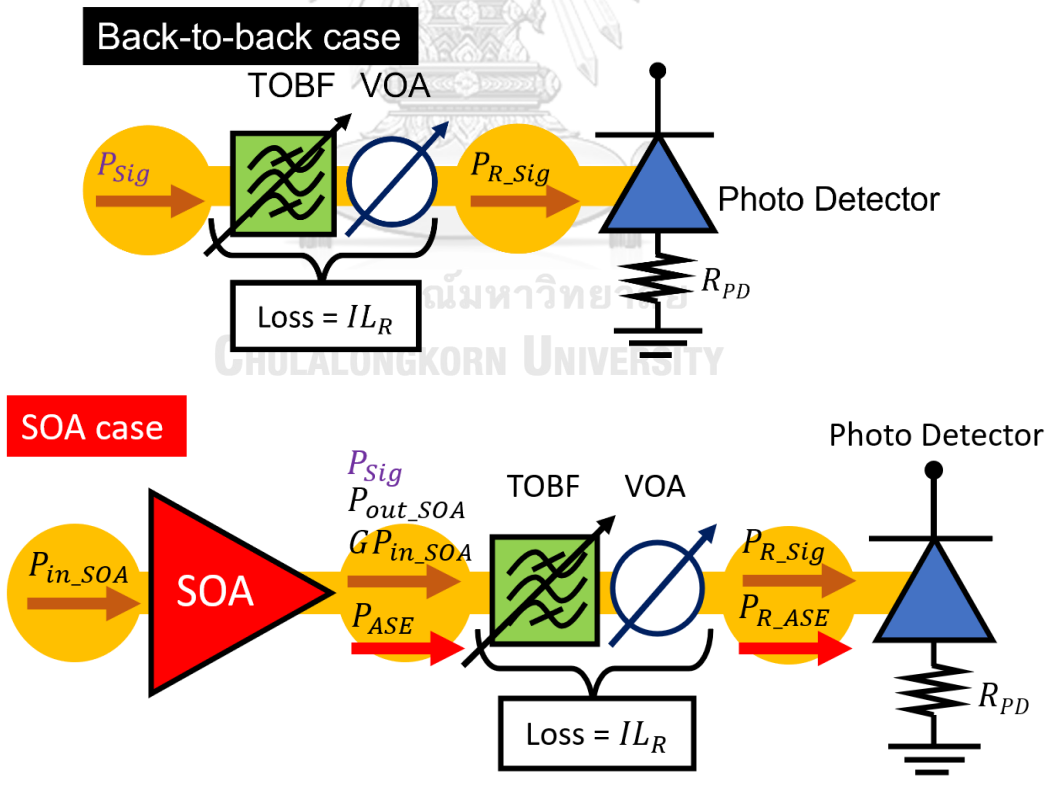
ตัวแปรและค่าคุณลักษณะที่ใช้คำนวณหาค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนทั้งหมดจะแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 อ้างอิงจากชุดทดลองแรกในประเทศญี่ปุ่น

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าคุณลักษณะที่ใช้หาความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนความร้อน	$\sigma_T^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลัก	$\sigma_{Q\_Sig}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากกระแสมีด	$\sigma_D^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี	$\sigma_{Q\_ASE}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนจากสัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบีตกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอี	$\sigma_{Sig-ASE}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนจากสัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบีตกันระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับตัวมันเอง	$\sigma_{ASE-ASE}^2$		A <sup>2</sup>
ความต้านทานโหลด (Load Resistance) หลังตัวตรวจจับแสง	$R_{PD}$	50 [12, 20]	Ohm
ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzmann's Constant)	$k_B$	$1.3805 \times 10^{-23}$ [17, 32]	J/K
อุณหภูมิ	$T$	300	K
แบนด์วิดท์ไฟฟ้า (Electrical bandwidth) ของตัวตรวจจับแสง	$B_{PD}$	$30 \times 10^9$ [20]	Hz

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
กำลังแสงของสัญญาณหลัก	$P_{Sig}$		mW
กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี	$P_{ASE}$		mW
กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ	$P_{in\_SOA}$		mW
กำลังแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอ	$P_{out\_SOA}$		mW
กำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง	$P_{R\_Sig}$		mW
กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เข้าตัวตรวจจับแสง	$P_{R\_ASE}$		mW
ค่าประจุอิเล็กตรอน (Electron Charge)	$q$	$1.6022 \times 10^{-19}$ [17, 32]	C
กระแสแสง	$I_p$		A
ผลรวมของกระแสมืดทั้งก้อน (Bulk Dark Current) และกระแสมืดพื้นผิว (Surface Dark Current)	$I_D + I_L$	$20 \times 10^{-9}$ [20]	A
ค่าการตอบสนอง (Responsivity) ของตัวตรวจจับแสงที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร	$\mathcal{R}$	0.47 [20]	A/W
กำลังสูญเสียแทรกหน้าภาครับ	$IL_R$		เท่า
อัตราขยายของตัวขยายแสง	$G$		เท่า
โอเอสเอ็นอาร์	$OSNR$		เท่า
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี	$S_{ASE}$		W/Hz
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่เข้าตัวตรวจจับแสง	$S_{R\_ASE}$		W/Hz
ความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงในหน่วยนาโนเมตร	$Res_{nm}$	1	nm
ความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงในหน่วยเฮิรตซ์	$Res$	$1.746 \times 10^{11}$	Hz
แบนด์วิธสามดีบีของตัวกรองแสงปรับค่าได้ ในหน่วยนาโนเมตร	$B_{TOBF\_nm}$	2.7 [19]	nm
แบนด์วิธสามดีบีของตัวกรองแสงปรับค่าได้	$B_{TOBF}$	$4.72 \times 10^{11}$	Hz
ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant)	$h$	$6.526 \times 10^{-34}$ [17, 32]	J•s

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความยาวคลื่น (Wavelength) ของช่องสัญญาณ	$\lambda$	1310	nm
ความเร็วแสง	$c$	$2.998 \times 10^8$ [17, 32]	m/s
ความถี่ของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1310 nm	$\nu$	$1.526 \times 10^{14}$	Hz
ปัจจัยการแปลงประชากรของตัวขยายแสง	$n_{sp}$		
ตัวเลขสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (6 dB)	$NF_{E\_Amp}$	4 [22]	เท่า
อัตราขยายของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (29 dB)	$G_{E\_Amp}$	794 [22]	เท่า
เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวตรวจจับแสง	$SNR_{PD}$		dB
เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$SNR_{E\_Amp}$		dB
ความแปรปรวนขาเข้าตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$\sigma_{in}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$\sigma_{out}^2$		A <sup>2</sup>



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์และตัวแปรต่าง ๆ (บน) กรณีติด ๆ กัน และ (ล่าง) กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ

### 3.1.1 สัญญาณรบกวนความร้อน

สัญญาณรบกวนความร้อนเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานโหลดหลังตัวตรวจจับแสง  $R_{PD}$  แม้ว่าโครงสร้างของตัวตรวจจับแสงไม่มีตัวต้านทานเป็นองค์ประกอบ แต่จำเป็นต้องต่อตัวต้านทานโหลดเพื่อรับกระแสแสงจากตัวตรวจจับแสงดังรูปที่ 3.1 ความแปรปรวนจากสัญญาณรบกวนความร้อน  $\sigma_T^2$  แปรผกผันกับความต้านทานโหลดดังสมการที่ (3.2) [17, 32] โดยตัวต้านทานโหลดมีค่าความต้านทาน 50 Ohm [20] แทนค่าตัวแปรจากตารางที่ 3.1 ความแปรปรวนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_{PD}} B_{PD} = 9.941 \times 10^{-12} \text{ {หน่วย } A^2} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลัก

สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือสัญญาณรบกวนช็อต (Shot Noise) เกิดจากความผันผวนในการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลที่ตัวตรวจจับแสง ความแปรปรวนจากสัญญาณควอนตัม  $\sigma_Q^2$  มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับกระแสแสง  $I_p$  ซึ่งกระแสแสงมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่าการตอบสนอง  $\mathcal{R}$  กับกำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  ดังสมการที่ (3.3) [17, 32]

$$I_p = \mathcal{R} P_{R\_Sig} \text{ {หน่วย } A} \quad (3.3)$$

กำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสงมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างกำลังแสงของสัญญาณหลัก  $P_{R\_Sig}$  และกำลังสูญเสียแทรกหน้าภาครับ  $IL_R$  ดังสมการที่ (3.4) เนื่องจากสัญญาณหลักเดินทางผ่านทั้งสองอุปกรณ์ก่อนเข้าตัวตรวจจับแสงดังรูปที่ 3.1

$$P_{R\_Sig} = P_{Sig} \times IL_R \text{ {W}} \quad (3.4)$$

ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลัก  $\sigma_{Q\_Sig}^2$  เป็นไปดังสมการที่ (3.5) [17, 32] เมื่อแทนค่าตัวแปรจากตารางที่ 3.1 และสมการที่ (3.5) ความแปรปรวนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{Q\_Sig}^2 = 2qI_p B_{PD} = 2q\mathcal{R}P_{R\_Sig} B_{PD} = 4.512 \times 10^{-9} P_{Sig} IL_R \text{ {A}^2} \quad (3.5)$$

แต่หากเป็นกรณีที่มีการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ กำลังแสงของสัญญาณหลัก  $P_{Sig}$  ในสมการที่ (3.4) จะเปรียบเสมือนกับกำลังแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{out\_SOA}$  ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง  $P_{in\_SOA}$  กับอัตราขยาย  $G$  ของตัวขยายแสง ดังนั้นกำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  ในกรณีดังกล่าวจึงมีค่าดังสมการที่ (3.6)

$$P_{R\_Sig} = P_{out\_SOA} \times IL_R = G P_{in\_SOA} IL_R \text{ {W}} \quad (3.6)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.6) แทนค่าไปยังสมการที่ (3.4) และ (3.5) ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลักในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าดังสมการที่ (3.7)

$$\sigma_{Q\_sig}^2 = 2q\mathcal{R}P_{R\_sig}B_{PD} = 4.512 \times 10^{-9}GP_{in\_SOA} IL_R \{A^2\} \quad (3.7)$$

### 3.1.3 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากกระแสมืด

กระแสมืด (Dark Current) คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวตรวจจับแสงขณะป้อนแรงดันขั้วย้อนกลับ กระแสมืดแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ (1) กระแสมืดทั้งก้อน (Bulk Dark Current)  $I_D$  ที่เกิดขึ้นในบริเวณดีพลีชัน และ (2) กระแสมืดพื้นผิว (Surface Dark Current)  $I_L$  ที่เกิดขึ้นบริเวณภายนอกของโครงสร้าง ความแปรปรวนจากสัญญาณรบกวนกระแสมืด  $\sigma_D^2$  ในตัวตรวจจับแสงมีค่าเป็นไปดังสมการที่ (3.8) [17, 32] เมื่อแทนค่าตัวแปรจากตารางที่ 3.1 ความแปรปรวนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_D^2 = 2q(I_D + I_L)B_{PD} = 1.920 \times 10^{-16} \{A^2\} \quad (3.8)$$

### 3.1.4 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี

สัญญาณรบกวนเอเอสอีคือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากตัวขยายแสง กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี  $P_{ASE}$  ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนควอนตัมเช่นเดียวกับสัญญาณหลัก กำลังแสงดังกล่าวหาได้จากสมการที่ (3.9) [17, 32]

$$P_{ASE} = S_{ASE}B_{TOBF} = h\nu n_{sp}(G - 1)B_{TOBF} \{W\} \quad (3.9)$$

แต่เนื่องจากค่าการแปลงประชากรของตัวขยายแสง  $n_{sp}$  เป็นค่าไม่คงที่ในทุกกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  เพื่อให้กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอี  $P_{ASE}$  ที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด จึงใช้โอเอสเอ็นอาร์ (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) ในการคำนวณหาความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเอเอสอี  $S_{ASE}$  ดังสมการที่ (3.10) [33] เพื่อนำไปหากำลังแสงของสัญญาณรบกวนที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_ASE}$  ดังสมการที่ (3.11) ทั้งนี้วิธีการวัดหาค่าโอเอสเอ็นอาร์จะอธิบายต่อในหัวข้อ 4.1.3 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์

$$S_{ASE} = \frac{GP_{in\_SOA}}{OSNR \times Res} \left\{ \frac{W}{Hz} \right\} \quad (3.10)$$

$$P_{R\_ASE} = \frac{GP_{in\_SOA}}{OSNR} \frac{B_{TOBF}}{Res} IL_R \{W\} \quad (3.11)$$

ทั้งนี้แบนด์วิธสามดีบีของตัวกรองแสงปรับค่าได้ในหน่วยเฮิร์ต  $B_{TOBF}$  และความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงในหน่วยเฮิร์ตซ์  $Res$  สามารถหาได้จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ และเมื่อแทนค่าจากตารางที่ 3.1 จึงมีค่าเท่ากับ

$$B_{TOBF} = B_{TOBF_{nm}} \frac{\lambda^2}{c} = 4.72 \times 10^{11} \text{ {Hz}} \quad (3.12)$$

$$Res = Res_{nm} \frac{\lambda^2}{c} = 1.746 \times 10^{11} \text{ {Hz}} \quad (3.13)$$

ทั้งนี้ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณรบกวนเอเอสอี  $\sigma_{Q\_ASE}^2$  เป็นไปตามสมการที่ (3.14) [17, 32] เมื่อแทนค่าตัวแปรจากตารางที่ 3.1 และสมการที่ (3.11) ความแปรปรวนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{Q\_ASE}^2 = 2q\mathcal{R}P_{R\_ASE}B_{PD} = 1.218 \times 10^{-12} \frac{GP_{in\_SOA}IL_R}{OSNR} \text{ {A}^2} \quad (3.14)$$

### 3.1.5 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบิตกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอี

สัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอีเกิดจากความถี่บีต (Beat frequency) ระหว่างสัญญาณทั้งสองที่อยู่บนความถี่เดียวกัน ความแปรปรวนที่เกิดจากสัญญาณบีตนี้เป็นไปตามสมการที่ (3.15) [17, 32] เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 3.1, สมการที่ (3.6) และ (3.10) ความแปรปรวนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{Sig\_ASE}^2 = 4(\mathcal{R}P_{R\_Sig})(\mathcal{R}S_{R\_ASE}B_{PD}) = 0.1518 \frac{(GP_{in\_SOA}IL_R)^2}{OSNR} \text{ {A}^2} \quad (3.15)$$

### 3.1.6 สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการบิตกันระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับตัวมันเอง

นอกจากสถานะความถี่บีตเกิดขึ้นระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอีแล้ว สถานะนี้ยังเกิดขึ้นที่สัญญาณเอเอสอีกันเองด้วย โดยความแปรปรวนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนระหว่างสัญญาณเอเอสอีและสัญญาณเอเอสอี  $\sigma_{ASE-ASE}^2$  เป็นไปตามสมการที่ (3.10) [17, 32] และเมื่อแทนค่าตัวแปรจากตารางที่ 3.1 และสมการที่ (3.16) ความแปรปรวนดังกล่าวจึงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = \mathcal{R}^2 S_{R\_ASE}^2 (2B_{TOBF} - B_{PD})B_{PD} = 0.1987 \left( \frac{GP_{in\_SOA}IL_R}{OSNR} \right)^2 \text{ {A}^2} \quad (3.16)$$

### 3.1.7 สัญญาณรบกวนจากตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า

การแทรกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าหลังตัวตรวจจับแสงทำให้สัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไม่แสดงในค่าความแปรปรวนตั้งหัวข้อก่อนหน้า แต่สัญญาณรบกวนดังกล่าวจะแสดงในรูปของตัวเลขสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า  $NF_{E\_Amp}$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างเอสเอ็นอาร์ขาออกตัวตรวจจับแสง  $SNR_{PD}$  และเอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $SNR_{E\_Amp}$  ดังสมการที่ (3.17) ทั้งนี้ค่าเอสเอ็นอาร์จะอธิบายในหัวข้อถัดไป

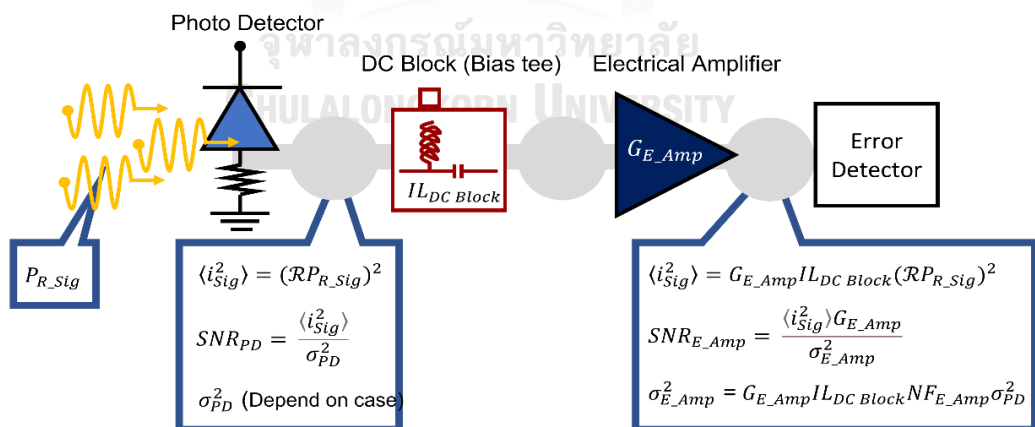
$$NF_{ElecAmp} = \frac{SNR_{PD}}{SNR_{E\_Amp}} \quad (3.17)$$

### 3.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์

ค่าเอสเอ็นอาร์หรืออัตราส่วนกำลังสัญญาณหลักต่อสัญญาณรบกวน คือค่าที่บ่งบอกคุณภาพสัญญาณเพื่อใช้เปรียบเทียบในกรณีต่าง ๆ เอสเอ็นอาร์สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณ  $\langle i_{Sig}^2 \rangle$  หารด้วยผลรวมของความแปรปรวน  $\sigma_{Total}^2$  ในกรณีที่สนใจดังสมการที่ (3.18) [17, 32] โดยส่วนใหญ่นิยมแสดงค่าเอสเอ็นอาร์ในหน่วย dB มากกว่าหน่วยเท่า

$$SNR = \frac{\langle i_{Sig}^2 \rangle}{\sigma_{Total}^2} \quad (3.18)$$

โดยตัวแปรและค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอสเอ็นอาร์ของสัญญาณแสดงในตารางที่ 3.1 ถึง 3.2 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงค่ากำลังแสงของสัญญาณหลัก, เอสเอ็นอาร์ และความแปรปรวน ณ ตำแหน่งหลังตัวตรวจจับแสง และหลังตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและค่าคุณลักษณะใช้หาเอสเอ็นอาร์

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวตรวจจับแสง	$SNR_{PD}$		dB
เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$SNR_{E\_Amp}$		dB
เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ในกรณีติด ๆ กัน	$SNR_{B2B}$		dB
เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ	$SNR_{SOA}$		dB
ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณ	$\langle i_{Sig}^2 \rangle$		A <sup>2</sup>
ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณ ขาออกตัวตรวจจับแสง	$\langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle$		A <sup>2</sup>
ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณ ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$\langle i_{Sig\_E\_Amp}^2 \rangle$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสง	$\sigma_{PD}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสง ในกรณีติด ๆ กัน	$\sigma_{PD\_B2B}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสง ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ	$\sigma_{PD\_SOA}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$\sigma_{E\_Amp}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ในกรณีติด ๆ กัน	$\sigma_{E\_Amp\_B2B}^2$		A <sup>2</sup>
ความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ	$\sigma_{E\_Amp\_SOA}^2$		A <sup>2</sup>
กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของตัวบล็อกสัญญาณ กระแสตรง (6 dB)	$IL_{DC\ Block}$	0.79 [21]	เท่า
ตัวเลขสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าของ ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า (29 dB)	$NF_{E\_Amp}$	4 [22]	เท่า
อัตราขยายของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า	$G_{E\_Amp}$	794 [22]	เท่า



เอสเอ็นอาร์ของสัญญาณขาออกตัวตรวจจับแสง  $SNR_{PD}$  สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณขาออกตัวตรวจจับแสง  $\langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle$  และความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสง  $\sigma_{PD}^2$  ดังรูปที่ 3.2 และสมการที่ (3.19)

$$SNR_{PD} = \frac{\langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle}{\sigma_{PD}^2} \quad (3.19)$$

โดยค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณขาออกตัวตรวจจับแสง  $\langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle$  แปรผันตรงกับกำลังสองของกระแสแสง  $I_P$  และเมื่อกำหนดให้ดัชนีการกล้ำสัญญาณ (Modulation index,  $m$ ) เท่ากับ 1 ค่าดังกล่าวจะเป็นไปตามสมการที่ (3.20) ทั้งนี้ความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสง  $\sigma_{PD}^2$  นั้นขึ้นอยู่กับกรณีต่าง ๆ ในการทดลองซึ่งจะแจกแจงในหัวข้อ 3.2.1 การคำนวณเอสเอ็นอาร์กรณีติด ๆ กัน และ 3.2.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสไอเอ

$$\langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle = \frac{(mI_P)^2}{2} = \frac{(\mathcal{R}P_{R\_Sig})^2}{2} \quad (3.20)$$

ในการหาค่าเอสเอ็นอาร์รวมของการทดลองนี้จำเป็นต้องใช้ค่า ณ ตำแหน่งขาเข้าตัวตรวจจับอัตราความผิดพลาดบิต ดังนั้นเอสเอ็นอาร์จากสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $SNR_{E\_Amp}$  จึงเหมาะสมสุด โดยค่าดังกล่าวหาได้จากสมการที่ (3.21) ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $\langle i_{Sig\_E\_Amp}^2 \rangle$  หาได้จากสมการที่ (3.22)

$$SNR_{E\_Amp} = \frac{\langle i_{Sig\_E\_Amp}^2 \rangle}{\sigma_{E\_Amp}^2} = \frac{\langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle G_{E\_Amp} I_{DC\ Block}}{\sigma_{E\_Amp}^2} \quad (3.21)$$

$$\langle i_{Sig\_E\_Amp}^2 \rangle = \langle i_{Sig\_PD}^2 \rangle G_{E\_Amp} I_{DC\ Block} \quad (3.22)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.19) และ (3.21) แทนค่าลงในสมการที่ (3.17) จัดรูปใหม่จะได้ค่าความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $\sigma_{E\_Amp}^2$  ดังสมการที่ (3.23)

$$\sigma_{E\_Amp}^2 = G_{E\_Amp} N_{F_{E\_Amp}} I_{DC\ Block} \sigma_{PD}^2 \quad (3.23)$$

### 3.2.1 การคำนวณเอสเอ็นอาร์กรณีติด ๆ กัน

ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.1 สัญญาณรบกวนภายในลิงก์ ความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสงกรณีติด ๆ กัน  $\sigma_{PD\_B2B}^2$  มีค่าเป็นดังสมการที่ เมื่อนำค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3.23) และ (3.21) จะได้ค่าความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีติด ๆ กัน  $\sigma_{B2B}^2$  และ เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีติด ๆ กัน  $SNR_{B2B}$  ดังสมการที่ (3.25) และ (3.26) ตามลำดับ ในกรณีนี้กำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  จะแทนจากสมการ (3.4)

$$\sigma_{PD\_B2B}^2 = \sigma_{Q\_Sig}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_T^2 \quad (3.24)$$

$$\sigma_{B2B}^2 = \sigma_{PD\_B2B}^2 G_{E\_Amp} N_{F_{E\_Amp}} I_{L_{DC\ Block}} \quad (3.25)$$

$$SNR_{B2B} = \frac{(\mathcal{R}P_{R\_Sig})^2 G_{E\_Amp} I_{L_{DC\ Block}}}{2\sigma_{B2B}^2} = \frac{(\mathcal{R}P_{Sig} \times I_{L_R})^2}{2(\sigma_{PD\_B2B}^2) N_{F_{E\_Amp}}} \quad (3.26)$$

### 3.2.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ

ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.1 สัญญาณรบกวนภายในลิงก์ ความแปรปรวนขาออกตัวตรวจจับแสงกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $\sigma_{PD\_SOA}^2$  มีค่าเป็นดังสมการที่ (3.27) เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3.23) และ (3.21) จะได้ค่าความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $\sigma_{SOA}^2$  และเอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $SNR_{SOA}$  ดังสมการที่ (3.28) และ (3.29) ตามลำดับ ในกรณีนี้กำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  จะแทนค่าจากสมการที่ (3.6)

$$\sigma_{PD\_SOA}^2 = \sigma_{Q\_Sig}^2 + \sigma_{Q\_ASE}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{Sig-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2 \quad (3.27)$$

$$\sigma_{SOA}^2 = \sigma_{PD\_SOA}^2 G_{E\_Amp} N_{F_{E\_Amp}} I_{L_{DC\ Block}} \quad (3.28)$$

$$SNR_{SOA} = \frac{(\mathcal{R}P_{R\_Sig})^2}{2\sigma_{SOA}^2} = \frac{(\mathcal{R}GP_{in\_SOA} \times I_{L_R})^2}{2(\sigma_{PD\_SOA}^2) N_{F_{E\_Amp}}} \quad (3.29)$$

### 3.3 การคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ

ตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ  $N_{F_{SOA}}$  คืออัตราส่วนระหว่างเอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีติด ๆ กัน  $SNR_{B2B}$  และเอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $SNR_{SOA}$  ดังสมการที่ (3.30) จากรูปที่ 3.1 ในการเปรียบเทียบกำหนดให้กำลังแสงของสัญญาณหลัก  $P_{Sig}$  ในสมการที่ (3.26) เท่ากับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  ในสมการที่ (3.29) เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (3.26) และ (3.29) ลงในสมการที่ (3.30) จึงได้

$$N_{F_{SOA}} = \frac{SNR_{B2B}}{SNR_{SOA}} = \frac{\sigma_{PD\_SOA}^2}{G^2 \sigma_{PD\_B2B}^2} \quad (3.30)$$

แต่เนื่องจากสัญญาณรบกวนความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวต้านทานหลังตัวตรวจจับแสง และสัญญาณรบกวนควอนตัมจากกระแสมีค่าน้อยมาก ในการคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอจึงควรละเลยความแปรปรวนจากสองสัญญาณรบกวนดังกล่าว และได้ตัวเลขสัญญาณรบกวนใหม่เป็นดังสมการที่ (3.31)

$$NF_{SOA} = \frac{\sigma_{PD\_SOA}^2}{\sigma_{PD\_B2B}^2} = \frac{\sigma_{Q\_Sig}^2 + \sigma_{Q\_ASE}^2 + \sigma_{Sig-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2}{G^2 \sigma_{Q\_Sig}^2} \quad (3.31)$$

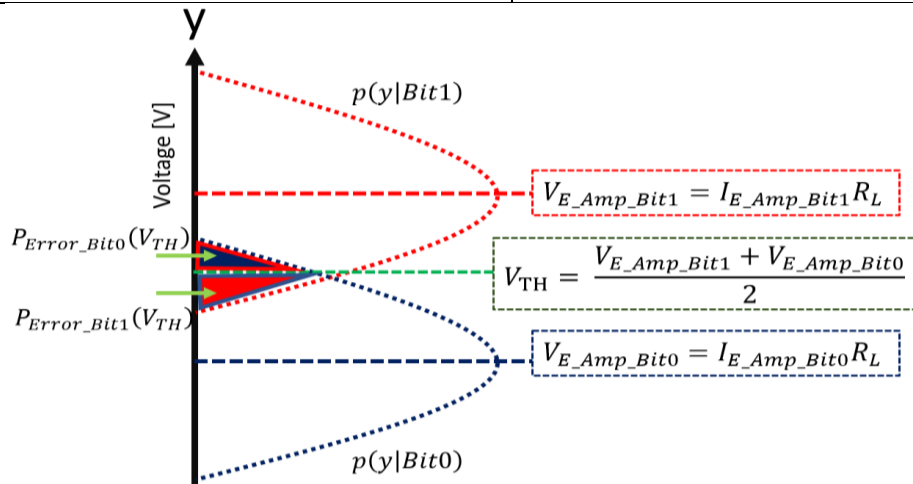
### 3.4 การคำนวณอัตราความผิดพลาดบิต

อัตราความผิดพลาดบิตเป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของสัญญาณในกรณีต่าง ๆ ในทางปฏิบัติตัวตรวจจับอัตราความผิดพลาดบิตทำงานในเทอมของแรงดันไฟฟ้า แต่จากการคำนวณในหัวข้อ 3.1 สัญญาณรบกวนภายในลิงก์ และ 3.2 การคำนวณเอสเอ็นอาร์ เป็นการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ในเทอมของกระแสซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้า ทั้งนี้อัตราความผิดพลาดบิตคาดการณ์ได้จากค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.3 และรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและค่าคุณลักษณะใช้หาอัตราความผิดพลาดบิต

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	หน่วย
อัตราความผิดพลาดบิต	$BER$	
ความน่าจะเป็นที่ตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตตรวจจับบิต 1 เป็นบิต 0	$P_{Error\_Bit1}(V_{TH})$	
ความน่าจะเป็นที่ตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตตรวจจับบิต 0 เป็นบิต 1	$P_{Error\_Bit0}(V_{TH})$	
อัตราการเกิดบิต 1 และบิต 0	$P(Bit1)$ และ $P(Bit0)$	
ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของบิต 1 และบิต 0	$p(y Bit1)$ และ $p(y Bit0)$	
ความแปรปรวนรวมของสัญญาณขาออกตัวตรวจจับแสงที่บิต 1 และบิต 0	$\sigma_{PD\_Bit1}^2$ และ $\sigma_{PD\_Bit0}^2$	$A^2$
ความแปรปรวนรวมของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0	$\sigma_{E\_Amp\_Bit1}^2$ และ $\sigma_{E\_Amp\_Bit0}^2$	$A^2$
ความแปรปรวนรวมของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0 ในเทอมแรงดันไฟฟ้า	$\sigma_{E\_Amp\_Bit1\_V^2}^2$ และ $\sigma_{E\_Amp\_Bit0\_V^2}^2$	$V^2$
กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง	$P_{R\_Sig}$	mW
กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่บิต 1 และบิต 0	$P_{R\_Bit1}$ และ $P_{R\_Bit0}$	mW
อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Ratio, ER)	$ER$	A
กระแสแสงที่บิต 1 และบิต 0	$I_{p\_Bit1}$ และ $I_{p\_Bit0}$	A

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	หน่วย
กระแสเฉลี่ยของสัญญาณขาออก ตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0	$I_{E\_Amp\_Bit1}$ และ $I_{E\_Amp\_Bit0}$	A
แรงดันเฉลี่ยของสัญญาณขาออกตัวขยาย สัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0	$V_{E\_Amp\_Bit1}$ และ $V_{E\_Amp\_Bit0}$	V
ค่าแรงดันขีดแบ่ง (Threshold Voltage)	$V_{TH}$	V



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข  
ของบิต 1 บิต 0 ที่เข้าตัวตรวจจับความผิดพลาดบิต

เนื่องจากภาครับของการทดลองชุดแรกในประเทศญี่ปุ่นประกอบจากอุปกรณ์วิจัย จึงสามารถ  
แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในหัวข้อนี้ได้ แต่การทดลองชุดสองที่ประเทศไทยใช้ภาครับเป็นมอดูลคิวเอส  
เอฟพี 28 ซึ่งภายในใช้ตัวขยายทางไฟฟ้าแบบจำกัด (Limiting electrical amplifier) จึงส่งผลให้ไม่  
สามารถคำนวณอัตราความผิดพลาดบิตได้เนื่องจากการทำงานไม่เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 3.3 แสดงการหาอัตราความผิดพลาดบิตของการทดลองซึ่งเกิดจากสองความน่าจะเป็น  
เป็นคือ (1) ความน่าจะเป็นที่ตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตตรวจจับบิต 1 เป็นบิต 0  
 $P_{Error\_Bit1}(V_{TH})$  และ (2) ความน่าจะเป็นที่ตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตตรวจจับบิต 0 เป็นบิต 1  
 $P_{Error\_Bit0}(V_{TH})$  โดยความน่าจะเป็นของทั้งสองเหตุการณ์สามารถหาได้จากปริพันธ์ของฟังก์ชัน  
การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของบิต 1 บิต 0 ( $p(y|Bit1)$  และ  $p(y|Bit0)$ ) ดังสมการ  
ที่ (3.32) และ (3.33) [17, 32] ตามลำดับ ทั้งนี้แรงดันขีดแบ่งจะคำนวณในลำดับถัดไป เมื่อนำค่า  
ทั้งหมดมาคำนวณกับอัตราการเกิดบิต 1  $P(Bit1)$  และบิต 0  $P(Bit0)$  อัตราความผิดพลาดบิต  
 $BER$  จะเป็นดังสมการที่ (3.34) [17, 32]

$$P_{Error\_bit1}(V_{TH}) = \int_{-\infty}^{V_{TH}} p(y|Bit1)dy \quad (3.32)$$

$$P_{Error\_bit0}(V_{TH}) = \int_{V_{TH}}^{\infty} p(y|Bit0)dy \quad (3.33)$$

$$BER = P(Bit1)P_{Error\_bit1}(V_{TH}) + P(Bit0)P_{Error\_bit0}(V_{TH}) \quad (3.34)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขเป็นไปดังสมการที่ (3.35) และ (3.36) [17, 32] ซึ่งเป็นไปตามการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการหาฟังก์ชันดังกล่าวได้แก่ (1) ความแปรปรวนรวมของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าบิต 1 และบิต 0 ในเทอมแรงดันไฟฟ้า ( $\sigma_{E\_Amp\_Bit1\_V^2}^2$  และ  $\sigma_{E\_Amp\_Bit0\_V^2}^2$ ) และ (2) แรงดันเฉลี่ยบิต 1 กับ 0 ของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า ( $V_{E\_Amp\_Bit1}$  และ  $V_{E\_Amp\_Bit0}$ ) แสดงในรูปที่ 3.3

$$p(y|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{E\_Amp\_Bit1\_V^2}^2}} \times e^{-\frac{(y-V_{E\_Amp\_Bit1})^2}{2\sigma_{E\_Amp\_Bit1\_V^2}^2}} \quad (3.35)$$

$$p(y|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{E\_Amp\_Bit0\_V^2}^2}} \times e^{-\frac{(y-V_{E\_Amp\_Bit0})^2}{2\sigma_{E\_Amp\_Bit0\_V^2}^2}} \quad (3.36)$$

ดังหลักการในรูปที่ 3.3 และสมการที่ (3.23) ความแปรปรวนรวมของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0 ( $\sigma_{E\_Amp\_Bit1}^2$  และ  $\sigma_{E\_Amp\_Bit0}^2$ ) หาได้จากผลคูณของความแปรปรวนรวมของสัญญาณขาออกตัวตรวจจับแสงที่บิต 1 และบิต 0 ( $\sigma_{PD\_Bit1}^2$  และ  $\sigma_{PD\_Bit0}^2$ ) กับกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรง  $IL_{DC\ Block}$ , ตัวเลขสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $NF_{E\_Amp}$  และอัตราขยายของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $G_{E\_Amp}$  ดังสมการที่ (3.37) และ (3.38) ตามลำดับ

$$\sigma_{E\_Amp\_Bit1}^2 = \sigma_{PD\_Bit1}^2 G_{E\_Amp}^2 NF_{E\_Amp} IL_{DC\ Block} \{A^2\} \quad (3.37)$$

$$\sigma_{E\_Amp\_Bit0}^2 = \sigma_{PD\_Bit0}^2 G_{E\_Amp}^2 NF_{E\_Amp} IL_{DC\ Block} \{A^2\} \quad (3.38)$$

จากที่กล่าวไปในย่อหน้าแรกของหัวข้อนี้ ความแปรปรวนดังกล่าวจึงเปลี่ยนจากเทอมกระแสมาเป็นเทอมแรงดัน โดยนำความแปรปรวนคูณกับความต้านทานหลังตัวตรวจจับแสงกำลังสอง  $R_{PD}^2$  ดังสมการที่ (3.39) และ (3.40)

$$\sigma_{E\_Amp\_Bit1\_V^2}^2 = R_{PD}^2 \sigma_{E\_Amp\_Bit1}^2 \{V^2\} \quad (3.39)$$

$$\sigma_{E\_Amp\_Bit0\_V^2}^2 = R_{PD}^2 \sigma_{E\_Amp\_Bit0}^2 \{V^2\} \quad (3.40)$$

ในลำดับถัดไปจะแสดงวิธีการหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และ บิต 0 ( $V_{E\_Amp\_Bit1}$  และ  $V_{E\_Amp\_Bit0}$ ) โดยตัวแปรต่าง ๆ จะเรียบเรียงในเทอมกระแสแล้วจึงแปลงเป็นเทอมกำลังเพื่อแทนค่าในสมการที่ (3.35) และ (3.36) ในภายหลัง กระแสแสงที่บิต 1 และบิต 0 ( $I_{p\_Bit1}$  และ  $I_{p\_Bit0}$ ) ของสัญญาณขาออกตัวตรวจจับแสงหาได้จากกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ บิต 1 และบิต 0 ( $P_{R\_Bit1}$  และ  $P_{R\_Bit0}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  และอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน  $ER$  ดังสมการที่ (3.41) และ (3.42) [17, 32] จะแสดงในบทถัดไป

$$P_{R\_Sig} = \frac{P_{R\_Bit1} + P_{R\_Bit0}}{2} \{W\} \quad (3.41)$$

$$ER = \frac{P_{R\_Bit1}}{P_{R\_Bit0}} \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.3), (3.41) และ (3.42) เมื่อเรียบเรียงใหม่จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสแสงที่บิต 1 และบิต 0 ( $I_{p\_Bit1}$  และ  $I_{p\_Bit0}$ ) ของสัญญาณขาเข้าตัวตรวจจับแสงในรูปของอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน  $ER$  และกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  ดังสมการที่ (3.43) และ (3.44) ตามลำดับ

$$I_{p\_Bit1} = \mathcal{R} \frac{2P_{R\_Sig}}{1 + ER^{-1}} \{A\} \quad (3.43)$$

$$I_{p\_Bit0} = \mathcal{R} \frac{2P_{R\_Sig}}{1 + ER} \{A\} \quad (3.44)$$

เนื่องจากสัญญาณขาออกจากตัวตรวจจับแสงเดินทางผ่านตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรงและตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าก่อนเข้าตัวตรวจจับความผิดพลาดบิตดังรูปที่ 3.2 กระแสเฉลี่ยของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0 ( $I_{E\_Amp\_Bit1}$  และ  $I_{E\_Amp\_Bit0}$ ) จึงเท่ากับกระแสแสงที่บิต 1 และบิต 0 ( $I_{p\_Bit1}$  และ  $I_{p\_Bit0}$ ) คูณกับรากที่สองของอัตราขยายของตัวขยายสัญญาณไฟฟ้า  $\sqrt{G_{E\_Amp}}$  และรากที่สองของกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของตัวบล็อกสัญญาณกระแสตรง  $\sqrt{IL_{DC\ Block}}$  ดังสมการที่ (3.45) และ (3.46) ตามลำดับ

$$I_{E\_Amp\_Bit1} = \sqrt{G_{E\_Amp} IL_{DC\ Block}} \times \mathcal{R} \frac{2P_{R\_Sig}}{1 + ER^{-1}} \{A\} \quad (3.45)$$

$$I_{E\_Amp\_Bit0} = \sqrt{G_{E\_Amp} IL_{DC\ Block}} \times \mathcal{R} \frac{2P_{R\_Sig}}{1 + ER} \{A\} \quad (3.46)$$

จากที่ได้กล่าวไปในย่อหน้าแรกของหัวข้อนี้ ผลลัพธ์จากสมการที่ (3.45) และ (3.46) จะนำไปแปลงเป็นค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0 ( $V_{E\_Amp\_Bit1}$  และ  $V_{E\_Amp\_Bit0}$ ) ซึ่งค่าดังกล่าวหาได้จาก ผลคูณระหว่างกระแสเฉลี่ยของสัญญาณ

ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และ 0 ( $I_{E\_Amp\_Bit1}$  และ  $I_{E\_Amp\_Bit0}$ ) กับความต้านทานหลังตัวตรวจจับแสง  $R_{PD}$  ดังสมการที่ (3.47) และ (3.48)

$$V_{E\_Amp\_Bit1} = \sqrt{G_{E\_Amp} I_{DC\ Block}} \times \mathcal{R} \frac{2P_{R\_Sig}}{1 + ER^{-1}} \times R_{PD} \quad \{V\} \quad (3.47)$$

$$V_{E\_Amp\_Bit0} = \sqrt{G_{E\_Amp} I_{DC\ Block}} \times \mathcal{R} \frac{2P_{R\_Sig}}{1 + ER} \times R_{PD} \quad \{V\} \quad (3.48)$$

แรงดันขีดแบ่งคือค่าที่ไว้ใช้ตัดสินช่วงของบิต 1 และบิต 0 ในตัวตรวจจับความผิดพลาดบิต โดยค่าของแรงดันขีดแบ่ง  $V_{TH}$  อยู่กึ่งกลางแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าที่บิต 1 และบิต 0 ( $V_{E\_Amp\_Bit1}$  และ  $V_{E\_Amp\_Bit0}$ ) ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.49)

$$V_{TH} = \frac{V_{E\_Amp\_Bit1} + V_{E\_Amp\_Bit0}}{2} \quad \{V\} \quad (3.49)$$

สมการที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  และอัตราความผิดพลาดบิต  $BER$  ในกรณีต่าง ๆ โดยคำนวณจากการแทนค่าสมการที่ (3.32), (3.33), และ (3.49) ลงใน (3.34) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงในบทถัดไป

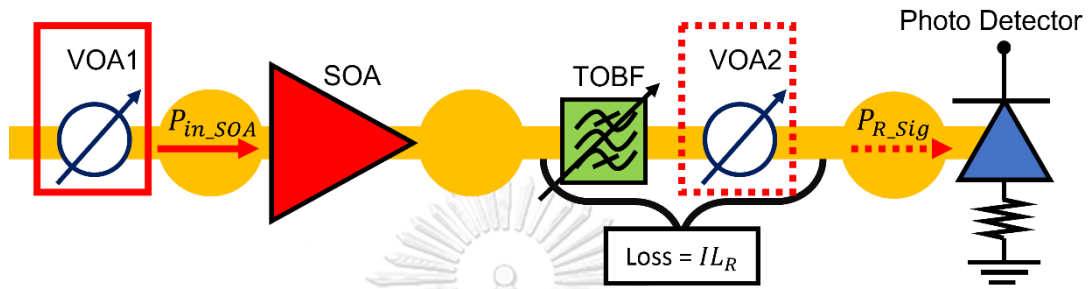
### 3.5 การวัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิต และกราฟช่วงไดนามิก

กราฟอัตราความผิดพลาดบิต (BER Plot) มีไว้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  และอัตราความผิดพลาดบิต  $BER$  ในการทดลองกราฟอัตราความผิดพลาดบิตจะวัดได้จากการปรับค่ากำลังสูญเสียแทรกหน้าภาครับ  $IL_R$  ทำให้วัดอัตราความผิดพลาดบิต  $BER$  ในทุก ๆ กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  ได้ จากสมการในบทนี้ทำให้สามารถคำนวณกราฟอัตราความผิดพลาดบิตดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.4 การคำนวณอัตราความผิดพลาดบิต

ประโยชน์ของการคำนวณกราฟอัตราความผิดพลาดบิตคือทำให้ผู้ทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎีได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เปรียบเทียบผลการทดลอง และการคำนวณอัตราความผิดพลาดบิตของการทดลองชุดหนึ่งไว้ในบทถัดไป

กราฟช่วงไดนามิก (Dynamic Range Plot) มีไว้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  และอัตราความผิดพลาดบิต  $BER$  ที่กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  มีค่าคงที่ จากรูปที่ 3.4 กราฟช่วงไดนามิกหาได้โดยการปรับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  ด้วยตัวลดทอนแสงปรับค่าได้หมายเลข 1 (กรอบเส้นทึบ) และคงค่ากำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R\_Sig}$  ด้วยตัวลดทอนแสงปรับค่าได้หมายเลข 2 (กรอบเส้นประ)

ประโยชน์ของการเปรียบเทียบระหว่างผลคำนวณและผลทดลองของกราฟช่วงไดนามิกคือ ทำให้ผู้ทดลองสามารถเห็นความรุนแรงของผลกระทบอื่นที่ไม่ใช่ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนรบกวนต่าง ๆ ในทุก ๆ ค่ากำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง  $P_{in\_SOA}$  โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เปรียบเทียบผลการทดลอง และการคำนวณของการทดลองชุดหนึ่งไว้ในบทถัดไป



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงวิธีการวัดกราฟช่วงไดนามิกของตัวขยายแสงเอสโอเอ

### 3.6 สมการงบกำลัง

ระยะทางการเชื่อมต่อของระบบสื่อสารทางแสงสามารถคำนวณได้จากสมการงบกำลัง โดยค่าคุณลักษณะที่สำคัญแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าคุณลักษณะที่ใช้กับสมการงบกำลังในการทดลอง

ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	หน่วย
งบกำลังทั้งหมดของลิงก์	$P_T$	dB
กำลังแสงขาออกจากภาคส่ง	$P_S$	dBm
ความไวแสงของภาครับ	$P_R$	dBm
อัตราขยายของตัวขยายแสง	$G$	dB
สัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง	$\alpha$	dB/km
ระยะทางของลิงก์	$L$	km
กำลังสูญเสียแทรกทั้งหมดในลิงก์	$\Sigma IL$	dB
กำลังเผื่อของระบบ	$margin$	dB
ระยะทางสูงสุดของลิงก์	$L_{max}$	km
กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง ที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ $10^{-12}$ ในกรณีติด ๆ กัน	$P_{R\_B2B\_10^{-12}}$	dBm



ค่าคุณลักษณะ	สัญลักษณ์	หน่วย
กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง ที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ $10^{-12}$ ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ	$P_{R\_SOA\_10^{-12}}$	dBm
เอสเอ็นอาร์ที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ $10^{-12}$	$SNR_{10^{-12}}$	เท่า
ปัจจัยคุณภาพ (Quality Factor, Q Factor)	$Q$	เท่า

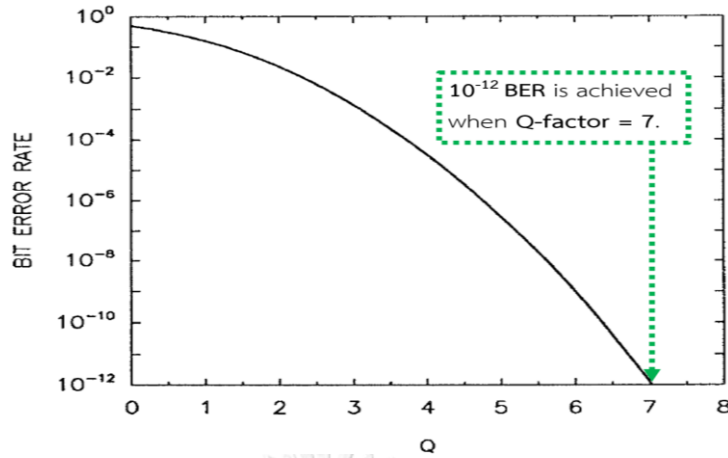
ในการสื่อสารทางแสงงบกำลังทั้งหมดของลิงก์  $P_T$  ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่กำหนดระยะทางสูงสุด โดยงบกำลังขึ้นอยู่กับสามปัจจัยหลักคือ (1) กำลังแสงขาออกจากภาคส่ง  $P_S$ , (2) ความไวแสงของภาครับ  $P_R$ , และ (3) อัตราขยายของตัวขยายแสง  $G$  โดยปัจจัยข้างต้นจะเปลี่ยนแปลงเป็นกำลังสูญเสียแทรกจากอุปกรณ์ภายในลิงก์ในกรณีนี้คือ (1) เส้นใยแก้วนำแสง, (2) ตัวเชื่อมต่อ (มีค่าประมาณ 0.2 dB ต่อจุดเชื่อมต่อ), และ (3) ตัวกรองแสงแบบปรับค่าได้ สมการงบกำลังเป็นไปดังสมการที่ (3.50) [17] เมื่อจัดเรียงสมการงบกำลังใหม่จะได้ระยะทางสูงสุดของลิงก์  $L_{max}$  เป็นดังสมการที่ (3.51)

$$P_T = P_S - P_R + G = \alpha L + \Sigma IL + margin \quad (3.50)$$

$$L_{max} = \frac{P_S - P_R + G - (\Sigma IL + margin)}{\alpha} \quad (3.51)$$

มาตรฐาน 100GBASE-LR4 กำหนดให้อัตราความผิดพลาดบิตต้องต่ำกว่า  $10^{-12}$  ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขออนุญาตใช้ตัวแปรใหม่คือ กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในทั้งสองกรณี ( $P_{R\_B2B\_10^{-12}}$  และ  $P_{R\_SOA\_10^{-12}}$ ) แทนที่ค่าความไวแสงของภาครับ  $P_R$  ในการคำนวณงบกำลัง ซึ่งค่ากำลังแสงดังกล่าวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของเอสเอ็นอาร์ และกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงดังสมการที่ (3.18) โดยค่าเอสเอ็นอาร์ที่อัตราความผิดพลาดบิตต่าง ๆ ประมาณได้จากค่าปัจจัยคุณภาพ  $Q$  ดังสมการที่ (3.52) [34] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยคุณภาพกับอัตราความผิดพลาดบิตแสดงดังรูปที่ 3.5 ดังนั้นเอสเอ็นอาร์ที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$   $SNR_{10^{-12}}$  คือ 49 เท่า

$$SNR_{10^{-12}} = Q^2 = 7^2 = 49 \quad (3.52)$$



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยคุณภาพ กับอัตราความผิดพลาดบิต [34]

ดังนั้น  $P_{R_{B2B_{10^{-12}}}}$  ซึ่งคือกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในกรณีใด ๆ ก็ตาม หาได้จากการคำนวณค่ากำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R_{Sig}}$  จากสมการที่ (3.26) โดยแทนค่า (1) ความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีใด ๆ ก็ตาม  $\sigma_{B2B}^2$  จากสมการที่ (3.24), (2) ตัวแปรต่าง ๆ จากตารางที่ 3.1 ถึง 3.2 , และ (3) เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีใด ๆ ก็ตาม  $SNR_{B2B}$  เท่ากับ 49 โดยผลที่ได้เป็นดังสมการที่ (3.53)

$$SNR_{B2B} = 49 = \frac{(\mathcal{R}P_{R_{Sig}})^2}{2(\sigma_{PD_{B2B}}^2)NF_{E_{Amp}}} = \frac{(\mathcal{R}P_{R_{B2B_{10^{-12}}}})^2}{2(\sigma_{PD_{B2B}}^2)NF_{E_{Amp}}} \quad (3.53)$$

เมื่อแก้สมการที่ (3.53) จะได้ว่า

$$(0.47 \times P_{R_{B2B_{10^{-12}}}})^2 = (4.512 \times 10^{-9} P_{R_{B2B}} + 9.941 \times 10^{-12}) 49 \times 8$$

$$P_{R_{B2B_{10^{-12}}}} = 1.334 \times 10^{-4} \{W\} = 0.1334 \{mW\} = -8.75 \{dBm\}$$

จากการแก้สมการข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความไวแสงของภาครับจะแทนค่าด้วย -8.75 dBm ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอจะหา  $P_{R_{SOA_{10^{-12}}}}$  ซึ่งคือกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ได้จากการคำนวณค่ากำลังแสงของสัญญาณหลักที่เข้าตัวตรวจจับแสง  $P_{R_{Sig}}$  จากสมการที่ (3.29) โดยแทนค่า (1) ค่าความแปรปรวนขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $\sigma_{SOA}^2$  จากสมการที่ (3.27), (2) ตัวแปรต่าง ๆ จากตารางที่ 3.1 ถึง 3.2, และ (3) เอสเอ็นอาร์ขาออกตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $SNR_{SOA}$  เท่ากับ 49 โดยผลที่ได้เป็นดังสมการที่ (3.54)

$$SNR_{SOA} = 49 = \frac{(\mathcal{R}P_{R\_Sig})^2}{2(\sigma_{PD\_SOA}^2)NF_{E\_Amp}} = \frac{(\mathcal{R}P_{R\_SOA\_10^{-12}})^2}{2(\sigma_{PD\_SOA}^2)NF_{E\_Amp}} \quad (3.54)$$

ทั้งนี้การแก้สมการที่ (3.54) จำเป็นต้องทราบค่าโอเอสเอ็นอาร์  $OSNR$  ของตัวขยายแสงในสมการที่ (3.14), (3.15), และ (3.16) ก่อน ดังนั้นกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{R\_SOA\_10^{-12}}$  จึงสามารถคำนวณได้ภายหลังจากการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์  $OSNR$  แล้วในบทถัดไป



## บทที่ 4

### ผลการทดลองเบื้องต้น

ในบทนี้นำเสนอผลการทดลองที่ได้จากอุปกรณ์ทั้งสองชุด และยืนยันแนวโน้มของผลการทดลองด้วยการคำนวณสมการในบทก่อนหน้าโดยมีทั้งหมด 5 หัวข้อย่อยคือ 4.1 ผลการวัดค่าคุณลักษณะของตัวขยายแสงเอสโอเอ, 4.2 การหาค่ากำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$ , 4.3 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR4 โดยใช้ใช้อุปกรณ์ชุดแรก, 4.4 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR โดยใช้ใช้อุปกรณ์ชุดแรก และ 4.5 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR4 โดยใช้ชุดอุปกรณ์ชุดสอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการวัดค่าคุณลักษณะของตัวขยายแสงเอสโอเอ

ในหัวข้อนี้แสดงการวัดค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของตัวขยายแสงเอสโอเอที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีวัตถุประสงค์คือ

- (1) หาช่วงความยาวคลื่นที่ตัวขยายแสงเอสโอเอทำงาน ด้วยผลการวัดสเปกตรัมแสงขาออกด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม
- (2) วัดอัตราขยาย  $G$  ของตัวขยายแสงเอสโอเอและโอเอสเอ็นอาร์  $OSNR$  ที่กำลังแสงขาเข้าต่าง ๆ ต่อมาหาค่ากราฟแนวโน้ม (approximation plot) ของค่าทั้งสองด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนค่าที่สมการต่าง ๆ ใน **บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง** เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองในหัวข้อถัดไป
- (3) เปรียบเทียบตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ  $NF_{SOA}$  ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม และการคำนวณความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน
- (4) ประมาณเวลาค่าฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอเพื่อบรรลุมุมวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยการวัดรูปคลื่นด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณดิจิทัล

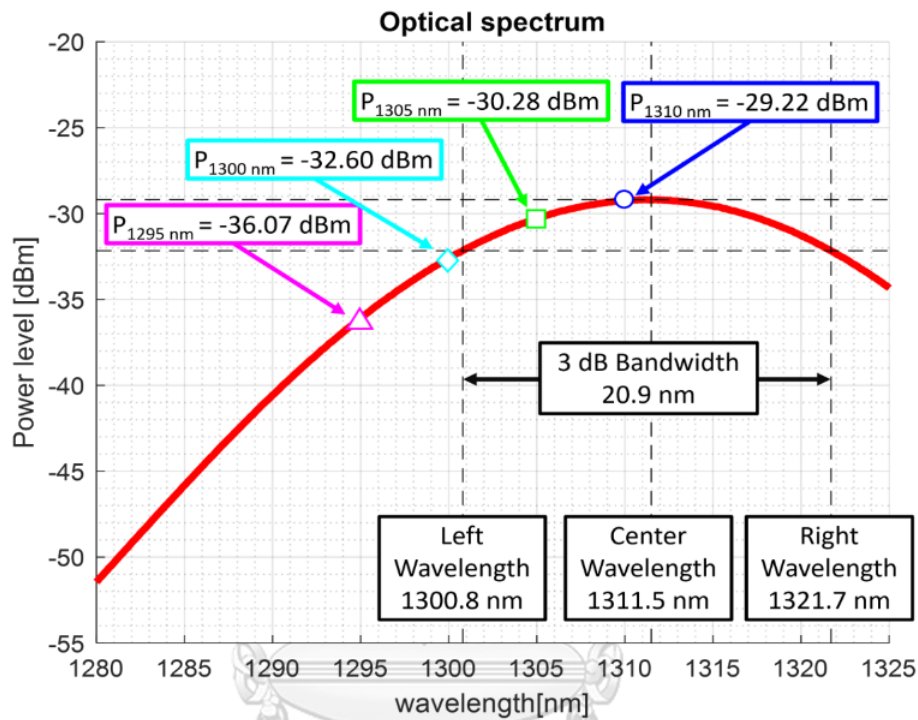
##### 4.1.1 ช่วงความยาวคลื่นที่ตัวขยายแสงเอสโอเอทำงาน

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า 200 mA เข้าตัวขยายแสงเอสโอเอพบว่าสเปกตรัมแสงขาออกได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ [ภาคผนวก 2] ดังนี้

- (1) ความกว้างแบนด์วิดท์สามดีบี 20.9 nm ความยาวคลื่นที่จุดยอดสเปกตรัม 1311.5 nm
- (2) ความยาวคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์สามดีบี 1300.8 nm ถึง 1321.7 nm

- (3) กำลังแสงที่ความยาวคลื่น 1295, 1300, 1305, และ 1310 nm มีค่า -36.07, -32.60, -30.28, และ -29.22 dBm ตามลำดับ

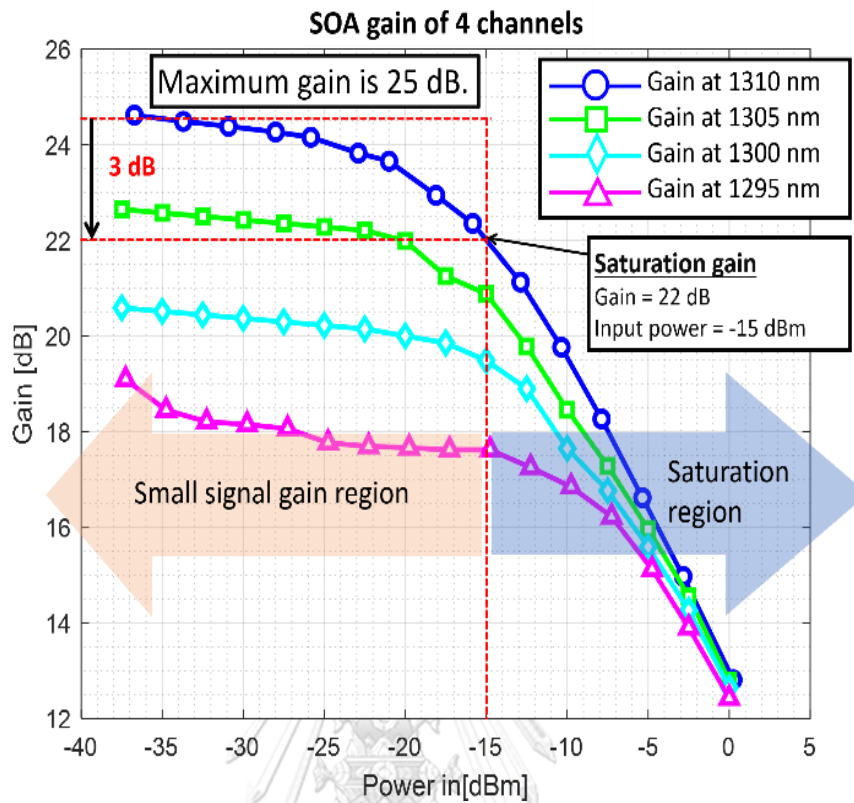
ดังนั้นตัวขยายแสงเอสโอเอตัวนี้จึงสามารถทำงานในมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ได้ และให้อัตราขยายสูงที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1305 nm



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมขาออกของเอสโอเอเมื่อป้อนด้วยกระแสไฟ 200 mA

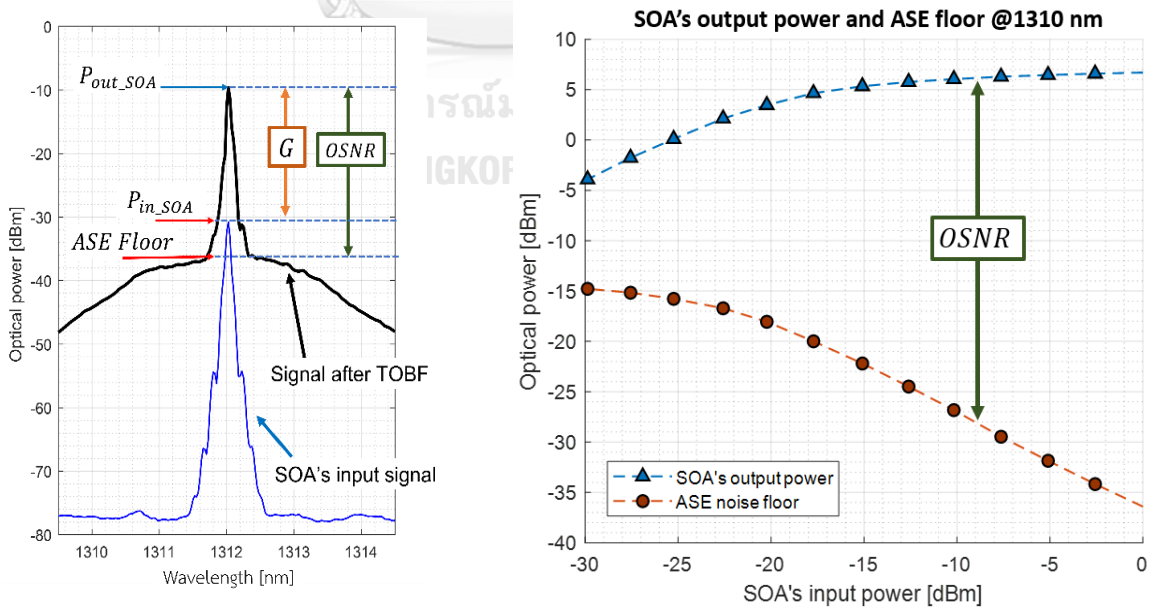
#### 4.1.2 ผลการวัดอัตราขยาย

จากรูปที่ 4.2 อัตราขยายของตัวขยายแสงเอสโอเอที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 25 dB ช่วงอัตราขยายเมื่อสัญญาณต่ำ (Small-signal Gain) เกิดขึ้นเมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอต่ำกว่า -15 dBm และช่วงอัตราขยายเมื่ออิ่มตัว (Saturation Gain) เกิดขึ้นเมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวสูงกว่า -15 dBm สำหรับความยาวคลื่น 1305, 1300, และ 1295 nm ค่ากำลังขยายมีลักษณะเรียงจากมากไปน้อยเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 อัตราขยายของตัวขยายแสงเอเลอเอที่ความยาวคลื่นตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4

### 4.1.3 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์

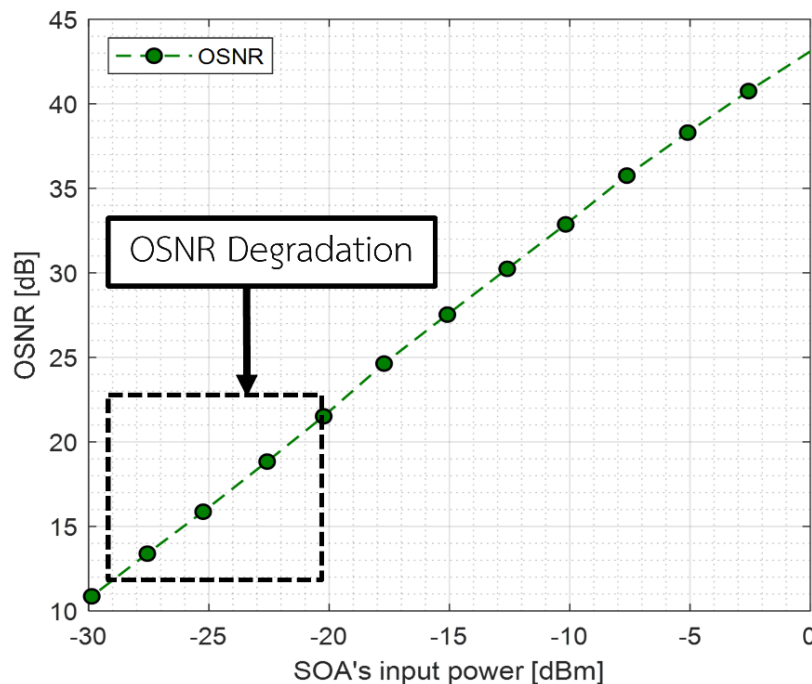


รูปที่ 4.3 (ซ้าย) สเปกตรัมแสงขาเข้า&ขาออกเอเลอเอ และ (ขวา) กราฟกำลังแสงขาออกเอเลอเอ และกำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสเอ็นอาร์เทียบกับกำลังแสงขาเข้าเอเลอเอ

รูปที่ 4.3 (ซ้าย) แสดงวิธีการวัดอ่านค่าโอเอสเอ็นอาร์ในหน่วย dB ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างยอดกำลังแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{out\_SOA}$  กับระดับพื้นสัญญาณรบกวนเอเอสอี (ASE noise floor) ของสเปกตรัมแสงขาออกเอสโอเอในหน่วย dBm ส่วนรูปที่ 4.3 (ขวา) แสดงผลการวัดสองตัวแปรข้างต้นเพื่อหาค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่แต่ละค่ากำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  ได้ผลสรุปดังนี้

- (1) ในช่วงอัตราขยายอิมิตัวพบว่า กำลังแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าลู่เข้าใกล้ 7 dBm เมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง  $P_{in\_SOA}$  เพิ่มขึ้นเกิน -15 dBm ในขณะที่กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วแบบเชิงเส้น
- (2) ในทางกลับกันในช่วงอัตราขยายเมื่อสัญญาณขาเข้าต่ำ กำลังแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อเทียบกับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่เพิ่มขึ้นก่อนถึง -15 dBm แต่กำลังแสงของสัญญาณรบกวนเอเอสอีมีค่าค่อยๆ ลดลงจาก -13 dBm

รูปที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์จากรูปที่ 4.3 (ขวา) พบว่าโอเอสเอ็นอาร์มีค่าแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ การเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์เกิดในช่วงกำลังแสงขาเข้าต่ำเนื่องจากกำลังแสงสัญญาณหลักที่น้อย และระดับพื้นสัญญาณรบกวนเอเอสอีที่มาก



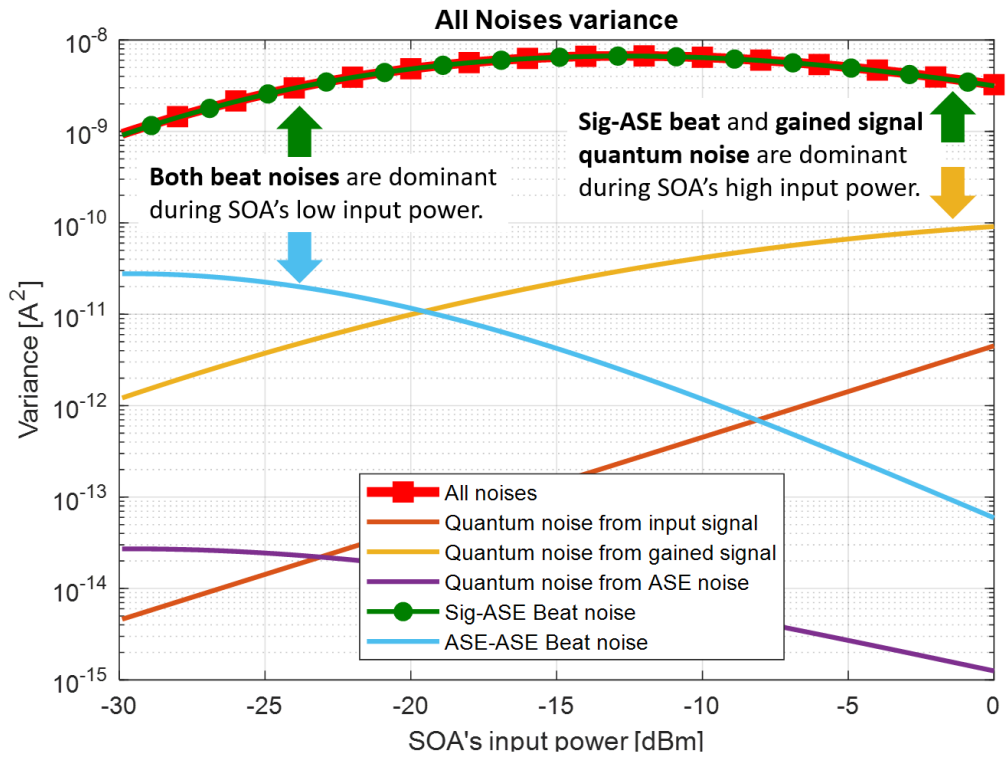
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโอเอสเอ็นอาร์และกำลังแสงขาเข้าเอสโอเอ

#### 4.1.4 ผลการวัดตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ

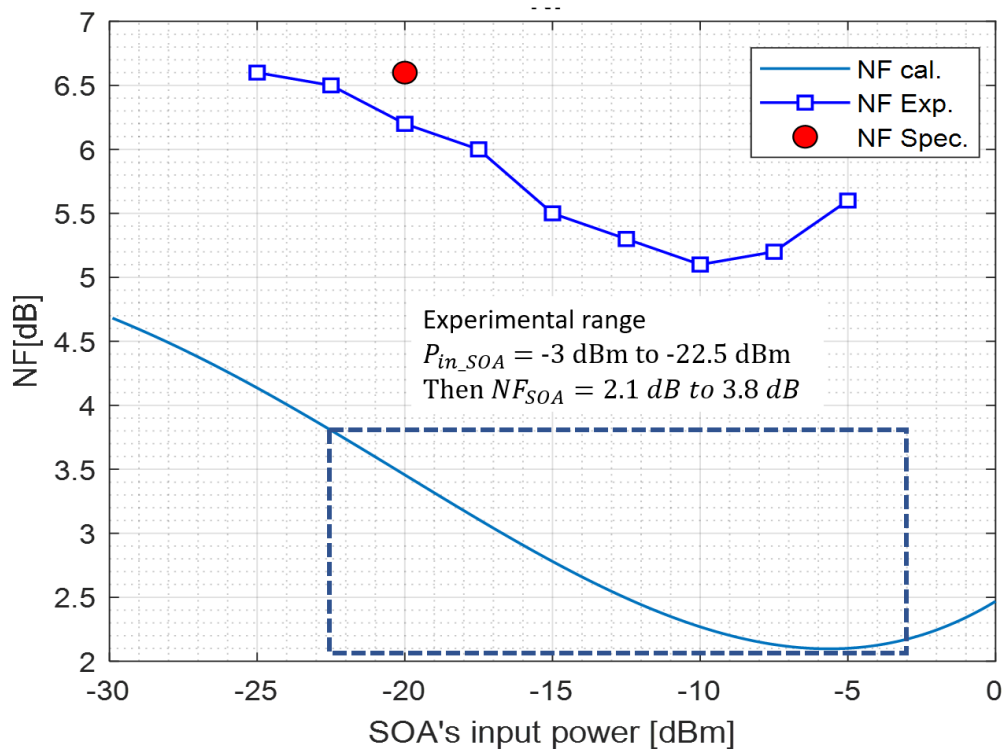
ตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ  $NF_{SOA}$  คำนวณได้จากความแปรปรวนต่าง ๆ ในหัวข้อ 3.1 สัญญาณรบกวนภายในลิงก์ โดยแทนค่าประมาณของอัตราขยาย  $G$ , โอเอสเอ็นอาร์  $OSNR$ , และตารางที่ 3.1 ลงในสมการความแปรปรวนได้แก่ (3.5), (3.7), (3.14), (3.15), และ (3.16) เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแปรปรวนต่าง ๆ กับกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอพบว่า ได้ผลเป็นดั่งเส้นกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  น้อย สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการปิดกันทั้งสองจะมีความรุนแรง แต่เมื่อกำลังแสงขาเข้ามากรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลักและการปิดกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอีจะมีความรุนแรง สรุปลคือสัญญาณรบกวนควอนตัมจากการปิดกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอี  $\sigma_{Sig-ASE}^2$  มีความรุนแรงที่สุดในทุกกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$

เมื่อนำตัวแปรต่าง ๆ แทนค่าลงในสมการที่ (3.31) พบว่าตัวเลขสัญญาณรบกวนของตัวขยายแสงเอสโอเอ  $NF_{SOA}$  มีลักษณะเป็นกราฟเว้าล่างดังรูปที่ 4.6 ซึ่งผลการคำนวณดังกล่าวมีแนวโน้มเดียวกับผลการทดลองวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงของบริษัท Yokogawa รุ่น AQ6370D และที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอเท่ากับ -20 dBm ค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับ [ภาคผนวก 2] การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่ -3 dBm ถึง -22.5 dBm ตัวเลขสัญญาณรบกวนดังกล่าวจากการคำนวณจึงอยู่ในช่วง 2.1 dB ถึง 3.8 dB





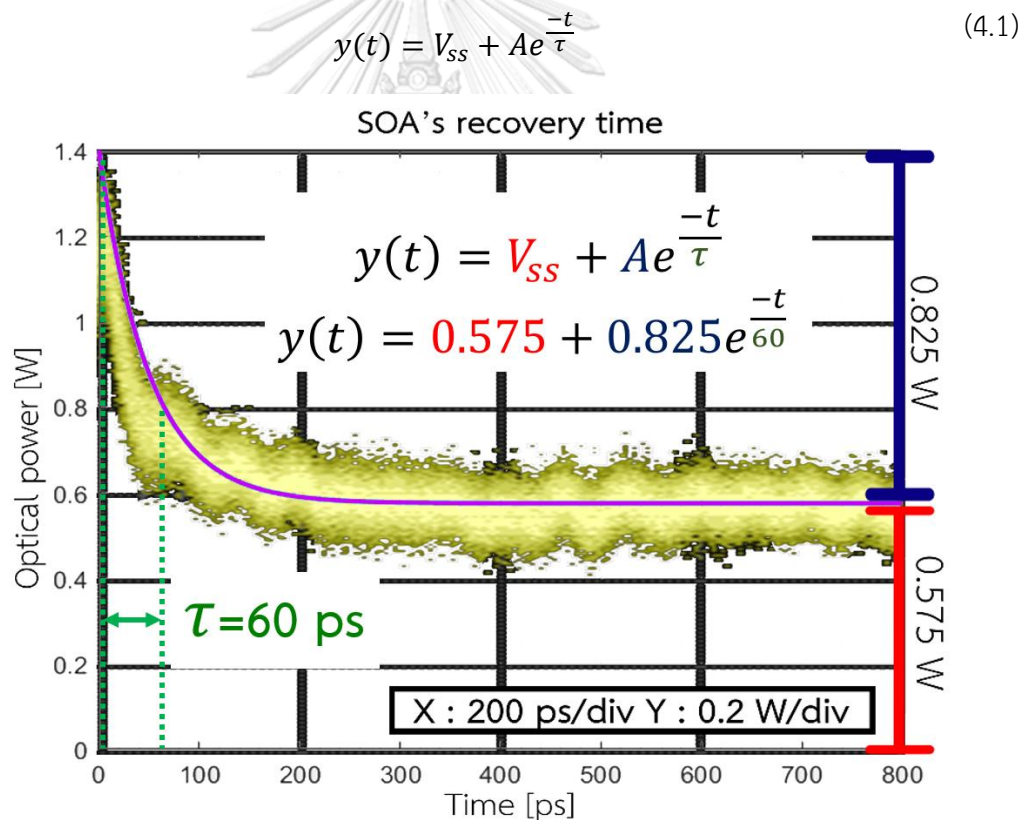
รูปที่ 4.5 การคำนวณความแปรปรวนสัญญาณรบกวนรวมทั้งหมด



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองเทียบกับการคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนรวมของตัวขยายแสงเอสโอเอ

#### 4.1.5 เวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอ

เวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอคือระยะเวลาที่กำลังแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอ กลับเข้าสู่ระดับเสถียรภายหลังจากการขยายแสงอย่างเฉียบพลัน โดยหาได้จากการตั้งค่ารูปแบบ ข้อมูลเป็นบิต 0 ติดกัน 31 ตัวต่อบิต 1 ติดกัน 31 ตัว จากนั้นนำรูปคลื่นดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับ ฟังก์ชันลดลงของ เอกซ์โพเนนเชียล (exponential decay function) (4.1) เมื่อแทนค่าที่เหมาะสม ลงในสมการดังกล่าวดังเช่นใน รูปที่ 4.7 เวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงจะเท่ากับค่าคงตัวเวลา  $\tau$  ซึ่งในที่นี้ มีค่าประมาณ 60 ps ดังนั้นตัวขยายแสงเอสโอเอนี้เมื่อใช้งานกับมาตรฐาน 100GBASE-LR4 และ 10GBASE-LR จะมีเวลาฟื้นฟูยาวกว่าคาบบิตที่ 40 ps และสั้นกว่าคาบบิตที่ 100 ps ตามลำดับ ดังที่ ได้กล่าวไปในวัตถุประสงค์ข้อที่ 1



รูปที่ 4.7 ผลการวัดเวลาฟื้นฟูของตัวขยายแสงเอสโอเอ

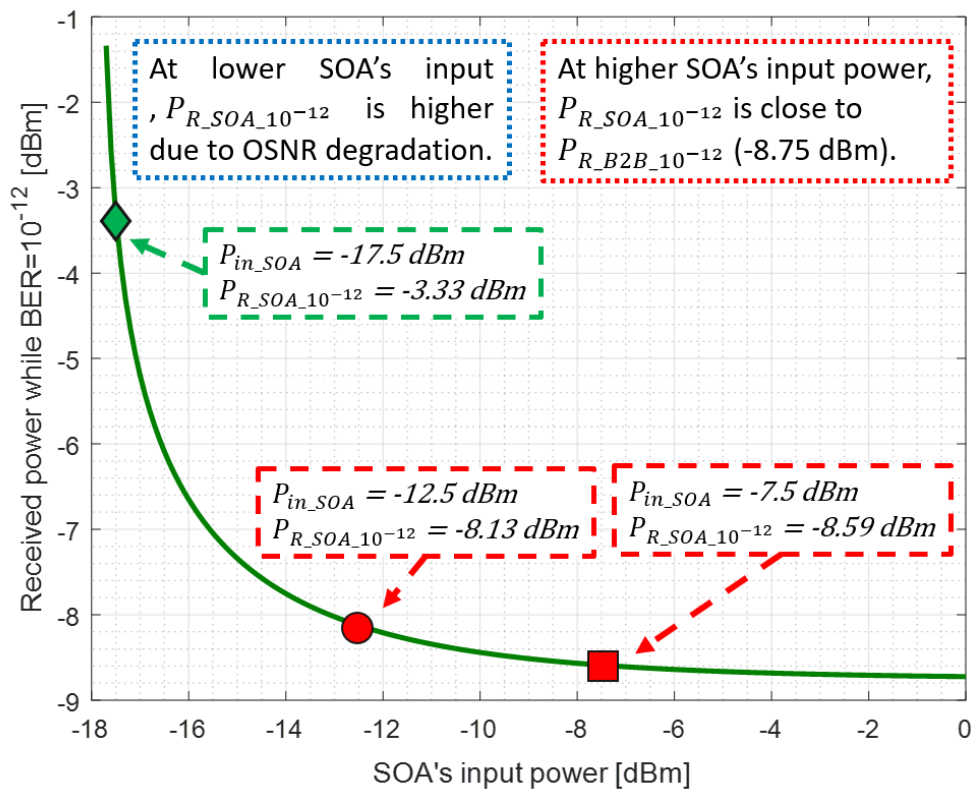
#### 4.2 การหาค่ากำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ $10^{-12}$

ดังที่ได้กล่าวไปในย่อหน้าสุดท้ายหัวข้อ 3.6 สมการบังคับกำลัง กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{R\_OSA\_10^{-12}}$  หาได้จากการแก้สมการที่ (3.54) โดยแทนค่า  $P_{R\_Sig}$  ด้วย  $P_{R\_OSA\_10^{-12}}$

$$\begin{aligned}
 (\mathcal{R}P_{R\_Sig})^2 &= 2NF_{E\_Amp}SNR_{10^{-12}}(\sigma_{Q\_Sig}^2 + \sigma_{Q\_ASE}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{Sig-ASE}^2 \\
 &\quad + \sigma_{ASE-ASE}^2) \\
 0 &= P_{R\_OSA\_10^{-12}}^2 \left( \frac{4R^2B_{PD}}{OSNR \times Res} + \frac{R^2B_{PD}(2B_{TOBF} - B_{PD})}{(OSNR \times Res)^2} - \frac{R^2}{2NF_{E\_Amp}SNR_{10^{-12}}} \right) \\
 &\quad + P_{R\_OSA\_10^{-12}}(2qRB_{PD}) \left( 1 + \frac{B_{TOBF}}{OSNR \times Res} \right) \\
 &\quad + \left( \frac{4k_B T}{R_{PD}} B_{PD} + 2q(I_D + I_L)B_{PD} \right)
 \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าโอเอสเอ็นอาร์  $OSNR$  ซึ่งสัมพันธ์กับกับ  $P_{in\_SOA}$  ตามสมการที่ (3.10) และแก้สมการกำลังสอง (Quadratic equation) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง  $P_{in\_SOA}$  และกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{R\_SOA\_10^{-12}}$  เป็นดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- (1) ที่ช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอสูง (-12.5 dBm ถึง 0 dBm) กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{R\_SOA\_10^{-12}}$  มีค่าใกล้เคียงกับกรณีติด ๆ กัน  $P_{R\_B2B\_10^{-12}}$  ที่ -8.75 dBm เนื่องจากเป็นช่วงที่สัญญาณรบกวนต่ำ อย่างไรก็ตามกำลังแสงที่คำนวณได้นี้ยังไม่ได้รวมผลกระทบรูปแบบข้อมูลซึ่งไม่สามารถพิสูจน์ได้จากการคำนวณ [5]
- (2) ที่ช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอต่ำ (น้อยกว่า -12.5 dBm) กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่พิจารณาสูงขึ้นจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ และที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอต่ำกว่า -17.8 dBm อัตราความผิดพลาดบิตมีค่าสูงกว่า  $10^{-12}$  ในทุกกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง
- (3) ในการทดลองชุดแรกสนใจกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  ที่ -7.5 dBm, -12.5 dBm, -17.5 dBm, และ -22.5 dBm ซึ่งคำนวณกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$   $P_{R\_OSA\_10^{-12}}$  เท่ากับ -8.59 dBm, -8.13 dBm, -3.33 dBm, และหาค่าไม่ได้ตามลำดับ



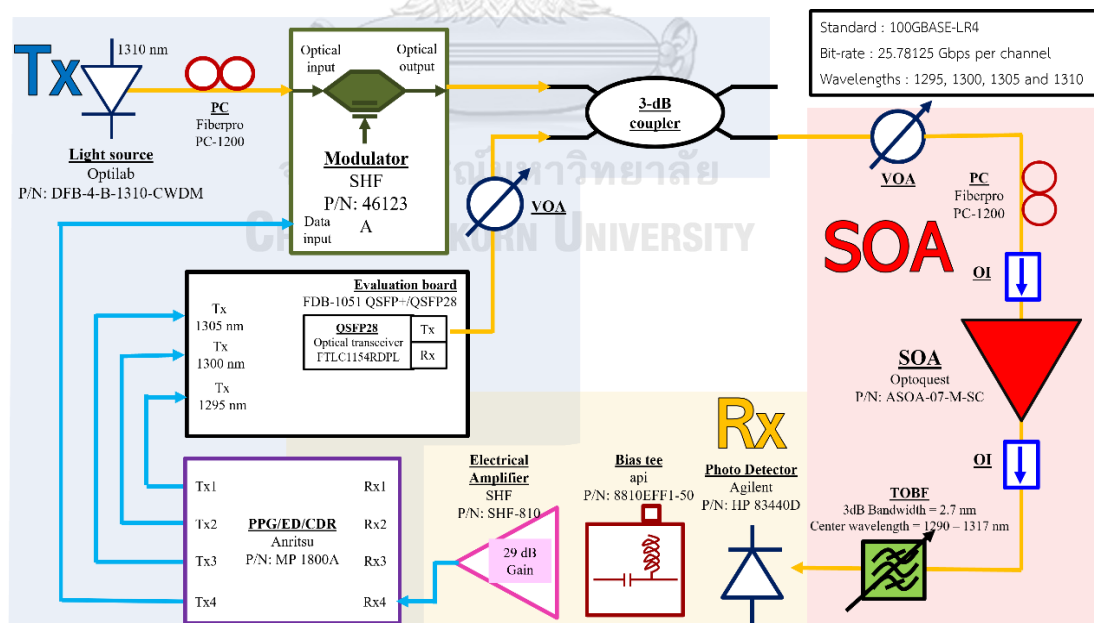
รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$

ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ

### 4.3 ผลการทดลองมาตรฐาน 100GBASE-LR4 โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก

ผลการทดลองในหัวข้อนี้ได้รับการตีพิมพ์ในบทความ Data Pattern Effect of SOA at 25 Gbps with Different PRBS and Multi-channel Amplification ในงานประชุมวิชาการ 2021 IEEE 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2021), ที่จังหวัดเชียงใหม่ ณ วันที่ 19 – 22 พฤษภาคม 2564 [35]

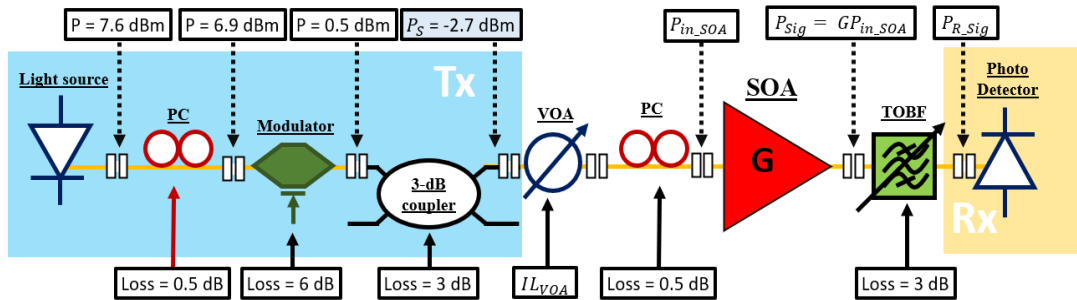
การทดลองนี้ตั้งเป้าเพื่อ (1) เปรียบเทียบการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอในลิงก์ที่ใช้มาตรฐาน 10GBASE-LR และ 100GBASE-LR4 ตามวัตถุประสงค์ที่ 1 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้, (2) ทำกำลังแสงขาเข้าที่เหมาะสมกับการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอด้วยกราฟช่วงไดนามิก ตามวัตถุประสงค์ที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้, (3) เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของกราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีต่าง ๆ , (4) พิสูจน์ผลกระทบรูปแบบข้อมูลด้วยการเปลี่ยนลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม, และ (5) พิสูจน์ผลของเอ็กซ์จีเอ็มด้วยการใช้งานภาคส่งทั้งสี่ช่องสัญญาณ แผนภาพของการทดลองชุดแรกเป็นไปดังรูปที่ 4.9 โดยภาครับและส่งประกอบจากอุปกรณ์วิจัย ทำให้สามารถคำนวณอัตราความผิดพลาดบิตในระบบได้



รูปที่ 4.9 แผนภาพการทดลองชุดแรกในประเทศญี่ปุ่น

### 4.3.1 การวิเคราะห์หึ่งบกำลังของการทดลองชุดแรก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกำลังแสงของสัญญาณในทุกช่วงตัวเชื่อมต่อ และค่ากำลังสูญเสียของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.10 โดยกำลังแสงของสัญญาณที่แต่ละตำแหน่งแสดงด้วยลูกศรประสีดำ และกำลังสูญเสียแทรกของแต่ละอุปกรณ์ที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 2 แสดงด้วยลูกศรทึบ



รูปที่ 4.10 ผลการวัดค่ากำลังแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ

และผลการวัดกำลังสูญเสียแทรกของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองชุดแรก

การทดลองสนใจค่ากำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  ที่ -7.5 dBm, -12.5 dBm, -17.5 dBm, และ -22.5 dBm จึงแทรกตัวลดทอนแสงแบบปรับค่าได้ก่อนหน้าตัวควบคุมโพลาไรเซชันเพื่อจำลองกำลังสูญเสียแทรกเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ค่าลดทอนแสง 4.3 dB, 9.3 dB, 14.3 dB, และ 19.3 dB สำหรับจำลองค่าลดทอนจากเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 11.5, 25.7, 40.0, และ 54.2 กิโลเมตรตามลำดับ

จากหัวข้อ 4.2 การหาค่ากำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  ตัวขยายแสงเอสโอเอไม่สามารถให้อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-12}$  ในช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอน้อยกว่า -17.8 dBm จึงวิเคราะห์หึ่งบกำลังได้สามกรณีแรก ขาดกรณีสุดท้ายในกรณีกำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงเท่ากับ -22.5 dBm เป็นดังตารางที่ 4.1

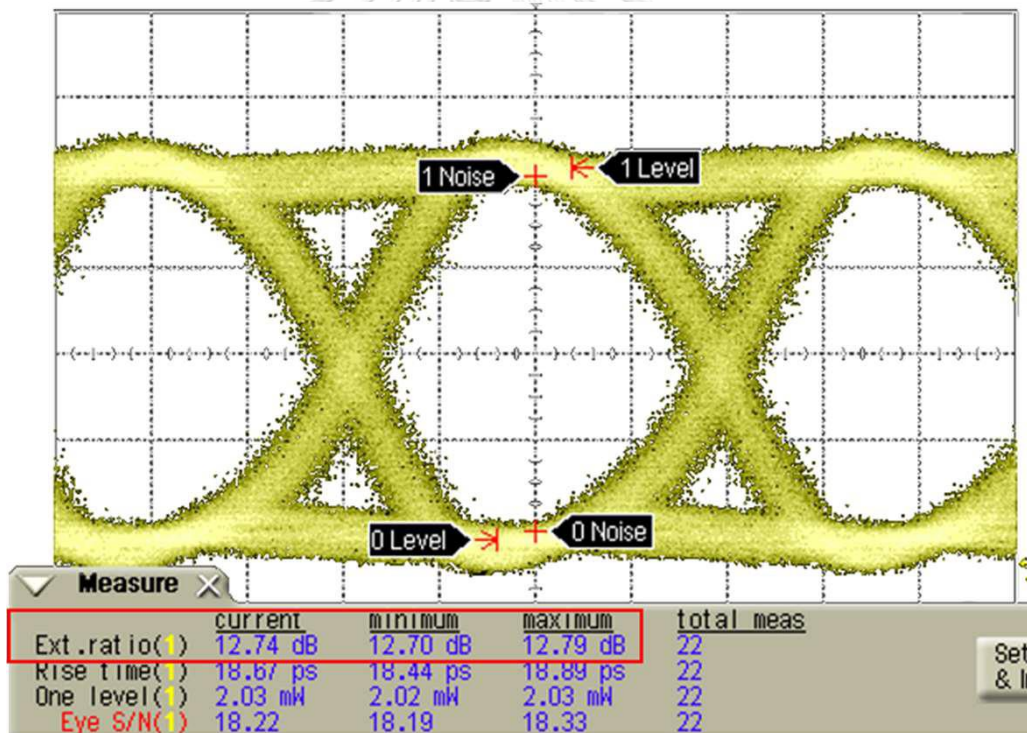
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบบกำลังในกรณีต่าง ๆ ในการทดลองชุดแรก

$P_{in\_SOA}$	$IL_{VOA}$	$\Sigma IL$	$P_S$	$P_{R\_SOA\_10^{-12}}$	$G$	$P_T$	margin
-7.5 dBm	4.3 dB	8.8 dB	-2.7 dBm	-8.59 dBm	19 dB	24.89 dB	16.09 dB
-12.5 dBm	9.3 dB	13.8 dB		-8.13 dBm	21 dB	26.43 dB	12.63 dB
-17.5 dBm	14.3 dB	18.8 dB		-3.33 dBm	23 dB	23.63 dB	4.83 dB

จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.1 พบว่าทั้งสามกรณีนี้ประมาณการใช้เส้นใยแก้วนำแสง ระยะทาง 11.5, 25.7, และ 40.0 กิโลเมตรสามารถรับส่งข้อมูลที่อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-12}$  ได้ โดยสอดคล้องกับในกรณีกำลังแสงขาเข้าตัวขยายเอสโอเอที่ -7.5 dBm, -12.5 dBm, และ -17.5 dBm มีกำลังเผื่อของระบบ *margin* เท่ากับ 16.09 dB, 12.63 dB, และ 4.83 dB ตามลำดับ

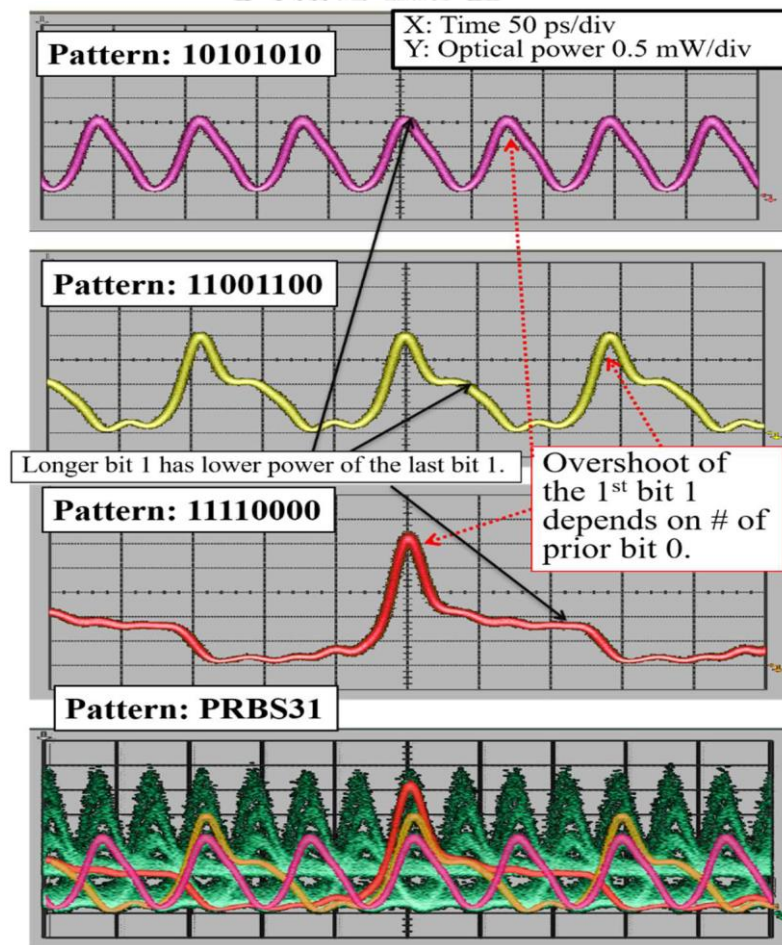
#### 4.3.2 ผลการวัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงของการทดลองชุดแรก

อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน *ER* ของสัญญาณแสงในกรณีติด ๆ กันมีค่าเท่ากับ 12.74 dB เนื่องจากกำลังแสงที่บิต 1 และบิต 0 ในแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงในกรณีติด ๆ กันมีความคงที่ ดังรูปที่ 4.11 ดังนั้นจึงสามารถอ่านค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันจากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัล (Digital Communication Analyzer, DCA) เลย จากค่าอัตราความผิดพลาดบิต *BER* จะคำนวณได้ เมื่อแทนค่า *ER* ลงในสมการที่ (3.43) และ (3.44)



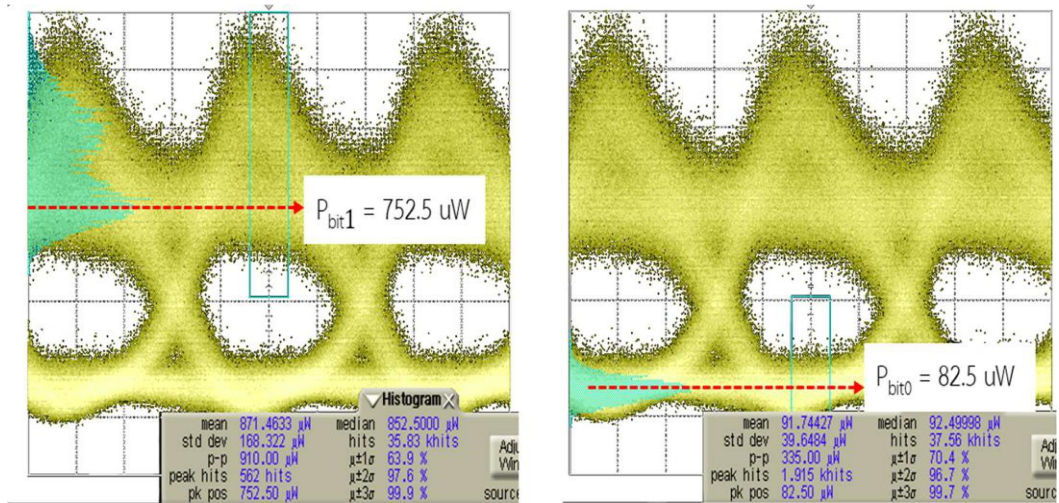
รูปที่ 4.11 แผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กัน  
ในการทดลองมาตรฐาน 100GBASE-LR4 โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก

จากหัวข้อ 1.2 การทบทวนวรรณกรรมพบว่า ผลกระทบรูปแบบข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ  $P_{in\_SOA}$  มีค่าสูงเท่ากับ -5 dBm โดยมีผลดังรูปที่ 4.12 กล่าวคือ รูปคลื่นของคาบบิต 1 ตัวแรกจะแกว่งขึ้นในระดับกำลังแสงที่ต่างกันขึ้นกับจำนวนบิต 0 ก่อนหน้าและคล้ายคลึงกับกับรูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ขวา) ดังนั้นรูปแบบบิตที่ต่างกันส่งผลให้เกิดการแกว่งขึ้นในระดับที่ไม่เท่ากัน เมื่อนำมาซ้อนทับเป็นแผนภาพรูปตาแล้วจึงทำให้ไม่สามารถวัดอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันด้วยเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารสัญญาณทางดิจิทัลตั้งกรณีติด ๆ กันได้ อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันสามารถหาได้จากการวัดฮิสโตแกรมของสัญญาณแสงที่บิต 1 และบิต 0 โดยเลือกค่ากำลังแสงที่ฮิสโตแกรมให้ความถี่สูงสุด จากรูปที่ 4.13 (ซ้าย) และ (ขวา) กำลังแสงของบิต 1 และบิต 0 ( $P_{R\_Bit1}$  และ  $P_{R\_Bit0}$ ) จึงมีค่าเท่ากับ 752.5 uW และ 82.5 uW ตามลำดับ จากนั้นแทนค่าทั้งสองลงในสมการที่ (3.42) อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชัน  $ER$  จึงมีค่าเท่ากับ 9.12 เท่า หรือ 9.6 dB



รูปที่ 4.12 แผนภาพรูปตาแสดงผลกระทบรูปแบบข้อมูลเมื่อใช้รูปแบบบิตที่ต่างกัน ด้วยกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอเท่ากับ -5 dBm



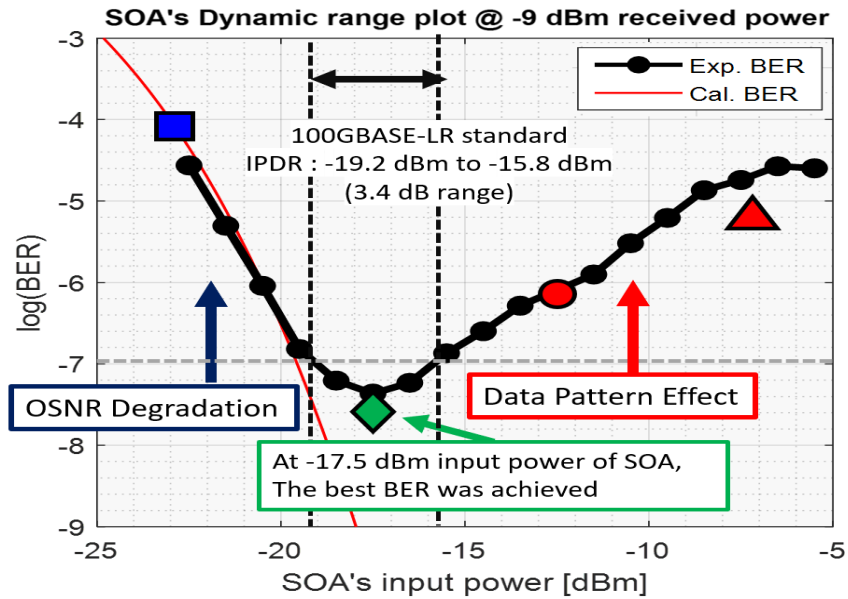


รูปที่ 4.13 ฮิสโตแกรมแผนภาพรูปตาในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอเมื่อจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40.0 กิโลเมตร (ซ้าย) กำลังแสงที่บิต 1 และ (ขวา) ที่บิต 0

#### 4.3.3 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกระหว่างการคำนวณกับการทดลองของชุดแรก

จากการทดลองวัดกราฟช่วงไดนามิกดังแสดงในรูปที่ 4.14 ที่กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงเท่ากับ -9 dBm พบว่าผลการทดลองและผลการคำนวณสัมพันธ์กันในช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าต่ำ (-22.5 dBm ถึง -20.0 dBm) ซึ่งเป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์เป็นอย่างมาก แต่เมื่อกำลังแสงขาเข้าสูงมากกว่า -20.0 dBm ผลเปรียบเทียบดังกล่าวกลับแตกต่างกันมากขึ้นตามกำลังแสงขาเข้า เนื่องจากการคำนวณแสดงเพียงผลลัพธ์จากสัญญาณรบกวนแต่ไม่สามารถรวมจากผลกระทบรูปแบบข้อมูล ในกรณีนี้วัดค่าช่วงไดนามิกของกำลังแสงขาเข้า (Input Power Dynamic Range, IPDR) ที่อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-7}$  ได้ -19.2 dBm ถึง -15.8 dBm กว้าง 3.4 dB

ดังนั้นจากกราฟช่วงไดนามิกที่ได้จากการทดลองจึงสรุปได้ว่า จุดที่คุณภาพสัญญาณได้รับผลกระทบจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์และผลกระทบรูปแบบข้อมูลน้อยที่สุดคือจุดที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าเท่ากับ -17.5 dBm โดยการวางตัวขยายแสงเอสโอเอนี้ในการทดลองมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ที่ตำแหน่ง 40 กิโลเมตรหลังจากภาคส่ง ซึ่งผลการทดลองนี้จะถูกยืนยันในหัวข้อ 4.3.4 เปรียบเทียบผลอัตราความผิดพลาดบิตระหว่างการคำนวณกับการทดลอง



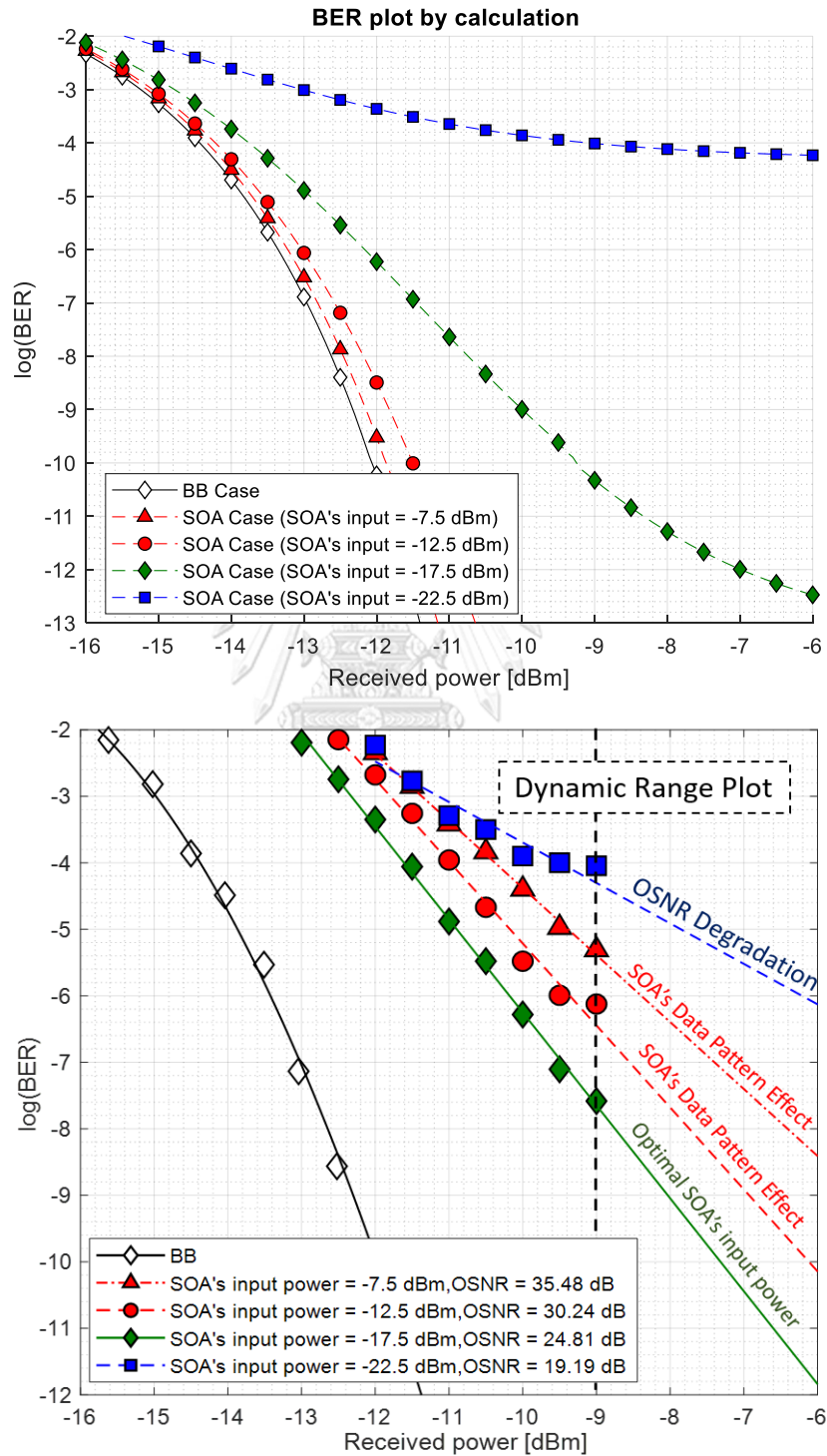
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ  
ในการทดลองของชุดแรก

#### 4.3.4 เปรียบเทียบผลอัตราความผิดพลาดบิตระหว่างการคำนวณกับการทดลอง

ผลการคำนวณกับการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอที่ กำลังแสงขาเข้า -7.5 dBm, -12.5 dBm, -17.5 dB, และ -22.5 dBm เป็นไปดังรูปที่ 4.15 (บน) กับ (ล่าง) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบจึงได้ข้อสรุปดังนี้

- (1) ในกรณีติด ๆ กัน (เส้นสีดำ) พบว่าของกราฟทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และตัวเลขผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน
- (2) กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้า -7.5 dBm และ -12.5 dBm (เส้นสีแดง ▲ และ ●) พบว่ากราฟอัตราความผิดพลาดบิตจากการทดลองนั้นแยกว่าการคำนวณเป็นอย่างมาก เนื่องจากได้รวมผลกระทบรูปแบบข้อมูล [4]
- (3) กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้า -22.5 dBm (เส้นสีน้ำเงิน ■) พบว่ากราฟการคำนวณ และการทดลองมีแนวโน้มเดียวกัน อีกทั้งสองมีค่ามากกว่ากรณีกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง -17.5 dBm (เส้นสีเขียว ◆) ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ [4]
- (4) กรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้า -17.5 dBm (เส้นสีเขียว ◆) พบว่ากราฟผลการทดลองมีค่าที่ดีที่สุดต่ำที่สุด ซึ่งหมายถึงสัญญาณมีคุณภาพที่สุดเมื่อรับผลกระทบรูปแบบบิต และการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ โดยผลการทดลองในกรณีนี้จะใช้เพื่อพิสูจน์ผลกระทบรูปแบบบิต และเอ็กซ์จีเอ็มในลำดับถัดไป

จุดทดลองของกราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง -9 dBm ทั้งสี่จุด สอดคล้องกับอัตราความผิดพลาดบิตที่ ▲, ●, ◆, และ ■ ในกราฟช่วงไดนามิกในรูปที่ 4.14



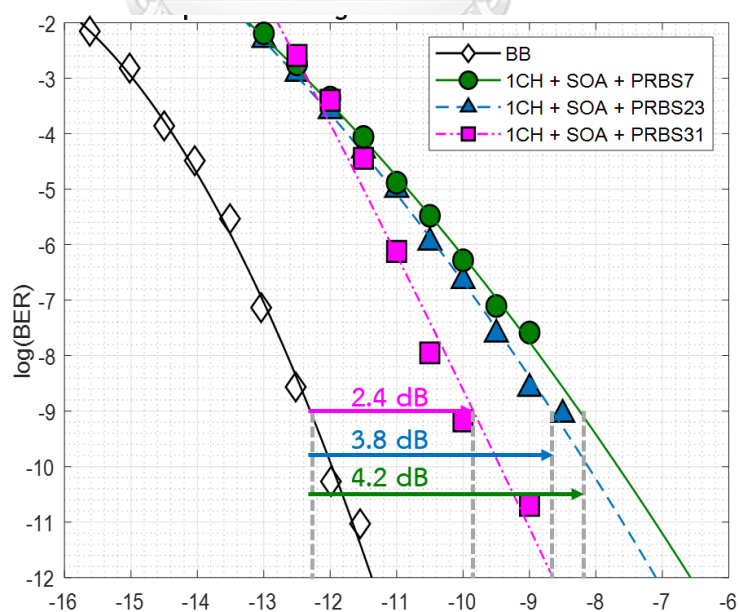
รูปที่ 4.15 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จาก

(บน) การคำนวณ และ (ล่าง) การทดลอง

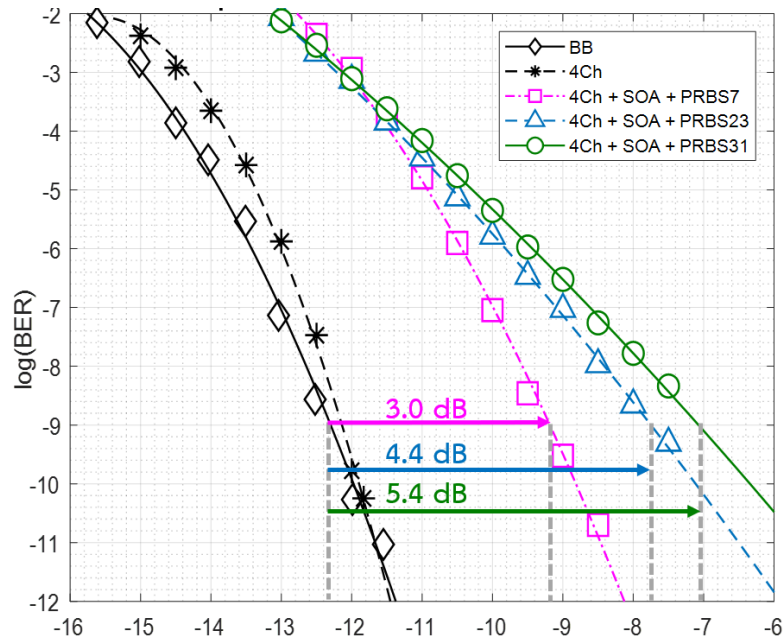
ลำดับถัดไปจะศึกษา (1) ผลกระทบรูปแบบบิตจากการใช้งานลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม (Pseudo Random Binary Sequence, PRBS) ที่ต่างกัน และ (2) เอ็กซ์จีเอ็ม (Cross Gain Modulation) [6] จากการส่งสัญญาณแสงสี่ความยาวคลื่นพร้อมกันเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอ โดยทดลองต่อจากกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเท่ากับ  $-17.5$  dBm ซึ่งเป็นกรณีที่ได้อัตราความผิดพลาดบิตดีที่สุดจากทั้งสี่กรณี อีกทั้งใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม PRBS7, PRBS23, และ PRBS31

ผลการทดลองวัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีหนึ่งช่องสัญญาณแสงและสี่ช่องสัญญาณแสงเป็นดังรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 ตามลำดับ โทษกำลัง (Power penalty) อ่านที่อัตราความผิดพลาดบิต  $10^{-9}$  เป็นดังตารางที่ 4.2 โดยสรุปได้ดังนี้

- (1) ไม่ว่าจะเป็กรณีส่งสัญญาณแสงหนึ่งหรือสี่ช่องสัญญาณ โทษกำลังมีค่าแปรผันตรงกับลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียมที่ใช้งาน เนื่องจากลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียมที่มีดีกรีน้อยมีการติดกันของบิต 0 และ 1 น้อยกว่าดีกรีที่สูงกว่า ทำให้ได้รับผลจากรูปแบบข้อมูลน้อยกว่า
- (2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าโทษกำลังกรณีส่งสัญญาณแสงหนึ่งกับสี่ช่องสัญญาณ พบว่าสี่ช่องสัญญาณจะมีค่ามากกว่าเนื่องจากผลของเอ็กซ์จีเอ็ม [6] เมื่อใช้งานลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม PRBS7, PRBS23, และ PRBS31 เท่ากับ 0.6 dB, 0.6 dB, และ 1.2 dB ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ ที่หนึ่งช่องสัญญาณแสงโดยใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7, 23, และ 31



รูปที่ 4.17 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ  
เมื่อส่งสี่ช่องสัญญาณแสงโดยใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7, 23, และ 31

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต  $10^{-9}$  จากกรณีใช้ลำดับไบนารีการสุ่ม  
แบบเทียม 7, 23, และ 31 ในการส่งสัญญาณแสงหนึ่งและสี่ช่องสัญญาณ

	PRBS7	PRBS23	PRBS31
1 ช่องสัญญาณ	2.4 dB	3.8 dB	4.2 dB
4 ช่องสัญญาณ	3.0 dB	4.4 dB	5.4 dB
เอ็กซ์จีเอ็ม	0.6 dB	0.6 dB	1.2 dB

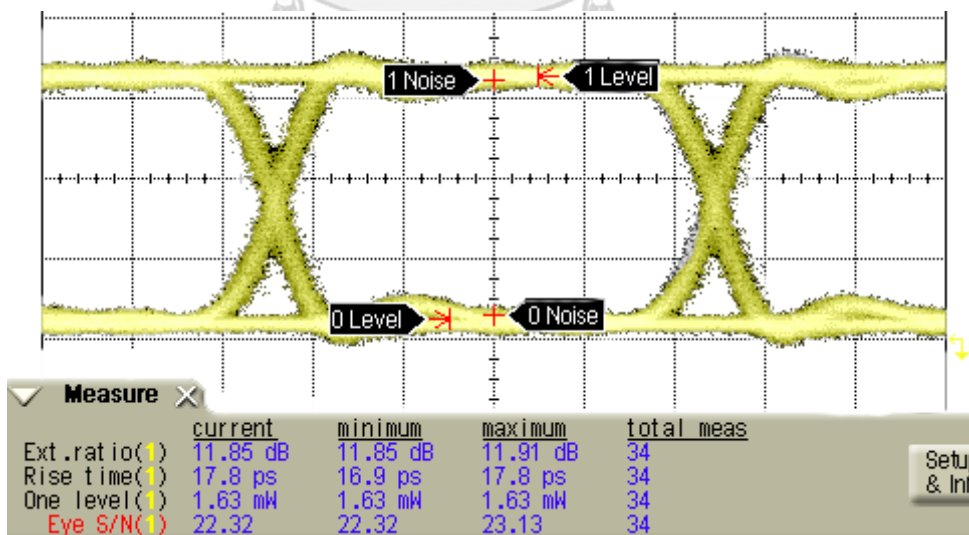
#### 4.4 ผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก

เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 อุปกรณ์ภาคส่งและภาครับที่ใช้งานในหัวข้อนี้เหมือนกับหัวข้อก่อนหน้า เนื่องจากข้าพเจ้าต้องการควบคุมให้ตัวแปรแวดล้อมระหว่างสองการทดลองนี้น้อยที่สุด โดยสิ่งที่แตกต่างระหว่างการทดลองทั้งสองได้แก่ (1) อัตราการส่งข้อมูลซึ่งหัวข้อนี้ใช้งาน 10.3125 กิกะบิตต่อวินาทีแทน 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที และ (2) การทดสอบใช้ช่องสัญญาณเดียวที่ความยาวคลื่น 1310 nm ตามมาตรฐาน 10GBASE-LR

##### 4.4.1 ผลการวัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสง

ผลการวัดแผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กันเป็นดังรูปที่ 4.18 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพรูปตากรณีเดียวกันจากหัวข้อที่แล้วในรูปที่ 4.11 พบว่า

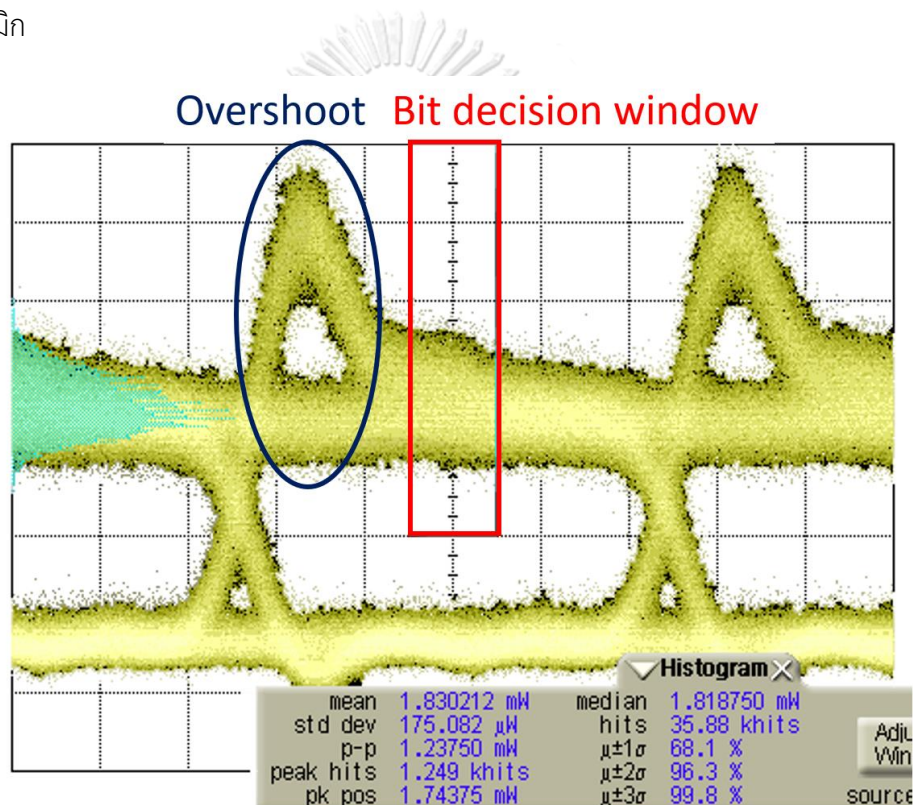
- (1) อัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชิ่งซึ่งที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัลของทั้งสองมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกันคือ 12.74 dB และ 11.85 dB สำหรับข้อมูล 10.3125 กิกะบิตต่อวินาทีและ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาทีตามลำดับ
- (2) เอสเอ็นอาร์ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารดิจิทัลของมาตรฐาน 10GBASE-LR เท่ากับ 22.32 dB ซึ่งสูงกว่า 18.22 dB ของ 100GBASE-LR4 เป็นผลจากการลดอัตราการส่งข้อมูลเป็น 0.4 เท่า



รูปที่ 4.18 แผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กันในการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR

โดยใช้อุปกรณ์ชุดแรก

แผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอในการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR เป็นดังรูปที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกับรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นแผนภาพรูปตาในกรณีเดียวกันพบว่า แผนภาพรูปตาในมาตรฐาน 10GBASE-LR ไม่เกิดการแกว่งขึ้น (Overshoot) หลายระดับแบบมาตรฐาน 100GBASE-LR4 อีกทั้งช่วงตัดสินใจบิต (Bit decision window) ของมาตรฐาน 10GBASE-LR ไม่ครอบคลุมช่วงการแกว่งขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอเพื่อขยายระยะทางที่มาตรฐาน 10GBASE-LR สัญญาณแสงได้รับผลกระทบจากผลกระทบรูปแบบข้อมูลน้อยกว่ามาตรฐาน 100GBASE-LR4 [5] โดยผลลัพธ์ดังกล่าวจะพิสูจน์โดยการทดลองวัดกราฟ ช่วงไดนามิก

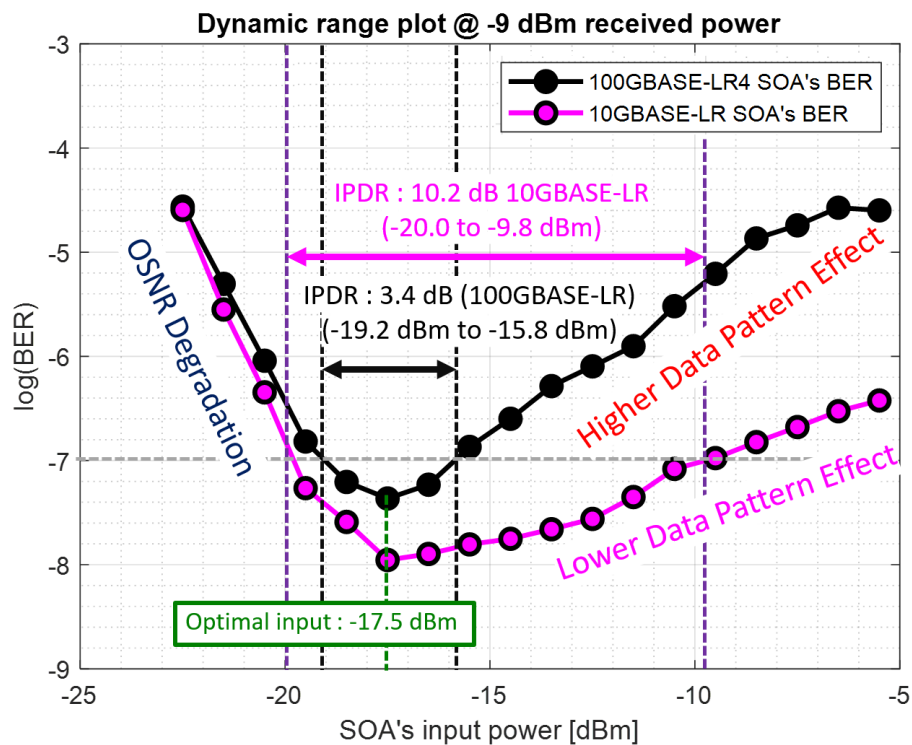


รูปที่ 4.19 ฮิสโตแกรมแผนภาพรูปตาในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอเมื่อจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40.0 กิโลเมตรที่บิต 1 ในการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR โดยอุปกรณ์ชุดแรก

#### 4.4.2 ผลการวัดกราฟช่วงไดนามิกของการทดลองชุดแรกที่มาตรฐาน 10GBASE-LR

การเปรียบเทียบผลการทดลองวัดกราฟช่วงไดนามิกในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสง -17.5 dBm ในการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR กับ 100GBASE-LR4 เป็นไปดังรูปที่ 4.20 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- (1) เมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอน้อยกว่า  $-17.5$  dBm อัตราความผิดพลาดบิตของทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์นั้นไม่ขึ้นกับความยาวคาบบิตของสัญญาณแสงขาเข้า
- (2) เมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอน้อยกว่า  $-17.5$  dBm อัตราความผิดพลาดบิตของทั้งสองมีค่าต่างกันมากขึ้นตามกำลังแสงขาเข้าที่มากขึ้น เนื่องจากผลกระทบรูปแบบบิตที่มีความรุนแรงแปรผันตรงตามกำลังแสงขาเข้า และแปรผกผันกับตามความยาวคาบบิต [4, 5]
- (3) กำลังแสงขาเข้าที่เหมาะสมที่สุดกับการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอนี้ในมาตรฐาน 10GBASE-LR คือ  $-17.5$  dBm ค่าเดียวกับมาตรฐาน 100GBASE-LR4 สอดคล้องกับอัตราความผิดพลาดบิตต่ำสุด
- (4) ช่วงไดนามิกของกำลังแสงขาเข้าที่อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-7}$  เมื่อใช้กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสง  $-9$  dBm 10GBASE-LR คือ  $-20.0$  dBm ถึง  $-9.8$  dBm ทำให้ช่วงไดนามิกของกำลังแสงขาเข้าคือ  $10.2$  dB เมื่อเทียบกับมาตรฐาน 100GBASE-LR4 จึงสรุปได้ว่าเมื่อแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอนี้มาตรฐาน 10GBASE-LR มีความเสถียรกว่า



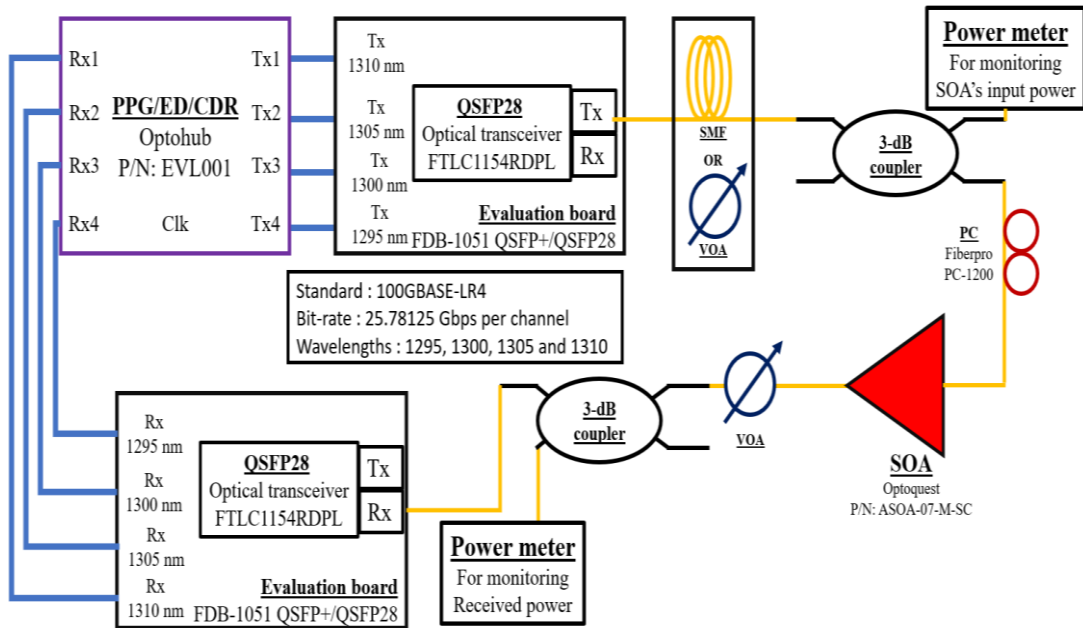
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกที่ได้จากการทดลองตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 และ 10GBASE-LR



#### 4.5 ผลการทดลองมาตรฐาน 100GBASE-LR4 โดยใช้ชุดอุปกรณ์ชุดสอง

เพื่อวัดและวิเคราะห์ผลกระทบจากการแทรกเส้นใยแก้วนำแสง และการแทรกตัวขยายแสง เอสโอเอในระบบที่ใช้งานกับอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาจึงทำการสั่งซื้อ (1) มอดูลรับส่งคิวเอสเอฟพี 28 (QSFP28 Module) กับบอร์ดประเมินผล (Evaluation board) ของบริษัท Finisar รุ่น FTLC1154RDPL กับ FDB-1051 ตามลำดับ และ (2) เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตของบริษัท Optohub รุ่น EV-L001 อีกทั้งบริษัท IRCT ได้กรุณาให้ข้าพเจ้ายืมใช้งานเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Keysight รุ่น N1092C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ เนื่องจากที่ห้องปฏิบัติการวิจัย NICT ที่ประเทศไทยไม่มีเครื่องที่สามารถเก็บผลแผนภาพรูปตาและรูปคลื่นของสัญญาณแสง 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที และด้วยสถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ในช่วงเดือนมิถุนายนที่ผ่านมาทำให้ข้าพเจ้าไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นผลการทดลองที่น่าเสนอนี้ในบทนี้จึงเป็นผลการทดลองที่เก็บมาด้วยเวลาอันสั้น แต่ครบถ้วนทั้งสองประเด็นที่กล่าวไปในช่วงต้น

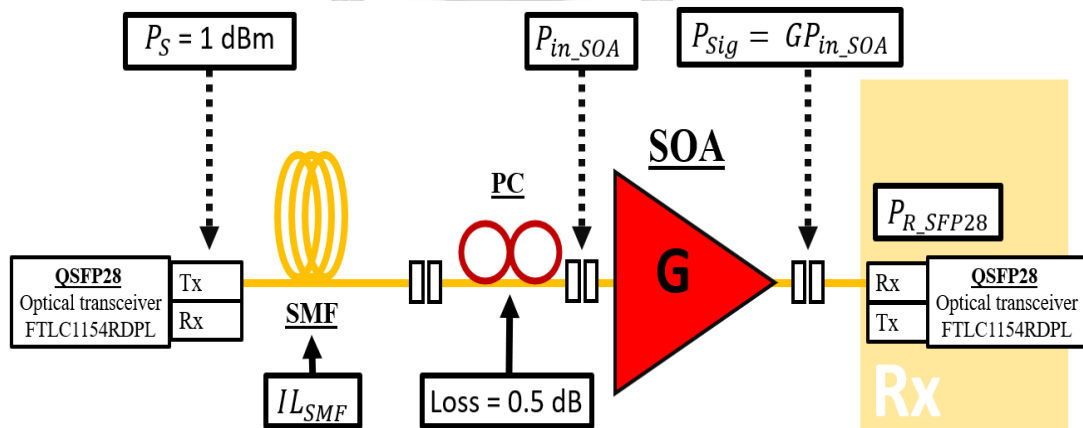
การทดลองชุดสองใช้มอดูลคิวเอสเอฟพี 28 กับบอร์ดประเมินผลเป็นทั้งภาคส่งและภาครับ โดยมีแผนภาพการทดลองดังรูปที่ 4.21 การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาผลของการเชื่อมต่อเอสเอ็นอาร์ที่เกิดขึ้นกับรูปคลื่นขาออกตัวขยายแสงเอสโอเอ (2) ทหาระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมกับการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอ ด้วยกราฟอัตราความผิดพลาดบิตและกราฟช่วงไดนามิกเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ 2, และ (3) ทดสอบการทำงานของตัวขยายแสงเอสโอเอด้วยระยะทางที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-12}$  ตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4



รูปที่ 4.21 แผนภาพการทดลองชุดสองที่ประเทศไทย

#### 4.5.1 การวิเคราะห์หึ่งบกำลังของการทดลองชุดสอง

การวิเคราะห์หึ่งบกำลังในหัวข้อนี้จะเหมือนกับหัวข้อ 4.3.1 การวิเคราะห์หึ่งบกำลังของการทดลองชุดแรก โดยกำลังแสงของสัญญาณที่แต่ละตำแหน่งแสดงด้วยลูกศรประสีดำ และกำลังสูญเสียแทรกของแต่ละอุปกรณ์แสดงด้วยลูกศรทึบดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลการวัดค่ากำลังแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ

และผลการวัดกำลังสูญเสียแทรกของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองชุดสอง

การทดลองในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอภายหลังจากเส้นใยแก้วนำแสงความยาว 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตร เมื่อค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง  $IL_{SMF}$  ความยาวทั้งสิ้น เท่ากับ 3.5 dB, 7.0 dB, 10.5 dB, และ 14 dB โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง  $\alpha$  เท่ากับ 0.35 dB/km ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด ความไวแสงของมอดูเลตอร์รับส่งควิเอสเอฟพี 28  $P_{R\_QSFP28}$  เท่ากับ -8.6 dBm [12] เมื่อแทนค่าข้างต้นและวิเคราะห์ผลตามรูปที่ 4.22 ลงในสมการที่ (3.50) ได้เป็นสมการที่ (4.2) และได้ผลการคำนวณบ่งชี้ในกรณีต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 4.3 พบว่ากรณีทั้งหมดในการทดลองสามารถส่งข้อมูลจากภาครับไปยังภาคส่งได้

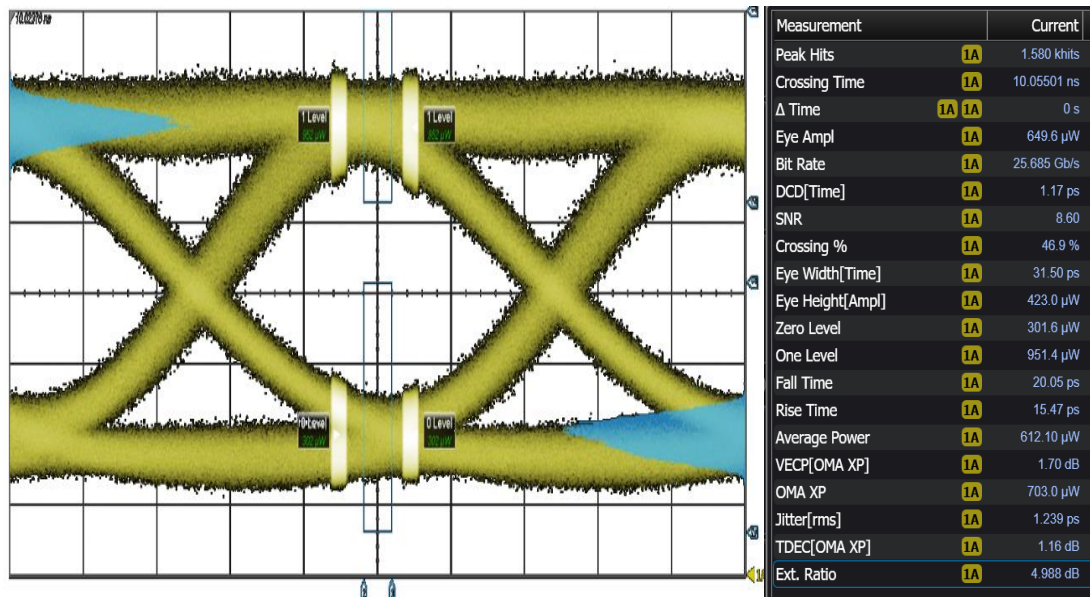
$$P_T = P_S - P_{R\_QSFP28} + G = IL_{SMF} + \Sigma IL + margin \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบงบกำลังในกรณีต่าง ๆ ในการทดลองชุดสอง

กรณี	$P_T$	$P_S$	$P_{R\_QSFP28}$	$P_{in\_SOA}$	$G$	$IL_{SMF}$	$\Sigma IL$	$margin$
B2B	9.6 dB	1 dBm	-8.6 dBm	-	-	-	1.5 dB	8.1 dB
10kmSMF	9.6 dB			-	-	3.5 dB		4.6 dB
10kmSMF + SOA	24.6 dB			-3 dBm	15.0 dB	3.5 dB		19.6 dB
20kmSMF + SOA	27.1 dB			-6.5 dBm	17.5 dB	7.0 dB		18.6 dB
30kmSMF + SOA	29.6 dB			-10 dBm	20.0 dB	10.5 dB		17.6 dB
40kmSMF + SOA	32.1 dB			-13.5 dBm	22.5 dB	14.0 dB		16.6 dB

#### 4.5.2 ผลการวัดแผนภาพรูปตารกรณีติด ๆ กัน

ผลการวัดแผนภาพรูปตารเป็นดังรูปที่ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.11 จะเห็นความแตกต่างระหว่างสัญญาณขาออกจากภาคส่งของอุปกรณ์วิจัยกับอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ โดยอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันสัญญาณขาออกอุปกรณ์เชิงพาณิชย์เท่ากับ 5.0 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุปกรณ์เชิงวิจัยที่ 12.74 dB เนื่องจากอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ใช้การกล้ำสัญญาณแสงดูดกลืนไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) เพื่อสร้างสัญญาณ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาที แตกต่างกับอุปกรณ์วิจัยซึ่งใช้ตัวกล้ำสัญญาณแสงมาคเซห์นเดอร์ (Mech-Zehnder Modulator, MZM) ซึ่งมีราคาสูงกว่า [17, 32]



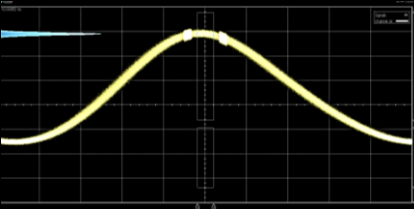
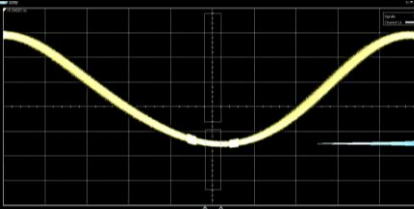
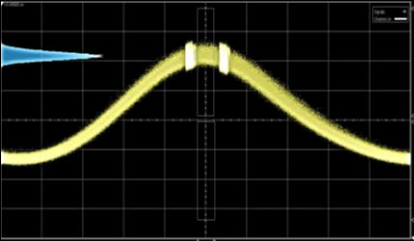
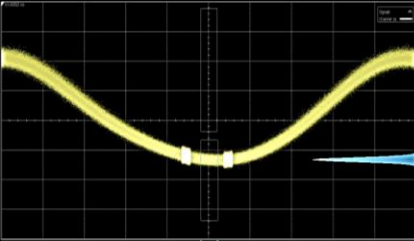
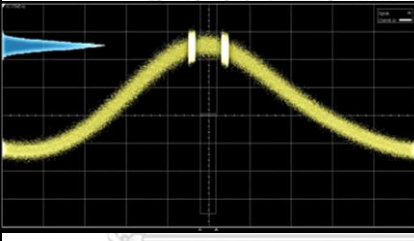
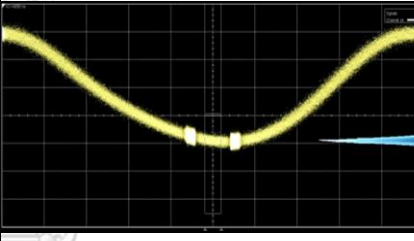
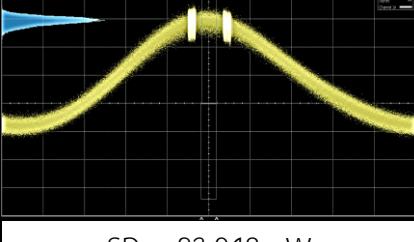
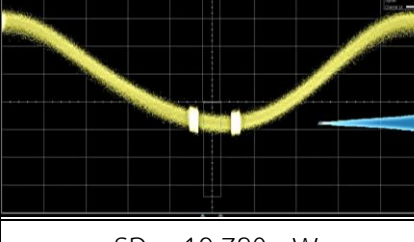
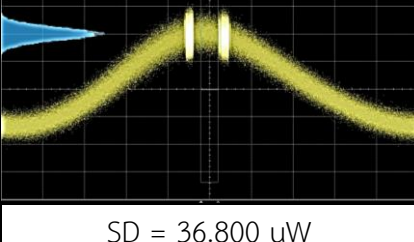
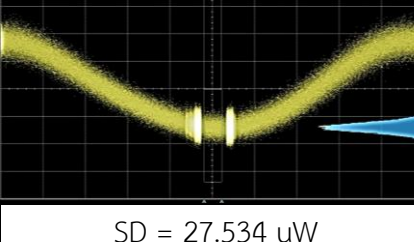
รูปที่ 4.23 แผนภาพรูปตาในกรณีติด ๆ กันในการทดลองชุดสอง

#### 4.5.3 ผลการวัดรูปคลื่นในการทดลองชุดสอง

เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบรูปแบบข้อมูลในแผนภาพรูปตาของสัญญาณภายหลังแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอดังรูปที่ 4.12 หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการวัดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ของฮิสโตแกรมในตำแหน่งตัดสินบิตด้วยเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลของบริษัท Keysight รุ่น N1092C เพื่อศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในรูปคลื่น ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดรูปคลื่นของสัญญาณแสงขาออกกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ ภายหลังเส้นใยแก้วนำแสงความยาว 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตร ที่กำลังแสงขาออกกรณีเดียวกันคือ -2.5 dBm จากตารางสรุปผลการวัดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฮิสโตแกรมในตำแหน่งตัดสินบิต 1 และ บิต 0 ได้ว่า

- (1) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่บิต 1 มีค่ามากกว่าบิต 0 ในทุกกรณี เนื่องจากที่บิต 1 มีสัญญาณรบกวนควอนตัมจากสัญญาณหลักสูงกว่าบิต 0
- (2) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีติด ๆ กันมีค่าต่ำกว่ากรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนควอนตัมที่เพิ่มขึ้นของตัวขยายแสงเอสโอเอ (1) สัญญาณรบกวนเอเอสอี, (2) การปิดกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอี, และ (3) การปิดกันระหว่างสัญญาณเอเอสอีกับตัวมันเอง
- (3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอมีค่าสูงขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่แทรกข้างหน้า ซึ่งเป็นผลมาจากค่าไอเอสเอ็นอาร์ที่ลดลงดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฮิสโตแกรมที่ตำแหน่งตัดสินบิต 1 และ 0 การทดลองชุดสอง

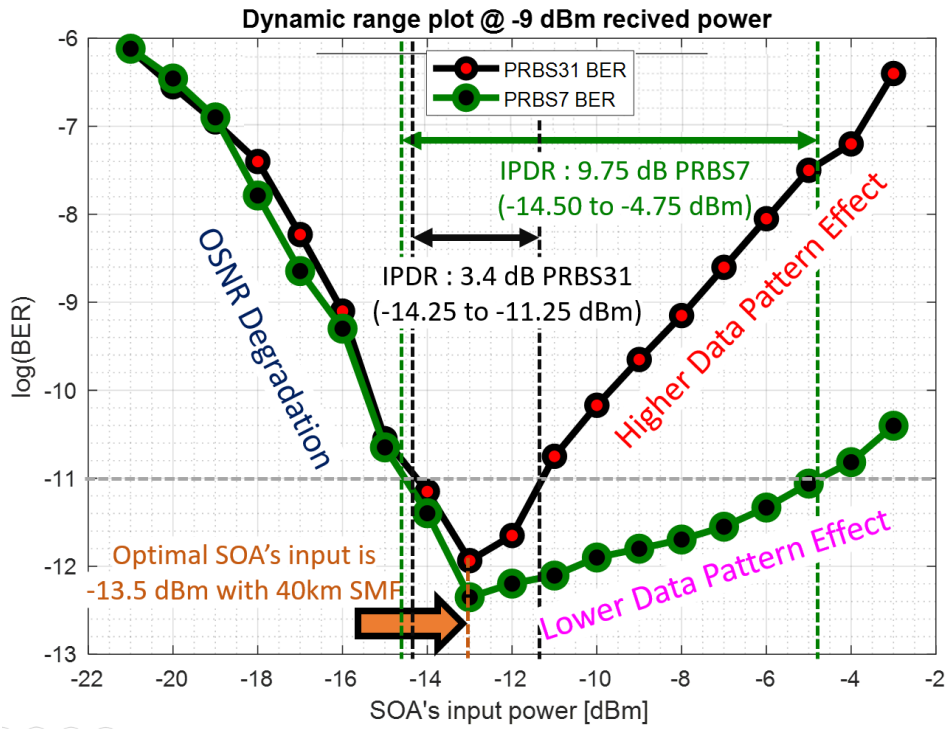
กรณี	บิต 1	บิต 0
B2B	 SD = 9.066 $\mu$ W	 SD = 6.692 $\mu$ W
10kmSMF + SOA	 SD = 20.721 $\mu$ W	 SD = 11.560 $\mu$ W
20kmSMF + SOA	 SD = 23.032 $\mu$ W	 SD = 13.536 $\mu$ W
30kmSMF + SOA	 SD = 23.948 $\mu$ W	 SD = 19.720 $\mu$ W
40kmSMF + SOA	 SD = 36.800 $\mu$ W	 SD = 27.534 $\mu$ W

#### 4.5.4 ผลการทดลองวัดกราฟช่วงไดนามิกของการทดลองชุดสอง

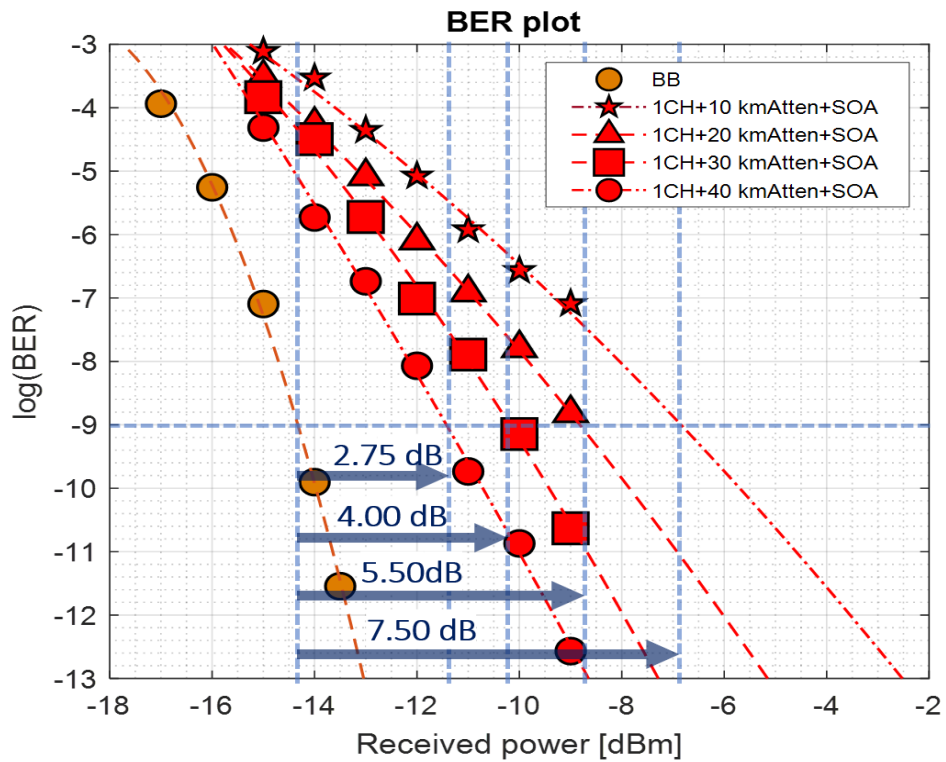
ผลการทดลองวัดกราฟช่วงไดนามิกในหัวข้อนี้ใช้การตั้งค่าเดียวกับผลการทดลองใน 4.3.3 เปรียบเทียบกราฟช่วงไดนามิกระหว่างการคำนวณกับการทดลองของชุดแรก กล่าวคือวัดค่าที่กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงเท่ากับ  $-9$  dBm ทั้งนี้ได้ใช้ลำดับโบนารีการสุ่มแบบเทียม 7 และ 31 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบรูปแบบข้อมูลด้วย จากผลการทดลองในรูปที่ 4.24 สรุปได้ว่า

- (1) กราฟช่วงไดนามิกทั้งสองกรณีแสดงผลกระทบรูปแบบข้อมูลและการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ที่ช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอสสูง ( $-3$  dBm ถึง  $-13.5$  dBm) และต่ำ ( $-21$  dBm ถึง  $-13.5$  dBm) ตามลำดับ โดยผลการทดลองดังกล่าวมีแนวโน้มเดียวกับผลการทดลองรูปที่ 4.14
- (2) กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอที่เหมาะสมที่สุดกับการทำงานในการทดลองนี้คือ  $-13.5$  dBm เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.3 พบว่าระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมที่สุดคือ 40 กิโลเมตร
- (3) ผลการทดลองในกรณีใช้ลำดับโบนารีการสุ่มแบบเทียม 7 ในช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอสสูงให้ผลการวัดอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่ากรณีใช้ลำดับโบนารีการสุ่มแบบเทียม 31 ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลกระทบรูปแบบข้อมูลที่มีบิต 0 ต่อเนื่องยาวกว่า
- (4) ช่วงไดนามิกของกำลังแสงขาเข้าที่อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-11}$  ในกรณีใช้ลำดับโบนารีการสุ่มแบบเทียม PRBS31 คือ 3 dB อยู่ระหว่าง  $-14.25$  dBm ถึง  $-11.25$  dBm ซึ่งแคบกว่ากรณีใช้ลำดับโบนารีการสุ่มแบบเทียม PRBS7 คือ 9.75 dB อยู่ระหว่าง  $-14.50$  dBm ถึง  $-4.75$  dBm สรุปได้ว่าหากใช้รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ 8b/10b ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอระบบจะมีเสถียรภาพมากกว่ารูปแบบการส่งข้อมูลแบบ 64b/66b

เมื่อเปรียบเทียบโทซกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต  $10^{-9}$  ในกรณีจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตรด้วยตัวลดทอนแสงแบบปรับค่าได้ก่อนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอ พบว่ามีค่า 7.50 dB, 5.50 dB, 4.00 dB, และ 2.75 dB ตามลำดับดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 กราฟช่วงไดนามิกจากการทดลองชุดสองในกรณีลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม 7 และ 31



รูปที่ 4.25 กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีติด ๆ กัน และกรณีจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตรก่อนหน้าตัวขยายแสงเอสโอเอ

#### 4.5.5 ผลการทดลองวัดกราฟอัตราความผิดพลาดบิต

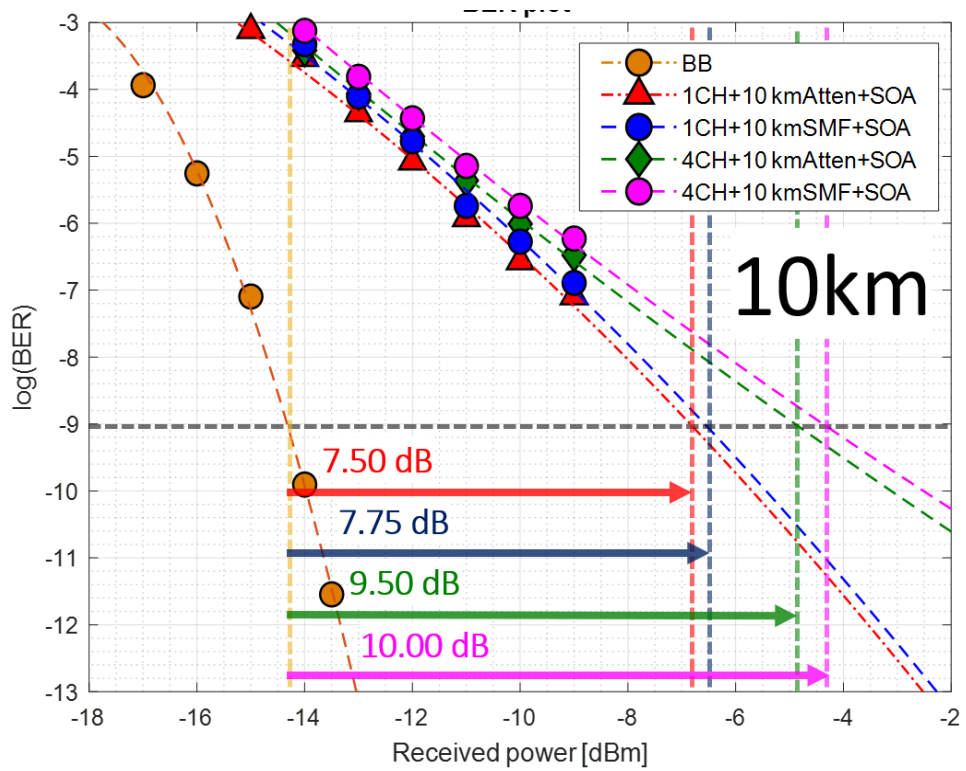
หัวข้อนี้เปรียบเทียบกราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบจากเอ็กซ์จีเอ็มและการแทรกเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตร ซึ่งทั้งสองผลกระทบไม่สามารถพิสูจน์ได้ด้วยการคำนวณ การทดลองในหัวข้อนี้จึงสนใจกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- (A) กรณีติด ๆ กัน (เส้นสีน้ำตาล ●)
- (B) ส่งสัญญาณแสงหนึ่งช่องจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทางต่าง ๆ (เส้นสีแดง ▲)
- (C) ส่งสัญญาณแสงหนึ่งช่องแทรกเส้นใยแก้วนำแสงระยะทางต่าง ๆ (เส้นสีน้ำเงิน ●)
- (D) ส่งสัญญาณแสงสี่ช่องจำลองค่าลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทางต่าง ๆ (เส้นสีเขียว ◆)
- (E) ส่งสัญญาณแสงสี่ช่องแทรกเส้นใยแก้วนำแสงระยะทางต่าง ๆ (เส้นสีชมพู ●)

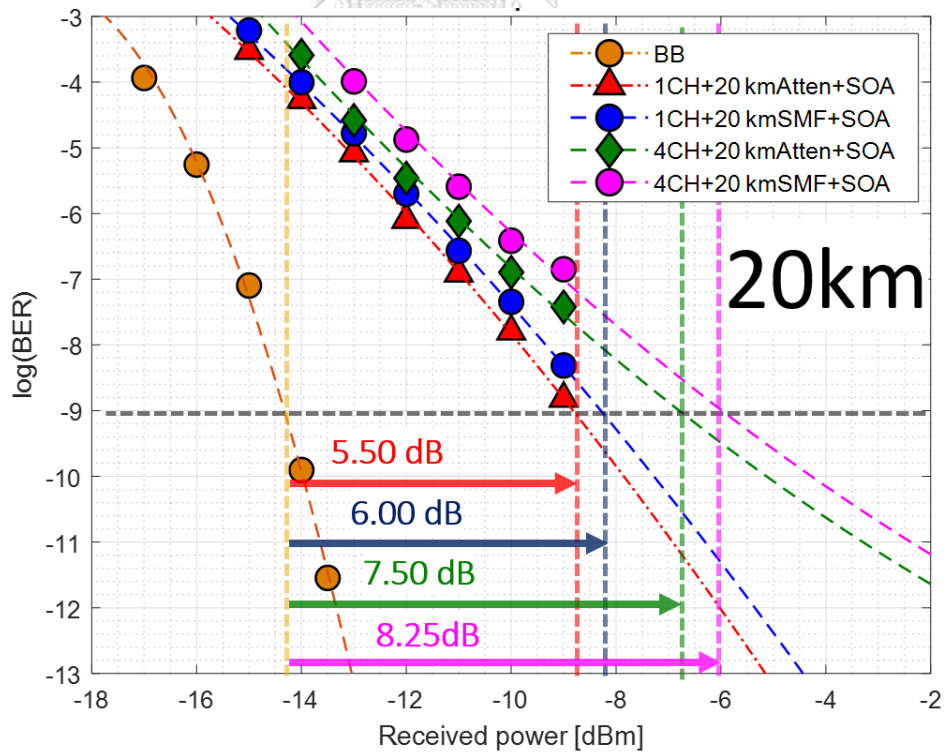
กราฟอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีข้างต้นที่ระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 4.26, 4.27, 4.28, และ 4.29 ตามลำดับ และค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต  $10^{-9}$  ในกรณีต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 เพื่อบ่งชี้ความรุนแรงของผลกระทบที่กล่าวมา จากผลข้างต้นจึงสรุปได้ดังนี้

- (1) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีจำลองกับแทรกเส้นใยแก้วนำแสง ((B) กับ (C)) ค่าโทษกำลังที่เกิดจากการแทรกเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าสูงขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นผลมาจากโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion) อย่างไรก็ตามสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1310 nm ได้รับผลดังกล่าวน้อยมาก [17, 32] โดยในกรณีของเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40 กิโลเมตรมีค่าโทษกำลังเพียง 1 dB
- (2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการส่งหนึ่งช่องสัญญาณกับสี่ช่องสัญญาณ ((B) กับ (D)) จะพบว่าผลกระทบจากเอ็กซ์จีเอ็มเกิดขึ้นอย่างเท่าเทียมทุกกรณี [6] โดยค่าโทษกำลังที่เกิดมีค่าใกล้เคียงกันที่ 2.00 dB ถึง 2.25 dB
- (3) ในกรณีส่งสัญญาณแสงสี่ช่องผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40 กิโลเมตรและตัวขยายแสงเอสโอ (4CH + 40kmSMF +SOA) สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่อัตราความผิดพลาดต่ำกว่า  $10^{-12}$  ตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ได้

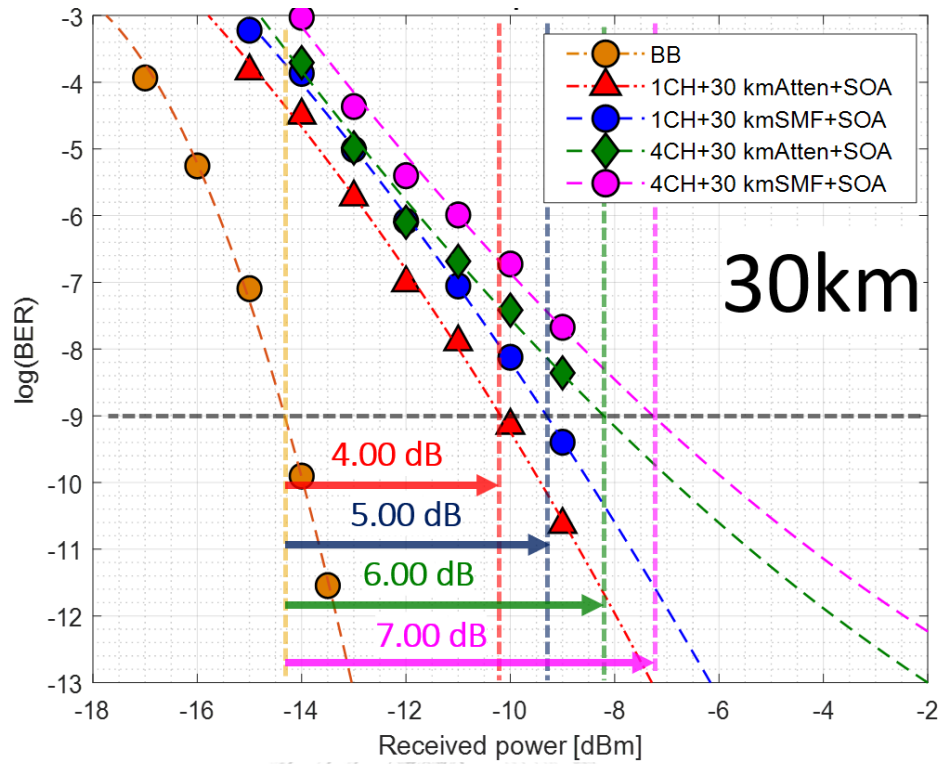




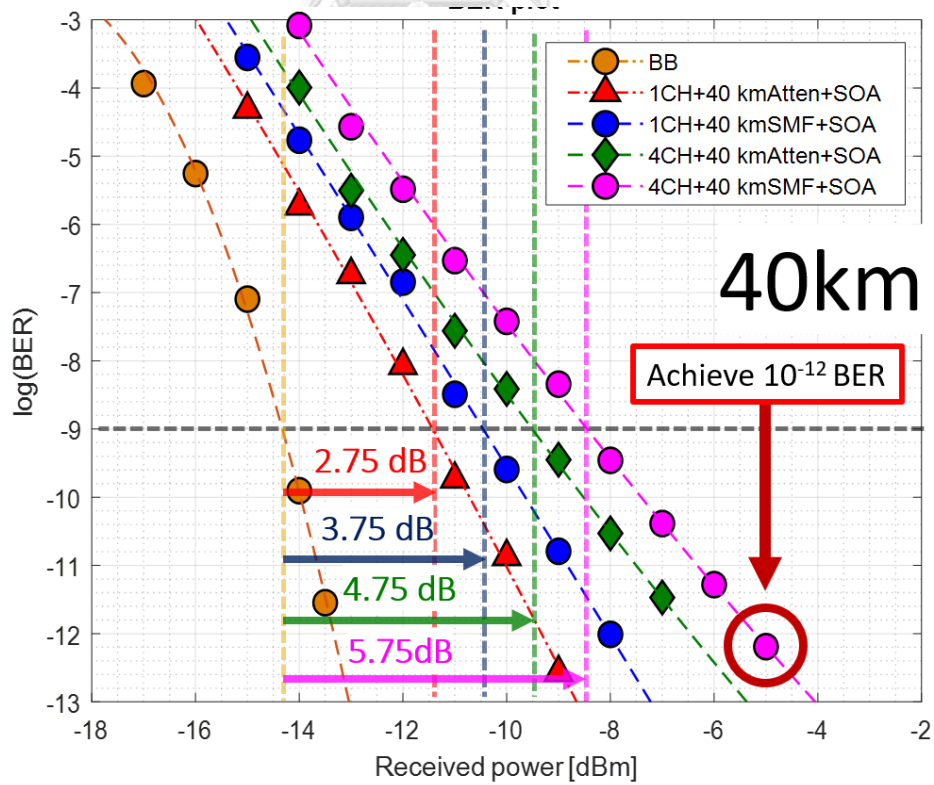
รูปที่ 4.26 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 10 กิโลเมตร



รูปที่ 4.27 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 20 กิโลเมตร



รูปที่ 4.28 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 30 กิโลเมตร



รูปที่ 4.29 อัตราความผิดพลาดบิตกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง 40 กิโลเมตร

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าโทษกำลังที่อัตราความผิดพลาดบิต  $10^{-9}$  ในกรณีต่าง ๆ

กรณี	10 km	20 km	30 km	40 km
ส่งสัญญาณแสงหนึ่งช่อง จำลองเส้นใยแก้วนำแสง	7.50 dB	5.50 dB	4.00 dB	2.75 dB
ส่งสัญญาณแสงหนึ่งช่อง แทรกเส้นใยแก้วนำแสง	7.75 dB	6.00 dB	5.00 dB	3.75 dB
ส่งสัญญาณแสงสี่ช่อง จำลองเส้นใยแก้วนำแสง	9.50 dB	7.50 dB	6.00 dB	4.75 dB
ส่งสัญญาณแสงสี่ช่อง แทรกเส้นใยแก้วนำแสง	10.00 dB	8.25 dB	7.00 dB	5.75 dB
เปรียบเทียบ (●-▲) ผลการแทรกเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อส่งสัญญาณแสงหนึ่งช่อง	0.25 dB	0.50 dB	1.00 dB	1.00 dB
เปรียบเทียบ (●-◆) ผลการแทรกเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อส่งสัญญาณแสงสี่ช่อง	0.50 dB	0.75 dB	1.00 dB	1.00 dB
เปรียบเทียบ (◆-▲) ผลของเอ็กซ์จีเอ็ม เมื่อจำลองเส้นใยแก้วนำแสง	2.00 dB	2.00 dB	2.00 dB	2.00 dB
เปรียบเทียบ (●-●) ผลของเอ็กซ์จีเอ็ม เมื่อแทรกเส้นใยแก้วนำแสง	2.25 dB	2.25 dB	2.00 dB	2.00 dB

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวางตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวขยายแสงเอสโอเอเพื่อขยายระยะทางของการสื่อสารทางแสงในการเชื่อมต่อโครงข่ายศูนย์ข้อมูล 100 กิกะบิต โดยใช้ดับเบิลยูดีเอ็ม 4 ช่องสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นในแถบความถี่โอ (1295 nm, 1300 nm, 1305 nm, และ 1310 nm) ด้วยอัตราการส่งข้อมูลช่องสัญญาณละ 25.78125 กิกะบิตต่อวินาทีตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ซึ่งการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอทำให้เกิดผลกระทบ 3 ประการกับสัญญาณดังนี้

- (1) การเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์มีความรุนแรงเมื่อกำลังขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอต่ำกว่า  $-17.5$  dBm ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนที่สูงมากเทียบกับกำลังแสงขาออกที่น้อยของเอสโอเอ
- (2) เมื่อกำลังขาเข้าสูงกว่า  $-13.5$  dBm ผลกระทบรูปแบบข้อมูล ส่งผลกับรูปคลื่นของ 1 ตัวแรกซึ่งแกว่งขึ้นในระดับที่ต่างกันขึ้นกับจำนวนบิต 0 ก่อนหน้า แผนภาพรูปตาของสัญญาณจึงเห็นความไม่คงที่ของกำลังแสงที่บิต 1 อย่างชัดเจน ความรุนแรงของผลกระทบดังกล่าวขึ้นกับความยาวคาบบิตของสัญญาณ, เวลาฟื้นฟูตัวขยายแสง, และลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียมที่ใช้งาน
- (3) เมื่อใช้ตัวขยายแสงหลายช่องสัญญาณแสงดับเบิลยูดีเอ็ม เอ็กซ์จีเอ็มเกิดจากการแย่งกำลังขยายระหว่างสัญญาณ ทำให้โทษกำลังของระบบเพิ่มขึ้นอย่างเท่าเทียมในทุกกำลังแสงขาเข้าตัวขยาย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งการทดลองเป็นสองชุดเพื่อพิสูจน์ผลกระทบข้างต้นโดย

ชุดแรกใช้อุปกรณ์วิจัยเป็นภาคส่งและภาครับ ทำให้เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB ได้ อีกทั้งยังสามารถปรับอัตราการส่งข้อมูลได้ ให้มีผลการทดลองมาตรฐาน 10GBASE-LR เปรียบเทียบกับ 100GBASE-LR4 ในชุดอุปกรณ์เดียวกัน เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 อย่างไรก็ตามผลการทดลองชุดแรกใช้ตัวลดทอนแบบปรับค่าได้จำลองการสูญเสียกำลังในเส้นใยแก้วนำแสงเนื่องจากโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงไม่สามารถคำนวณได้

ชุดสองใช้มอดูรับส่งคิวเอสเอฟพี 28 และบอร์ดประเมินผลเป็นภาคส่งและภาครับ ร่วมกับตัวควบคุมโพลาริเซชันอัตโนมัติซึ่งเป็นอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ เพื่อป้องกันความรุนแรงของผลกระทบทั้งสามประการในลิงก์ดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้จริง

ผลการวัดค่าคุณลักษณะของตัวขยายแสงเอสโอเอพบว่า

- (1) ทำงานในช่วงความยาวคลื่นตามมาตรฐาน 100GBASE-LR ได้ โดยที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 25 dB และมีช่วงอัตราขยายอิมิตัวเมื่อกำลังแสงขาเข้ามากกว่า -15 dBm
- (2) โอเอสเอ็นอาร์แปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับกำลังแสงขาเข้า ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ในช่วงกำลังแสงขาเข้าต่ำ
- (3) สัญญาณรบกวนควอนตัมจากการปิดกันระหว่างสัญญาณหลักและสัญญาณเอเอสอีมีความรุนแรงในทุกช่วงกำลังแสงขาเข้า เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและการวัดของตัวเลขสัญญาณรบกวนพบว่ามีความไวเหมือนกัน ซึ่งจะสูงขึ้นเมื่อกำลังแสงขาเข้าลดลง
- (4) เวลาฟีนฟูมีค่าประมาณ 60 ps จึงเปรียบเทียบการทำงานในมาตรฐาน 10GBASE-LR (ความยาวคาบปิดเท่ากับ 100 ps) และมาตรฐาน 100GBASE-LR4 (ความยาวคาบปิดเท่ากับ 40 ps) ได้ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1

ผลการทดลองชุดแรกสรุปได้ว่า

- (1) จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.8 กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงที่ทำให้ได้อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ  $10^{-12}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงที่ลดลง เนื่องมาจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์ โดยในการคำนวณนี้ไม่สามารถรวมผลกระทบรูปแบบข้อมูล
- (2) จากกราฟช่วงไดนามิกในรูปที่ 4.14 ที่กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงเท่ากับ -9 dBm พบว่าช่วงที่อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-7}$  คือ -19.2 dBm ถึง -15.8 dBm ทำให้ช่วงไดนามิกของกำลังแสงขาเข้าเท่ากับ 10.2 dB
- (3) จุดที่คุณภาพสัญญาณได้รับผลกระทบจากการเสื่อมโอเอสเอ็นอาร์และผลกระทบรูปแบบข้อมูลน้อยที่สุด คือจุดที่กำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอเท่ากับ -17.5 dBm ดังนั้นจึงสามารถแทรกเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40 กิโลเมตรหน้าตัวขยายแสงได้
- (4) เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการคำนวณและทดลองพบว่า ในช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงเอสโอเอต่ำกว่า -17.5 dBm อัตราความผิดพลาดบิตมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเสื่อมของโอเอสเอ็นอาร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการในบทที่ 3 แต่ในช่วงกำลังแสงขาเข้าสูงกว่า -17.5 dBm ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากการทดลองแยกจากการคำนวณมากเนื่องจากผลกระทบรูปแบบข้อมูล

- (5) รูปคลื่นของสัญญาณข้อมูล 10.3125 กิกะบิตต่อวินาทีตามมาตรฐาน 10GBASE-LR ภายหลังจากได้รับการขยายด้วยตัวขยายแสงเอสโอเอมีการแกว่งขึ้นของบิต 1 เป็นค่าคงที่ อีกทั้งช่วงตัดสินบิตไม่คร่อมอยู่ในช่วงแกว่งขึ้น ซึ่งต่างจากสิ่งที่เกิดขึ้นกับสัญญาณข้อมูล 25.78125 กิกะบิตต่อวินาทีมาตรฐาน 100BASE-LR4
- (6) มาตรฐาน 100BASE-LR4 มีช่วงไดนามิกของกำลังแสงขาเข้าเท่ากับ 10.2 dB (-20.0 dBm ถึง -9.8 dBm) และกว้างกว่ามาตรฐาน 100GBASE-LR4 อยู่ 6.8 dB เนื่องจากอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงมากจะได้รับผลกระทบข้อมูลน้อยลง ด้วยบทสรุปดังกล่าวจึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 1

#### ผลการทดลองชุดสองสรุปได้ว่า

- (1) จากแผนภาพรูปตาในรูปที่ 4.23 สัญญาณแสงจากภาคส่งของอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ให้ค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ทิงชันต่ำกว่าอุปกรณ์วิจัยเนื่องจากการใช้รูปแบบการกล้ำสัญญาณที่ต่างกัน
- (2) ผลการวัดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฮิสโตแกรมในตำแหน่งตัดสินบิต 1 และ 0 ตามตารางที่ 4.4 ในกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ มีค่าสูงขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่แทรกข้างหน้า ซึ่งเป็นผลมาจากค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ลดลง
- (3) จากรูปที่ 4.24 กราฟช่วงไดนามิกที่กำลังแสงขาเข้าตัวตรวจจับแสงเท่ากับ -9 dBm พบว่าที่อัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า  $10^{-11}$  คือ -14.25 dBm ถึง -11.25 dBm ทำให้ได้ช่วงไดนามิกกำลังแสงขาเข้าเท่ากับ 3.0 dB
- (4) แต่เมื่อใช้ลำดับไบนารีการสุ่มแบบเทียม PRBS7 แทน PRBS31 พบว่าช่วงไดนามิกกำลังแสงขาเข้ามีค่ากว้างขึ้นเป็น -14.50 dBm ถึง -4.75 dBm โดยกว้างกว่าช่วงก่อน 6.75 dB ซึ่งเป็นผลมาจากผลกระทบรูปแบบบิตที่รุนแรงน้อยลงในช่วงกำลังแสงขาเข้าตัวขยายแสงสูง
- (5) จากผลการอ่านค่าโทษกำลังของกราฟอัตราความผิดพลาดบิตกรณีแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอ และจำลองเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตรด้วยตัวลดทอนแบบปรับค่าได้พบว่ามีค่าโทษกำลังเท่ากับ 7.50 dB, 5.50 dB, 4.00 dB, และ 2.75 dB ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากผลกระทบรูปแบบบิต
- (6) ผลต่างค่าโทษกำลังที่เกิดจากการแทรกเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 10, 20, 30, และ 40 กิโลเมตร มีค่าตั้งแต่ 0.25 dB ถึง 1.00 dB ซึ่งเพิ่มขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง
- (7) ค่าโทษกำลังที่เกิดจากผลของเอ็กซ์จีเอ็มมีค่า 2.00 dB ถึง 2.25 dB ในทุกกรณี

- (8) การวางตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวขยายแสงเอสโอเอคือ 40 กิโลเมตรจากภาคส่ง ซึ่งสรุปได้จากผลการทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีส่งสัญญาณแสงสี่ช่องผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 40 กิโลเมตร และตัวขยายแสงเอสโอ (4CH + 40kmSMF +SOA) โดยสามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่อัตราความผิดพลาดต่ำกว่า  $10^{-12}$  ตามมาตรฐาน 100GBASE-LR4 ได้ ด้วยบทสรุปดังกล่าวจึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 2

## 5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

- (1) เนื่องจากทางห้องปฏิบัติการวิจัย Photonic Network System Laboratory ที่ข้าพเจ้าไปฝึกงานนั้นส่งมอบมอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 กับบอร์ดประเมินผล เพื่อการทดลองมาตรฐาน 100GBASE-LR4 มาในช่วง 2 สัปดาห์สุดท้ายของการฝึกงาน ทำให้ข้าพเจ้ามีเวลาน้อยมากในการเก็บผลการทดลองแรก
- (2) จากประเด็นที่ (1) ทำให้ผลการทดลองแรกไม่ได้ศึกษาผลกระทบจากการแทรกเส้นใยแก้วนำแสง และการแทรกตัวขยายแสงเอสโอเอในระบบที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ จึงต้องทดลองซ้ำในชุดที่สองที่ประเทศไทย ซึ่งต้องรอการสั่งซื้อมอดูลรับส่งควิเอสเอฟพี 28 กับบอร์ดประเมินผล และเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตอีกชุด
- (3) ห้องปฏิบัติการวิจัย NICT ที่ประเทศไทยไม่มีเครื่องวิเคราะห์การสื่อสารทางดิจิทัลที่สามารถเก็บผลแผนภาพรูปตาและรูปคลื่นของสัญญาณแสง 25.78125 กิกะบิตต่อวินาทีได้ จึงต้องขอยืมเครื่องของบริษัท Keysight รุ่น N1092C จากบริษัท IRCT เพื่อใช้ในการทดลองเป็นเวลา 1 สัปดาห์
- (4) ด้วยสถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ในช่วงเดือนมิถุนายนที่ผ่านมา ทำให้ข้าพเจ้าไม่สามารถเข้าไปเก็บผลการทดลองได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นผลการทดลองที่น่าเสนาหานี้ในช่วงท้ายบทที่ 4 จึงเป็นผลการทดลองที่เก็บมาภายในช่วงเวลาอันสั้น

## บรรณานุกรม

- [1] *IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 4: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation*, 2010.
- [2] *IEEE Standard for Ethernet Amendment 2: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 100 Gb/s Operation Over Backplanes and Copper Cables*, 2014.
- [3] *IEEE Standard for Ethernet - Amendment 3: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation over Fiber Optic Cables*, 2015.
- [4] M. Duelk and R. Gutierrez-Castrejon, "25-Gb/s 40-km PHY at 1310 nm for 100 GbE Using SOA-Based Preamplifier," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 12, pp. 1681-1689, 2008, doi: 10.1109/JLT.2008.920124.
- [5] R. Gutierrez-Castrejon, *Nonlinear Dynamics of Semiconductor Optical Amplifiers*. 2012.
- [6] M. Amaya, A. Sharaiha, and J. L. Bihan, "Evaluation of BER and WDM Crosstalk Penalty at 2.5 Gb/s in an SOA by Holding Beam Injection around Transparency Wavelength," in *2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies*, 24-28 April 2006 2006, vol. 2, pp. 2030-2035, doi: 10.1109/ICTTA.2006.1684713.
- [7] "IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications - Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layer, and Management Parameters for 10 Gb/s Operation," *IEEE Std 802.3ae-2002 (Amendment to IEEE*



*Std 802.3-2002*), pp. 1-544, 2002, doi: 10.1109/IEEESTD.2002.94131.

- [8] Optilab. *4 Channel DFB Laser Source, Benchtop, 1310 nm, CWDM*. [Online]. Available: <https://www.oquest.com/getDdatasheet/id/10227-10227.pdf>.
- [9] Fiberpro. *Multi-Channel Polarization Controller PC1200 series*. [Online]. Available: <http://www.sunins.com/old/fiberpro/Feb2009%20Fiber%20Pro%20Catalogue%20Data/polarization%20controller/PC1200%20MCPC.pdf>.
- [10] Optoquest. *Polarization Control Related Products*. [Online]. Available: [https://www.optoquest.co.jp/en/component/polarization/polarization\\_cartridge.html](https://www.optoquest.co.jp/en/component/polarization/polarization_cartridge.html).
- [11] S. C. T. AG. *Datasheet SHF 46123 A Optical Transmitter*. [Online]. Available: [https://www.shf-communication.com/wp-content/uploads/datasheets/datasheet\\_shf\\_46123\\_a.pdf](https://www.shf-communication.com/wp-content/uploads/datasheets/datasheet_shf_46123_a.pdf).
- [12] Finisar. *10km 100GBASE-LR4 QSFP28 Optical Transceiver Module*. [Online]. Available: [https://th.mouser.com/datasheet/2/610/Finisar-09-06-2018-FTLC1154RDPL\\_Product\\_Spec\\_Rev\\_B-1397829.pdf](https://th.mouser.com/datasheet/2/610/Finisar-09-06-2018-FTLC1154RDPL_Product_Spec_Rev_B-1397829.pdf).
- [13] Finisar. *FDB-1051 QSFP+/QSFP28 Evaluation Board*. [Online]. Available: <https://th.mouser.com/pdfDocs/FDB-1051-BoardDatasheet.pdf>.
- [14] Optoquest. *Variable Attenuator Module*. [Online]. Available: [https://www.optoquest.co.jp/en/pdf/pdf\\_att.pdf](https://www.optoquest.co.jp/en/pdf/pdf_att.pdf).
- [15] H. C. T. (Shenzhen). *Custom Made 1x2 1x4 2x2 Fiber Optic Fbt Splitter Coupler*. [Online]. Available: <https://m.made-in-china.com/product/Custom-Made-1X2-1X4-2X2-Fiber-Optic-Fbt-Splitter-Coupler-892160435.html>.
- [16] I. T. S. S. (ITU-T). "G.652 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable." <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en> (accessed).
- [17] G. Keiser, *Optical Fiber Communication*. 2015.
- [18] Optoquest. *Auto-Tracking Linear Polarization Controller*. [Online]. Available:

- <https://www.jpu.or.jp/eng/wp-content/uploads/2017/10/pdf-lpc-4.pdf>.
- [19] Optoquest. *Angle Tunable Type Wavelength Tunable Filter Module*. [Online]. Available: [https://www.optoquest.co.jp/en/component/wavelength/wavelength\\_filtermodule\\_kakudo.html](https://www.optoquest.co.jp/en/component/wavelength/wavelength_filtermodule_kakudo.html).
- [20] Agilent. *Agilent 83440B/C/D High-Speed Lightwave Converters*. [Online]. Available: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/Agilent-83440B-Datasheet.pdf>.
- [21] AEROFLEX. *Bias tee*. [Online]. Available: <https://www.apitech.com/globalassets/documents/products/rf-microwave-microelectronics-power-solutions/rf-components/bias-tees/8810e.pdf>.
- [22] S. C. T. AG. *Broadband Amplifier*. [Online]. Available: [https://www.shf-communication.com/wp-content/uploads/datasheets/datasheet\\_shf\\_810.pdf](https://www.shf-communication.com/wp-content/uploads/datasheets/datasheet_shf_810.pdf).
- [23] Anritsu. *Signal Quality Analyzers MP1800A*. [Online]. Available: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-en/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/Brochure/mx183000a-e1500.pdf>.
- [24] Optohub. *Low cost 4Ch 28Gb/s PPG/ED/CDR Data Sheet*. [Online]. Available: [https://www.optohub.com/products/datasheets/EV-L001\\_R7.pdf](https://www.optohub.com/products/datasheets/EV-L001_R7.pdf).
- [25] Keysight. *86100A Infiniium DCA Wide-Bandwidth Oscilloscope*. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/th/en/product/86100A/infiniium-dca-widebandwidth-oscilloscope.html>.
- [26] Keysight. *86109A 30 GHz optical / 40 GHz electrical module*. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/th/en/product/86109A/30-ghz-optical--40-ghz-electrical-module.html>.
- [27] Keysight. *83484A Dual channel 50 GHz electrical module*. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/th/en/product/83484A/dual-channel-50-ghz-electrical-module.html>.

- [28] Keysight. *1092C DCA-M Sampling Oscilloscope (One Optical and Two Electrical Channels)*. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/th/en/support/N1092C/dca-m-sampling-oscilloscope-one-optical-two-electrical-channels.html>.
- [29] Thorlabs. *Optical Power and Energy Meter, Dual-Channel Benchtop Console*. [Online]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=2748](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2748).
- [30] Advantest. *Q8384 Optical Spectrum Analyzer*. [Online]. Available: [https://www3.advantest.com/documents/11348/146687/pdf\\_mn\\_EO8384\\_OPERATING\\_MANUAL.pdf](https://www3.advantest.com/documents/11348/146687/pdf_mn_EO8384_OPERATING_MANUAL.pdf).
- [31] Yokogawa. *AQ6370 Series Optical Spectrum Analyzer*. [Online]. Available: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/1/2706/files/BUAO6370SR-20EN.pdf>.
- [32] ด. วรสุชีพ, ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง:หลักการและองค์ประกอบ. 2012.
- [33] I. D. William Shieh, Chapter, "OFDM for Optical Communications," in *Optical Communication Fundamentals*: Academic Press, 2010, ch. 3, pp. 53-118.
- [34] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition*. John Wiley & Sons, 2002.
- [35] P. Sawatdee *et al.*, "Data Pattern Effect of SOA at 25 Gbps with Different PRBS and Multi-channel Amplification," in *2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 19-22 May 2021 2021, pp. 228-231, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454841.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## 1. แผนข้อกำหนดคุณลักษณะของมอดูลรับส่งคิวเอสเอฟพี 28 กับบอร์ดประเมินผล [12, 13]

# FINISAR

### Product Specification

## 10km 100GBASE-LR4 QSFP28 Optical Transceiver Module

### FTLC1154RDPL

#### PRODUCT FEATURES

- Hot-pluggable QSFP28 form factor
- Supports 103.1Gb/s aggregate bit rate
- Power dissipation < 3.5W
- RoHS-6 compliant
- Commercial case temperature range of 0°C to 70°C
- Adaptive CTLE
- Single 3.3V power supply
- Maximum link length of 10km on Single Mode Fiber (SMF)
- 4x25Gb/s DFB-based LAN-WDM transmitter
- 4x25G retimed electrical interface
- Duplex LC receptacles
- I2C management interface



#### APPLICATIONS

- 100GBASE-LR4 100G Ethernet

Finisar's FTLC1154RDPL QSFP28 transceiver modules are designed for use in 100 Gigabit Ethernet links on up to 10km of single mode fiber. They are compliant with the QSFP28 MSA<sup>1</sup>, IEEE 802.3ba 100GBASE-LR4<sup>2</sup> and IEEE 802.3bm CAUI-4<sup>3</sup>. Digital diagnostic functions are available via the I2C interface, as specified by the QSFP28 MSA and Finisar Application Notes AN-2152<sup>4</sup> and AN-2153<sup>5</sup>. The optical transceiver is compliant per the RoHS-6 Directive 2011/65/EU<sup>6</sup>. See Finisar Application Note AN-2038<sup>7</sup> for more details.

#### PRODUCT SELECTION

### FTLC1154RDPL

- 4: Gen 2
- R: 100GE-LR4 maximum bit rate (103.1 Gb/s)
- D: 4x25G LAN-WDM optical architecture
- P: Pull-tab release
- L: LC straight receptacles

**I. Pin Descriptions**

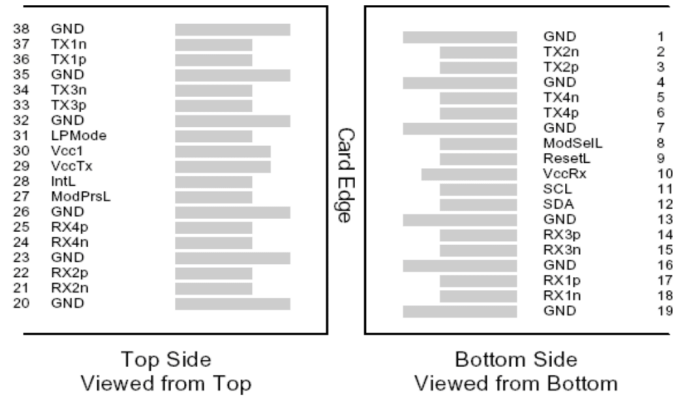


Figure 1 – QSFP28-compliant 38-pin connector (per SFF-8679)

Pin	Symbol	Name/Description	Notes
1	GND	Ground	1
2	Tx2n	Transmitter Inverted Data Input	
3	Tx2p	Transmitter Non-Inverted Data Input	
4	GND	Ground	1
5	Tx4n	Transmitter Inverted Data Input	
6	Tx4p	Transmitter Non-Inverted Data Input	
7	GND	Ground	1
8	ModSelL	Module Select	
9	ResetL	Module Reset	
10	Vcc Rx	+3.3 V Power supply receiver	
11	SCL	2-wire serial interface clock	
12	SDA	2-wire serial interface data	
13	GND	Ground	1
14	Rx3p	Receiver Non-Inverted Data Output	
15	Rx3n	Receiver Inverted Data Output	
16	GND	Ground	1
17	Rx1p	Receiver Non-Inverted Data Output	
18	Rx1n	Receiver Inverted Data Output	
19	GND	Ground	1
20	GND	Ground	1
21	Rx2n	Receiver Inverted Data Output	
22	Rx2p	Receiver Non-Inverted Data Output	
23	GND	Ground	1
24	Rx4n	Receiver Inverted Data Output	
25	Rx4p	Receiver Non-Inverted Data Output	
26	GND	Ground	1
27	ModPrsL	Module Present	
28	IntL	Interrupt	
29	Vcc Tx	+3.3 V Power supply transmitter	
30	Vcc1	+3.3 V Power Supply	
31	LPMODE	Low Power Mode	

32	GND	Ground	1
33	Tx3p	Transmitter Non-Inverted Data Input	
34	Tx3n	Transmitter Inverted Data Input	
35	GND	Ground	1
36	Tx1p	Transmitter Non-Inverted Data Input	
37	Tx1n	Transmitter Inverted Data Input	
38	GND	Ground	1

## Notes

- Circuit ground is internally isolated from chassis ground.
- The IntL pin ("Interrupt Low", pin 28) can be configured to act as an Rx\_LOS output;  
The LPMODE pin ("Low Power Mode", pin 31) can be configured to act as an input for Tx\_Disable;  
See Finisar Application Note AN-2038<sup>8</sup> for more details.

## II. Absolute Maximum Ratings

Module performance is not guaranteed beyond the operating range (see Section VI). Exceeding the limits below may damage the transceiver module permanently.

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
Maximum Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	-0.5		3.6	V	
Storage Temperature	T <sub>S</sub>	-40		+85	°C	
Case Operating Temperature	T <sub>OP</sub>	0		+70	°C	
Relative Humidity	RH	15		85	%	1
Receiver Damage Threshold, per Lane	P <sub>RDMG</sub>	5.5			dBm	

## Notes:

- Non-condensing.

## III. Electrical Characteristics (EOL, T<sub>OP</sub> = 0 to +70 °C, V<sub>CC</sub> = 3.135 to 3.465 Volts)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	3.135		3.465	V	
Supply Current	I <sub>CC</sub>			1.12	A	
Module total power	P			3.5	W	1
<b>Transmitter</b>						
Signaling rate per lane		25.78125 ± 100 ppm			GBd	
Differential data input swing per lane	V <sub>in,pp</sub>	900			mV	
Differential input return loss (min)	RL <sub>d(f)</sub>	9.5 – 0.37f, 0.01 ≤ f < 8 4.75 – 7.4log <sub>10</sub> (f/14), 8 ≤ f < 19			dB	
Differential to common mode input return loss (min)	RL <sub>dc(f)</sub>	22-20(f/25.78), 0.01 ≤ f < 12.89 15-6(f/25.78), 12.89 ≤ f < 19			dB	
Differential termination mismatch				10	%	
Stressed input parameters						
Eye width			0.46		UI	
Applied pk-pk sinusoidal jitter		Per IEEE 802.3bm Table 88-13				
Eye height			95		mV	
DC common mode voltage		-350		2850	mV	
<b>Receiver</b>						
Signaling rate per lane		25.78125 ± 100 ppm			GBd	
Differential data output swing	V <sub>out,pp</sub>	100	400	600	mVpp	2
		300	800	1200		
Eye width		0.57			UI	
Vertical eye closure				5.5	dB	

Differential output return loss (min)	RLd(f)	$9.5 - 0.37f$ , $0.01 \leq f < 8$ $4.75 - 7.4 \log_{10}(f/14)$ , $8 \leq f < 19$	dB	
Common to differential mode conversion return loss (min)	RLdc(f)	$22 - 20(f/25.78)$ , $0.01 \leq f < 12.89$ $15 - 6(f/25.78)$ , $12.89 \leq f < 19$	dB	
Differential termination mismatch			10	%
Transition time, 20% to 80%	$t_r$ , $t_f$	12		ps

**Notes:**

- Maximum total power value is specified across the full temperature and voltage range. Power consumption  $\leq 3.5W$  when stabilized, but may be  $> 3.5W$  during locking acquisition.
- Output voltage is settable in 4 discrete ranges via I2C. Default range is 400 – 800 mV.

**IV. Optical Characteristics (EOL,  $T_{OP} = 0$  to  $+70$  °C,  $V_{CC} = 3.135$  to  $3.465$  Volts)**

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
<b>Transmitter</b>						
Signaling Speed per Lane		25.78125 $\pm$ 100 ppm			Gb/s	1
Lane center wavelengths (range)		1294.53 – 1296.59 1299.02 – 1301.09 1303.54 – 1305.63 1308.09 – 1310.19			nm	
Total Average Launch Power	$P_{OUT}$			10.5	dBm	
Transmit OMA per Lane	$TxOMA$	-1.3		4.5	dBm	
Average Launch Power per Lane	$TXP_x$	-4.3		4.5	dBm	2,7
Optical Extinction Ratio	ER	4			dB	
Sidemode Suppression ratio	$SSR_{min}$	30			dB	
Average launch power of OFF transmitter, per lane				-30	dBm	
Relative Intensity Noise	RIN			-130	dB/Hz	
Optical Return Loss Tolerance				20	dB	
Transmitter Reflectance				-12	dB	
Transmitter eye mask definition {X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3}		{0.25, 0.4, 0.45, 0.25, 0.28, 0.4}				3
<b>Receiver</b>						
Signaling Speed per Lane		25.78125 $\pm$ 100 ppm			GBd	4
Lane center wavelengths (range)		1294.53 – 1296.59 1299.02 – 1301.09 1303.54 – 1305.63 1308.09 – 1310.19			nm	
Receive Power (OMA) per Lane	$RxOMA$			4.5	dBm	
Average Receive Power per Lane	$RXP_x$	-10.6		4.5	dBm	5,7
Receiver Sensitivity (OMA) per Lane	$Rxsens$			-8.6	dBm	
Return Loss	RL	-26			dB	
Stressed Receiver Sensitivity (OMA) per Lane	SRS			-6.8	dBm	6
Receive electrical 3 dB upper cutoff frequency, per lane				31	GHz	
LOS De-Assert	$LOS_D$			-11.6	dBm	
LOS Assert	$LOS_A$	-24		-13.6	dBm	
LOS Hysteresis			1.2		dB	

**Notes:**

- Transmitter consists of 4 lasers operating at 25.78Gb/s each.
- Minimum value is informative.
- Hit ratio  $5 \times 10^{-5}$ .
- Receiver consists of 4 photodetectors operating at 25.78Gb/s each.
- Minimum value is informative, equals min  $TxOMA$  with infinite ER and max channel insertion loss.
- SRS is measured with vertical eye closure penalty of 1.8 dB max, J2 of 0.30 UI, and J9 of 0.47 UI.



7. Power value and power accuracy are with all channels on.

## V. General Specifications

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Ref.
Bit Rate (all wavelengths combined)	BR			103.1	Gb/s	1
Bit Error Ratio @25.78Gb/s	BER			10 <sup>-12</sup>		2
<b>Maximum Supported Distances</b>						
Fiber Type						
SMF per G.652	L <sub>max</sub>			10	km	

### Notes:

1. Supports 100GBASE-LR4 per IEEE 802.3ba.
2. Tested with a 2<sup>31</sup> – 1 PRBS.

## VI. Environmental Specifications

Finisar FTLC1154RDPL QSFP28 transceivers have an operating case temperature range of 0°C to +70°C.

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Ref.
Case Operating Temperature	T <sub>op</sub>	0		+70	°C	
Storage Temperature	T <sub>sto</sub>	-40		+85	°C	

## VII. Regulatory Compliance

Finisar FTLC1154RDPL QSFP28 transceivers are Class 1 Laser Products. They are certified per the following standards:

Feature	Agency	Standard
Laser Eye Safety	FDA/CDRH	CDRH 21 CFR 1040 and Laser Notice 50
	CSA	IEC60825-2:2004+A1+A2
	TüV	EN60825-1:2014 & EN60825-2:2006+A1+A2
Electrical Safety	CSA	IEC60950-1:2005+A1+A2
	TüV	EN60950-1:2006+A11+A1+A12+A2
	UL/CSA	CLASS 3862.13 & CLASS 3862.93

Copies of the referenced certificates are available at Finisar Corporation upon request.

## VIII. Digital Diagnostics Functions

FTLC1154RDPL QSFP28 transceivers support the I2C-based diagnostics interface specified by the SFF Committee<sup>1</sup>. See also Finisar Application Notes AN-2152<sup>4</sup> and AN-2153<sup>5</sup>.

**IX. Memory Contents**

Per SFF-8665 Specification<sup>1</sup>. See Finisar Application Note AN-2152<sup>4</sup>. For CFP replacement applications, the transceiver module can be customized to enable Tx\_Disable and Rx\_LOS functions as alternate functions on LPMode and IntL pins. See Finisar Application Note AN-2174<sup>8</sup> for more details.

**XI. Mechanical Specifications**

Finisar FTLC1154RDPL transceivers are compatible with the QSFP28 Specification for pluggable form factor modules.

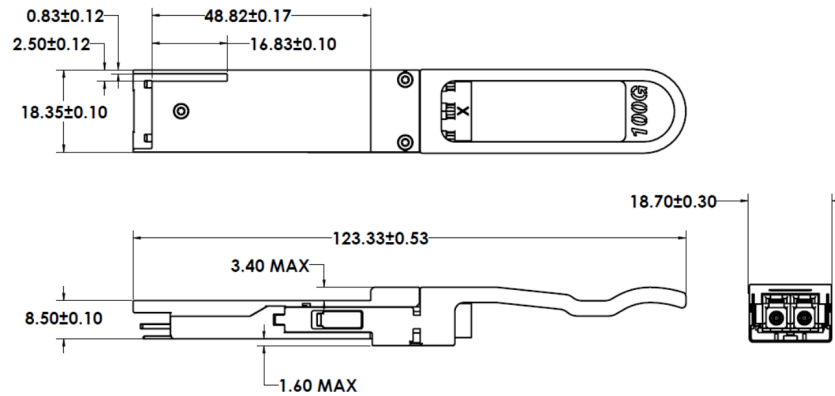


Figure 2. FTLC1154RDPL Mechanical Dimensions.

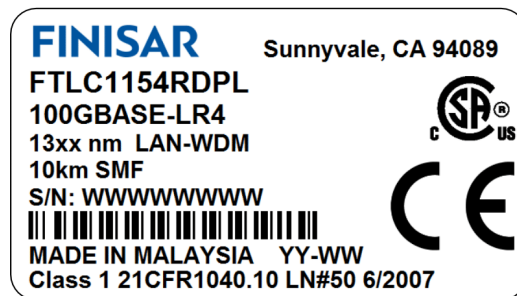


Figure 3. Product Label (Not to Scale)

**XII. References**

1. SFF-8665: “QSFP+ 28Gb/s 4X Pluggable Transceiver Solution (QSFP28)”, Rev 1.9, June 29, 2015 (and associated SFF documents)
  - i. SFF-8661
  - ii. SFF-8679
  - iii. SFF-8636
  - iv. SFF-8662
  - v. SFF-8663
  - vi. SFF-8672
  - vii. SFF-8683
2. IEEE 802.3ba, PMD Type 100GBASE-LR4.
3. IEEE 802.3bm, Annex 83E, CAUI-4 Interface.
4. Application Note AN-2152: EEPROM Map, Finisar Corporation.
5. Application Note AN-2153: Initialization, Finisar Corporation.
6. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council, “on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment,” July 1, 2011.
7. Application Note AN-2038: Finisar Implementation Of RoHS Compliant Transceivers, Finisar Corporation.
8. Application Note AN-2174: QSFP28 LR4 and QSFP28 CWDM4 – Tx\_Disable and Rx\_LOS Capability, Finisar Corporation.

**For More Information:**

Finisar Corporation  
1389 Moffett Park Drive  
Sunnyvale, CA 94089-1133  
Tel. 1-408-548-1000  
Fax 1-408-541-6138  
[sales@finisar.com](mailto:sales@finisar.com)  
[www.finisar.com](http://www.finisar.com)

## 2. แผนข้อกำหนดคุณลักษณะของตัวขยายแสงเอสโอเอ

ASOA-07-M-SC  
18042402

Page 1 of 3

### 1. Optical Specification(s):

Parameters	Min.	Typ.	Max.	Unit
Wavelength	1300	-	1320	nm
Input Power	-	-20	-	dBm
Output Power	+7	-	-	dBm
Signal Gain <sup>2</sup>	12	-	-	dB

### 2. Electrical and Mechanical Specification(s):

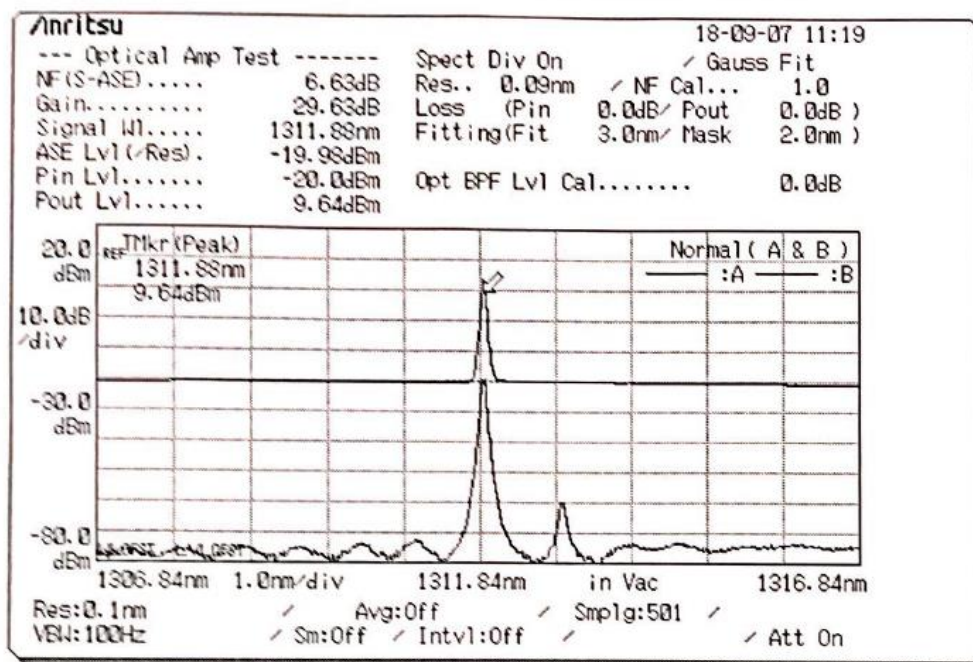
Parameters	Unit
Operation Temperature	0 to +40 °C
Storage Temperature	-10 to +70 °C
Power Supply	+5.0 +/- 0.1 VDC
Dimensions	115(W) x 70(D) x 22(H) mm

### 3. Communication Interface(s):

Parameters	
Electrical Connector	4 pin(2mm Pitch)
Warning/Protection	<input type="checkbox"/> Pump Laser Over Temperature <input type="checkbox"/> Loss of input <input type="checkbox"/> Loss of output <input type="checkbox"/> Safety Interlock <input type="checkbox"/> Keylock
Suggested Consumption Power	SOA1) 0.67W@10dBm output power (Driving current~0.135A) SOA2) 0.66W@10dBm output power (Driving current~0.133A)
Max Consumption Power	SOA1) 1.7W@ TEC1 =1.65V and Temp.=25C SOA2) 1.49W@ TEC2 =1.65V and Temp.=25C
Optical Connector	SC/UPC
Optical Fiber	Min. 0.5m 900um tubing SMF-28

#### 4. SOA 1 performance

Parameters	Measured	Unit	Pass/Fail
Signal Gain <sup>2</sup>	29.6	dB	PASS
Noise Figure <sup>2</sup>	6.63	dB	N/A



### 3. แผนข้อกำหนดคุณลักษณะของตัวควบคุมโพลาไรเซชันอัตโนมัติของบริษัท Optoquest รุ่น ALP05C [18]

## Auto-Tracking Linear Polarization Controller

Optical fiber is known for providing stable optical transmission, but it is also well known that optical fiber can be affected by slight structural shifts and influenced by disturbances, so that the total input and output of a comprehensive combination of optical fibers exhibit wave plate functionality.

The characteristics may vary due to disturbances of temperature changes and vibration in a relatively modest manner.

In addition, although polarization-maintaining fibers which provide stable transmission of polarized waves are also available, they are not cost effective when used to consistently control polarization with various function devices.

This product can be used for automatic linear polarization tracking in the above cases. This product realizes stable linear polarization output, even though polarization input is unstable.

This product is recommended for a wide range of applications, such as optical communications, optical measurement, biotechnology, and other research institutions, etc.

### *Features*

- Low insertion loss, low loss fluctuation and high return loss
- Capability to convert arbitrary polarization to linear polarization
- Capability to specify the angle and control constant speed rotation on the operator panel
- Spatial output capability by connecting a collimate attachment to the output adapter

### **Key Applications**

- Conversion of arbitrary polarization to linear polarization for input into polarization dependent elements
- SHG conversion and wavelength conversion
- Various polarization experiments
- Polarization fluctuation control for optical communication systems



### *Typical Specifications*

Model	ALP05C
Insertion Loss	$\leq 1.5$ dB
Return Loss	$\geq 50$ dB
Optical Input Power *	-12 to 10 dBm (approx. 60 $\mu$ W to 10 mW) @ 1550 nm
Polarization Extinction Ratio	$\geq 20$ dB
Optical Adapter	SC/FC Inter-Exchangeable Type Adapter

\* Input Power: Customizable up to 1 W. However, light sources may need to be borrowed in this case.

### Rating

External Control	USB
Power Source	AC 90-240 V
Power Consumption	≤ 30 [W]
Operating Temperature	10-45 [deg C]
Storage Temperature	0-60 [deg C]
Dimensions (W x H x D)	260 x 99 x 280 [mm]
Weight	5 [kg]

### Ordering Instructions

**+Auto-Tracking Linear Polarization Controller****Order format: ALP05C- (1) - S / (2) - P / (2)**

Input Output

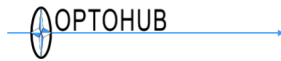
Order format example: ALP05C-15-S/S-P/S

(λ: 1510nm, Input fiber: SMF, Input connector: SC/SPC, Output fiber: PMF, Output Connector: SC/SPC)

(1) Wavelength	15: 1550nm 13: 1310nm
Input Side	S: SMF
Output Side	P: PMF
(2) Types of Polish	F: FC/SPC S: SC/SPC FA: FC/Angled PC SA: SC/Angled PC *When you chose the Angled PC, the adapter is the fixed type.

**\* For the exposed pigtails, both input and output sides need to be customized.**

## 4.แผ่นข้อกำหนดคุณลักษณะของเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิตบริษัท Optohub รุ่น EV-L001 [24]



Rev.7 [Feb. 2018]

### **Low cost 4Ch 28Gb/s PPG/ED/CDR Data Sheet**

#### ■ **EV-L001**

**PPG/ED/CDR for 100GE component testing**

##### **Description**

EV-L001 is a 4Ch 28Gb/s PPG/ED/CDR powered by Inphi IN012525-CQ quad channel CDR.

EV-L001 works as USB bus powered device which communicates with PC via Virtual COM Port (VCP) enabled by STM32L433 microprocessor (STMicroelectronics).



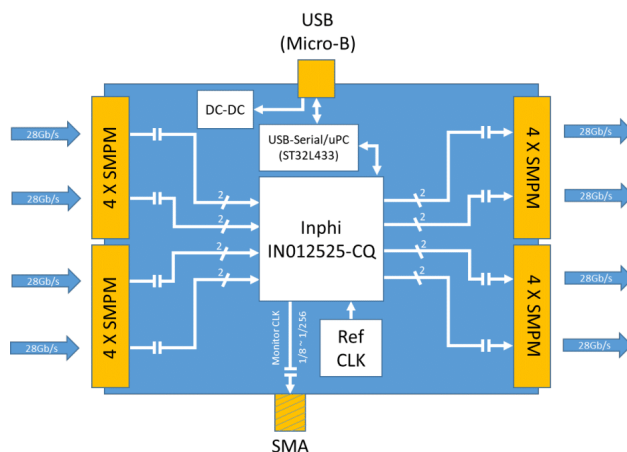
##### **Features**

- ◆ Inphi IN012525-CQ quad channel 10G/25G/28G CDR is packaged
  - Supports data rates in the range of 9.95-14.025Gb/s and 20-28.2Gb/s
  - PRBS 7/9/15/23/31 are supported for both error checking and pattern generation
  - Independent pattern setting for all 4Ch in PPG mode
- ◆ Built in programmable reference clock supports all the bit rates which supported by the CDR
- ◆ USB bus powered operation (+5V, Less than 500mA operation)
  - +5V DC adaptor jack for in case USB port does not have enough current capacity
- ◆ Serial interface (USB serial) is used to communicate with PC
- ◆ Programmable initial setting (power On setting) for built-in application (Only +5V DC power supply is required.)
- ◆ 8 ports SMPM connector at each end for 4 high speed differential signals
- ◆ One SMA connector for divided clock signal output
- ◆ All signals are AC coupled (Internal DC block exists)
- ◆ Room temperature operation ( +15 degC to +40 degC )
- ◆ **Supported OS: Windows 7, 8.x, 10 (32bit or 64bit), Windows 10 recommended.**

##### **Applications**

- PRBS signal source and error checker for 100GE component testing
- Portable ED/PPG for trade show and on site demonstration
- Built-in PRBS source for 100GE optical signal generator



**Block Diagram****Absolute Maximum Ratings**

(Tc=25degC, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
DC power supply	Vin		-0.3	---	+5.8	V
Input differential voltage swing	R_Vdiff		---	---	0.9	Vppd
DC voltage level*1	Vdc	Average voltage	-5		+5	V

\*1: For all high speed inputs and outputs (signal and clock)

**Electrical Characteristics**

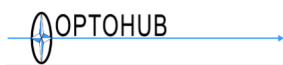
(Tc=25degC, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Reference clock stability	---		-100		+100	ppm
Output differential voltage	T_Vdiff		500	---	950	mVppd
Differential resistance	Rd		85	100	115	$\Omega$
Differential input return loss*1	R_SDD11	0.1GHz ~ 20GHz	6			dB
Differential output return loss*1	T_SDD22	0.1GHz ~ 20GHz	6			dB
Monitor clock output	Vmclk			400		mVpp

\*1: +5V supplied.

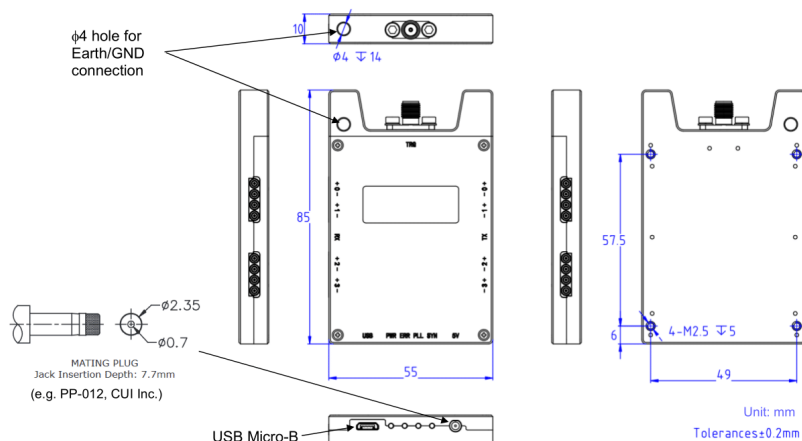
**ESD**

All high speed signal inputs and outputs (data and clock) must withstand 1000V of ESD using the human body model (HBM) and 250V of ESD using the charged device model (CDM) without damage.



EV-L001  
Rev.7 [Feb. 2018]

### **Outline Drawings**



### **Warranty (User registration is required.)**

This product is subject of the limited warranty against defects in materials and workmanship under normal use for a period of ONE (1) YEAR from the date of retail purchase by the original end-user purchaser (“Warranty Period”). If a hardware defect arises and valid claim is received within the Warranty Period, OPTOHUB will exchange the product with a product that is new or which has been manufactured from new or serviceable used parts and is at least functionally equivalent to the original product. A replacement product assumes the remaining warranty of the original product or ninety (90) days from the date of replacement whichever provides longer coverage for you. When a product is exchanged, any replacement item becomes your property and the replaced item becomes OPTOHUB’s property.

#### EXCLUSIONS AND LIMITATIONS

This warranty does not apply: (a) to damage at any of high speed signal input or output (Data and Clock) by any cause (ESD, excess signal power or whatever); (b) to damage any of connector (SMPM, SMA, and USB) by any reason; (c) to damage caused by accident, abuse, misuse, flood, fire, earthquake or other external causes; (c) to damage caused by operating the product outside the permitted or intended uses described by OPTOHUB; (d) to a product or part that has been modified to significantly alter functionality or capability without the written permission of OPTOHUB; or (e) if any OPTOHUB serial number has been removed or defaced.

### **OPTOHUB Co., Ltd.**

305 Live Tower Musashi Urawa  
7-6-8 Bessho, Minami-ku, Saitama-shi  
Saitama, 336-0021 JAPAN

URL : <http://www.optohub.com>  
E-mail : [info@optohub.com](mailto:info@optohub.com)  
TEL : +81-48-844-8899  
FAX : +81-48-844-8902

All specifications described herein are subject to change without notice.  
Copyright 2016 OPTOHUB Co., Ltd.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิชชากรณ์ สวัสดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	3 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	345 ซอยจรัญสนิทวงศ์ 12 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ 10600
ผลงานตีพิมพ์	P. Sawatdee et al., "Data Pattern Effect of SOA at 25 Gbps with Different PRBS and Multi-channel Amplification," in 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 19-22 May 2021, pp. 228-231, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454841.