

การออกแบบและสร้างต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง
ที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที



นางสาวคำขวัญ พัฒนกุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2856-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 2.5 GB/S DIRECTLY MODULATED
OPTICAL TRANSMITTER PROTOTYPE

Miss Kumkwan Pattanakul



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2856-1

คำขวัญ พัฒนกุล : การออกแบบและสร้างต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลต โดยตรงที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที. (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 2.5 GB/S DIRECTLY MODULATED OPTICAL TRANSMITTER PROTOTYPE)
 อ. ที่ปรึกษา : ดร.ดวงฤดี วรสุทธิพ, 113 หน้า. ISBN 974-53-2856-1.

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบ ประกอบ ทดสอบ และปรับปรุงต้นแบบ ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที โดยการนำสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาที จำนวน 16 ช่องสัญญาณมารวมกัน เทคนิคที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณ ข้อมูลเข้ากับแสงคือการมอดูเลตทางความเข้ม โดยใช้การมอดูเลตโดยตรงเข้ากับตัวเลเซอร์ จากการ ทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบขึ้นพบว่าสามารถให้สมรรถนะได้ตรงตามมาตรฐาน ITU G.957: Digital Sections and Digital Line Systems – Optical Interfaces for Equipments and Systems Relating to the Synchronous Digital Hierarchy และสามารถให้ค่าอัตราผิดพลาดบิต ได้ต่ำกว่า 10^{-9} ในการส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวแบบมาตรฐานด้วยระยะทาง 15 กิโลเมตร โดยที่ภาครับใช้ตัวรับสัญญาณทางแสงตามมาตรฐาน SONET/SDH

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... คำขวัญ..... พัฒนกุล.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ดวงฤดี วรสุทธิพ.....
 ปีการศึกษา....2548.....

4670242721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTICAL TRANSMITTER / DIRECT MODULATION

KUMKWAN PATTANAKUL : DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 2.5 GB/S
DIRECTLY MODULATED OPTICAL TRANSMITTER PROTOTYPE. THESIS ADVISOR :
DUANGRUDEE WORASUCHEEP, Ph.D., 113 pp. ISBN 974-53-2856-1.

This thesis presents the design, assembly, test and development of a 2.5 Gb/s optical transmitter prototype. The 2.5 Gb/s data rate is generated by combining 16 parallel electrical channels, each at 155 Mb/s data rate. The intensity modulation technique is used for data modulation by directly modulate onto a laser. The experimental measurements prove that the performance of prototype meets ITU G.957 standard: Digital Sections and Digital Line Systems – Optical Interfaces for Equipments and Systems Relating to the Synchronous Digital Hierarchy. The 2.5 Gb/s data transmission over 15-km standard single mode fiber (SSMF) using the transmitter prototype and a commercial receiver can achieve the bit error rate better than 10^{-9} .

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering... Student's signature..... *Kumkwan P.*
Field of study....Electrical Engineering... Advisor's signature..... *Dual Worachep*
Academic year..2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ดิฉันใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง สำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.ดวงฤดี วรรณสุชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ พร้อมทั้งแรงกระตุ้นและแรงบันดาลใจในการทำวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ อาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ จากทั้งวิชาที่เปิดสอนและคำแนะนำเมื่อมีปัญหาเฉพาะด้าน

ขอขอบคุณโครงการวิจัยร่วมเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการศึกษาและพัฒนา สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยและจัดซื้อครุภัณฑ์สำคัญต่าง ๆ เช่น Mixed Signal Oscilloscope, Digital Communication Analyzer และ Optical Spectrum Analyzer

ขอขอบคุณ บริษัทไทยไฟเบอร์ออปติก จำกัด ที่บริจาคเส้นใยนำแสงโหมดเดียวแบบมาตรฐานเพื่อใช้ในการทดลองระยะทางรวมทั้งสิ้น 15 กิโลเมตร

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่อนุญาตให้เข้าใช้เครื่องมือ Fusion Splicer และ Fiber Polisher

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อน ๆ และคนรอบตัวผู้วิจัย ในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีคมนาคมทุก ๆ ท่าน สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณที่ทำให้ทุกวันในการวิจัยมีคุณค่าและมีความหมาย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติ ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
2. การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง.....	6
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง.....	6
2.1.1 ตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	7
2.1.1.1 ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer).....	8
2.1.1.2 แหล่งกำเนิดแสง (Light source).....	8
2.1.1.3 ตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver).....	10
2.1.2 ตัวรับสัญญาณทางแสง.....	12
2.1.2.1 โฟโตไดโอด (Photodiode).....	13
2.1.2.2 ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier).....	14
2.1.2.3 วงจรกู้คืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา (Clock & Data Recovery Circuit) .	14
2.1.2.4 ตัวดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexer or demux).....	15
2.1.3 เส้นใยนำแสง.....	15
2.1.3.1 เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode Fiber, SMF).....	15
2.1.3.2 เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด (Multi-Mode Fiber, MMF).....	16
2.2 เทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูล.....	16

บทที่	หน้า
2.2.1 การมัลติเพล็กซ์	17
2.2.1.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลา (Time Division Multiplexing, TDM) ...	17
2.2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM).....	18
2.2.1.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามรหัสทางแสง (Optical Code Division Multiplexing, OCDM).....	18
2.2.2 รูปแบบการมอดูเลต.....	19
2.2.2.1 การมอดูเลตทางความเข้ม (Intensity Modulation).....	19
2.2.2.2 การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation)	20
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนไปของสัญญาณ	21
2.3.1 การลดทอน (Attenuation)	22
2.3.2 การกระจายโครมาติก (Chromatic Dispersion)	23
2.3.2.1 การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion)	24
2.3.2.2 การกระจายที่หน้าคลื่น (Waveguide Dispersion)	24
2.3.3 สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector Noises)	26
2.3.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อต (Quantum or Shot Noise)	27
2.3.3.2 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark current noise)	27
2.3.3.3 สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal Noise).....	27
2.3.4 สัญญาณรบกวนจากตัวขยายสัญญาณ (Amplifier Noise)	28
3. วิธีดำเนินการวิจัย	29
3.1 อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	29
3.1.1 ตัวเลเซอร์	30
3.1.2 ตัวขับเลเซอร์.....	32
3.1.3 ตัวมัลติเพล็กซ์.....	33
3.1.4 ผลการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นจาก Evaluation boards ของอุปกรณ์แต่ละตัวมาประกอบกัน	35
3.1.5 ผลการเดิน (Jitter) ของสัญญาณที่ได้จากตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	37
3.2 การปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน	44
3.2.1 การแกว่งของสัญญาณเนื่องจากการพุ่งเกิน	46
3.2.2 การตัดของรูปคลื่น.....	47

บทที่	หน้า
4. การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	50
4.1 หลักการทำงานของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น	50
4.2 การออกแบบลายวงจร.....	52
4.2.1 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณขาเข้า 16 ช่องสัญญาณและสัญญาณนาฬิกาจาก ตัวกำเนิดสัญญาณข้อมูลกับขาเข้าชิพมัลติเพล็กซ์	54
4.2.2 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์กับขาเข้าของชิพตัวขับ เลเซอร์.....	54
4.2.3 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์เข้ากับตัวเลเซอร์	54
4.2.4 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงเข้าสู่ RCLK ของชิพมัลติเพล็กซ์	55
4.2.5 สัญญาณนาฬิกาขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ (PCLKO).....	56
4.2.6 แหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply)	56
4.3 การออกแบบ PCB (Print Circuit Board).....	56
4.3.1 PCB แบบที่ 1	56
4.3.2 PCB แบบที่ 2	61
4.3.3 PCB แบบที่ 3	67
5. ผลการทดสอบสมรรถนะตัวส่งสัญญาณทางแสงและการวิเคราะห์	77
5.1 มาตรฐานของสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณทางแสง	77
5.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดสัญญาณทางแสง	78
5.2.1 ตัว DCA (Digital Communication Analyzer).....	79
5.2.2 ตัว OSA (Optical Spectrum Analyzer)	79
5.3 วิธีการวัดสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	79
5.3.1 การทดสอบในโดเมนเวลา	79
5.3.2 การทดสอบในโดเมนความยาวคลื่น	83
5.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	84
5.4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะในโดเมนเวลา.....	84
5.4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะในโดเมนความยาวคลื่น.....	88
5.5 วิธีการหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER).....	90
5.6 ผลการทดสอบส่งสัญญาณข้อมูลเพื่อวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิต.....	92
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	97
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	97

บทที่	หน้า
6.2 ข้อเสนอแนะ	98
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก ลักษณะการเชื่อมต่อระดับสัญญาณแบบ LVPECL	103
ภาคผนวก ข การสร้าง Pseudo Random Bit Sequence	105
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	115



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผลการวัดการเกิดการเต้นของสัญญาณ	42
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดเกี่ยวกับขาเข้าและขาออกของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	50
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดสำหรับการเชื่อมต่อทางแสงใน STM-16.....	76
ตารางที่ 5.2 ค่า x และ y ของ eye mask ใน STM-16.....	76
ตารางที่ 5.3 รายละเอียดทางไฟฟ้าของตัวส่งสัญญาณทางแสง	82



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 (ก) ระบบสื่อสารทางแสงพื้นฐาน (ข) เมื่อตัวรับและตัวขยายถูกรวมเข้าไป (ค) เมื่อ MUX และ DMUX ถูกรวมเข้าไป.....	2
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง.....	6
รูปที่ 2.2 แผนภาพบล็อกรูปของตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง.....	7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขับเลเซอร์กับกำลังทางแสงขาออก.....	9
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของตัวขับเลเซอร์.....	11
รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกรูปของตัวรับสัญญาณทางแสง.....	12
รูปที่ 2.6 วงจรกู้คืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา.....	14
รูปที่ 2.7 เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว.....	15
รูปที่ 2.8 เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด.....	16
รูปที่ 2.9 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลา.....	17
รูปที่ 2.10 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความยาวคลื่น.....	18
รูปที่ 2.11 ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามรหัสทางแสง.....	18
รูปที่ 2.12 การมอดูเลตทางความเข้มเพื่อบอกคาบ.....	20
รูปที่ 2.13 การมอดูเลตทางเฟสเพื่อบอกคาบ.....	21
รูปที่ 2.14 เส้นทางของสัญญาณที่ผ่านชายเชื่อมโยงข้อมูลทางแสง.....	21
รูปที่ 2.15 ค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสง.....	23
รูปที่ 2.16 การกระจายเชิงวัสดุ.....	24
รูปที่ 2.17 การกระจายท่อนำคลื่น.....	24
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างค่าการกระจายเชิงวัสดุและท่อนำคลื่นของเส้นใยนำแสงโหมดเดียว.....	25
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	29
รูปที่ 3.2 ตัวเลเซอร์ ของบริษัท Triquint Semiconductor รุ่น D572.....	30
รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าคุณลักษณะสมบัติของตัวเลเซอร์.....	30
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางแสงขาออกและกระแสขับเลเซอร์.....	31
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของ MAX3869.....	32
รูปที่ 3.6 แผนภาพการทำงานของ MAX3891.....	34
รูปที่ 3.7 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบจาก Evaluation boards.....	35
รูปที่ 3.8 สัญญาณนาฬิกาขาเข้าของตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	36

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.9 สัญญาณข้อมูลขาเข้าของตัวส่งสัญญาณทางแสง	36
รูปที่ 3.10 สัญญาณขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง	37
รูปที่ 3.11 ระบบที่ใช้ในการทดลองวัดการเดินของตัวขับเคลื่อนเซอร์.....	38
รูปที่ 3.12 ระบบที่ใช้ในการทดลองวัดการเดินของตัวขับเคลื่อนเซอร์.....	38
รูปที่ 3.13 สัญญาณขาออกจากตัวกำเนิดสัญญาณ (ก) ที่ความถี่ 1.25 GHz (ข) ที่ความถี่ 2.5 GHz.....	39
รูปที่ 3.14 สัญญาณขาออกจากตัวขับเคลื่อนเซอร์ (ก) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 1.25 GHz (ข) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 2.5 GHz.....	40
รูปที่ 3.15 สัญญาณขาออกจากตัวขับเคลื่อนเซอร์ (ก) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 1.25 GHz (ข) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 2.5 GHz.....	41
รูปที่ 3.16 ระบบที่ใช้ในการทดลองดูการเดินของตัวส่งสัญญาณทางแสง	42
รูปที่ 3.17 สัญญาณขาออกจากตัวขับเคลื่อนเซอร์ (ก) ที่ความถี่ 1.25 GHz (ข) ที่ความถี่ 2.5 GHz.....	43
รูปที่ 3.18 ระบบที่ใช้ในการทดลองปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน	44
รูปที่ 3.19 สัญญาณขาออกทางไฟฟ้าจากตัวขับเคลื่อนเซอร์.....	45
รูปที่ 3.20 สัญญาณขาออกทางแสงจากตัวขับเคลื่อนเซอร์.....	45
รูปที่ 3.21 แผนภาพตาของสัญญาณที่เกิดการพุ่งเกิน.....	47
รูปที่ 3.22 แผนภาพตาของสัญญาณที่เกิดการตัดของรูปคลื่น	48
รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น	50
รูปที่ 4.2 แผนผังวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	52
รูปที่ 4.3 แผนภาพตาเปรียบเทียบระหว่างการขับเคลื่อนแบบข้างเดียวกับการขับเคลื่อนแบบผลต่าง.....	55
รูปที่ 4.4 การแยกเส้นสัญญาณแบบข้างเดียวเพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม	57
รูปที่ 4.5 การแยกเส้นสัญญาณแบบผลต่างเพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม.....	57
รูปที่ 4.6 ลักษณะ PCB ของบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1	58
รูปที่ 4.7 บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 ที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ บัดกรีเรียบร้อยแล้ว.....	59
รูปที่ 4.8 แผนภาพบล็อกการทดลองต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง	59
รูปที่ 4.9 สัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์.....	60
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเซอร์วัดโดย DCA	60
รูปที่ 4.11 สัญญาณขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเซอร์วัดโดย MSO.....	61
รูปที่ 4.12 ลักษณะ PCB ของบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2	62
รูปที่ 4.13 บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 ที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ บัดกรีเรียบร้อยแล้ว.....	63

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.14 สัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์.....	64
รูปที่ 4.15 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์	64
รูปที่ 4.16 สัญญาณขาออกจากบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2.....	65
รูปที่ 4.17 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์ โดยส่งข้อมูล 1010	66
รูปที่ 4.18 สัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 โดยส่งข้อมูล 1010.....	66
รูปที่ 4.19 คอนเนตเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณขาเข้าเข้าสู่บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง (ก) บนบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 (ข) บนบอร์ดต้นแบบตัวส่ง สัญญาณทางแสงแบบที่ 3	67
รูปที่ 4.20 ภาคตัดขวางของ microstrip line.....	68
รูปที่ 4.21 ลักษณะ PCB ของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	70
รูปที่ 4.22 บอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 ที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ บัดกรีเรียบร้อยแล้ว	70
รูปที่ 4.23 แผนภาพบล็อกการทดลองต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3	71
รูปที่ 4.24 สัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์.....	71
รูปที่ 4.25 สัญญาณข้อมูลที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์.....	72
รูปที่ 4.26 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์	73
รูปที่ 4.27 สัญญาณขาออกจากบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3.....	73
รูปที่ 4.28 การเชื่อมต่อการกรับแบบข้างเดียวเป็นการกรับแบบผลต่าง.....	74
รูปที่ 4.29 สัญญาณขาออกจากบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 โดยการกรับแบบ ผลต่าง	75
รูปที่ 5.1 แผนภาพตา	80
รูปที่ 5.2 Peak to Peak และ RMS jitter	81
รูปที่ 5.3 หน้ากากของแผนภาพตาของตัวส่งสัญญาณทางแสง	81
รูปที่ 5.4 แผนภาพบล็อกพื้นฐานของการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสง	82
รูปที่ 5.5 แผนภาพบล็อกของการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสงโดยการใช้ระบบกู้คืนสัญญาณ นาฬิกา	82
รูปที่ 5.6 การวัดสัญญาณทางแสงในโดเมนความยาวคลื่นแสงด้วย OSA.....	83
รูปที่ 5.7 สัญญาณขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง	85
รูปที่ 5.8 ผลการวัด Jitter ของสัญญาณที่ฝั่งรับ (ไม่ใช้ filter).....	86
รูปที่ 5.9 ผลการวัด Jitter ของสัญญาณที่ฝั่งรับ (ใช้ fourth-order Bessel-Thomson filter)	86
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบ eye mask ของสัญญาณที่ไม่ผ่านตัวกรอง	87

รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบ eye mask.....	88
รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของสัญญาณทางแสงก่อนการมอดูเลต.....	89
รูปที่ 5.13 สเปกตรัมของสัญญาณทางแสงหลังจากมอดูเลตด้วยสัญญาณ PRBS 2.5 Gb/s.....	89
รูปที่ 5.14 การวัดหาค่า BER	92
รูปที่ 5.15 แผนภาพตาของสัญญาณทางแสงก่อนส่งผ่านเส้นใยนำแสง.....	93
รูปที่ 5.16 แผนภาพตาของสัญญาณทางแสงหลังจากส่งผ่านเส้นใยนำแสงแบบ SSMF ระยะทาง 15 กิโลเมตร.....	93
รูปที่ 5.17 การกระจายออกของพัลส์ของสัญญาณทางแสงที่ตำแหน่ง 0 กิโลเมตรเทียบกับที่ ตำแหน่ง 15 กิโลเมตร ที่ระดับกำลังทางแสงเท่ากับ -5 dBm.....	94
รูปที่ 5.18 กราฟค่าแฟกเตอร์ Q กับกำลังทางแสงที่ได้รับ	95
รูปที่ 5.19 กราฟอัตราความผิดพลาดบิต.....	96
รูปที่ 6.1 ปัญหา Ringing และ Reflections	99

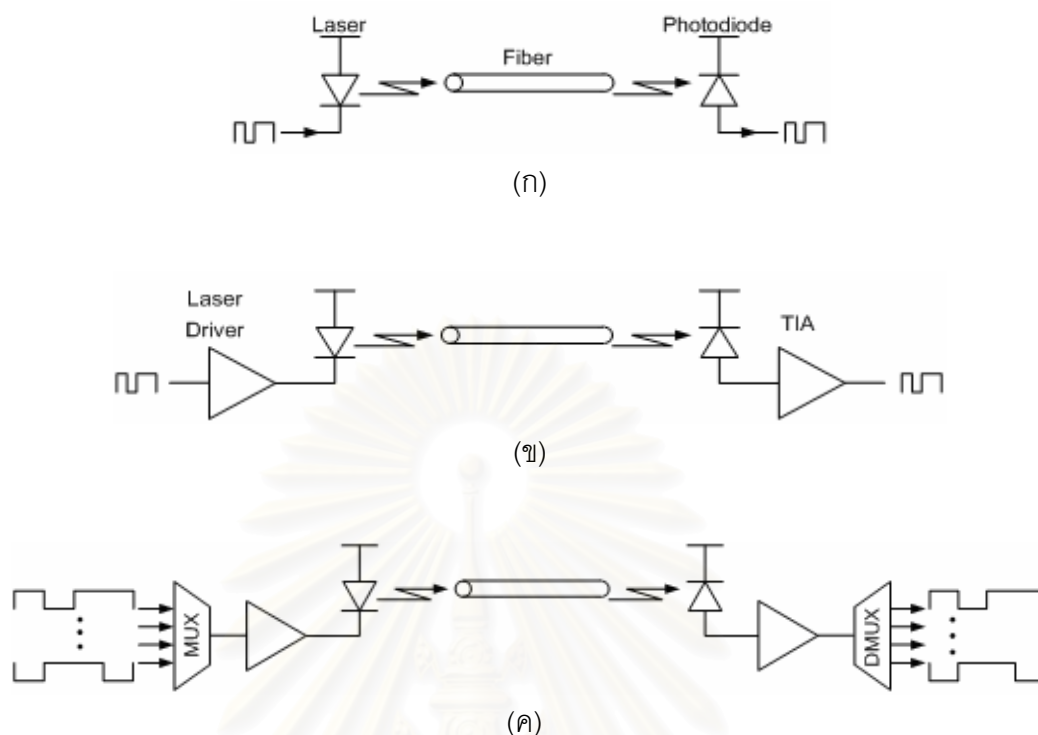
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการในการใช้ช่องสัญญาณมีเพิ่มมากขึ้น เพื่อจะสามารถรองรับปริมาณข้อมูลส่งที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ทุกขณะ อันเนื่องมาจากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีความเร็วสูงและเทคโนโลยีสารสนเทศต่าง ๆ ทำให้จำนวนช่องสัญญาณที่มีอยู่ไม่เพียงพอที่จะตอบสนองต่อความต้องการ จึงเป็นที่มาของการพิจารณาใช้คลื่นแสงมาแทนที่ในการส่งสัญญาณข้อมูล เพราะแสงมีช่วงความถี่คลื่นพาห้ที่สูงมากอยู่ที่ประมาณ $10^{14} - 10^{15}$ เฮิรตซ์ จึงมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมหาศาลที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลอัตราความเร็วสูงได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟค่าการลดทอนพลังงาน (Attenuation) ภายในเส้นใยนำแสงที่ผลิตจากแก้วจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างได้ประมาณ 45 THz ข้อดีอื่น ๆ ของการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงก็มีอยู่ด้วยกันหลากหลาย เช่น (1) มีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยนำแสงต่ำมากเมื่อเทียบกับสายทองแดง ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและประหยัดจำนวนอุปกรณ์ในการทวนสัญญาณ (2) เส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาจึงสามารถติดตั้งได้ง่ายและใช้พื้นที่น้อย (3) เนื่องจากเส้นใยนำแสงถูกผลิตมาจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า เช่น แก้วหรือพลาสติก จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น ขาวสารที่ส่งไปกับแสงจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ดังนั้นการลักลอบใช้สัญญาณทางแสงเพื่อนำไปประมวลผลและแอบล้วงรู้ข้อมูลจึงไม่สามารถกระทำได้

จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้น ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก รูปที่ 1.1 (ก) แสดงระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงพื้นฐานซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ (1) ตัวแปรสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นแสง (Electro-Optical Transducer) ตัวอย่างเช่น ตัวเลเซอร์ (Laser) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าไปเป็นรูปแบบของแสง (2) เส้นใยนำแสง (Optical Fiber) ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสงที่ผลิตจากตัวเลเซอร์ส่งไปยังปลายทาง (3) ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ตัวอย่างเช่น ตัวโฟโตไดโอด (Photodiode) ทำหน้าที่รับแสงจากปลายทางของเส้นใยนำแสงและเปลี่ยนมันเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 (ก) ระบบสื่อสารทางแสงพื้นฐาน (ข) เมื่อตัวขับและตัวขยายถูกรวมเข้าไป

(ค) เมื่อ MUX และ DMUX ถูกรวมเข้าไป

เมื่อต้องการส่งข้อมูลให้ได้ระยะทางที่ไกลขึ้นหรือส่งผ่านเส้นใยนำแสงราคาถูกลง คุณภาพต่ำ ที่มีค่าลดทอนสูง จะทำให้การสูญเสียกำลังทางแสงจากต้นทางไปยังปลายทางมีค่ามาก ส่งผลให้ตัวเลเซอร์ต้องผลิตแสงที่มีความเข้มสูงเพื่อส่งไปได้ไกลเพียงพอ ตัวโฟโตไดโอดต้องมีความไว (Sensitivity) ต่อแสงต่ำ ๆ เพื่อรับสัญญาณอ่อน ๆ ได้ และเนื่องจากสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากตัวโฟโตไดโอดมีค่าน้อยจึงต้องถูกขยายด้วยตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) อีกครั้ง เหตุผลเหล่านี้นำไปสู่ระบบที่ซับซ้อนมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ซึ่งตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) จะทำให้กระแสที่ป้อนเข้าสู่ตัวเลเซอร์มากขึ้นจึงผลิตแสงได้มากขึ้น ส่วน TIA (Trans-Impedance Amplifier) สามารถแปลงกระแสไฟฟ้าอ่อน ๆ ที่ออกจากตัวโฟโตไดโอดให้เป็นแรงดันไฟฟ้าขนาดใหญ่ขึ้นได้

การส่งและรับสัญญาณแสงดังรูปที่ 1 (ข) นี้จะใช้สำหรับข้อมูลอนุกรมความเร็วสูง เช่นสัญญาณข้อมูลหนึ่งช่องสัญญาณที่ความเร็ว 10 Gb/s อย่างไรก็ตามข้อมูลจริงที่ส่งผ่านตัวส่งสัญญาณจะอยู่ในรูปของสัญญาณความเร็วต่ำหลาย ๆ ช่องสัญญาณ เพราะมันถูกสร้างมาจากผู้ใช้หลาย ๆ คน ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer, MUX) จึงถูกนำมาใช้เพื่อรวมสัญญาณจากหลาย ๆ ช่องสัญญาณมาเป็นช่องสัญญาณเดียว เช่นเดียวกันที่ตัวรับสัญญาณต้องมีตัวดีมัลติเพล็กซ์

(Demultiplexer, DMUX) เพื่อแยกสัญญาณความเร็วสูงออกเป็นหลาย ๆ ช่องสัญญาณความเร็วต่ำดั้งเดิม ระบบจึงมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 1 (ค) การรวมสัญญาณลักษณะนี้เป็นแบบ TDM (Time Division Multiplexing) สำหรับรูปแบบของต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะออกแบบและประกอบขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกเป็นดังระบบในรูปที่ 1 (ค) ซึ่งประกอบด้วย ตัวมัลติเพล็กซ์ ตัวซีบเลเซอร์ และตัวเลเซอร์

นอกจากการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณโดยใช้การมัลติเพล็กซ์แบบ TDM ดังที่กล่าวมาข้างต้น ก็ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงในหลากหลายแนวทางออกมาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาสมรรถนะของตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสง [1-3] การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ เช่น การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น WDM (Wavelength Division Multiplexing), OCDM (Optical Code Division Multiplexing) [4-6] รูปแบบการมอดูเลตที่แตกต่างกัน [7-11] และการส่งด้วยอัตราความเร็วที่สูงขึ้นถึง 10, 40 และ 42.7 Gb/s [1, 8, 11] แต่ในงานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้มีการนำเสนอถึงรายละเอียดในการประกอบตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสง เนื่องจากได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์

สำหรับงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้การมอดูเลตสัญญาณทางความเข้ม (Intensity Modulation) มากกว่าการมอดูเลตทางเฟสหรือความถี่ เพราะความง่ายกว่าในการส่งและตรวจจับสัญญาณ โดยเฉพาะที่ภาคตัวรับสัญญาณทางแสงซึ่งจะนิยมใช้วิธีการตรวจจับโดยตรง (Direct Detection) สำหรับการมอดูเลตสัญญาณทางความเข้มนั้นมี 2 วิธี คือแบบโดยตรง (Direct Modulation) และแบบภายนอก (External Modulation) ซึ่งแบบแรกไม่ใช้ตัวมอดูเลตทางแสง (Optical Modulator) และไม่มี ความซับซ้อนของวงจรมากนัก จึงมีราคาถูกกว่าและเป็นที่ยอมรับกันมากกว่าแบบที่สอง หากแต่อัตราการส่งข้อมูลจะไม่สูงมากนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การมอดูเลตแบบโดยตรงเช่นเดียวกับงานวิจัย [1] แต่ที่ความยาวคลื่นแสงต่างกันและด้วยอัตราความเร็วข้อมูลต่ำกว่าเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้งานใน LAN (Local Area Network)

ในประเทศไทยถึงแม้จะมีการใช้งานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงมากขึ้น แต่เป็นการนำเข้าทั้งระบบจากต่างประเทศ เนื่องจากขาดวิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ในการออกแบบและประกอบอุปกรณ์ให้เป็นระบบ จึงเป็นที่มาของการริเริ่มงานวิจัยด้านนี้ โดยจะทำการประกอบต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่อัตราความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s เป็นชุดทดลองในการทดสอบส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode

Fiber, SMF) และสำหรับใช้ในงานวิจัยเชิงประยุกต์ต่อไปในอนาคต เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ และเพิ่มศักยภาพของผลงานวิจัยให้เทียบเท่าระดับสากล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิจัย ออกแบบ สร้าง และทดสอบต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลต โดยตรงที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที รวมถึงวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่จำกัดขอบเขตในการส่งสัญญาณเพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงของประเทศไทยต่อไป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรงที่อัตราความเร็ว 2.5 Gb/s
2. ตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองส่งสัญญาณด้วยตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมทั้งเสนอวิธีแก้ไข

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรงได้
2. สามารถทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงที่ใช้งานอยู่จริง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว
2. ศึกษาและออกแบบองค์ประกอบต่าง ๆ ในตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง
3. ออกแบบและต่อวงจรของตัวตรวจวัดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT)
4. ประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่อัตราความเร็ว 2.5 Gb/s
5. ทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสง

6. วิเคราะห์ผลการทดลองและปรับปรุงตัวส่งสัญญาณทางแสงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตรงตามต้องการ
7. ทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสง
8. วิเคราะห์ผลการทดลองและรวบรวมข้อมูล
9. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์



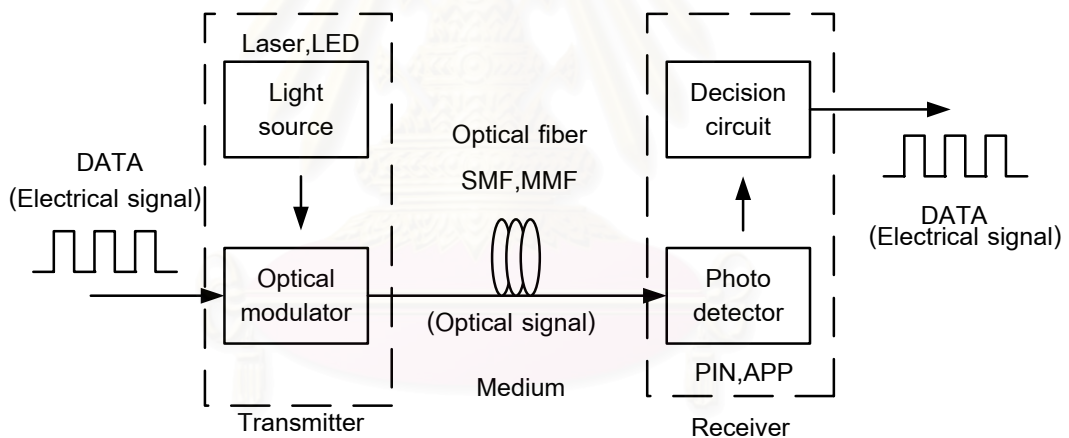
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

บทนี้จะกล่าวถึงระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงว่ามีการทำงานอย่างไรและประกอบด้วยองค์ประกอบใดบ้างเพื่อให้เห็นภาพรวมของระบบ จากนั้นจะกล่าวถึงเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูล ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต้องเรียนรู้ก่อนที่จะออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง สุดท้ายจะกล่าวถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้สัญญาณผิดเพี้ยนไปเพื่อนำไปออกแบบตัวส่งสัญญาณให้สามารถใช้งานได้ตรงตามความต้องการ

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง



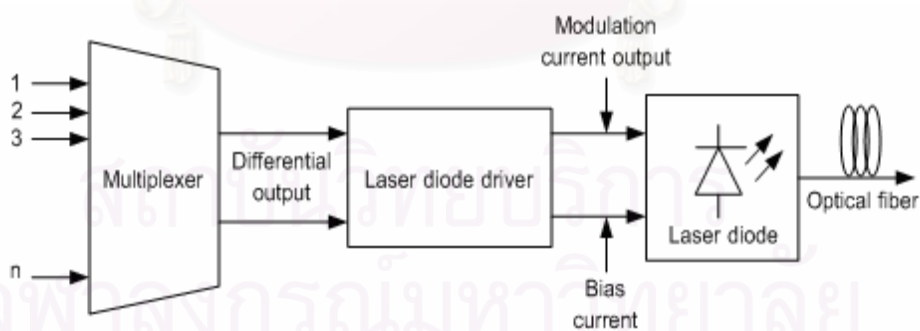
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงก็คล้ายกับระบบสื่อสารด้วยสายเคเบิลที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป องค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารเหล่านี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ตัวรับสัญญาณ (Receiver) และสื่อกลาง (Medium) ข้อแตกต่างระหว่างระบบสื่อสารทั้งสองแบบนี้คือสื่อกลางที่ใช้จะมีลักษณะแตกต่างกัน โดยในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงจะใช้เส้นใยนำแสงเป็นสื่อกลางแทนที่จะใช้สายทองแดงเหมือนกับระบบสื่อสารด้วยสายเคเบิลดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นสัญญาณที่ส่งไปจะต้องอยู่ในรูปของสัญญาณทางแสง ด้วยเหตุนี้ตัวส่งและตัวรับสัญญาณจึงจำเป็นต้องมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าทั่วไปให้เป็นสัญญาณทางแสง และแปลงสัญญาณทางแสงกลับมาอยู่ในรูป

ของสัญญาณไฟฟ้าดังเดิม รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ในตัวส่งสัญญาณทางแสง และตัวรับสัญญาณทางแสงจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.1.1 และ 2.1.2 ตามลำดับ ในหัวข้อที่ 2.1.3 จะกล่าวถึงประเภทของเส้นใยนำแสง

2.1.1 ตัวส่งสัญญาณทางแสง

ตัวส่งสัญญาณทางแสงทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณทางแสง ในการมอดูเลตสัญญาณเข้ากับแหล่งกำเนิดแสงสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ การมอดูเลตโดยตรง (Direct modulation) และการมอดูเลตภายนอก (External modulation) [12] การมอดูเลตโดยตรงคือการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้าไปกับเลเซอร์โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านตัวมอดูเลตทางแสง (Optical modulator) แบบภายนอก ส่วนการมอดูเลตภายนอกจะต้องมอดูเลตสัญญาณข้อมูลผ่านตัวมอดูเลตทางแสงเพิ่มเติมจากตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave Laser) ที่ใช้ผลิตแสง การมอดูเลตโดยตรงจึงเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกกว่าการมอดูเลตภายนอก อีกทั้งตัวเลเซอร์ที่มอดูเลตโดยตรงได้ (Directly Modulated Laser) ยังใช้พลังงานน้อยกว่าและมีราคาถูกกว่าราคารวมของตัวมอดูเลตทางแสงกับตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่องดังที่ถูกเปรียบเทียบไว้ใน [13] แต่การมอดูเลตโดยตรงนี้มีข้อจำกัดเรื่องอัตราความเร็วสูงสุดในการส่งข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 10 GHz อันเนื่องมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสขั้วของตัวเลเซอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.2 แผนภาพบล็อกของตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง

แผนภาพบล็อก (Block diagram) ของตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ตัวส่งสัญญาณทางแสงนี้ประกอบด้วย ตัวมัลติเพล็กซ์ แหล่งกำเนิดแสง และตัวขับเลเซอร์ [14] ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.1.1.1 – 2.1.1.3 ตามลำดับ

2.1.1.1 ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer)

ตัวมัลติเพล็กซ์มีหน้าที่ในการรวมจำนวนของช่องสัญญาณข้อมูลมาตรฐาน SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy) แล้วสร้างเป็นสัญญาณข้อมูลขาออกแบบอนุกรม (Serial) การมัลติเพล็กซ์ที่ใช้นี้ก็คือการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing, TDM)

2.1.1.2 แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

แหล่งกำเนิดแสงทำหน้าที่ในการผลิตแสงโดยมีขนาดของกำลังทางแสงขาออกแปรผันตรงกับขนาดกระแสที่ป้อน แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงจะผลิตจากสารกึ่งตัวนำ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ไดโอดเปล่งแสง และ เลเซอร์ เหตุผลของความนิยมใช้คือขนาดของลำแสงที่ผลิตออกมามีความใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของเส้นใยนำแสงทำให้พลังงานถูกถ่ายเทเข้าสู่เส้นใยนำแสงได้เป็นอย่างดี

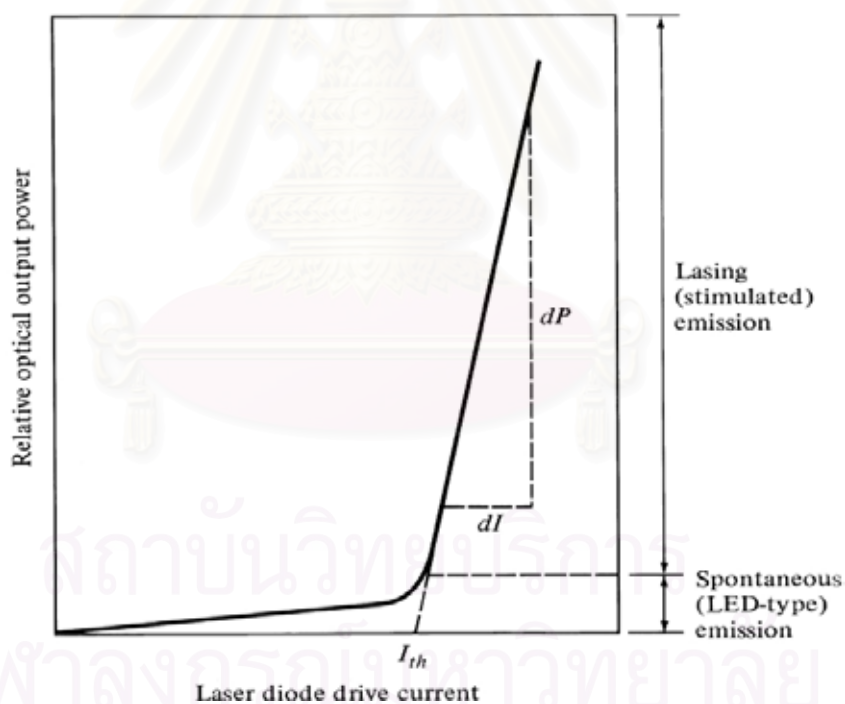
(1) ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diodes, LEDs)

ไดโอดเปล่งแสงเป็นสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 0.8-0.9 ไมครอน ตามชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ แสงที่ได้จาก LEDs เป็นแสงแบบอนาพันธ์ (Incoherent) คือจะมีลำแสงที่กระจายออกเป็นวงกว้าง อย่่างรูปแตรและมีความยาวคลื่นที่ต่าง ๆ กัน จึงเป็นที่มาของสเปกตรัมที่กว้าง จากความกว้างของสเปกตรัมนี้เอง LEDs จึงถูกจำกัดการใช้งานกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงที่มีอัตราความเร็วบิตต่ำที่ประมาณ 100-200 Mb/s โดยปกติ LEDs จะถูกใช้งานคู่กับเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด เนื่องจากความใกล้เคียงในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงและแกนกลางที่ใหญ่กว่าของเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว ข้อดีของ LEDs คือการใช้งานกับวงจรรีบ (Drive circuitry) มีความซับซ้อนน้อยกว่าวงจรรีบของเลเซอร์ เนื่องจากไม่ต้องการวงจรรีบกลับ (Feedback circuit) เพื่อรักษาระดับกำลังทางแสงให้คงที่และไม่จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อย่างของเลเซอร์

(2) เลเซอร์ (Laser Diodes, LDs)

เลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพีเอ็นเช่นเดียวกับ LEDs แต่มีโครงสร้างและขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนกว่า LEDs มาก ทำงานโดยใช้กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ

คือ การดูดซึมพลังงาน (Absorption) การปลดปล่อยพลังงานโดยเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) และการปลดปล่อยพลังงานโดยเกิดจากการกระตุ้น (Stimulated Emission) [15] เลเซอร์ให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.3-1.6 ไมครอน แสงที่ได้จากเลเซอร์จะมีลำแสงขนาดเล็ก ความกว้างของสเปกตรัมแคบกว่า LEDs จึงเหมาะสมกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงที่ต้องการอัตราความเร็วสูง โดยปกติเลเซอร์จะถูกใช้งานคู่กับเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว เนื่องจากความใกล้เคียงในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงและแกนกลางที่เล็กกว่าของเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด ข้อดีของเลเซอร์คือมันสามารถผลิตกำลังทางแสงออกมาได้สูงกว่า LEDs มาก และสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสขั้วได้เร็วกว่า แต่เนื่องจากว่าเลเซอร์เป็นอุปกรณ์มีฐาน (Threshold Device) การเปล่งแสงจึงไม่คงที่และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสขั้วโดยที่สัดส่วนการเปล่งแสงนี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงต้องมีวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้กำลังทางแสงขาออกของเลเซอร์คงที่



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วเลเซอร์กับกำลังทางแสงขาออก [15]

โดยปกติกำลังทางแสงขาออกสามารถถูกสร้างขึ้นและรักษาให้คงที่โดยการป้อนกระแสค่าคงที่เหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current, I_{th}) ให้กับเลเซอร์แบบเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้งานของตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่จะมีการปรับเปลี่ยนค่ากระแสขั้วลงอย่างรวดเร็วให้สอดคล้องกับระดับข้อมูลทีป้อนซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัล จำเป็นต้องใช้ตัวเลเซอร์

ที่มอดูเลตโดยตรงได้ และตัวเลเซอร์นี้จะถูกไบแอสให้อยู่เหนือกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนไปอีก เพื่อหลีกเลี่ยงการหน่วงเวลา (Delay) ระหว่างการเปิด-ปิดของตัวเลเซอร์ และเพื่อให้มีกำลังทางแสงขาออกมากเพียงพอที่จะส่งไปให้ได้ระยะทางไกลดังที่ออกแบบตัวส่งสัญญาณ

368รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขับกับกำลังทางแสงขาออกของเลเซอร์ทั่วไป ลักษณะการทำงานของเลเซอร์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกคือช่วงกระแสขับต่ำกว่าค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน เลเซอร์จะทำหน้าที่คล้าย LEDs คือให้อัตราการแปลงกระแสที่ต่ำ ส่วนในช่วงหลังคือช่วงกระแสขับสูงกว่าค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน ช่วงนี้เป็นช่วงที่จะถูกนำมาใช้งาน เนื่องจากให้อัตราการแปลงกระแสที่สูงกว่าช่วงแรกมาก ๆ กำลังทางแสงขาออกของเลเซอร์ (P_o , mW) สามารถประมาณได้จากสมการที่ 369(2.1)

$$P_o = S(I - I_{th}) \quad (2.1)$$

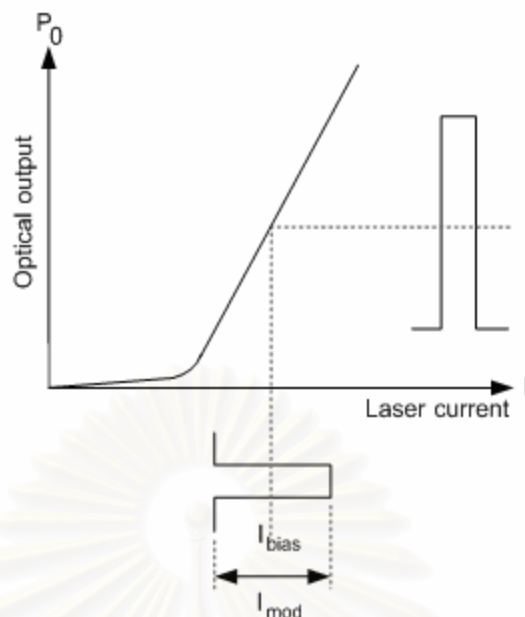
โดยที่ S คือค่าประสิทธิภาพอัตราการแปลงกระแส (Slope Efficiency, W/A)

I คือค่ากระแสขับ (mA)

จากสมการที่ 370(2.1) จะเห็นได้ว่าระดับกำลังทางแสงขาออกขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสขับและประสิทธิภาพอัตราการแปลงกระแสของเลเซอร์ ซึ่งค่าประสิทธิภาพอัตราการแปลงกระแสนี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างกระแสขับกับกำลังทางแสงขาออก โดยที่ค่าประสิทธิภาพนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามโครงสร้าง กระบวนการประกอบ วัสดุที่ใช้ และอุณหภูมิที่ใช้งานของเลเซอร์

2.1.1.3 ตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver)

ตัวขับเลเซอร์เป็นวงจรแหล่งกำเนิดกระแสซึ่งใช้ป้อนไบแอสเดินหน้า (Forward bias) ให้กับตัวเลเซอร์ เมื่อสัญญาณข้อมูลออกจากตัวมัลติเพล็กซ์จะมีกระแสน้อยมาก ตัวขับจะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณที่มีลำดับของข้อมูลสัญญาณบิต '1' และ '0' เหมือนเดิมแต่มีระดับกระแสเพียงพอที่จะไปขับตัวเลเซอร์ให้ได้ระดับกำลังทางแสงขาออกสูงตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของตัวขับเลเซอร์

สรุปได้ว่าหน้าที่หลักของตัวขับเลเซอร์คือเตรียมระดับของกระแสขับให้เหมาะสมสำหรับไบแอสและมอดูเลตตัวเลเซอร์ ดังเช่นในการมอดูเลตทางความเข้ม ข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังทางแสง โดยสัญญาณบิต '1' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังทางแสงค่าหนึ่งและสัญญาณบิต '0' ก็จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังทางแสงอีกค่าหนึ่งซึ่งน้อยกว่า ในการปรับระดับกำลังทางแสงจะต้องใช้กระแส 2 ชนิดคือกระแสไบแอส (I_{bias}) และกระแสมอดูเลต (I_{mod}) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กระแสไบแอสคือกระแสคงที่ที่ใช้ตั้งช่วงการทำงานของตัวเลเซอร์ให้อยู่เหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยน และใช้กระบวนการผลิตแสงแบบการปลดปล่อยพลังงานโดยเกิดจากการกระตุ้นในช่วงเชิงเส้นตรง นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดระดับกำลังทางแสงขาออกของเลเซอร์ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาระยะทางไกลสุดในการส่งสัญญาณโดยการคำนวณ Power Budget สำหรับกระแสมอดูเลตคือกระแสสลับที่ใช้ในการเปลี่ยนระดับกำลังทางแสงของสัญญาณบิต '1' และบิต '0' ไปในจังหวะเดียวกับรูปคลื่นแรงดันขาเข้าของสัญญาณข้อมูล ถ้าความต่างของระดับกระแสของสัญญาณบิต '1' และบิต '0' ในการมอดูเลตโดยตรงมีค่ามาก วงจรตัวขับสัญญาณก็ต้องใช้กำลังงานมากในการขับกระแสที่ต่างระดับมากเช่นนี้ แต่จะได้รับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน (Extinction Ratio) ที่สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นข้อดีเนื่องจากจะส่งผลให้ระบบการรับ-ส่งข้อมูลนั้น ๆ มีอัตราความผิดพลาดบิตต่ำลง

ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันสามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

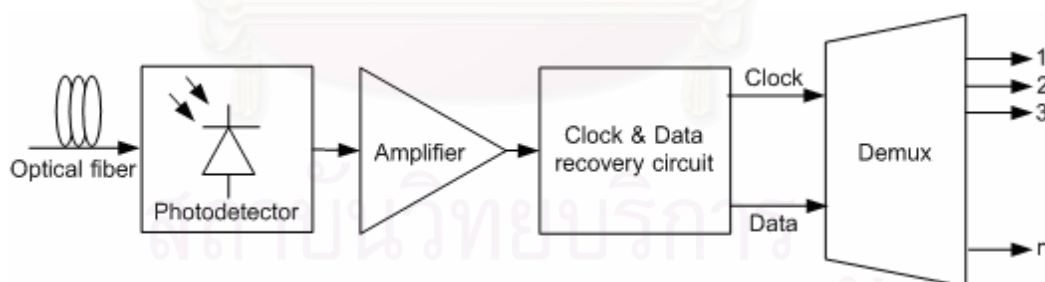
$$Extinction Ratio (dB) = 10 \log \left(\frac{\text{bit '1' power}}{\text{bit '0' power}} \right) \quad (2.2)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าการที่จะได้รับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันที่มาก ๆ สามารถทำได้โดยกำหนดให้ค่ากำลังทางแสงของบิต '0' มีค่าน้อย ๆ หรือกำหนดให้ความต่างของกำลังทางแสงของบิต '1' กับบิต '0' มีค่ามาก ๆ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้สามารถทำได้โดยการปรับกระแสไบแอสให้มีค่าน้อยลง หรือปรับกระแสมอดูเลตให้มีค่าสูงขึ้น ตามลำดับ การที่ได้รับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันที่มาก ๆ จะทำให้ได้รับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ที่ดี และได้รับอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีหรือมีค่าน้อย ๆ ด้วยเช่นกัน

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้ตัวขับคือ (1) วงจรต้องมีความเร็วเพียงพอที่จะสวิตช์ระดับกระแสเพื่อให้ได้กำลังทางแสงขาออกที่ถูกมอดูเลตมีการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-Symbol Interference) น้อยที่สุด ทำให้ได้รับอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีคือมีค่าน้อย ๆ (2) สามารถปรับกระแสได้มากพอที่จะไปขับตัวเลเซอร์ให้ผลิตกำลังทางแสงของค่าสัญญาณบิต '1' ออกได้มากตามที่ต้องการ (3) ช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าต้องไม่สูงเกินกว่าที่ตัวเลเซอร์จะทนรับได้ [12]

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่าการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมสัญญาณที่ถูกส่งไปจะมีด้วยกัน 2 ตัวด้วยกันคือ กระแสไบแอสและกระแสมอดูเลต

2.1.2 ตัวรับสัญญาณทางแสง



รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกของตัวรับสัญญาณทางแสง

แผนภาพบล็อกของตัวรับสัญญาณทางแสงแบบตรวจจับโดยตรงแสดงดังรูปที่ 2.5 ตัวรับสัญญาณทางแสงนี้ประกอบด้วยโฟโตไดโอด ตัวขยายสัญญาณ วงจรกู้คืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา และตัวดีมัลติเพล็กซ์ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.1.2.1 -2.1.2.4

การตรวจจับโดยตรงเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการตรวจจับกำลังทางแสง ทำโดยใช้ตัวโฟโตไดโอดเพียงตัวเดียวในการแปลงสัญญาณทางแสงกลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วสุ่ม

อ่านค่าระดับสัญญาณทุก ๆ คาบของบิต ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงเพื่อตัดสินใจว่าเป็นข้อมูลบิต '1' หรือ '0' ที่ถูกส่งมา

2.1.2.1 โฟโตไดโอด (Photodiode)

โฟโตไดโอดใช้สำหรับตรวจจับกำลังทางแสง โดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โฟโตไดโอดจะผลิตกระแสแสง (Photocurrent, I_p) ออกมา ซึ่งจะแปรผันตรงตามขนาดของกำลังทางแสง (P_o) ที่ตรวจจับได้ดังสมการที่ 375(2.3)

$$I_p = R P_o \quad (2.3)$$

โดยที่ R คือค่าการตอบสนอง (Responsivity, A/W)

โฟโตไดโอดชนิดสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงส่วนใหญ่ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ PIN และ APD

(1) PIN

PIN เป็นอุปกรณ์รับแสงที่มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ p-i-n จะทำงานเมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ (Reversed Bias Voltage) ที่ตัว PIN เมื่อแสงมาตกกระทบ PIN จะทำการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนไปเป็นกระแสแสงให้วิ่งผ่านตัวต้านทานโหลด (Load Resistor) ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมซึ่งจะให้ค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระดับของพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบ เนื่องจาก PIN มีราคาถูกและประกอบขึ้นง่ายจึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

(2) APD (Avalanche Photodiode)

APD เป็นอุปกรณ์รับแสงที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยใช้ปรากฏการณ์การถล่ม (Avalanche) [15] ทำให้เกิดการคูณเพิ่มของกระแสแสงจนกระทั่งได้กระแสตรวจจับที่ตกคร่อมตัวต้านทานโหลดมากขึ้นเป็นสิบหรือร้อยเท่าจากตัว PIN จากปรากฏการณ์การถล่มนี้เองจึงทำให้ APD มีค่าความไว (sensitivity) ที่ต่ำกว่า PIN มากซึ่งส่งผลดีกับการออกแบบระบบทำให้ได้ระยะทางส่งไกลมากขึ้น

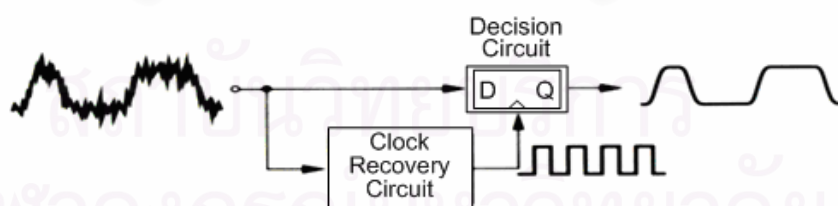
2.1.2.2 ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier)

เมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงก่อนมาถึงตัวโฟโตไดโอดด้วยระยะทางที่ไกล กำลังทางแสงจะถูกลดทอนลงทุกขณะจากการสูญเสียกำลังภายในเส้นใยนำแสงและที่จุดเชื่อมต่อ กำลังทางแสงที่เหลือน้อยอยู่ที่นี่จะถูกตัวโฟโตไดโอดแปลงออกมาเป็นกระแสแสงที่อ่อนค่ามาก จึงจำเป็นต้องขยายสัญญาณให้มีระดับสูงขึ้นด้วยตัวขยายสัญญาณ ก่อนที่จะส่งไปยังวงจรถูกคืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา ซึ่งใช้การตัดสินใจระดับสัญญาณในโดเมนแรงดัน ด้วยเหตุนี้เอง กระแสแสงที่อ่อนนั้นจึงต้องถูกขยายและเปลี่ยนจากโดเมนกระแสมาเป็นโดเมนแรงดัน โดยใช้ตัว Trans-Impedance Amplifier และอาจจะถูกขยายอีกทีด้วยตัว Limiting Amplifier ในกรณีของสัญญาณดิจิทัล เพื่อให้ได้ระดับแรงดันสูงขึ้นไปอีกแต่ก็จะเพิ่มปัญหาเรื่องการเดิน (Jitter) ของสัญญาณขาออกมากขึ้นด้วย ลักษณะของตัวขยายสัญญาณทั้ง 2 แบบมีดังนี้

Trans-Impedance Amplifier ทำหน้าที่แปลงกระแสขาเข้า (I_{in}) ไปเป็นแรงดันขาออก (V_{out}) ซึ่งอัตราส่วนในการแปลงจะขึ้นอยู่กับค่า Trans-Impedance Gain (R_T) โดยที่ $R_T = \delta V_{out} / \delta I_{in}$

Limiting Amplifier ประกอบไปด้วยตัว Operational Amplifier ที่ถูกนำมาวางเรียงต่อกัน เพื่อขยายขนาดของแรงดันให้มากขึ้น และลดค่าเวลาขึ้นและลง (Rise and Fall Times) ให้น้อยลง

2.1.2.3 วงจรถูกคืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา (Clock & Data Recovery Circuit)



รูปที่ 2.6 วงจรถูกคืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา

หลังจากได้รับสัญญาณข้อมูลและทำการขยายขนาดของสัญญาณเรียบร้อยแล้ว กระบวนการต่อไปคือการกู้คืนสัญญาณนาฬิกา สัญญาณนาฬิกานี้จะถูกแยกออกมาจากสัญญาณข้อมูลที่ได้รับนั่นเอง จากนั้นข้อมูลจะต้องถูกปรับตำแหน่งของคาบบิตหรือที่เรียกว่า Retimed ขึ้นตอนการแยกออกของสัญญาณนาฬิกาและการ Retime ข้อมูลนี้ถูกเรียกรวมกันว่า

การกู้คืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา วงจรที่ใช้ในการกู้คืนข้อมูลและสัญญาณนาฬิกาที่แสดงดังรูปที่ 2.6 วงจรกู้คืนสัญญาณนาฬิกาจะรับสัญญาณข้อมูลเข้ามาและสร้างสัญญาณนาฬิกาออกไปภายในวงจรกู้คืนสัญญาณนาฬิกาประกอบไปด้วยตัวตรวจจับความถี่และเฟส ตัวกรอง (Filter) และ VCO (Voltage-Controlled Oscillator) จากนั้นสัญญาณนาฬิกาที่ได้นี้จะถูกนำไป Retimed กับสัญญาณข้อมูลก่อนนำไปป้อนให้เป็นสัญญาณนาฬิกาให้กับตัว D flip-flop ซึ่งตัว D flip-flop นี้เองจะถูกเรียกว่าวงจรตัดสินใจ (Decision Circuit)

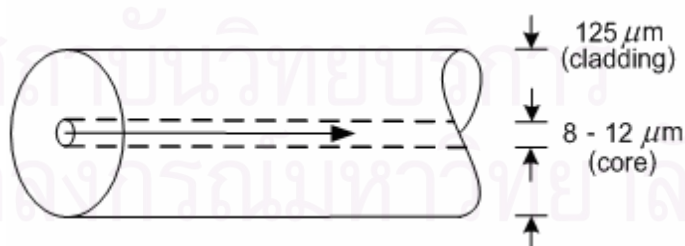
2.1.2.4 ตัวดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexer or demux)

หลังจากที่สัญญาณข้อมูลแบบอนุกรมถูกขยายสัญญาณและกู้คืนมาเรียบร้อยแล้ว สัญญาณข้อมูลอัตราความเร็วสูงนี้ก็จะถูกแยกออกให้เป็นข้อมูลแบบขนานที่มีหลายช่องสัญญาณดั้งเดิมโดยตัวดีมัลติเพล็กซ์ ข้อมูลที่ได้นี้ก็จะมีอัตราความเร็วต่ำลงเท่ากับข้อมูลก่อนถูกส่งผ่านตัวดีมัลติเพล็กซ์ที่ภาคตัวส่งสัญญาณทางแสงนั่นเอง

2.1.3 เส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทตามจำนวนโหมดการแพร่ (Propagation mode) คือเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวและชนิดหลายโหมด

2.1.3.1 เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode Fiber, SMF)

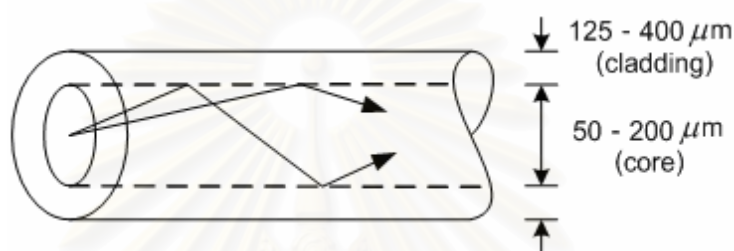


รูปที่ 2.7 เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว

เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน (Core) และวัสดุหุ้ม (Cladding) ประมาณ 8-12 และ 125 ไมครอน ตามลำดับ ลักษณะของเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวเป็นดังรูปที่ 2.7 ส่วนของแกนมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดมาก

ทำให้การนำแสงภายในเส้นใยมีได้เพียงโหมดเดียว การที่นำแสงได้เพียงโหมดเดียวทำให้ได้รับผลกระทบจากการกระจายออกของสัญญาณตามแถบสีหรือโครมาติก (Chromatic Dispersion) เพียงอย่างเดียว จึงมีแบนด์วิดท์สำหรับใช้ส่งข้อมูลได้กว้างกว่า แต่เนื่องจากขนาดของแกนที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นเล็กมากทำให้ยากในการเชื่อมต่อและนำแสงเข้าสู่แกนของเส้นใย จึงต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ลำแสงออกมาขนาดเล็กอย่างเช่นตัวเลเซอร์

2.1.3.2 เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด (Multi-Mode Fiber, MMF)



รูปที่ 2.8 เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด

เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและวัสดุหุ้มโดยประมาณ 50-200 และ 125-400 ไมครอน ตามลำดับ ลักษณะเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดเป็นดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนของเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดนั้นมีขนาดใหญ่ทำให้ง่ายในการเชื่อมต่อและนำแสงเข้าสู่เส้นใย จึงสามารถใช้ LED ซึ่งมีราคาถูกกว่าเลเซอร์ได้ ส่วนการนำแสงภายในเส้นใยมีจำนวนโหมดในการแพร่สัญญาณอยู่มากมายและร่วมเดินทางไปพร้อม ๆ กัน ทำให้นอกจากจะเกิดการกระจายโครมาติกแล้ว ยังเกิดการกระจายของพัลส์อันเนื่องจากการกระจายระหว่างโหมด (Intermodal Dispersion) ด้วยคือแต่ละโหมดจะเดินทางด้วยความเร็วแตกต่างกันและเลือกใช้เส้นทางเดินที่มีระยะทางไม่เท่ากัน จึงมาถึงปลายทางเส้นใยนำแสงไม่พร้อมกัน ซึ่งการกระจายระหว่างโหมดนี้จะมีผลรุนแรงมากกว่าการกระจายโครมาติกหลายเท่าตัว

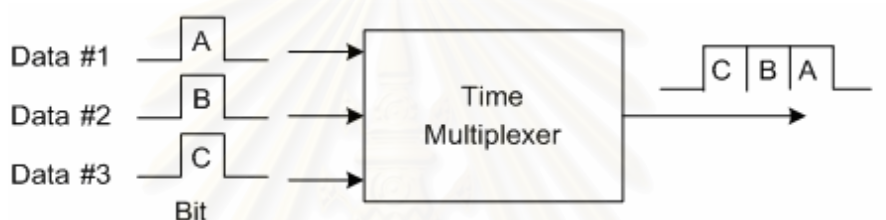
2.2 เทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูล

เทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาไว้หลากหลายวิธี ขึ้นกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่หาได้ในแต่ละยุค ในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ การมัลติเพล็กซ์ และการมอดูเลต

2.2.1 การมัลติเพล็กซ์

การมัลติเพล็กซ์นับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งในการสื่อสาร เนื่องจากการมัลติเพล็กซ์เป็นวิธีที่ทำให้สามารถส่งและรับข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ได้จำนวนมาก โดยอยู่ในช่วงเวลาและตัวกลางเดียวกันจึงช่วยให้ประหยัดช่องสัญญาณในการรับส่งข่าวสาร วิธีการมัลติเพล็กซ์ที่ใช้กันอยู่ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี วิธีที่นิยมนำมาใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลา แบบแบ่งตามความยาวคลื่น และแบบแบ่งตามรหัสทางแสง

2.2.1.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลา (Time Division Multiplexing, TDM)

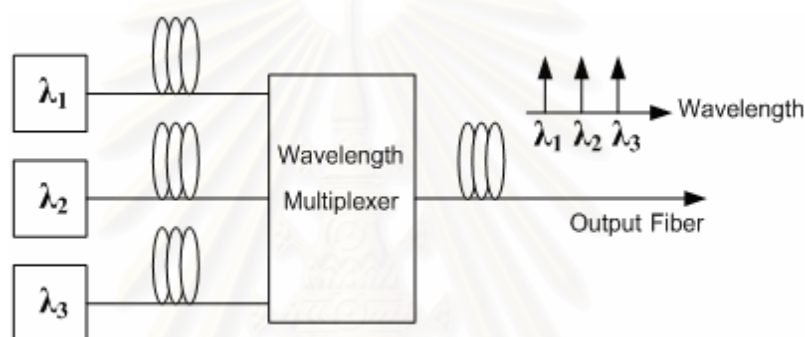


รูปที่ 2.9 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลา

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลาเป็นเทคนิคพื้นฐานที่นิยมใช้กันมานานแล้ว เป็นการเพิ่มความจุในการส่งโดยการเพิ่มอัตราการส่งบิตต่อหนึ่งช่องสัญญาณให้สูงขึ้น ลักษณะการมัลติเพล็กซ์เป็นดังรูปที่ 2.9 เทคนิคในการรวมสัญญาณทำได้โดยการแบ่งเวลาเป็นช่วง ๆ ซึ่งแต่ละช่วงจะใช้สำหรับการบรรจุข้อมูลที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต่าง ๆ นำมาเรียงกันไป เมื่อสัญญาณเข้ามาจะถูกส่งไปเก็บไว้ในวงจรรบัฟเฟอร์ (Buffer) สำหรับพักข้อมูล และรอเวลาในระบบมัลติเพล็กซ์ การมัลติเพล็กซ์แบบนี้ช่วยให้สามารถส่งข้อมูลได้พร้อมกันหลายช่องสัญญาณด้วยระบบที่มีอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลรวมสูงขึ้น นั่นก็คือเมื่อมีข้อมูลที่อิสระจากกัน N ช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราความเร็ว R b/s จะถูกรวมกันทางสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่ข้อมูลเส้นทางเดียวซึ่งทำงานที่อัตราความเร็วสูงขึ้นเป็น $N \times R$ b/s

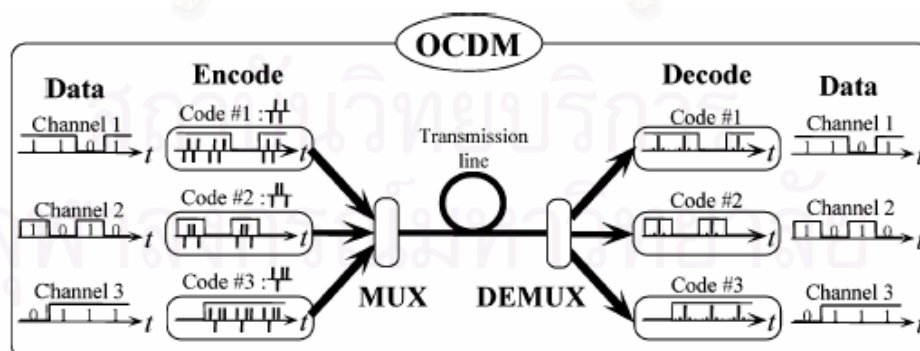
2.2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความยาวคลื่น เป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันมาเป็นพาหะข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกไปในตัวกลางเดียวกันเพื่อประหยัดตัวกลางในการส่งข่าวสาร ในการรวมกันนี้สามารถใช้อุปกรณ์ได้หลายชนิดในการรวมแสง เช่น Mach-Zehnder Interferometer Multiplexer หรือ Star Couplers วิธีการมัลติเพล็กซ์นี้เป็นวิธีที่มีความสะดวกและมีประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นอย่างมาก ลักษณะการมัลติเพล็กซ์แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความยาวคลื่น

2.2.1.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามรหัสทางแสง (Optical Code Division Multiplexing, OCDM)



รูปที่ 2.11 ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามรหัสทางแสง [5]

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามรหัสทางแสง เป็นเทคนิคหนึ่งในการมัลติเพล็กซ์ข้อมูลไปยังเส้นใยสื่อสัญญาณเดียว ช่องสัญญาณแต่ละช่องในระบบมัลติเพล็กซ์ถูกเข้ารหัสด้วย

แสงที่เป็นลักษณะเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 2.11 ผู้ใช้ที่ใช้รหัสถูกต้องเท่านั้นจึงจะสามารถกู้ข่าวสารที่ถูกเข้ารหัสได้ ในการเข้ารหัสและถอดรหัสสามารถทำได้ 2 ทางด้วยกันคือในโดเมนความถี่และในโดเมนเวลา การเข้ารหัสในโดเมนความถี่เปรียบเทคนิการกระจายทางสเปกตรัม ส่วนการเข้ารหัสในโดเมนเวลาพัลส์ของแสงจะถูกกระจายให้มีความถี่สูงขึ้นเช่นในหนึ่งคาบมีพัลส์ 3 ลูก เมื่อถูกกระจายแล้วก็จะถูกเข้ารหัสตามโดเมนนั้น ๆ รายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมใน [5] และ [6]

2.2.2 รูปแบบการมอดูเลต

การมอดูเลตคือการรกล้ำสัญญาณสองสัญญาณเข้าด้วยกัน ในที่นี้หมายถึงสัญญาณข้อมูลกับคลื่นแสง รายละเอียดเกี่ยวกับการมอดูเลตก็จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือวิธีที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้ากับตัวกำเนิดแสงมี 2 วิธีด้วยกันคือการมอดูเลตโดยตรงกับการมอดูเลตภายนอกดังที่กล่าวรายละเอียดไปแล้วในหัวข้อที่ 2.1.1 ส่วนที่สองคือรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณว่ารวมเข้ากับแสงในลักษณะใด

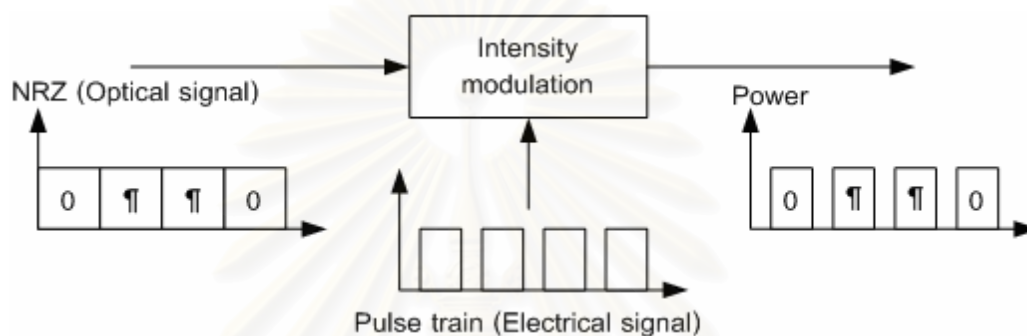
รูปแบบการมอดูเลตข้อมูล (Data Modulation) ที่นิยมใช้ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงมีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ การมอดูเลตทางความเข้ม และการมอดูเลตทางเฟส

2.2.2.1 การมอดูเลตทางความเข้ม (Intensity Modulation)

ในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลทางความเข้ม ข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังทางแสง (Amplitude) โดยสัญญาณบิต '1' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานค่าหนึ่ง และสัญญาณบิต '0' ก็จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานอีกค่าหนึ่ง การมอดูเลตทางความเข้มเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการมอดูเลต เนื่องจากตัวเลเซอร์สามารถแปลงจากสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าไปเป็นกำลังทางแสงได้โดยตรง ดังนั้นในการมอดูเลตทางความเข้มแบบโดยตรงส่วนประกอบสำคัญมีเพียงเลเซอร์ตัวเดียว นอกจากนี้วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการมอดูเลตแล้วก็ยังเป็นวิธีที่สามารถตรวจจับได้ง่ายที่สุดสามารถทำได้โดยการใช้อัตราตรวจจับแสงตัวเดียวในการแปลงสัญญาณแสงมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า

นอกจากการมอดูเลตทางความเข้มจะใช้รวมข้อมูลเข้าไปในคลื่นแสงแล้ว ก็ยังสามารถใช้รวมข่าวสารทางเวลาเข้าไปด้วย ซึ่งเรียกรวมแบบนี้ว่าการมอดูเลตเป็นคาบ (Periodic Modulation) ที่รู้จักกันดีคือ "Return to Zero, RZ" สถานะของสัญญาณข้อมูลจะถูก

แสดงในทุก ๆ ครั้งลูกคลื่นแรกของสัญญาณนาฬิกาเท่านั้นและจะกลับคืนสู่สถานะศูนย์ในช่วงครึ่งลูกคลื่นที่เหลือ นั่นก็คือความกว้างของพัลส์จะน้อยกว่าช่วงเวลาหนึ่งคาบหรืออาจจะมีค่ารอบทำงาน (Duty Cycle) เปลี่ยนไป การที่ความกว้างของบิตน้อยลงทำให้วิธีนี้ต้องการแบนด์วิดท์มากกว่าเดิมหรือก็คือมากกว่าใน Non Return to Zero, NRZ การทำสัญญาณให้เป็น RZ สามารถทำได้ 2 แบบ คือ (1) แปลงในช่วงที่สัญญาณข้อมูลเป็นสัญญาณไฟฟ้าอยู่ (2) แปลงหลังจากทำการมอดูเลตข้อมูลทางแสงแล้ว การทำแบบหลังนี้สามารถทำได้โดยการต่อตัวมอดูเลตทางความเข้มเพิ่มเข้าไปในระบบดังแสดงในรูปที่ 2.12

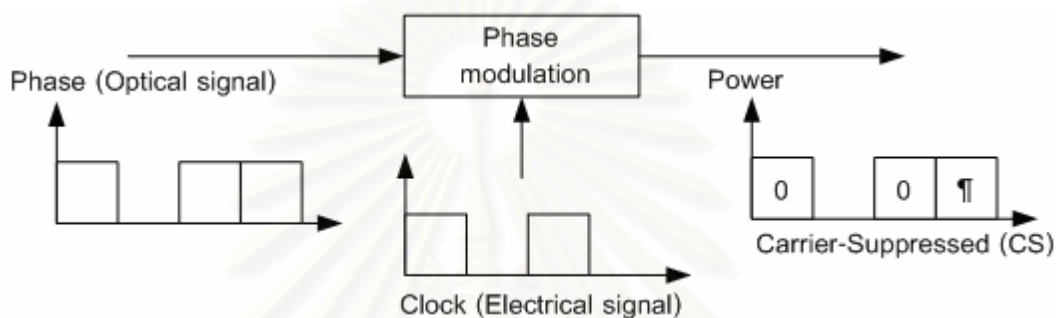


รูปที่ 2.12 การมอดูเลตทางความเข้มเพื่อบอกคาบ

2.2.2.2 การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation)

ในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลทางเฟส ข้อมูลจะถูกแทนที่ในรูปของเฟส เช่นในระบบ 2 เฟส PSK (Phase Shift Keying) สัญญาณบิต '1' จะถูกเปลี่ยนเฟสเป็น 0 องศา และสัญญาณบิต '0' ก็จะถูกเปลี่ยนเฟสเป็น 180 องศา เป็นต้น ในการมอดูเลตทางเฟสนั้นสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายวิธี เช่น PSK, DPSK (Differential PSK), QPSK, DQPSK เป็นต้น สำหรับการมอดูเลตทางเฟสแบบโดยตรงก็สามารถทำได้ง่ายเช่นเดียวกับการมอดูเลตทางความเข้ม คือใช้ตัวเลเซอร์เพียงตัวเดียว แต่ในการตรวจจับสัญญาณทำได้ยาก เนื่องจากตัวรับแสงไม่สามารถตอบสนองต่อเฟสได้ ตัวตรวจจับจะต้องทำหน้าที่ในการเปลี่ยนเฟสไปเป็นความเข้มก่อน วิธีในการตรวจจับมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีคือ (1) local oscillator laser (coherent detection) (2) frequency discriminator (optical filter) และ (3) signal self-reference (differential detection) [16] วิธีที่ 1 ทำโดยการใช้เลเซอร์อีกตัวหนึ่งมาอิงรวมกับสัญญาณที่ปลายทางให้เกิดการหักล้างหรือรวมกันก่อนที่จะเข้าตัวตรวจจับแสง วิธีที่ 2 เป็นการอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับเฟสมาช่วยเป็นตัวกรอง ส่วนวิธีที่ 3 ทำโดยการแยกสัญญาณเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งให้ผ่านการหน่วงเวลา 1 บิตแล้วนำมารวมกับอีกส่วนหนึ่ง วิธีนี้จะใช้ใน DPSK เท่านั้น

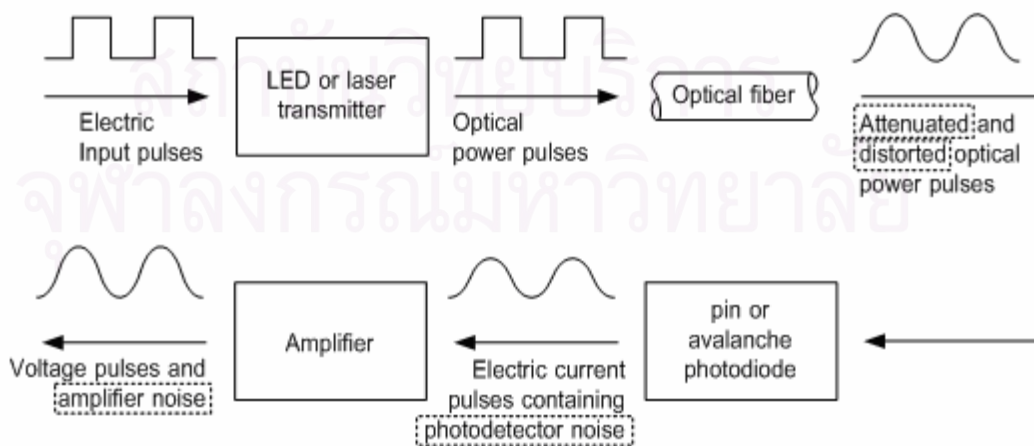
นอกจากการมอดูเลตทางเฟสจะใช้รวมข้อมูลเข้าไปในคลื่นแสงแล้ว ก็ยังสามารถใช้ในการมอดูเลตเป็นคอบเช่นเดียวกับการมอดูเลตทางความเข้ม ทำโดยการต่อดั้วมอดูเลตทางเฟสเพิ่มเข้าไปหลังจากมอดูเลตข้อมูลเรียบร้อยแล้วดังแสดงในรูปที่ 2.13 การมอดูเลตนี้จะทำให้สัญญาณมีการสับเปลี่ยนเฟสขนาด 180 องศาระหว่างบิตที่ติดกัน ค่าเฉลี่ยใน optical field ของสัญญาณมีค่าเป็นศูนย์ หรือไม่มีองค์ประกอบดีซี (กระแสตรง) ซึ่งในโดเมนความถี่สามารถแปลงไปสู่การ Carrier-Suppression ในสเปกตรัมทางแสงได้ จากที่กล่าวมาวิธีนี้นอกจากเป็นการให้ข่าวสารทางเวลาแล้วยังสามารถลดค่าเฉลี่ยใน optical field ได้ด้วย



รูปที่ 2.13 การมอดูเลตทางเฟสเพื่อคอบ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกการมอดูเลตทางความเข้มเนื่องจากสามารถทำได้สะดวกและง่ายกว่าทั้งในการส่งและรับสัญญาณ

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนไปของสัญญาณ



รูปที่ 2.14 เส้นทางของสัญญาณที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงข้อมูลทางแสง

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของสัญญาณข้อมูลที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้รับที่ปลายทางจะมีการผิดเพี้ยนไปไม่เหมือนกับสัญญาณที่ต้นทาง เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการลดทอน การบิดเบี้ยว และการมีคลื่นรบกวนต่าง ๆ มาเพิ่มรวมอยู่บนสัญญาณข้อมูล [15] เริ่มต้นจากสัญญาณทางแสงที่ได้ออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกลดทอนและบิดเบี้ยวเมื่อมันเดินทางผ่านเส้นใยนำแสง และเมื่อเดินทางไปถึง PIN หรือ APD สัญญาณทางแสงก็จะถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยจะมีคลื่นรบกวนของตัวตรวจจับสัญญาณทางแสงเพิ่มมาด้วย และเมื่อสัญญาณข้อมูลผ่านตัวขยายก็จะได้รับคลื่นรบกวนของตัวขยายเพิ่มเติมขึ้นอีก การที่สัญญาณลดทอนและบิดเบี้ยวไปเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่นการลดทอนอันเนื่องมาจากเส้นใยนำแสง การกระจายออกของสัญญาณเนื่องจากการกระจายโครมาติกหรือการกระจายระหว่างโหมด [15] รวมทั้งปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) [17] สำหรับการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ความเร็วไม่เกิน 2.5 Gb/s ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว ปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาคือ การลดทอนกำลัง การกระจายโครมาติก และสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสง

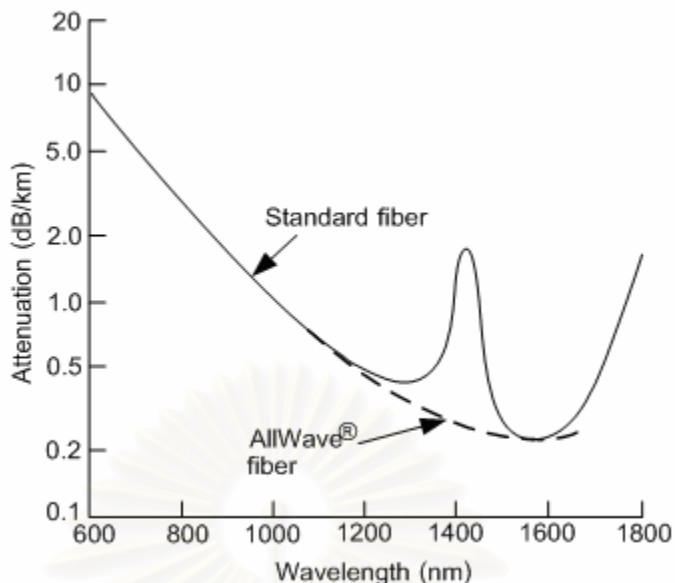
2.3.1 การลดทอน (Attenuation)

การลดทอนกำลังของสัญญาณแสงเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง เพราะมันเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดระยะทางไกลสุดระหว่างตัวส่งสัญญาณทางแสงกับตัวรับสัญญาณทางแสง หรือระหว่างตัวส่งสัญญาณทางแสงกับตัวขยายกำลังทางแสงแบบในสาย (In-line Optical Amplifier) กลไกการลดทอนพื้นฐานในเส้นใยนำแสงมีที่มาจาก 3 ปรากฏการณ์ คือ การดูดซึม (Absorption) การกระเจิง (Scattering) และการสูญเสียจากการปล่อยรังสี (Radiative loss) [15]

เมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสง กำลังงานจะถูกลดทอนลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางโดยแปรผันแบบเลขชี้กำลัง (Exponentially decrease with distance) สมมติให้ $P(0)$ เป็นกำลังทางแสงในเส้นใยนำแสงที่จุดเริ่มต้นที่ระยะทาง $Z = 0$ จะได้กำลังงานหลังจากที่แสงเดินทางไปเป็นระยะทาง Z คือ $P(Z)$ เป็นดังสมการที่ (2.4)

$$P(Z) = P(0)10^{-(\alpha Z/10)} \quad (2.4)$$

โดยที่ α คือค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสงในหน่วย dB/km ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง ค่าการลดทอนทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสง [15]

วิธีการแก้ปัญหาที่เกิดจากการลดทอนของสัญญาณแสงสามารถทำได้โดยการใช้ตัวขยายกำลังทางแสง (Optical Amplifier) เพื่อเพิ่มปริมาณโฟตอน แต่สำหรับในกรณีที่ส่งสัญญาณด้วยระยะทางไม่เกิน 15 กิโลเมตร อย่างที่ตั้งเป้าไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการทดสอบที่ความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมีค่า α_{1550} ประมาณ 0.25 dB/km เมื่อสมมติให้มีแสงส่งที่จุดเริ่มต้นคือ 1 mW จะได้กำลังทางแสงที่ตัวโฟโตไดโอดเท่ากับ

$$P(15 \text{ km}) = (1 \text{ mW}) 10^{-(0.25 \times 15 / 10)} = 0.422 \text{ mW}$$

จากผลการคำนวณจะได้กำลังทางแสงจะสูญเสียไป 57.8% หรือ 3.75 dB ซึ่งถือว่าอย่างน้อยอยู่เกินความจำเป็นที่ต้องใช้ตัวขยายกำลังทางแสง

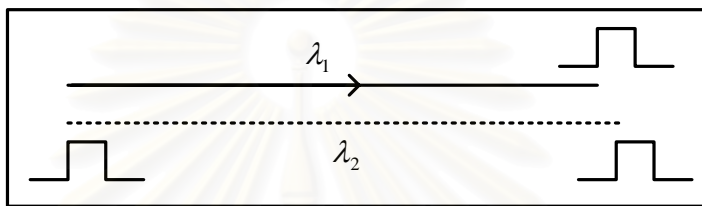
2.3.2 การกระจายโครมาติก (Chromatic Dispersion)

ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว การกระจายออกของสัญญาณจะเกิดจากการกระจายโครมาติก การกระจายโครมาติกคือการขยายกว้างออกของพัลส์แสงตามความยาวคลื่น ในขณะที่พัลส์แสงเดินทางไปตามเส้นใยนำแสง การขยายกว้างออกนี้มีต้นเหตุมาจากความกว้างของสเปกตรัมที่แหล่งกำเนิดแสงปล่อยออกมาในหลายค่าความยาวคลื่น ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าความเร็วกลุ่ม (Group Velocity) ไม่เท่ากันจึงไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทำให้พัลส์แสงขยายออก ปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งคือการกระจายตามความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion, GVD) เนื่องจากการกระจายเป็นผลของความเร็ว

กลุ่มซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น นั่นก็คือการกระจายโครมาติกขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ส่ง ดังนั้นถ้าความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงเพิ่มขึ้นการบิดเบี้ยวของสัญญาณเนื่องจากการกระจายนี้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

สาเหตุหลักของการกระจายโครมาติกมาจาก 2 แหล่งคือวัสดุที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสง และรูปแบบท่อนำคลื่น

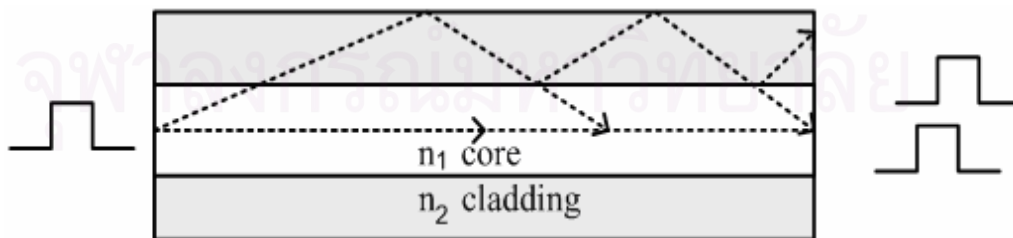
2.3.2.1 การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion)



รูปที่ 2.16 การกระจายเชิงวัสดุ

การกระจายเชิงวัสดุเกิดขึ้นจากการที่ค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ของวัสดุแกนกลางมีค่าต่างกันตามฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงที่เดินทางผ่าน จึงทำให้ความเร็วของแสงในเส้นใยนำแสงแตกต่างกันตามความยาวคลื่น ขณะเดียวกันแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีความกว้างของสเปกตรัมหรือก็คือจะมีช่วงความยาวคลื่นไม่เพียงแค่ว่าความยาวคลื่นเดียว ทำให้เกิดการกระจายของพัลส์เมื่อความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเดินทางบนเส้นทางระยะเท่ากัน แต่กลับมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ลักษณะการกระจายเชิงวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.16

2.3.2.2 การกระจายท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion)



รูปที่ 2.17 การกระจายท่อนำคลื่น

การกระจายท่อนำคลื่นเกิดขึ้นเพราะกำลังทางแสงถูกแบ่งปันระหว่างในแกนและในวัสดุหุ้มโดยประมาณ 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์ การกระจายเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ของแสง 20

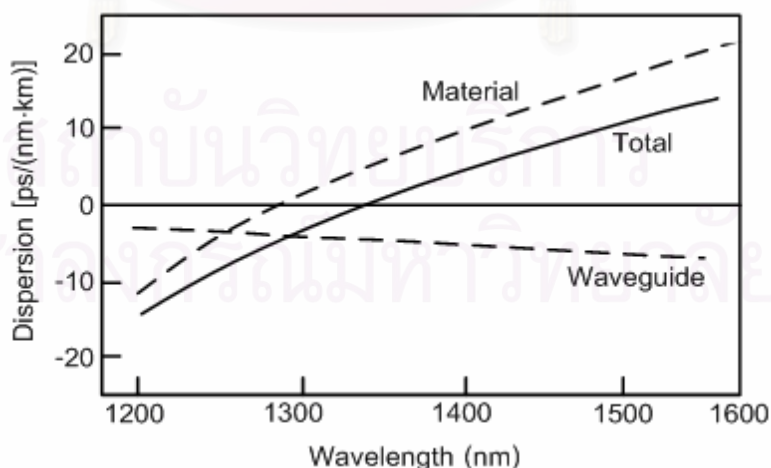
เปอร์เซ็นต์ในวัสดุหุ้ม ซึ่งเดินทางได้เร็วกว่าแสงในแกนกลางอันเนื่องจากค่าดัชนีหักเหที่น้อยกว่า ปริมาณของการแพร่กระจายที่นำคลื่นสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้มากขึ้นหรือน้อยลงได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบเส้นใยนำแสงว่าจะให้มีชั้นของวัสดุหุ้มกี่ชั้นและมีค่าดัชนีหักเหได้บ้าง ลักษณะการกระจายที่นำคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.17

ค่าการกระจายโครมาติก (D) ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุและที่นำคลื่นที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (2.5) ซึ่งมีหน่วยเป็น ps/(nm·km)

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{V_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \tag{2.5}$$

- โดยที่ L ความยาวทั้งหมดของเส้นใยนำแสงที่แสงเดินทางผ่าน
- τ_g คือค่าการหน่วงเวลา (Time delay) หรือการหน่วงแบบกลุ่ม (Group delay)
- λ คือค่าความยาวคลื่นแสง
- V_g คือค่าความเร็วกลุ่ม
- c คือค่าความเร็วแสง
- β_2 คือค่าพารามิเตอร์ของ GVD ซึ่งเท่ากับ $\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}$

ตัวอย่างค่าการกระจายที่เกิดในเส้นใยนำแสงโหมดเดียวแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างค่าการกระจายเชิงวัสดุและที่นำคลื่นของเส้นใยนำแสงโหมดเดียว [15]

เมื่อจัดเรียงสมการใหม่จะได้ค่าการกระจายออกของพัลส์เนื่องจากการกระจายโครมาติก (t_{GVD}) ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$t_{GVD} = DL\sigma_\lambda \quad (2.6)$$

โดยที่ σ_λ คือความกว้างสเปกตรัม (Spectral Width) ของแสงที่เดินทาง

การกระจายโครมาติกนี้นำมาซึ่งขีดจำกัดของอัตราความเร็วสูงสุดที่สามารถส่งได้ในระบบ เนื่องจากการกระจายโครมาติกทำให้สัญญาณแสงที่ส่งกระจายออก โดยแปรผันตรงกับระยะทางส่งและความกว้างของสเปกตรัมแสง ส่งผลให้เกิดการเหลื่อมทับกันของบิตข้อมูลที่อยู่ติดกันจนเกิดปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณทางแสงเมื่ออัตราความเร็วเพิ่มมากขึ้น วิธีแก้ไขโดยทั่วไปทำโดยการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยการกระจาย (Dispersion Compensation Fiber) สลับกันกับเส้นใยนำแสงที่ต้องการส่งทุก ๆ ช่วงระยะความยาวค่าหนึ่ง

สำหรับการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวด้วยระยะทางไม่เกิน 15 กิโลเมตร ที่ความยาวคลื่น 1550 nm จะใช้ค่า D ที่อ่านจากเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวแบบมาตรฐาน (Standard SMF) เท่ากับ 18 ps/(nm·km) และถ้าสมมติให้แสงเลเซอร์มีค่า $\sigma_\lambda = 1$ nm จะได้ค่าการกระจายออกของพัลส์เท่ากับ

$$t_{GVD} = 18 \times 15 \times 1 = 270 \text{ ps}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายออกของพัลส์กับความกว้างของคาบบิตที่ส่งด้วยอัตราความเร็ว 2.5 Gb/s ซึ่งมีค่า 400 ps ค่าการกระจายออกนี้มีค่าถึง 67.5 เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณที่ส่งไป ซึ่งในการส่งสัญญาณแบบ NRZ (Non Return-to-Zero) นี้สามารถยอมรับช่วงการกระจายออกได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถส่งได้ไกลเกิน 15 กิโลเมตร

2.3.3 สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector Noises)

สัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวตรวจจับแสงหรือตัวโฟโตไดโอดส่งผลให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) แ่ลง เนื่องจากมีสัญญาณอื่น ๆ เข้าไปแทรกรวมกับสัญญาณข้อมูล ทำให้เพิ่มโอกาสที่บิตจะผิดพลาดมีสูงขึ้น สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสงนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 องค์ คือสัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อต สัญญาณรบกวนกระแสมืด และสัญญาณรบกวนความร้อน [15]

2.3.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อต (Quantum or Shot Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อตเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนโฟตอนไปเป็นอิเล็กตรอน เกิดจากการแกว่งค่าของกระแสแสงที่เกิดขึ้นเอง เนื่องจากสภาพความไม่ต่อเนื่องของโฟตอนที่เดินทางมาถึงตัวตรวจจับแสง กระบวนการเกิดของสัญญาณรบกวนนี้จัดเป็นแบบปัวซอง (Poisson Process) ซึ่งจะแปรตรงกับปริมาณกระแสแสง กระแสสัญญาณรบกวนควอนตัม (i_Q) หาได้จากสมการที่ (2.7)

$$\langle i_Q^2 \rangle = \sigma_Q^2 = 2qI_p BM^2 F(M) \quad (2.7)$$

โดยที่ I_p คือค่าเฉลี่ยของกระแสแสง

B คือค่าแบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสง

M คือค่าคูณเพิ่มของกระแสแสงเมื่อใช้ตัว APD (ในกรณี PIN จะแทนค่าเป็น 1)

$F(M)$ คือตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) ที่เกิดจากลักษณะการสุ่ม (Random Nature) ของกระบวนการถล่ม (ในกรณี PIN จะแทนค่าเป็น 1)

2.3.3.2 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark current noise)

สัญญาณรบกวนกระแสมืดเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มีแสงมาตกกระทบตัวตรวจจับแสงเลย แต่ยังคงมีกระแสแสงผลิตขึ้นมาบ้างอันเนื่องจากไบแอสย้อนกลับที่ป้อนไว้ตลอดเวลา สัญญาณรบกวนนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างของตัวโฟโตไดโอดรวมถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่เลือกใช้ สัญญาณรบกวนกระแสมืด (i_D) หาได้จากสมการที่ (2.8)

$$\langle i_D^2 \rangle = 2qI_D BM^2 F(M) + 2qI_L B \quad (2.8)$$

โดยที่ I_D คือค่ากระแสมืดเชิงปริมาตร (Bulk Dark Current)

I_L คือค่ากระแสรั่วเชิงผิว (Surface Leakage Current)

2.3.3.3 สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal Noise)

สัญญาณรบกวนความร้อนเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากตัวต้านทานโหลด (R_L) เกิดจากการแกว่งของกระแสที่เกิดขึ้นเองอันเนื่องจากการเคลื่อนที่อย่างสุ่มของอิเล็กตรอนผ่านตัวต้านทานโหลดของตัวตรวจจับ สัญญาณรบกวนนี้มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียน

(Gaussian Distribution) ซึ่งจะแปรตรงกับอุณหภูมิ กระแสสัญญาณรบกวนความร้อน (i_T) หาได้จากสมการที่ (2.9)

$$\langle i_T^2 \rangle = \sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} B \quad (2.9)$$

โดยที่ T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ หน่วยเป็นองศาเคลวิน

k_B คือค่าคงที่ของ Boltzmann

2.3.4 สัญญาณรบกวนจากตัวขยายสัญญาณ (Amplifier Noise)

สัญญาณรบกวนจากตัวขยายสัญญาณเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวขยายสัญญาณหลังตัวตรวจจับสนแสงหรือตัวโฟโตไดโอด สัญญาณรบกวนนี้เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนความร้อนของตัวต้านทานภายในตัวขยายสัญญาณ ลักษณะการเกิดของสัญญาณรบกวนความร้อนนี้มีรูปแบบการกระจายแบบเกาส์เซียนโดยมีสเปกตรัมแบนราบ (Flat Spectrum) หรือที่เรียกกันว่าสัญญาณรบกวนขาว (White Noise)

นอกเหนือจากคลื่นรบกวนที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อที่ 2.2.3 และ 2.2.4 แล้วก็ยังมีคลื่นรบกวนอื่น ๆ ที่เกิดในภาคตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วย อาทิเช่น ตัวเลเซอร์ ตัวขับสัญญาณ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ แต่เป็นที่รู้กันว่าคลื่นรบกวนจากภาคตัวส่งสัญญาณทางแสงมีค่าน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับคลื่นรบกวนจากภาคตัวรับสัญญาณทางแสงจึงไม่ขอนำมากล่าวถึงในรายละเอียดในที่นี่

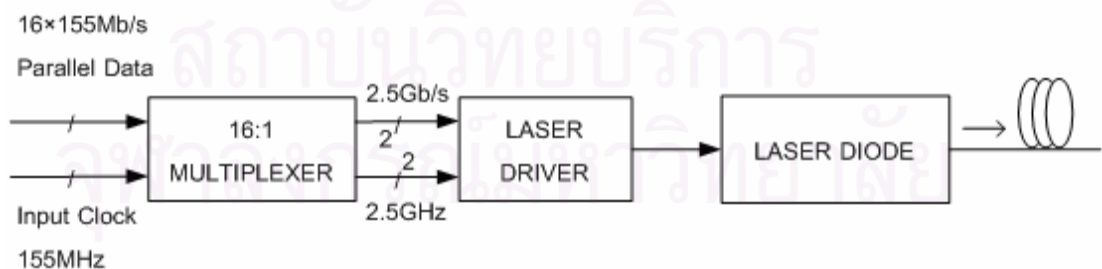
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่อัตราความเร็ว 2.5 Gb/s อันที่จริงคือ OC-48 ตามมาตรฐาน SONET (Synchronous Optical NETwork) และ STM-16 ตามมาตรฐาน SDH (Synchronous Digital Hierarchy) การวิจัยเริ่มต้นจากการคัดเลือกและทดสอบอุปกรณ์ที่ละชิ้นที่จะนำมาประกอบเป็นตัวส่งสัญญาณทางแสง เพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นในหัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้รับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันที่ดีที่สุด โดยค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันจะเป็นตัวบอกว่าแผนภาพตาจะเปิดกว้างแค่ไหน

เมื่อทราบถึงองค์ประกอบและวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วจึงเริ่มทำการออกแบบลายวงจร และ PCB (Print Circuit Board) ของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะประกอบขึ้น พร้อมกับทำการประกอบ ทดลอง วิเคราะห์ผล และทำการปรับปรุงตัวส่งสัญญาณทางแสงให้ได้สมรรถนะตรงตามต้องการ ซึ่งรายละเอียดในส่วนนี้จะถูกกล่าวในบทที่ 4 และสุดท้ายจะเป็นการทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น ทำการเปรียบเทียบผลกับมาตรฐาน ITU-T G.957 [18] ซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวในบทที่ 5

3.1 อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสง

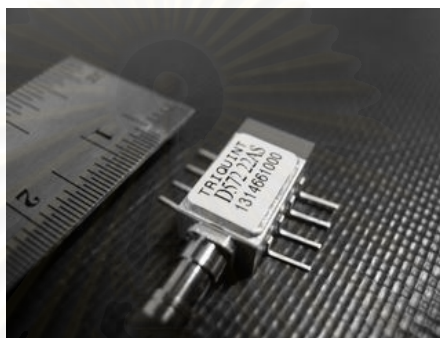


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง

ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะประกอบขึ้นนี้ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกัน คือ ตัวเลเซอร์ ตัวขับเลเซอร์ และตัวมัลติเพล็กซ์ ดังแสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.1 การเลือกใช้อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.1 – 3.1.3 ตามลำดับ จากนั้นในหัวข้อที่

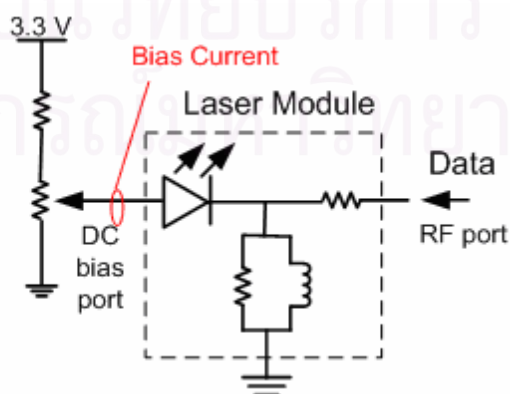
3.1.4 จะกล่าวถึงผลการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นจาก Evaluation boards ของอุปกรณ์แต่ละตัวที่นำมาประกอบกัน และในหัวข้อที่ 3.1.5 จะเป็นการวิเคราะห์ผลการเดินของสัญญาณที่ได้จากตัวขับเลเซอร์และตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้ในการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงเพื่อเป็นการทดสอบว่าอุปกรณ์ที่เลือกใช้ให้ค่าการเดินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ

3.1.1 ตัวเลเซอร์

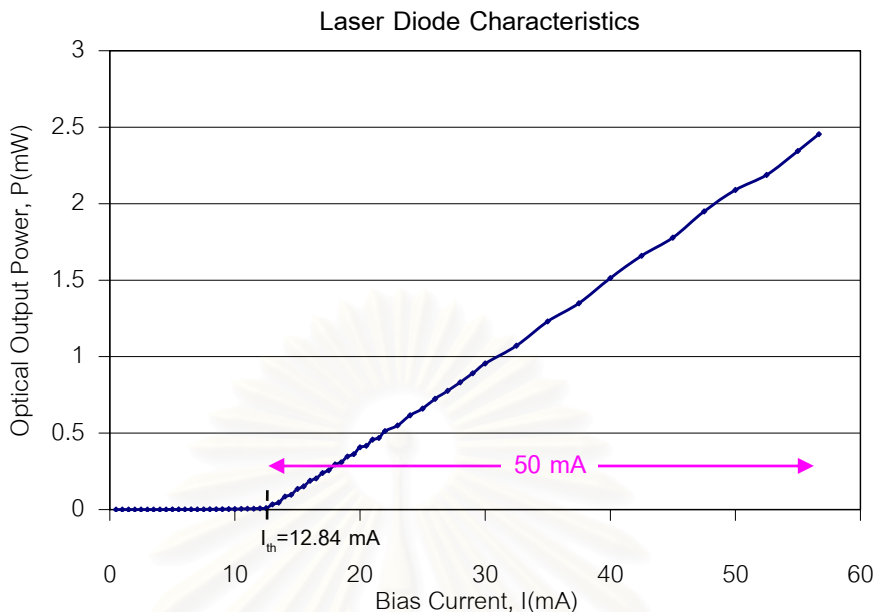


รูปที่ 3.2 ตัวเลเซอร์ ของบริษัท Triquint Semiconductor รุ่น D572

ตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้เป็นชนิด Distributed Feedback Laser (DFB) ซึ่งจะผลิตแสงเพียงโหมดเดียวทำให้มีความกว้างของสเปกตรัมทางแสงที่แคบกว่าชนิดอื่น ๆ โดยเลือกใช้ที่มีความยาวคลื่นแสงใกล้เคียงกับ 1550 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีค่าการสูญเสียพลังงานในเส้นใยนำแสงที่ผลิตจากแก้วเป็นค่าต่ำสุดอยู่ที่ค่าประมาณ 0.2 dB/km นอกจากนี้ตัวเลเซอร์ยังเป็นแบบ Uncooled ซึ่งจะมีขนาดเล็กเนื่องจากไม่มี Thermo Electric Cooler (TEC) รวมอยู่ด้วย และยิ่งไปกว่านั้นยังไม่จำเป็นต้องใช้วงจรป้อนกลับที่ซับซ้อนอย่างของตัวเลเซอร์ที่มี TEC รวมอยู่ด้วย ตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้นี้คือ D572 ของบริษัท Triquint Semiconductor ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาคูณลักษณะสมบัติของตัวเลเซอร์

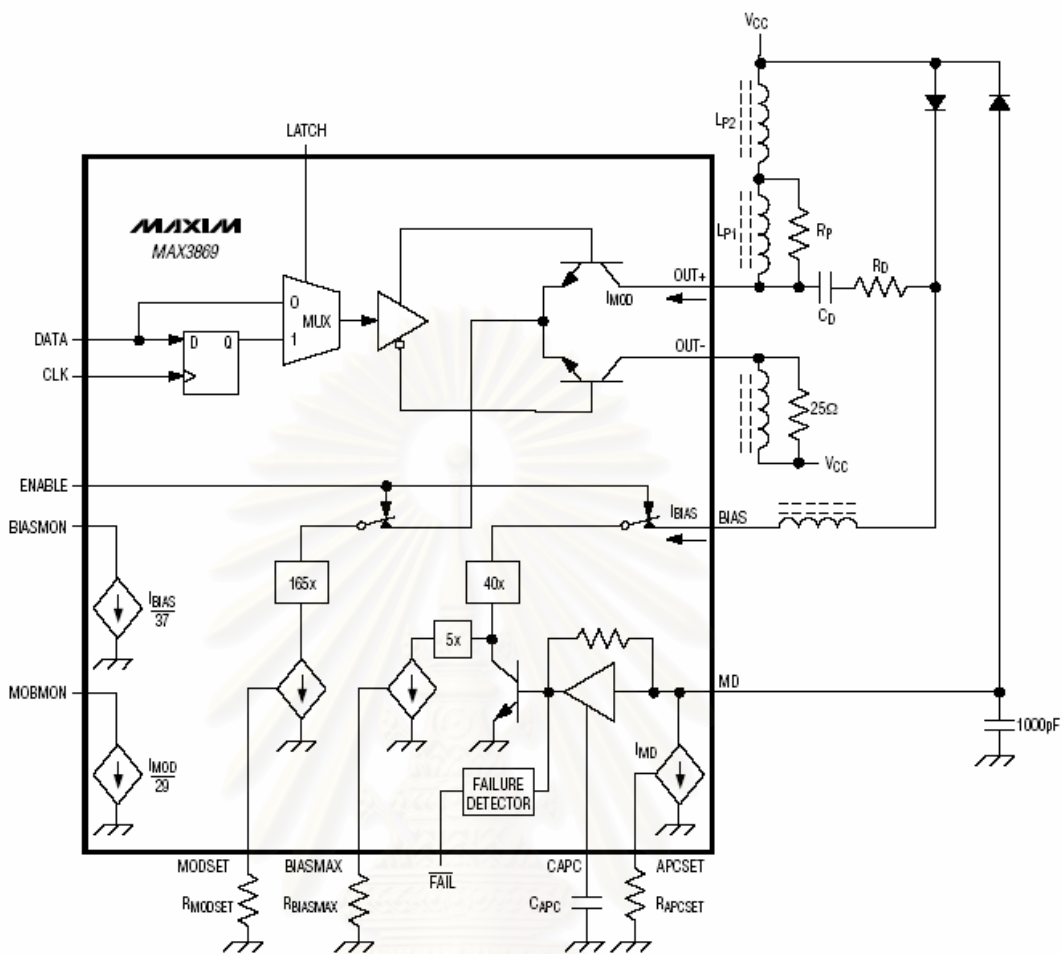


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางแสงขาออกและกระแสขั้วเลเซอร์

ก่อนการใช้งานตัวเลเซอร์ต้องทำการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติของตัวเลเซอร์นี้โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 3.3 แล้วทำการไบแอสตัวเลเซอร์โดยการป้อนกระแสตรงเข้าไปที่ DC Bias Port ให้เลเซอร์อยู่ในสถานะ Forward Biased ถัดไปค่อย ๆ ปรับค่าตัวต้านทานเพื่อทำให้กระแสที่ไหลเข้าไปที่ DC Bias Port เปลี่ยนไปก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางแสงขาออกและกระแสขั้วเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยการวัดกำลังทางแสงขาออกด้วยตัว Optical Power Monitor และวัดกระแสขั้วด้วยตัวมัลติมิเตอร์ เมื่ออ่านค่าจากกราฟในรูปที่ 3.4 จะได้ค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 12.84 mA ส่วนค่าความชันของเส้นกราฟจะเป็นค่าประสิทธิภาพอัตราการแปลงกระแสซึ่งเท่ากับ $55.6 \mu\text{W}/\text{mA}$ และค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ประมาณ 18.6 dB

สำหรับการมอดูเลตข้อมูลโดยตรง กระแสไบแอสจะต้องมีค่ามากกว่าค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนของตัวเลเซอร์ที่ใช้ ส่วนการมอดูเลตสัญญาณแสงทำโดยการป้อนสัญญาณข้อมูลที่ได้จากตัวขับสัญญาณเข้าไปที่ RF port โดยให้มีขนาด peak-to-peak มากพอที่จะให้ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันเกิน 8.2 dB ตามมาตรฐาน G.957 [18] ดังนั้นในการออกแบบวงจรควบคุมกระแสไบแอสควรจะออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 12.84 mA จนถึงประมาณ 58 mA และตัวขับเลเซอร์ที่เลือกใช้ต้องสามารถปรับกระแสมอดูเลตได้สูงถึงประมาณ 50 mA

3.1.2 ตัวขับเลเซอร์



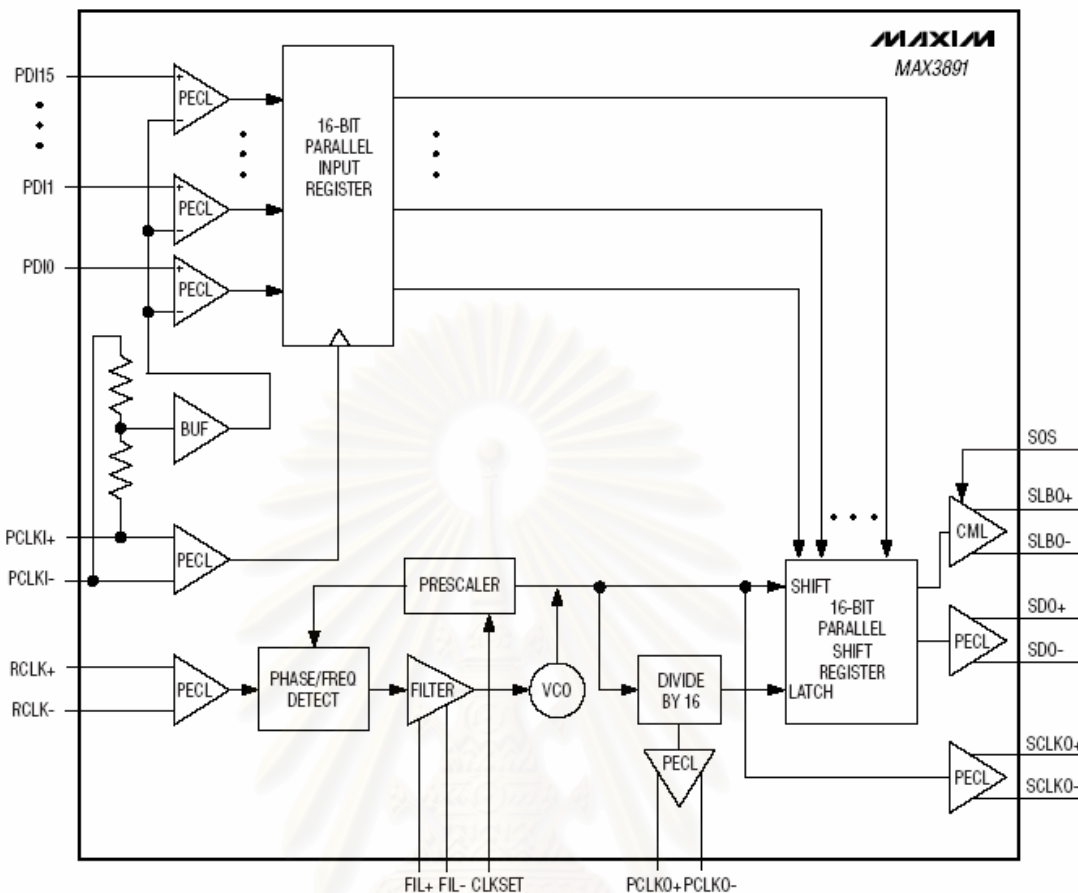
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของ MAX3869 [19]

ตัวขับเลเซอร์ทำหน้าที่ในการจัดเตรียมกระแสหลอดเลเซอร์ให้เหมาะสมสำหรับขับตัวเลเซอร์ จากการทดลองหาคุณลักษณะสมบัติของตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้พบว่าต้องการให้ตัวขับเลเซอร์สามารถปรับกระแสหลอดเลเซอร์ได้สูงถึง 50 mA ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ตัวขับเลเซอร์ของบริษัท MAXIM รุ่น MAX3869 ซึ่งสามารถปรับกระแสในการมอดูเลตได้สูงถึง 60 mA ซึ่งมากกว่า 50 mA ตามที่ต้องการ โดยชิพตัวนี้ต้องการระดับสัญญาณนาฬิกาและสัญญาณข้อมูลขาเข้าเป็นแบบผลต่าง LVPECL (Low Voltage Positive Emitter Coupled Logic) ซึ่งหนึ่งสัญญาณข้อมูลจะมี 2 เส้นด้วยกัน ระดับสัญญาณแบบผลต่าง LVPECL นี้จะมีผลต่างของระดับสัญญาณบิต '1' กับระดับสัญญาณบิต '0' ประมาณ 500-800 mV ซึ่งมีค่าน้อยทำให้สามารถปรับเปลี่ยนระดับได้อย่างรวดเร็ว จึงเหมาะกับการส่งข้อมูลที่อัตราความเร็วสูง นอกจากนี้สัญญาณแบบผลต่างนี้ยังสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย จึงเหมาะสมกับการส่ง-รับสัญญาณที่อัตราความเร็วสูงอย่าง 2.5 Gb/s ตามที่ต้องการ

รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพการทำงานของ MAX3869 เมื่อสัญญาณข้อมูลถูกป้อนเข้าสู่ชิพที่ขา DATA ชิพสามารถเลือกที่จะทำให้สัญญาณข้อมูลเป็นจังหวะเดียวกันกับสัญญาณนาฬิกาที่ถูกป้อนเข้ามาที่ขา CLK หรือใช้สัญญาณข้อมูลนี้ไปปรับขยายขนาด peak to peak ของมันเองให้เป็นสัญญาณขาออกเลยก็ได้ โดยการเลือกกระหว่างสองแบบนี้จะขึ้นอยู่กับสัญญาณป้อนเข้าไปที่ขา LATCH ถ้าสัญญาณ LATCH เป็น Vcc จะเป็นการเลือกแบบแรก แต่ถ้าสัญญาณ LATCH เป็น GND จะเป็นการเลือกแบบหลัง เมื่อเลือกสัญญาณที่เหมาะสมป้อนเข้าขา LATCH แล้ว สัญญาณข้อมูลจะถูกขยายโดยทรานซิสเตอร์ ซึ่งทรานซิสเตอร์นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์สัญญาณให้กระแสออกดูเลตไหลหรือไม่ไหลตามสัญญาณข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ระดับของกระแสออกดูเลตนี้จะถูกควบคุมด้วยตัวต้านทาน R_{MODSET} โดยค่าของตัวต้านทานจะแปรผกผันกับระดับกระแสออกดูเลต

3.1.3 ตัวมัลติเพล็กซ์

จากการที่ตัวขับเคลื่อนเซอร์ที่เลือกใช้ต้องการระดับสัญญาณขาเข้าเป็นแบบผลต่าง LVPECL ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อจึงเลือกใช้ตัวมัลติเพล็กซ์ที่ให้สัญญาณขาออกเป็นแบบผลต่าง LVPECL เช่นกัน จึงเป็นที่มาของการเลือกใช้ชิพ MAX3891 ของบริษัท MAXIM ซึ่งเป็น Serializer ชิพตัวนี้จะทำหน้าที่ในการรวมสัญญาณแบบ TDM โดยจะรวมสัญญาณขนาน 16 ช่องสัญญาณ ที่อัตราความเร็ว 155.52 Mb/s ออกมาเป็นสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรม 1 ช่องสัญญาณที่มีความเร็ว 2.5 Gb/s และให้ระดับสัญญาณเป็นแบบผลต่าง LVPECL ตามที่ต้องการ ส่วนสัญญาณข้อมูลขาเข้าที่มีความเร็วเพียง 155.52 Mb/s ไม่จำเป็นต้องเป็นแบบผลต่าง ชิพตัวนี้จะรับสัญญาณข้อมูลขาเข้าที่มีระดับของสัญญาณเป็นแบบ Single-Ended PECL ซึ่งไม่ยุ่งยากในการเชื่อมต่อเหมือนแบบผลต่าง PECL เนื่องจากสัญญาณข้อมูลหนึ่งสัญญาณจะใช้เพียงหนึ่งเส้น

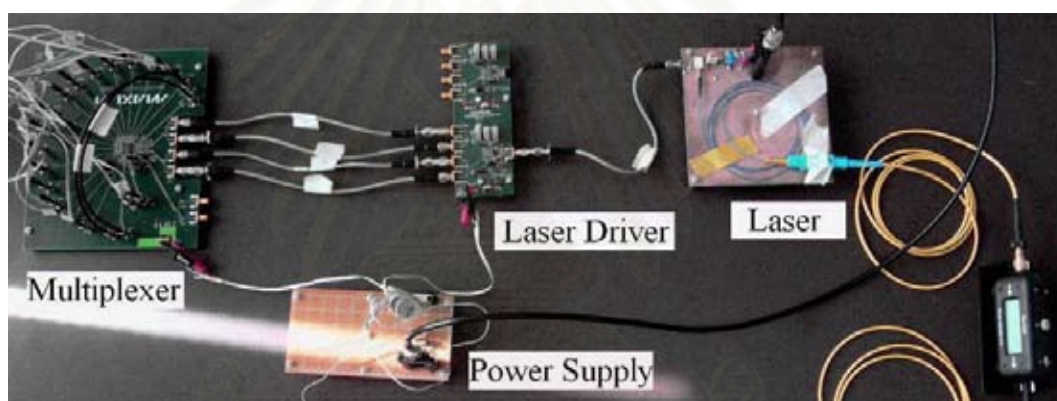


รูปที่ 3.6 แผนภาพการทำงานของ MAX3891 [20]

รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการทำงานของ MAX3891 เมื่อสัญญาณข้อมูล 16 ช่องสัญญาณที่อัตราความเร็ว 155.52 Mb/s ถูกป้อนเข้าสู่ชิพที่ขา PDI0 ถึง PDI15 แล้วจะถูกส่งด้วยจังหวะของสัญญาณนาฬิกาป้อนเข้าที่ขา PCLKI ที่ความถี่ 155.52 MHz ที่อินพุตรีจิสเตอร์ จากนั้นสัญญาณข้อมูล 16 ช่องสัญญาณจะถูกป้อนเข้าสู่ชิพรีจิสเตอร์เพื่อถูกรวมแบบ TDM เป็นสัญญาณเดี่ยวออกมาที่ขา SDO ที่อัตราความเร็ว 2.5 Gb/s โดยจะเรียงคิวเลือกช่องสัญญาณจาก 16 ช่องสัญญาณตามจังหวะของสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 2.5 GHz ที่ถูกสร้างมาจากสัญญาณนาฬิกาป้อนเข้าที่ขา RCLK โดยในที่นี่จะป้อนที่ความถี่ 155.52 MHz จากชิพตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock Oscillator) ของบริษัท Crystek Crystals Corporation ในท้ายที่สุดสัญญาณข้อมูลที่ได้ออกมาที่ขา SDO จะถูกปรับระดับภายในตัวชิพเองให้เป็นแบบผลต่าง LVPECL ตามที่ตัวขับเคลื่อนต้องการ

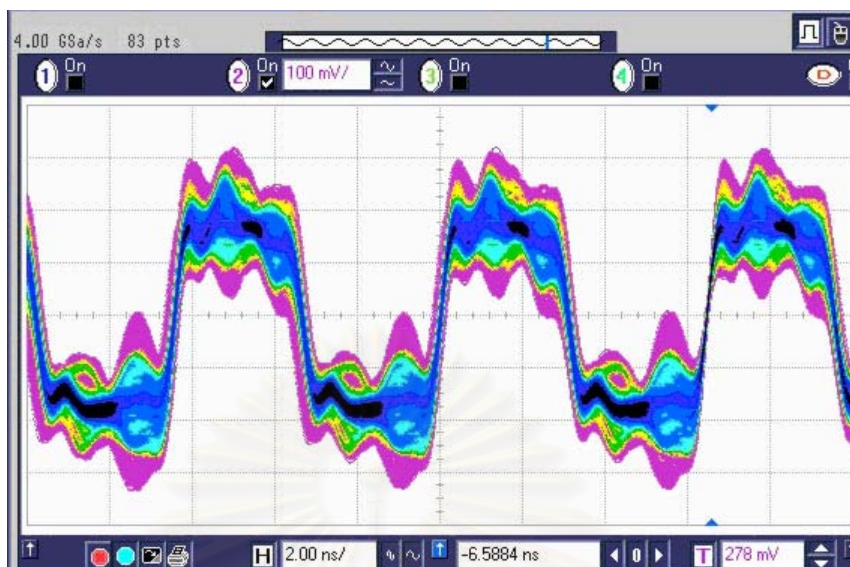
3.1.4 ผลการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นจาก Evaluation boards ของอุปกรณ์แต่ละตัวมาประกอบกัน

เพื่อเป็นการทดสอบว่าตัวมัลติเพล็กซ์ ตัวขับเลเซอร์ และตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้ เมื่อนำมาประกอบรวมกันแล้วสามารถให้สัญญาณได้ตรงตามต้องการ จึงเริ่มจากการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ Evaluation boards ในการทดสอบก่อน ลักษณะการเชื่อมต่อตัวส่งสัญญาณทางแสงจากการเชื่อมต่อบอร์ดต่าง ๆ เข้าด้วยกันแสดงดังรูปที่ 3.7 สัญญาณนาฬิกาและสัญญาณข้อมูลแบบผลต่างขาออกจากบอร์ดมัลติเพล็กซ์จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับขาเข้าของบอร์ดตัวขับเลเซอร์ ซึ่งที่บอร์ดนี้สัญญาณข้อมูลจะถูกปรับระดับกระแสมอดูเลตให้เหมาะสม กระแสมอดูเลตนี้จะถูกนำมาเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดเลเซอร์ซึ่งมีวงจรมอดูเลตไบแอสอยู่ในบอร์ดนี้ด้วย ตัวเลเซอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไบแอสและกระแสมอดูเลตไปเป็นสัญญาณข้อมูลทางแสงแล้วส่งผ่านเส้นใยนำแสงต่อไป

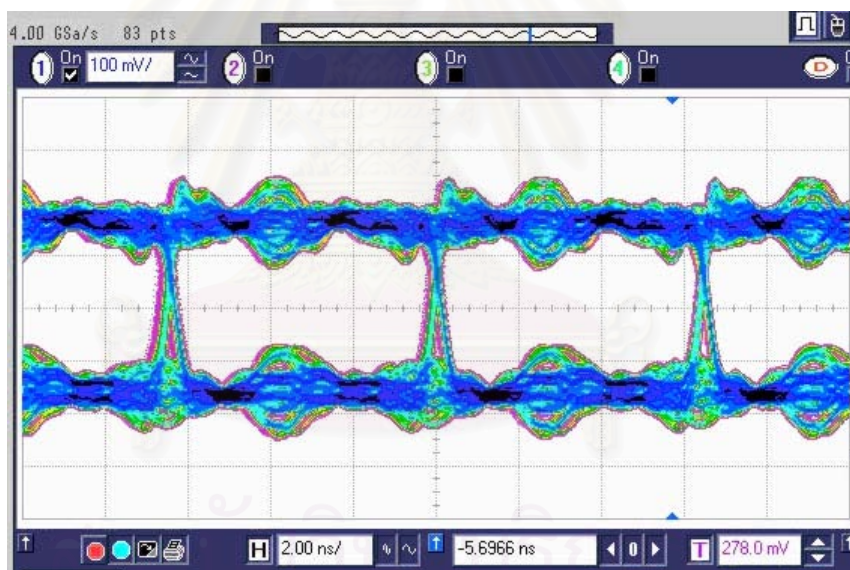


รูปที่ 3.7 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบจาก Evaluation boards

ในการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นนี้จะทำการทดลองโดยป้อนสัญญาณนาฬิกา และสัญญาณข้อมูล 16 ช่องสัญญาณความเร็ว 155.52 Mb/s ซึ่งมีรูปแบบเป็น 2^7-1 PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence) จากบอร์ดวงจรรวม (Integrated Circuit) ชนิด FPGA (Field Programmable Gate) เข้ากับขาเข้าของตัวส่งสัญญาณทางแสงหรือก็คือขาเข้าของบอร์ดตัวมัลติเพล็กซ์นั่นเอง ลักษณะของสัญญาณนาฬิกาและสัญญาณข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 จากนั้นทำการวัดสัญญาณทางแสงขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสงหรือก็คือสัญญาณขาออกจากบอร์ดเลเซอร์ ลักษณะของสัญญาณขาออกนี้แสดงดังรูปที่ 3.10 ค่าสัดส่วนตัวเลขที่วัดได้จากรูปนี้มีค่าเท่ากับ 8.45 dB ซึ่งมากกว่า 8.2 dB ตามมาตรฐาน SONET/SDH

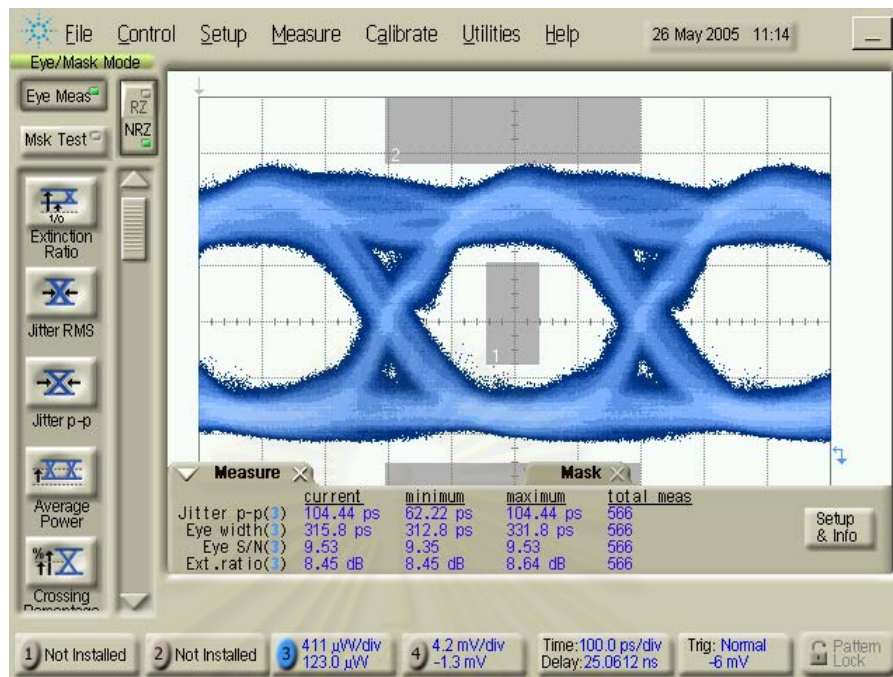


รูปที่ 3.8 สัญญาณนาฬิกาขาเข้าของตัวส่งสัญญาณทางแสง



รูปที่ 3.9 สัญญาณข้อมูลขาเข้าของตัวส่งสัญญาณทางแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

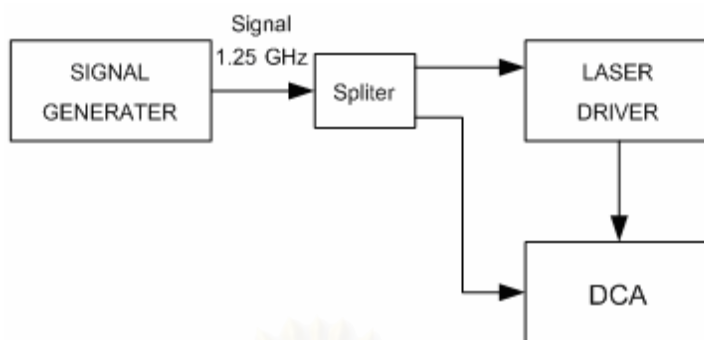


รูปที่ 3.10 สัญญาณขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง

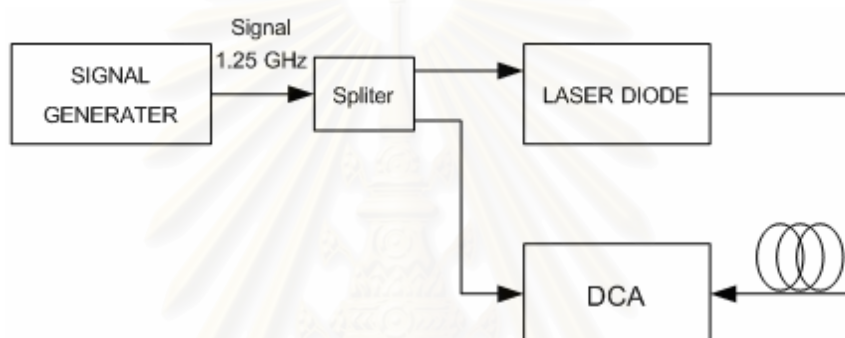
ดังนั้นจากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการประกอบเป็นตัวส่งสัญญาณทางแสงสามารถให้สัญญาณได้ตรงตามต้องการ

3.1.5 ผลการเดิน (Jitter) ของสัญญาณที่ได้จากตัวส่งสัญญาณทางแสง

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงการเดินของสัญญาณที่ได้จากตัวส่งสัญญาณทางแสง โดยจะแยกวิเคราะห์ที่ตัวขับเลเซอร์และตัวเลเซอร์ เริ่มต้นจากการป้อนสัญญาณที่เป็นรูปคลื่นไซน์ และค่ามีการเดินต่ำมากเข้าสู่ตัวขับเลเซอร์ และตัวเลเซอร์ดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 เพื่อวัดหาการเดินที่เกิดเพิ่มขึ้น โดยสัญญาณที่ใช้จะได้จากตัวกำเนิดสัญญาณรุ่น 8648C 100 kHz – 3200 MHz ของบริษัท HEWLETT PACKARD

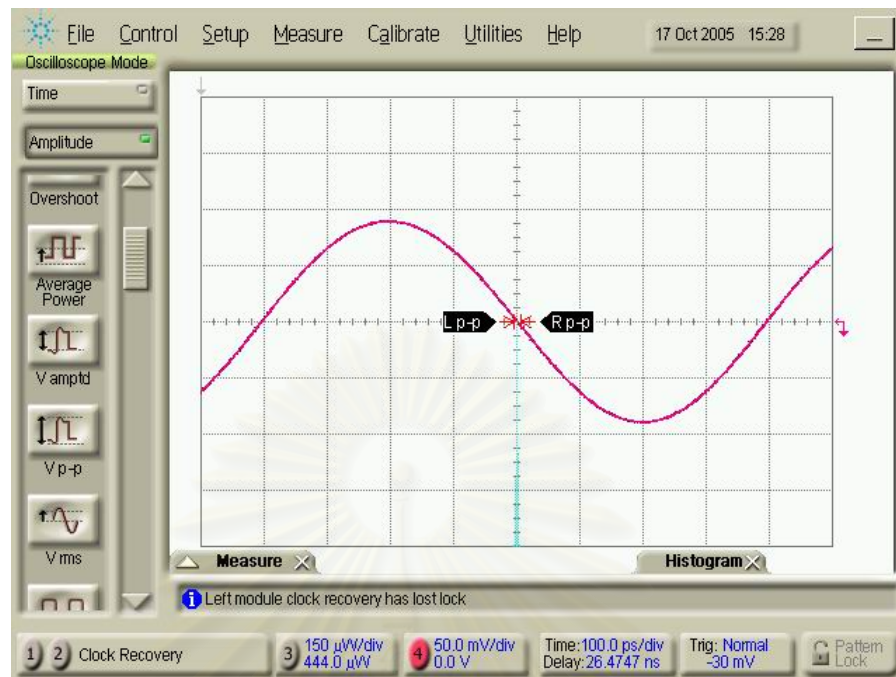


รูปที่ 3.11 ระบบที่ใช้ในการทดลองวัดการเดินของตัวขับเลเซอร์

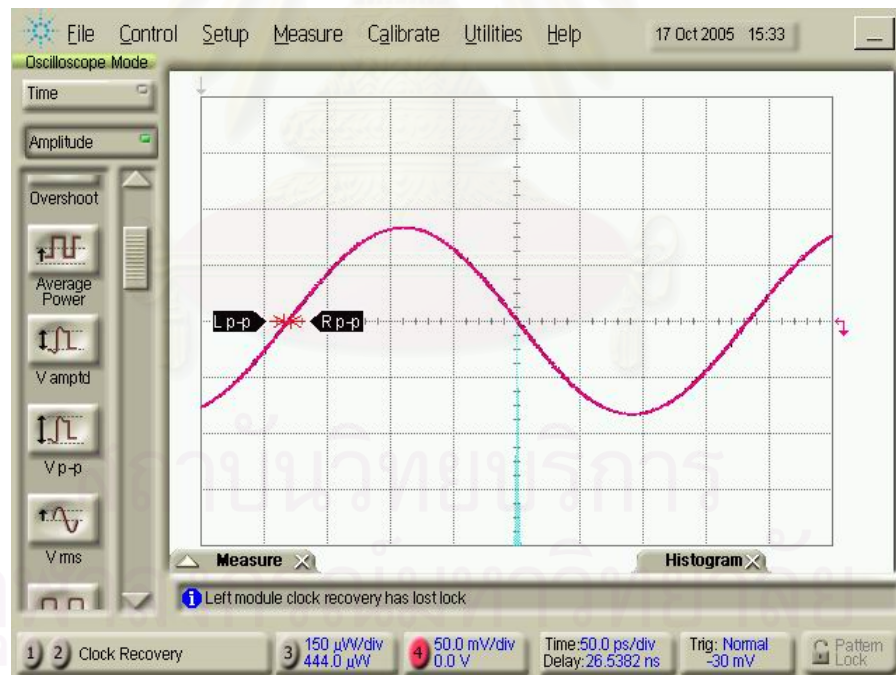


รูปที่ 3.12 ระบบที่ใช้ในการทดลองวัดการเดินของตัวเลเซอร์

เนื่องจากการเดินขึ้นอยู่กับความชันของสัญญาณ ดังนั้นในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ กรณีที่ 1 ให้สัญญาณขาเข้ามีความถี่ 1.25 GHz ซึ่งมีความกว้างของครึ่งคาบบิดเท่ากับคาบบิดของสัญญาณข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s และกรณีที่ 2 ให้สัญญาณขาเข้ามีความถี่ 2.5 GHz ซึ่งมีความชันใกล้เคียงกับสัญญาณข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s โดยกำหนดให้ระดับแอมพลิจูดเท่ากับ 600 mV เท่ากันกับสัญญาณขาออกจากตัวมัลติเพล็กซ์ซึ่งใช้ในการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะออกแบบขึ้น สัญญาณขาออกจากตัวกำเนิดสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.13

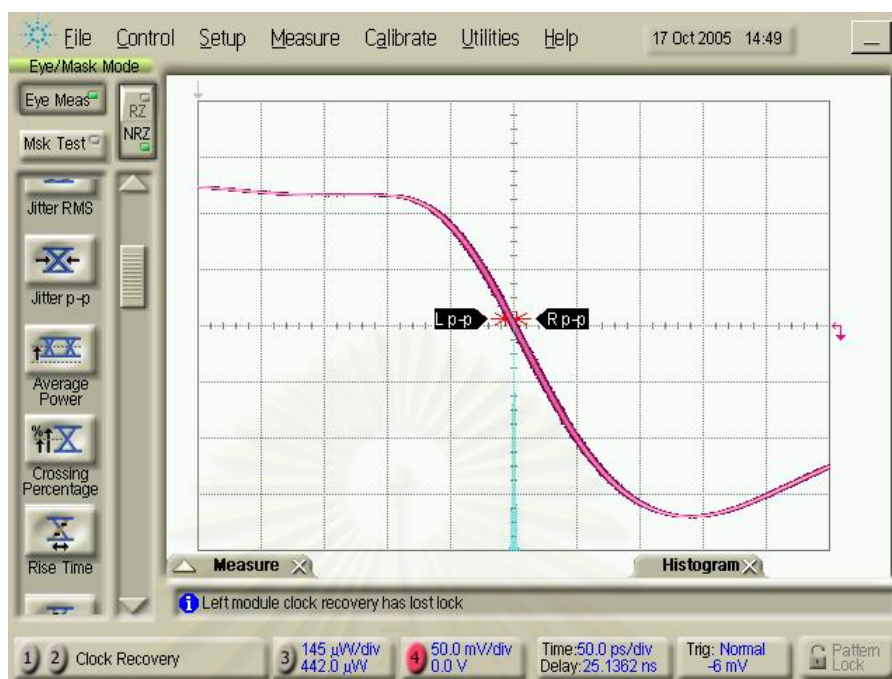


(ก)

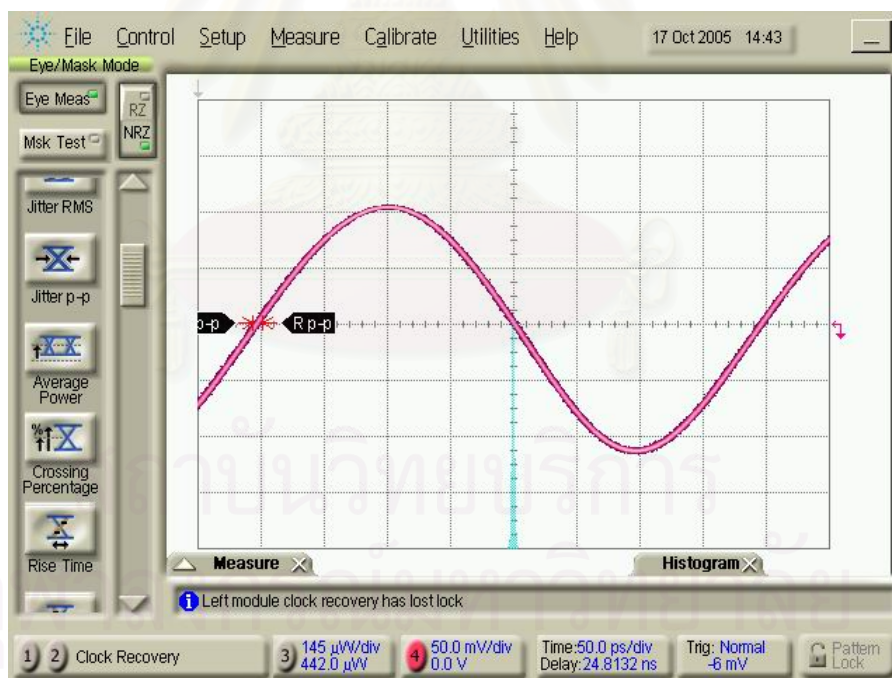


(ข)

รูปที่ 3.13 สัญญาณขาออกจากตัวกำเนิดสัญญาณ (ก) ที่ความถี่ 1.25 GHz
(ข) ที่ความถี่ 2.5 GHz

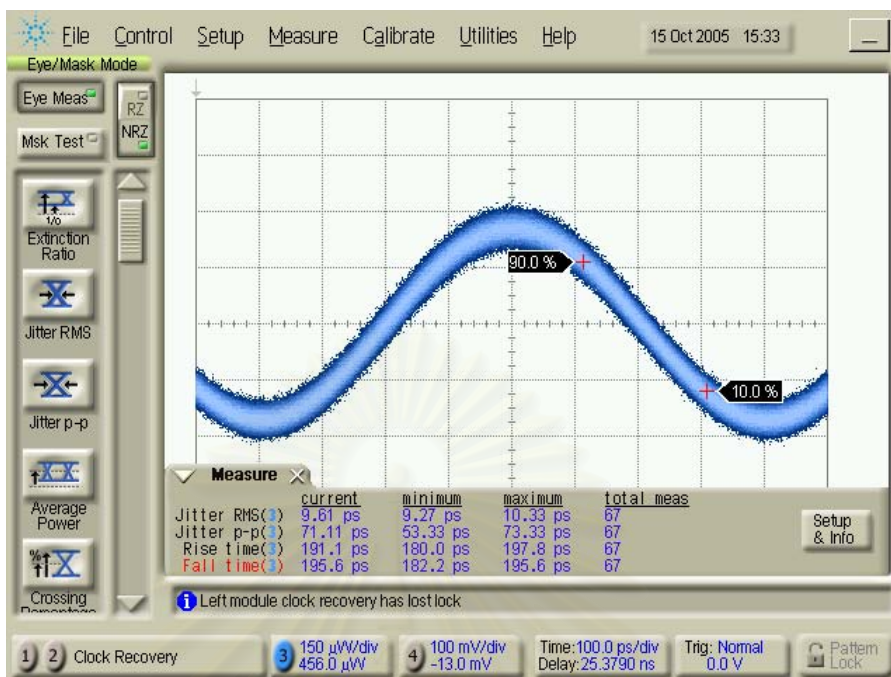


(ก)

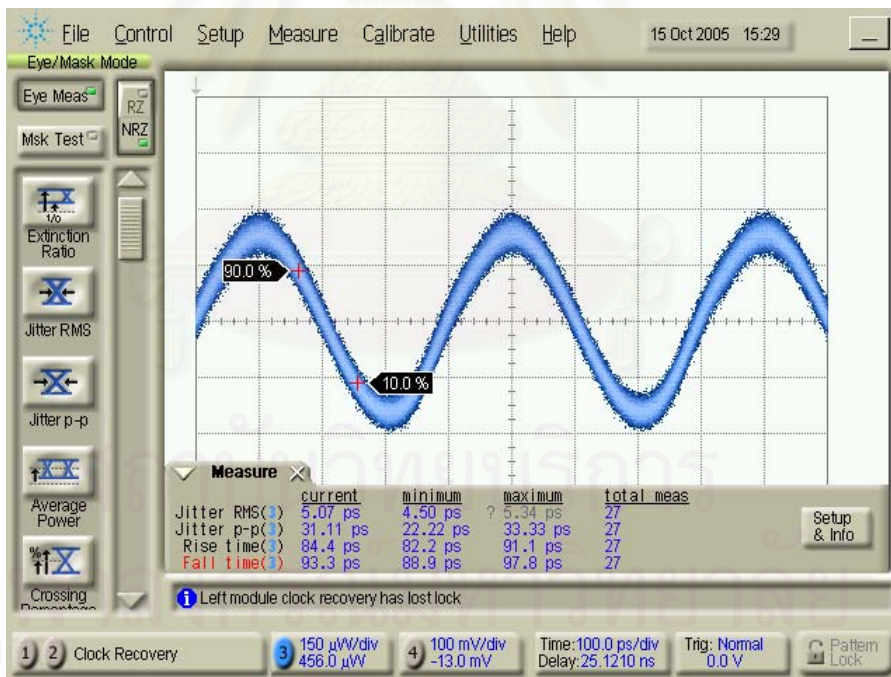


(ข)

รูปที่ 3.14 สัญญาณขาออกจากตัวขับเลเซอร์ (ก) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 1.25 GHz
(ข) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 2.5 GHz



(ก)



(ข)

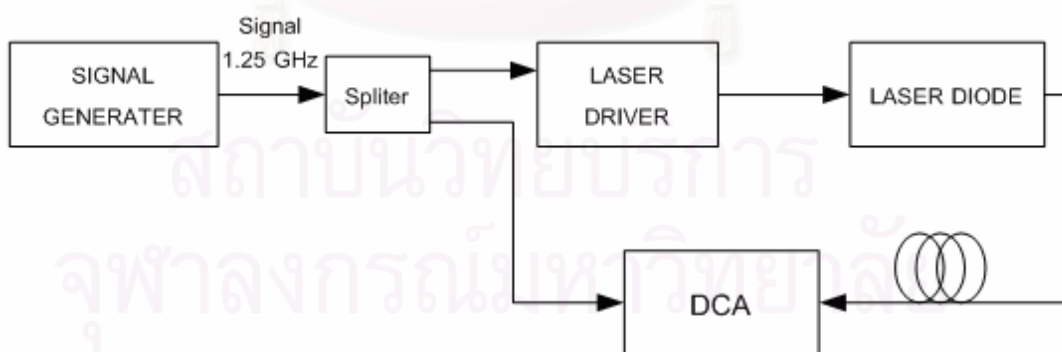
รูปที่ 3.15 สัญญาณขาออกจากตัวเลเซอร์ (ก) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 1.25 GHz
 (ข) เมื่อป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ 2.5 GHz

เมื่อทดลองป้อนสัญญาณที่ได้ในรูปที่ 3.13 นี้เข้าสู่ตัวขับเลเซอร์และตัวเลเซอร์ตามวิธีการทดลองในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับแล้ว สัญญาณขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 ผลการวัดค่าการเดินของสัญญาณแสดงดังตารางที่ 3.1

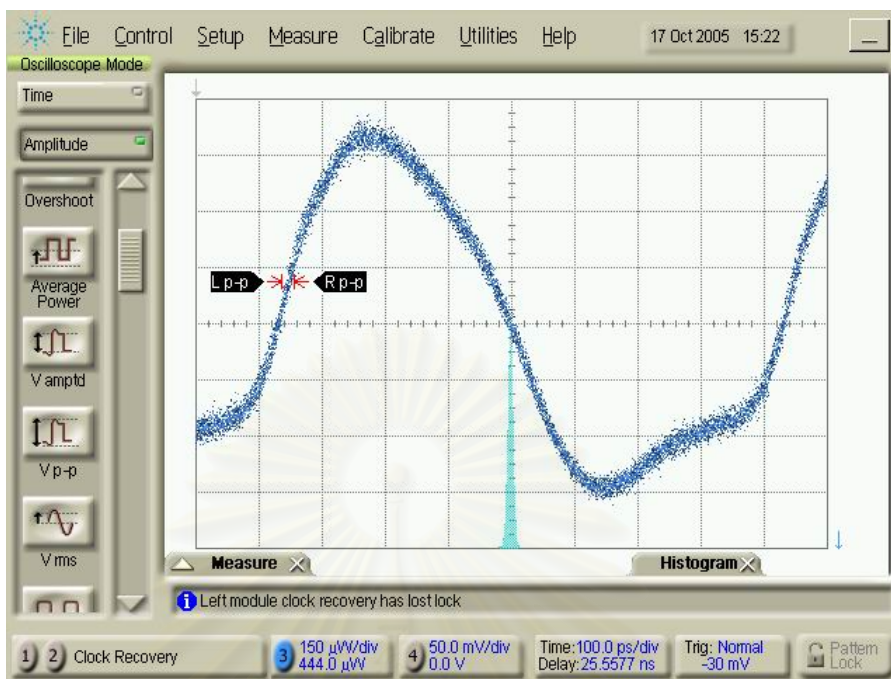
ตารางที่ 3.1 ผลการวัดการเกิดการเดินของสัญญาณ

Frequency	Jitter p-p of output from signal gen.	Jitter p-p of output from driver	Jitter p-p of output from laser
1.25 GHz	11.1 ps	15.0 ps	62.21ps
2.5 GHz	7.8 ps	10.0 ps	27.8ps

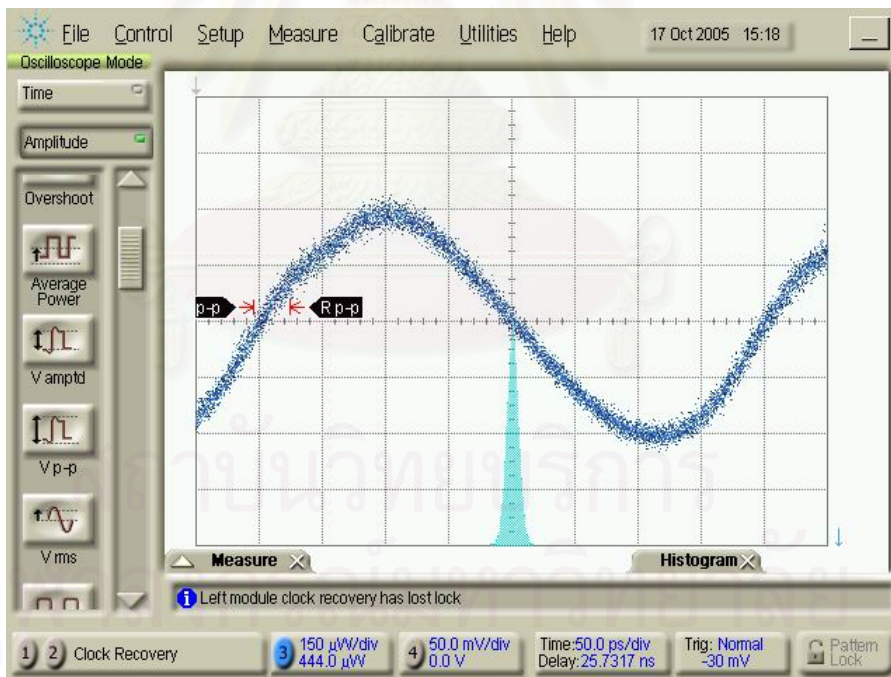
กรณีที่ 1 ที่ความถี่ 1.25 GHz สัญญาณขาออกที่ได้จากตัวขับเลเซอร์จะมีการเดินเพิ่มขึ้น 0.98% ของคาบิตของสัญญาณข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s ส่วนสัญญาณขาออกที่ได้จากตัวเลเซอร์จะมีการเดินเพิ่มขึ้น 12.78% ในกรณีที่ 2 ที่ความถี่ 2.5 GHz สัญญาณขาออกที่ได้จากตัวขับเลเซอร์จะมีการเดินเพิ่มขึ้น 0.55% ส่วนสัญญาณขาออกที่ได้จากตัวเลเซอร์จะมีการเดินเพิ่มขึ้น 5% จากการทดลองทั้งสองความถี่จะเห็นได้ว่าตัวเลเซอร์จะมีผลให้เกิดการเดินเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวขับเลเซอร์ และการเกิดการเดินจะแปรผกผันกับความชันของสัญญาณ ทั้งนี้เพราะว่าที่ความชันสูงชันสัญญาณรบกวนจะมีอิทธิพลต่อสัญญาณน้อยลง



รูปที่ 3.16 ระบบที่ใช้ในการทดลองดูการเดินของตัวส่งสัญญาณทางแสง



(ก)



(ข)

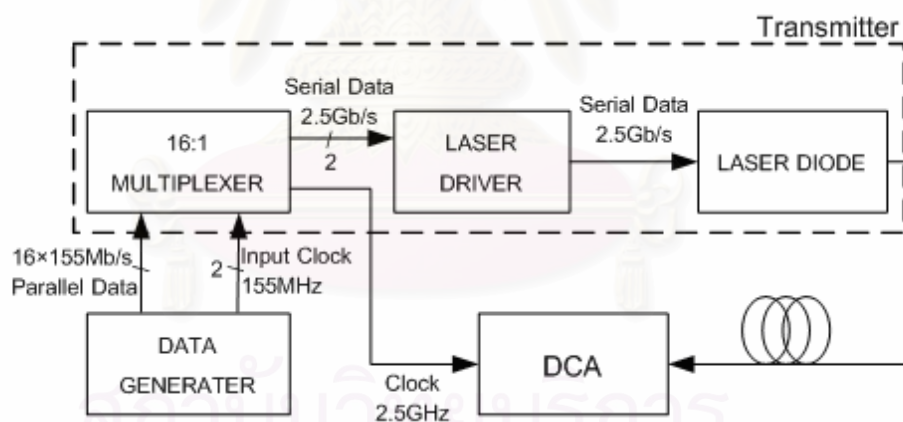
รูปที่ 3.17 สัญญาณขาออกจากตัวเลเซอร์ (ก) ที่ความถี่ 1.25 GHz (ข) ที่ความถี่ 2.5 GHz

เมื่อทำการต่อเชื่อมระหว่างตัวขับเลเซอร์และตัวเลเซอร์ดังรูปที่ 3.16 สัญญาณที่ได้จากตัวส่งสัญญาณทางแสงจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.17 กรณีที่ 1 ที่ความถี่ 1.25 GHz วัดค่าการ

ต้นของสัญญาณได้เท่ากับ 33.3 ps หรือเพิ่มขึ้น 5.55% กรณีที่ 2 ที่ความถี่ 2.5 GHz วัดค่าการต้นของสัญญาณได้เท่ากับ 34.4 ps หรือเพิ่มขึ้น 6.65% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้นี้กับสัญญาณในรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าผลรวมของการต้นจากตัวขับเลเซอร์และตัวเลเซอร์ในแต่ละความถี่มีค่าน้อยลง ที่ความถี่ 1.25 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 13.76% ที่ความถี่ 2.5 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 5.55% สาเหตุที่ทำให้การต้นที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 3.16 น้อยลงเนื่องจากสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่ตัวเลเซอร์มีความชันสูงขึ้น (ใช้สัญญาณในรูปที่ 3.14 เป็นสัญญาณขาเข้าแทนสัญญาณในรูปที่ 3.13) การที่ความชันสูงขึ้นนั้นทำให้สัญญาณรบกวนมีอิทธิพลต่อการเกิดต้นน้อยลงดังเช่นที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

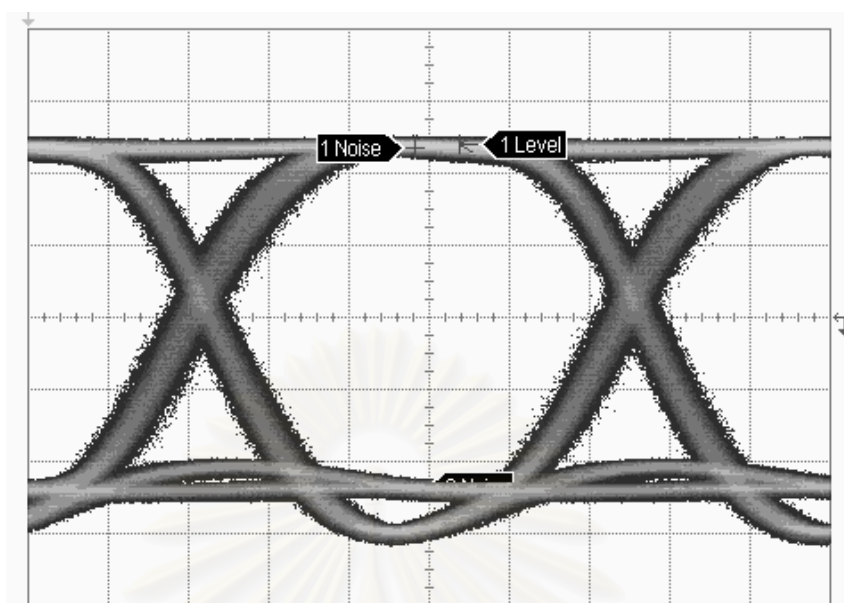
จากการทดลองในหัวข้อนี้จะเห็นได้ว่าตัวขับเลเซอร์ และตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้มีความเหมาะสมกับการใช้งานที่ความเร็ว 2.5 Gb/s ตามที่ต้องการ เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของการเกิดการต้นน้อยกว่า 0.1 UI (Unit Interval มีค่าเท่ากับช่วงเวลา 1 คาบ สำหรับสัญญาณ 2.5 Gb/s 1 UI = 400 ps)

3.2 การปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน

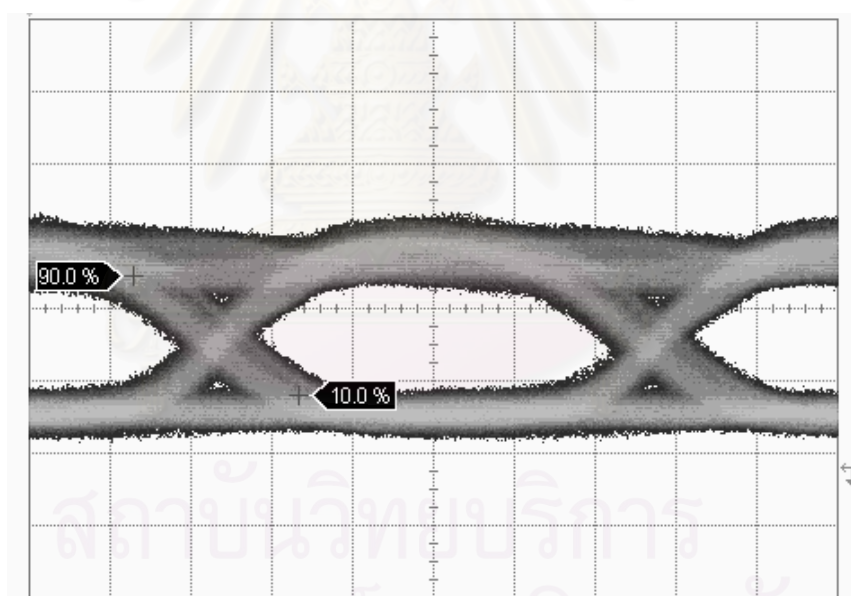


รูปที่ 3.18 ระบบที่ใช้ในการทดลองปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน

ระบบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.18 ตัวกำเนิดสัญญาณข้อมูลจะทำหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณที่เมื่อถูกรวมโดยตัวมัลติเพล็กซ์แล้วจะมีรูปแบบข้อมูลเป็นแบบ PRBS ความยาว $2^7 - 1$ บิต สัญญาณทางแสงที่ออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นนี้จะถูกวัดด้วยตัว DCA โดยการป้อนสัญญาณ trigger ด้วยสัญญาณนาฬิกาความเร็วเท่ากับสัญญาณข้อมูล



รูปที่ 3.19 สัญญาณขาออกทางไฟฟ้าจากตัวขับเลเซอร์



รูปที่ 3.20 สัญญาณขาออกทางแสงจากตัวเลเซอร์

รูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 แสดงแผนภาพตาก่อนและหลังการมอดูเลตกับตัวเลเซอร์ ในการมอดูเลตในช่วงเชิงเส้นสัญญาณทางแสงที่ได้จะมีลักษณะแผนภาพตาเช่นเดียวกับสัญญาณในรูปที่ 3.20 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ผลต่างของระดับสัญญาณบิต '1' กับบิต '0' ซึ่งจะขยายออกสูงขึ้นไปตามระดับสัญญาณทางไฟฟ้าที่ป้อนเข้า เนื่องจากผลต่างของระดับสัญญาณบิต

'1' กับสัญญาณบิต '0' เป็นตัวบอกถึงค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันดังแสดงในสมการที่ (2.2) ดังนั้นการปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

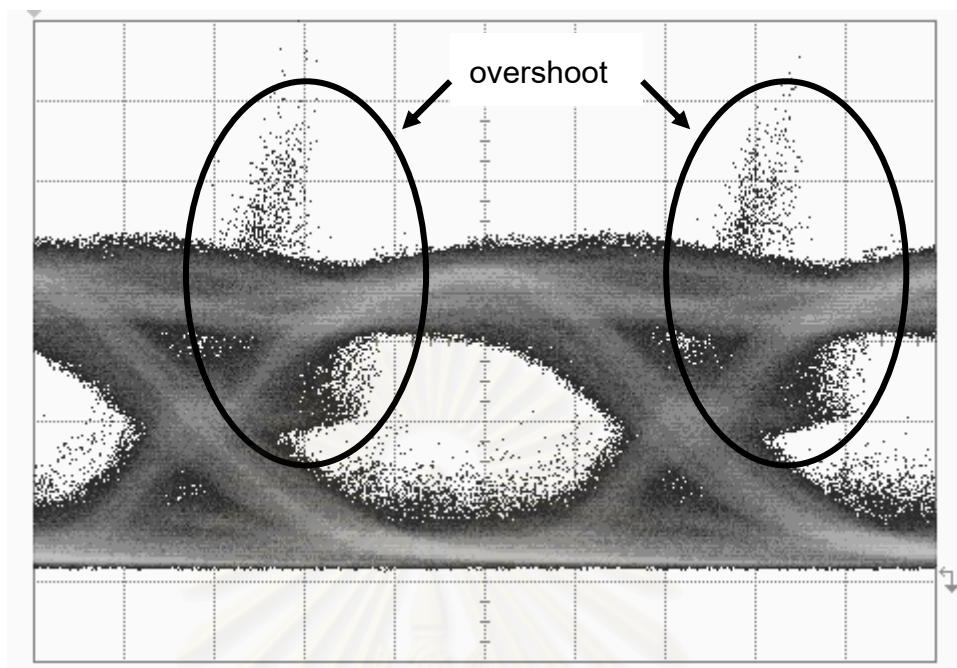
วิธีที่ 1 กำหนดให้ค่ากระแสไบแอสมีค่าคงที่ แล้วปรับเปลี่ยนค่ากระแสมอดูเลต ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันจะแปรตามระดับกระแสมอดูเลต คือถ้ากระแสมอดูเลตมีค่าสูงจะทำให้ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันมีค่าสูงขึ้นด้วย

วิธีที่ 2 กำหนดให้ค่ากระแสมอดูเลตมีค่าคงที่ แล้วปรับเปลี่ยนค่ากระแสไบแอส ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันจะแปรผกผันกับระดับกระแสไบแอส คือถ้ากระแสไบแอสมีค่าน้อยจะทำให้ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันมีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันให้เพิ่มขึ้นของวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 จะเห็นได้ว่าวิธีที่ 2 จะเป็นการเพิ่มค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันโดยการลดระดับพลังงานของทั้งสัญญาณบิต '1' และบิต '0' แต่ด้วยสัดส่วนที่ต่างกัน ซึ่งวิธีนี้จะใช้พลังงานน้อยลง ส่วนวิธีที่ 1 เป็นการเพิ่มค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันโดยการขยายผลต่างของระดับสัญญาณบิต '0' กับ บิต '1' ซึ่งต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น และจำเป็นต้องใช้ตัวขับเลเซอร์ที่สามารถป้อนกระแสสูง ๆ ได้ ดังนั้นในการทดลองปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันจะทำการศึกษาโดยการทดลองปรับค่ากระแสมอดูเลตและกระแสไบแอส (ทั้งวิธีที่ 1 และ 2) โดยจะดูที่ระดับสัญญาณของบิต '0' แทน จากการทดลองพบว่าการปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันมีข้อควรระวังที่อาจจะเกิดขึ้นคือการแกว่งของสัญญาณเนื่องจากเกิดการพุ่งเกินและการตัดของรูปคลื่น ดังจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2

3.2.1 การแกว่งของสัญญาณเนื่องจากการพุ่งเกิน

รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะการแกว่งของสัญญาณเนื่องจากการพุ่งเกิน จะสังเกตได้ว่าที่ขาขึ้นของบิต '1' จะมีการแกว่งขึ้นและลงของสัญญาณก่อนจะราบเข้าสู่แนวทึบ เมื่อปรับให้ระดับสัญญาณของบิต '0' มีค่าลดลงโดยการลดกระแสไบแอสหรือเพิ่มกระแสมอดูเลต ที่ระดับสัญญาณบิต '1' จะเกิดการพุ่งเกินรุนแรงมากขึ้น ส่วนรูปคลื่นด้านล่างของสัญญาณบิต '0' ยังคงที่เหมือนเดิม



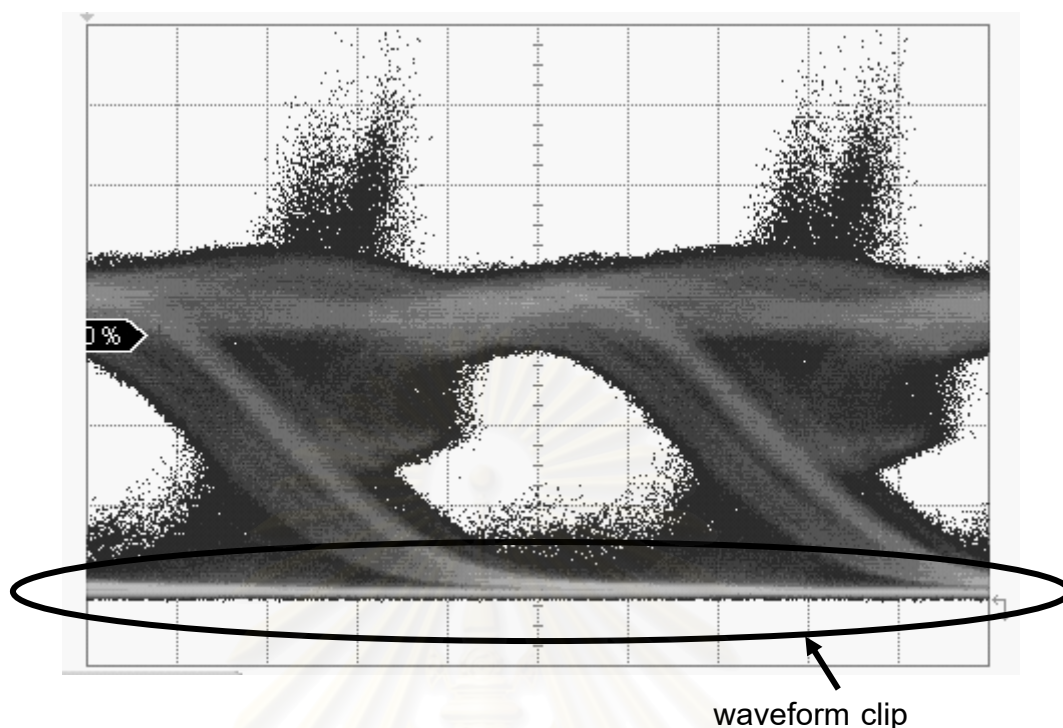
รูปที่ 3.21 แผนภาพตาของสัญญาณที่เกิดการพุ่งเกิน

ต้นเหตุของการเกิดการพุ่งเกินคือระดับสัญญาณบิต '0' อยู่ต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของตัวเลเซอร์ ดังนั้นในการสวิตช์ตัวเลเซอร์จากค่าต่ำกว่าขีดเริ่มเปลี่ยนถึงระดับของสัญญาณบิต '1' จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการสะสมโฟตอนเพิ่มขึ้นมาก ทำให้เกิดการหน่วงที่ขอบขาขึ้น ซึ่งการหน่วงที่เกิดจากการสวิตช์นี้ทำให้เกิดการสะสมศักย์เพิ่มขึ้น ทำให้ตัวเลเซอร์พุ่งเกินระดับสัญญาณบิต '1' ขึ้นไป

วิธีแก้ไขคือเพิ่มกระแสไบแอสหรือลดกระแสสมอตุเลตจนกระทั่งด้านล่างของรูปคลื่นเริ่มเคลื่อนขึ้น และการพุ่งเกินถูกลดลง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณบิต '0' ถูกเพิ่มขึ้นเหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของตัวเลเซอร์

3.2.2 การตัดของรูปคลื่น

รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะของการตัดของรูปคลื่น จะเห็นได้ว่าไม่สามารถเห็นแผนภาพตาได้ชัดเจน เส้นแสดงระดับต่ำสุด (สัญญาณบิต '0') จะมีลักษณะที่บวม เมื่อลดระดับของสัญญาณบิต '0' ลงมาด้านบนของรูปคลื่นจะถูกกดต่ำลงมาแต่ด้านล่างของรูปคลื่นจะคงที่หรือเป็นเส้นที่แบนลงกว่าเดิม



รูปที่ 3.22 แผนภาพตาของสัญญาณที่เกิดการตัดของรูปคลื่น

ต้นเหตุของการเกิดการตัดของรูปคลื่นคือ ระดับสัญญาณบิต '0' อยู่ต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของตัวเลเซอร์มากเกินไป ทำให้หลุดจากช่วงที่เป็นเชิงเส้นหรือก็คือมีค่าประสิทธิภาพอัตราการแปลงกระแสเปลี่ยนไป

วิธีแก้ไขคือเพิ่มกระแสไบแอสหรือลดกระแสมอดูเลตของตัวเลเซอร์จนกระทั่งด้านล่างของรูปคลื่นถูกเลื่อนขึ้นมาชัดเจน (แสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณบิต '0' ถูกเพิ่มขึ้นเหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของเลเซอร์) แผนภาพตาควรจะกลับมาเห็นได้ชัดเจนขึ้น

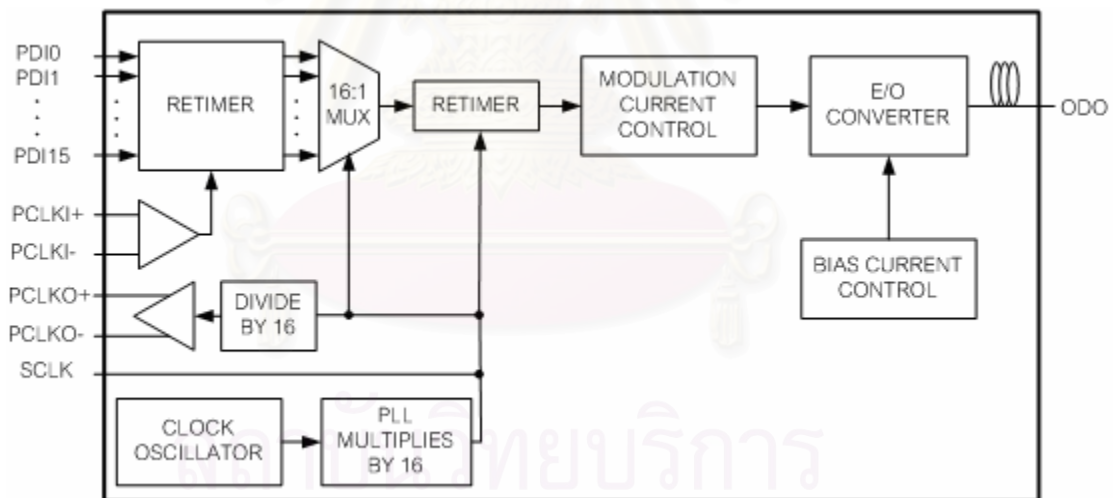
จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการปรับค่ากระแสไบแอสและกระแสมอดูเลตเพื่อให้ได้ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันสูงขึ้น ควรปรับให้ระดับกำลังทางแสงของบิต '0' อยู่เหนือค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนเล็กน้อยเพื่อป้องกันปัญหาการแกว่งของสัญญาณเนื่องจากการพุ่งเกินและการตัดของรูปคลื่น

บทที่ 4

การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง

เมื่อได้อุปกรณ์ที่จะนำมาประกอบเป็นตัวส่งสัญญาณทางแสงดังที่กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 3 ขั้นตอนต่อไปคือการนำมาออกแบบเป็นตัวส่งสัญญาณทางแสง ซึ่งก่อนจะทำการออกแบบนั้น ควรทราบถึงหลักการทำงานของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะประกอบขึ้นก่อน โดยหลักการทำงานนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1 จากนั้นในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบลายวงจร และ PCB (Print Circuit Board) พร้อมกับแสดงผลการทดลอง วิเคราะห์ผล และเสนอวิธีการปรับปรุงตัวส่งสัญญาณทางแสงเพื่อให้ได้สมรรถนะตรงตามต้องการ

4.1 หลักการทำงานของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดเกี่ยวกับขาเข้าและขาออกของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง

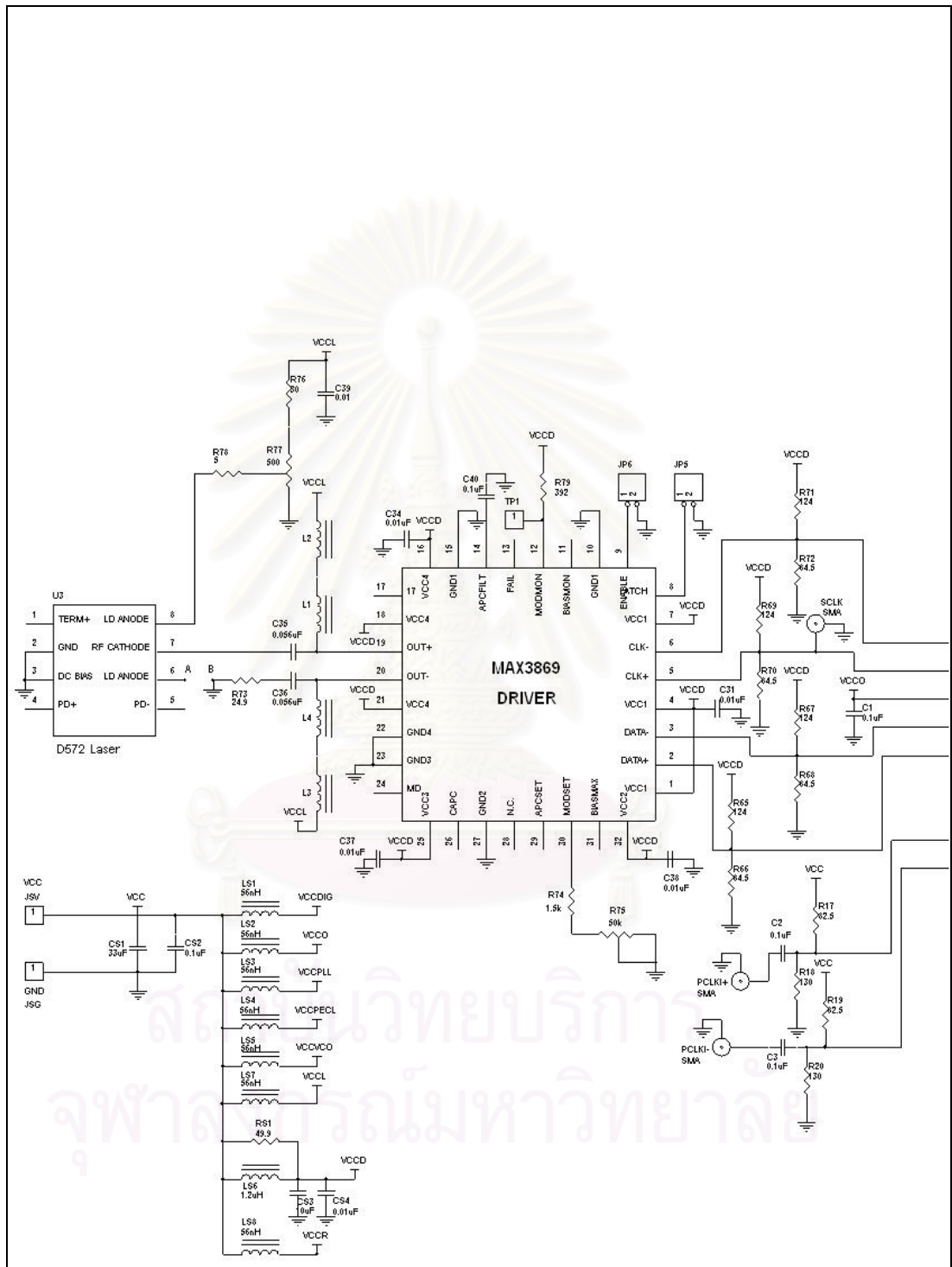
ชื่อ	หน้าที่
PDI0 – PDI15	ขาเข้าของสัญญาณข้อมูลแบบขนานความเร็ว 155.52 Mb/s
PCLKI+	ขาเข้าขาบวกของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 155.52 MHz ซึ่งมาพร้อมกับสัญญาณข้อมูลแบบขนาน
PCLKI-	ขาเข้าขาลบของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 155.52 MHz ซึ่งมาพร้อมกับสัญญาณข้อมูลแบบขนาน
PCLKO+	ขาออกขาบวกของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 155.52 MHz
PCLKO-	ขาออกขาลบของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 155.52 MHz
SCLK	ขาออกของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2.5 GHz
ODO	ขาออกของสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรมทางแสงที่ความเร็ว 2.5 Gb/s

หมายเหตุ Clock Oscillator นั้นสามารถเปลี่ยนมารับเป็นสัญญาณนาฬิกาภายนอกได้

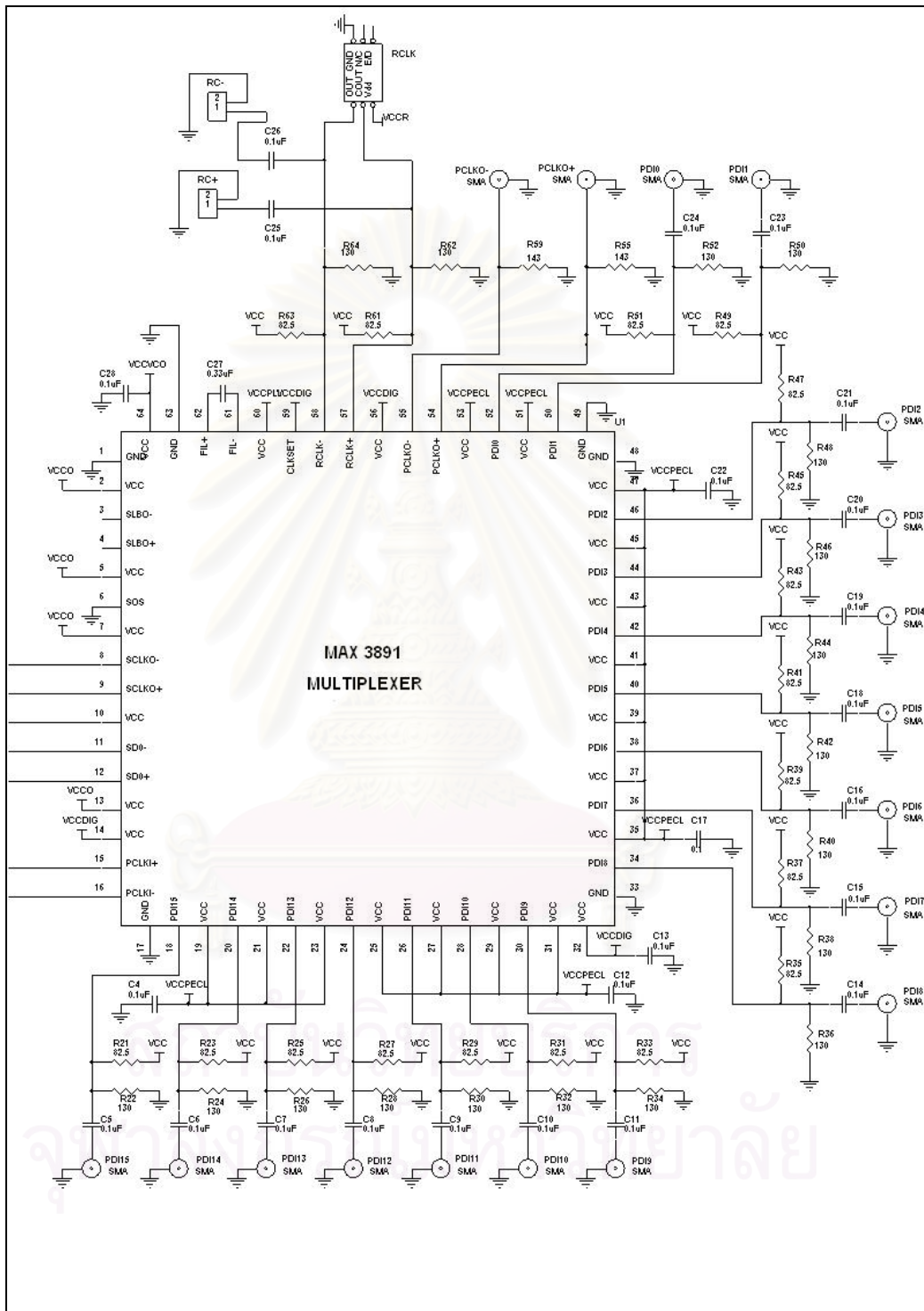
แผนภาพการทำงานของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยมีรายละเอียดของขาเข้าและออกดังตารางที่ 4.1 Clock Oscillator ทำหน้าที่เป็นสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงของระบบนี้ โดยจะมีความถี่ 155.52 Mb/s (หรือสามารถรับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกแทนดังที่กล่าวมาแล้วในการออกแบบ) สัญญาณนาฬิกาอ้างอิงนี้จะส่งเข้าสู่ Phase-Locked Loop (PLL) เพื่อคูณความถี่เพิ่ม 16 เท่าเป็น 2.5 GHz สัญญาณใหม่ที่ได้นี้คือ SCLK สัญญาณนาฬิกาจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปหารความถี่ลง 16 เท่าเป็น 155.52 MHz แล้วส่งออกที่ขา PCLKO เพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาให้ตัวกำเนิดสัญญาณข้อมูลแบบขนาน 16 ช่องสัญญาณ ส่วนที่ 2 นำไปใช้ในการรวมสัญญาณขาเข้า 16 ช่องสัญญาณเป็น 1 ช่องสัญญาณที่ 16:1 MUX ต่อไป

สัญญาณข้อมูลแบบขนานจำนวน 16 ช่องสัญญาณพร้อมสัญญาณนาฬิกาจะถูกส่งเข้าสู่ขาเข้าของบอร์ดคือ PDI0-PDI15 และ PCLKI สัญญาณข้อมูลทั้ง 16 ช่องสัญญาณจะถูกนำมา retime ใหม่ด้วยสัญญาณจาก PCLK จากนั้นจะถูกรวมเข้าเป็น 1 ช่องสัญญาณด้วย 16:1 MUX และถูก retime อีกครั้งก่อนส่งเข้าสู่วงจรควบคุมกระแสโมดูล ซึ่งกระแสโมดูลนี้จะถูกปรับผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ R_{Mod} สัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปรวมเข้ากับสัญญาณจากวงจรควบคุมกระแสไบแอส ซึ่งควบคุมผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ R_{Bias} จากนั้นสัญญาณทั้งสองก็จะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นแสงด้วย E/O Converter ต่อไป

4.2 การออกแบบลายวงจร



รูปที่ 4.2 แผนผังวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง



รูปที่ 4.2 แผนผังวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง (ต่อ)

รูปที่ 4.2 แสดงแผนผังวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ได้ออกแบบขึ้น ในการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 6 ส่วนด้วยกันดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณขาเข้า 16 ช่องสัญญาณและสัญญาณนาฬิกา (PDI0-PDI15 และ PCLKI) จากตัวกำเนิดสัญญาณข้อมูลกับขาเข้าชิพมัลติเพล็กซ์

เนื่องจากชิพมัลติเพล็กซ์ต้องการสัญญาณขาเข้าที่มีระดับสัญญาณเป็นแบบ LVPECL ซึ่งมีค่าแรงดันที่ระดับบิต '0' และบิต '1' ที่ประมาณ 1.6 V และ 2.4 V ตามลำดับหรือก็คือมีผลต่างของระดับสัญญาณประมาณ 800 mV [21] การเชื่อมต่อจะเลือกใช้แบบ AC-coupling เนื่องจากสามารถรับระดับสัญญาณขาเข้าได้หลายรูปแบบแต่ต้องมีผลต่างของระดับสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 300 – 900 mV ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คือ 0.1 uF การเลือกใช้จะคำนึงถึงผลของ low frequency cutoff ดังที่กล่าวในการเชื่อมต่อแบบ AC-coupling ในภาคผนวก ก.1 หัวต่อที่ใช้ในการรับสัญญาณขาเข้าเข้าสู่บอร์ดจะใช้เป็น SMB เนื่องจากรองรับความถี่ได้สูงถึง 4 GHz

4.2.2 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ (SCLK และ SDO) กับขาเข้าของชิพตัวขับเคลื่อน

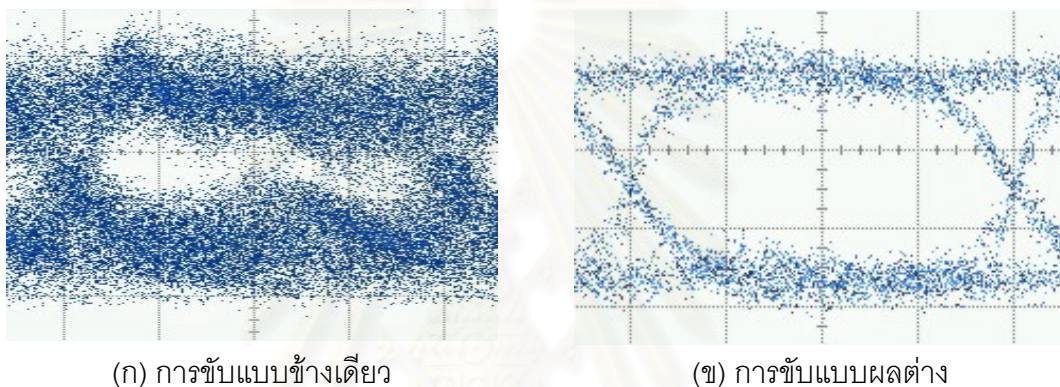
สัญญาณขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์แบบ LVPECL จึงต้องมีการต่อตัวต้านทานเพื่อทำการยกระดับของสัญญาณ DC ไว้ ลักษณะการเชื่อมต่อแบบนี้เรียกว่า DC-coupling ซึ่งรายละเอียดในการเชื่อมต่อแสดงในภาคผนวก ก.2

ในการออกแบบเพื่อความสะดวกในการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ จึงทำการต่อ SCLK ออกมาเพื่อใช้เป็นสัญญาณ Trigger ในการวัดกับ DCA โดยจะใช้หัวต่อแบบ SMA ซึ่งใช้สำหรับสัญญาณความเร็วสูง

4.2.3 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อน (OUT) เข้ากับตัวเลเซอร์

การเชื่อมต่อจะใช้แบบ AC-coupling เพื่อแก้ปัญหา Headroom ดังที่ถูกระบุใน [22] (“Headroom” หมายถึงความแตกต่างระหว่างระดับแรงดันแหล่งกำเนิดกับผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างเส้นทาง) ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คือ 0.056 uF การเลือกใช้จะคำนึงถึงผลของ low frequency cutoff ดังที่กล่าวในภาคผนวก ก.1 เนื่องจากตัวขับเคลื่อนให้สัญญาณขาออกเป็นแบบผลต่างจึงจำเป็นต้องทำการสร้างสมดุลระหว่างโหลดทั้งสองข้าง คือให้ค่า impedance มีค่าเท่ากันทั้งขนาดและเฟส โดยขาออกแต่ละขาของตัวขับเคลื่อนถูกกำหนดให้ขับโหลด 25 โอห์ม

สำหรับการขับตัวเลเซอร์สามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ (1) การขับแบบข้างเดียว (Single-Ended Drive) ขาออกขาบวกสามารถเชื่อมเข้ากับตัวเลเซอร์ได้เลยเพราะตัวเลเซอร์มี impedance ขาเข้าเท่ากับ 25 โอห์ม ส่วนขาออกขาลบต้องเชื่อมต่อเข้ากับตัวต้านทาน 25 โอห์ม (2) การขับแบบผลต่าง (Differential Drive) คือใช้สัญญาณขาออกจากตัวขับเลเซอร์ทั้งสองข้างช่วยกันขับสามารถทำได้โดยเชื่อมจุด A กับจุด B ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เข้าด้วยกัน สำหรับตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะประกอบขึ้นนี้จะใช้การขับแบบผลต่างเนื่องจากให้ความเร็วขอบ (edge-speed) เร็วกว่าการขับแบบข้างเดียว และยังปรับปรุงการไหลของกระแสให้ตัวเลเซอร์มีสมรรถนะดีขึ้นเนื่องจากเป็นลูปปิดดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพตาเปรียบเทียบระหว่างการขับแบบข้างเดียวกับการขับแบบผลต่าง

4.2.4 การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงเข้าสู่ RCLK ของชิพมัลติเพล็กซ์

การเชื่อมต่อจะออกแบบไว้ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ ให้เลือกรับสัญญาณอ้างอิงจาก Clock Oscillator หรือสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกก็ได้ เนื่องจากขา RCLK ต้องการสัญญาณที่มีระดับสัญญาณเป็นแบบ LVPECL ถ้าจะเลือกเชื่อมต่อกับ Clock Oscillator ให้ไม่ต้องต่อ C25 และ C26 จากนั้นทำการสลับค่าตัวต้านทาน R63 กับ R64 และ R61 กับ R62 ให้มีลักษณะเป็นการเชื่อมต่อเป็นแบบ DC-coupling ดังที่กล่าวในภาคผนวก ก.1 แต่ถ้าจะเลือกเชื่อมต่อกับสัญญาณนาฬิกาภายนอกก็ทำการเชื่อมต่อดังวงจรในรูปที่ 3.20 แต่ไม่ต้องต่อ Clock Oscillator ลงไป

4.2.5 สัญญาณนาฬิกาขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ (PCLKO)

เนื่องจากสัญญาณนาฬิกาขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ (PCLKO) มีรูปแบบสัญญาณเป็นแบบ LVPECL เพื่อที่จะสามารถนำไปต่อกับขาเข้าที่เป็นแบบ AC coupling ได้เลย จึงทำการต่อตัวต้านทานไว้เพื่อกำจัดสัญญาณ DC ออกไปดังรายละเอียดใน [23]

4.2.6 แหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply)

เนื่องจากมีองค์ประกอบหลายตัวที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนภายในแหล่งจ่าย เช่น VCO ดังนั้นในการออกแบบจึงทำการแบ่งแหล่งจ่ายออกเป็น 7 ส่วนด้วยกันดังนี้ (1) VCCDIG (2) VCCO (3) VCCPLL (4) VCCPECL (5) VCCVCO (6) VCCL (7) VCCD และ (8) VCCR เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเข้าสู่แหล่งจ่าย ในการต่อแหล่งจ่ายมาจากภายนอกจะเริ่มจากการ decoupling ด้วยตัวเก็บประจุก่อนเพื่อกรองเอาสัญญาณ AC ออก จากนั้นทำการแยกไฟเลี้ยงออกจากกันโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเพื่อกันสัญญาณรบกวนแต่ละส่วนออกจากกัน นอกจากนี้เพื่อให้ได้การกรองที่ดีที่สุดจึงทำการ decoupling แหล่งจ่ายอีกครั้งด้วยตัวเก็บประจุที่ตำแหน่งใกล้กับตัวชิพมากที่สุดด้วย

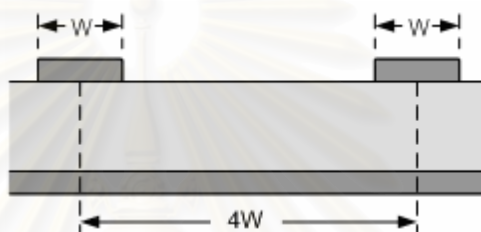
4.3 การออกแบบ PCB (Print Circuit Board)

เมื่อได้ลายวงจรแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบ PCB ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม Protel 99 SE ในการออกแบบ หลังจากได้ลายของ PCB แล้วก็ต้องส่งไปกัดและนำมาบัดกรีประกอบ จากนั้นจึงทำการทดลอง วิเคราะห์ผล และทำการแก้ไข โดยการวนกลับไปเริ่มออกแบบ PCB ใหม่อีกครั้งแล้วทำตามขั้นตอนดังที่กล่าวไปแล้ว ในการออกแบบนี้ได้มีการปรับปรุงแผ่น PCB เป็น 3 แบบด้วยกันดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.1 – 4.3.3

4.3.1 PCB แบบที่ 1

เริ่มที่การออกแบบ PCB เป็นแบบ 2 ชั้น ขนาด 3×4 นิ้ว ในการเดินเส้น จำเป็นต้องคำนึงถึงรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

- การเลือกชนิดของบอร์ดที่ใช้ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เป็น FR4 ซึ่งมีโดยทั่วไปจะ
ใช้ได้ความถี่ถึง 3 GHz [24] ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการใช้งานที่ความเร็ว 2.5 Gb/s ได้
- สัญญาณขาเข้าซีพม์ลติเพล็กซ์ 16 ช่องสัญญาณและสัญญาณนาฬิกา (PDI0-PDI15,
PCLKI+ และ PCLKI-) จะต้องออกแบบให้มีความยาวเท่ากัน
- สัญญาณขาเข้าซีพม์ลติเพล็กซ์ 16 ช่องสัญญาณแบบข้างเดียว ต้องออกแบบให้ห่างกัน
เพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม (crosstalk) โดยระยะห่างระหว่างตรงกลางของสอง
เส้นควรห่างกันมากกว่า 4 เท่าของความกว้างของเส้นสัญญาณ [25] ดังแสดงในรูปที่ 4.4

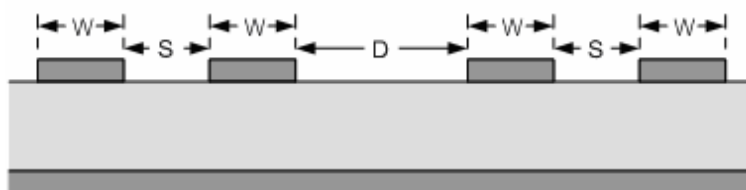


รูปที่ 4.4 การแยกเส้นสัญญาณแบบข้างเดียวเพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม

- สัญญาณที่เป็นคู่ผลต่างต้องออกแบบให้มีความยาวเท่ากัน และมีระยะห่างระหว่างคู่
สัญญาณเท่ากันตลอดเส้นทางเดิน

ขาเข้าของซีพม์ลติเพล็กซ์	PCLKI+ กับ PCLKI- และ RCLK+ กับ RCLK-
ขาออกของซีพม์ลติเพล็กซ์	PCLKO+ กับ PCLKO-, SDO+ กับ SDO- และ SCLK+ กับ SCLK-
ขาออกของซีพตัวขับเคลื่อน	OUT+ กับ OUT-

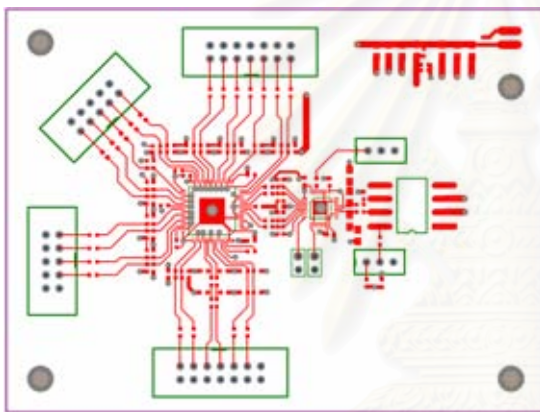
- สัญญาณที่เป็นคู่ผลต่างต้องออกแบบให้ห่างกันเพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม
(crosstalk) โดยระยะห่างระหว่างสองคู่สัญญาณห่างกันมากกว่า 2 เท่าของระยะห่าง
ระหว่างคู่สัญญาณเดียวกัน [25] ดังแสดงในรูปที่ 4.5



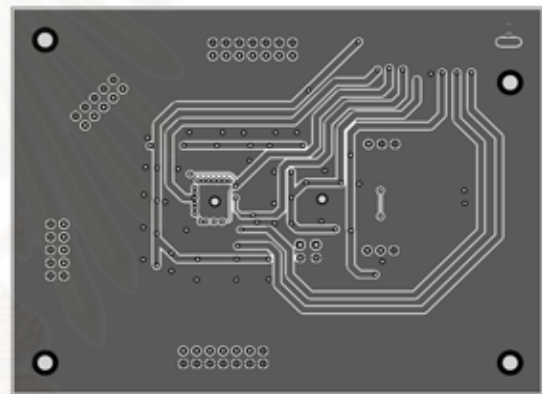
รูปที่ 4.5 การแยกเส้นสัญญาณแบบผลต่างเพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม

- ต้องมีการกรองสัญญาณรบกวนออกจากแหล่งจ่ายไฟเสมอ โดยในการกรองจะใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับแหล่งจ่าย และใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับแหล่งจ่ายไฟ ในการกรองสัญญาณรบกวนนอกจากจะต่อตรงบริเวณที่รับแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ดแล้ว ก็ยังจำเป็นต้องทำการกรองที่ตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดที่บ่อนไฟเลี้ยงเข้าสู่ชิพด้วย
- ในการเชื่อมต่อกราวด์ควรออกแบบให้มีระยะทาง Return Path สั้นที่สุด

ทำการเดินเส้นตามข้อกำหนดข้างต้น ได้ลักษณะของแผ่น PCB ดังรูปที่ 4.6 รูปที่ 4.6 (ก) แสดงชั้นที่ 1 ของแผ่น PCB ซึ่งใช้สำหรับเดินเส้นสัญญาณ และรูปที่ 4.6 (ข) แสดงชั้นที่ 2 ของแผ่น PCB ซึ่งใช้สำหรับเดินเส้นจ่ายไฟ และกราวด์



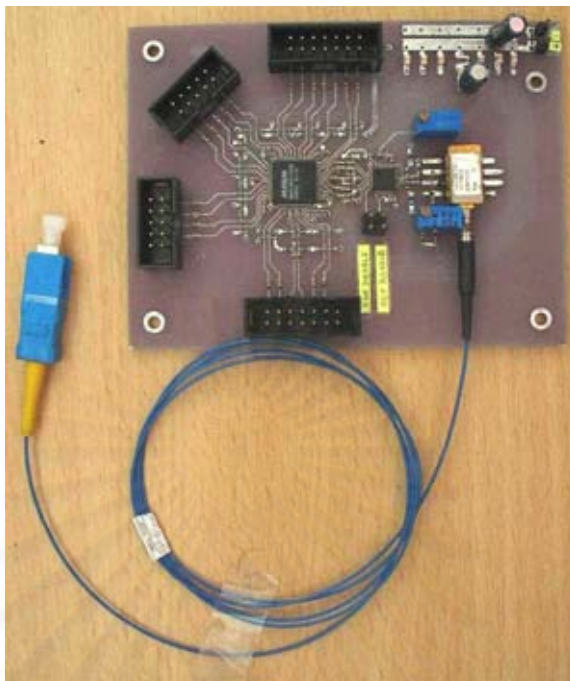
(ก) ชั้นที่ 1 ของแผ่น PCB



(ข) ชั้นที่ 2 ของแผ่น PCB

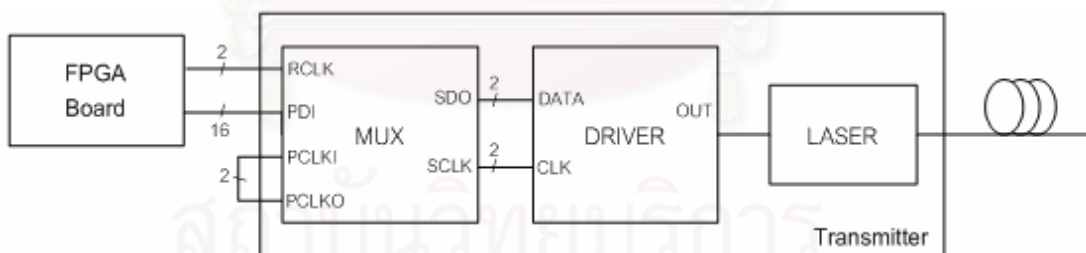
รูปที่ 4.6 ลักษณะ PCB ของบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1

แผ่น PCB ที่ออกแบบเรียบร้อยแล้วจะถูกส่งไปยังบริษัทที่ผลิตแผ่น PCB เพื่อทำการสร้าง แผ่นที่สร้างเสร็จแล้วจะถูกนำมาบัดกรีอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เป็นบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 ที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ บัดกรีเรียบร้อยแล้ว

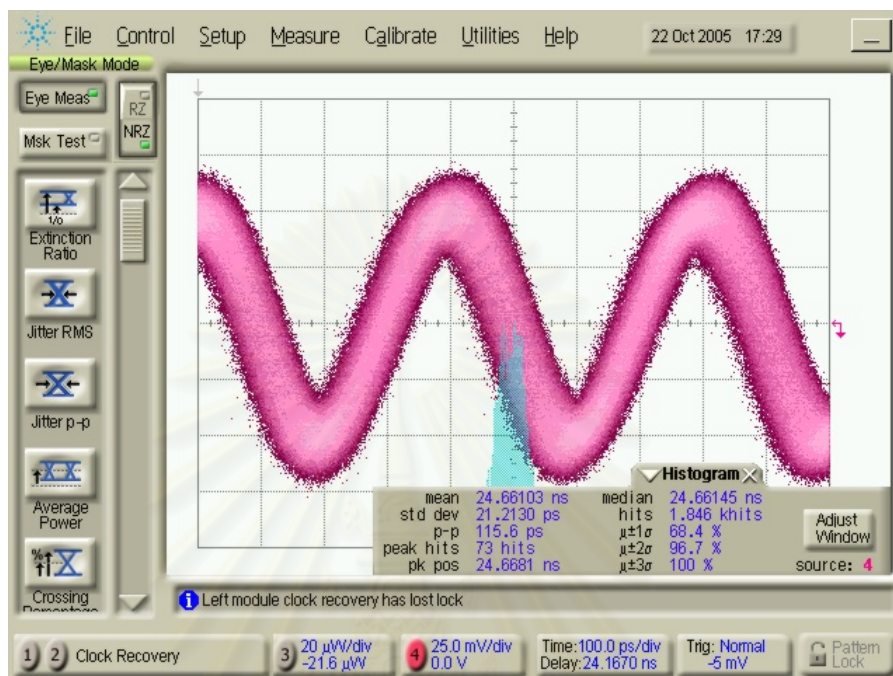
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ที่บอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1



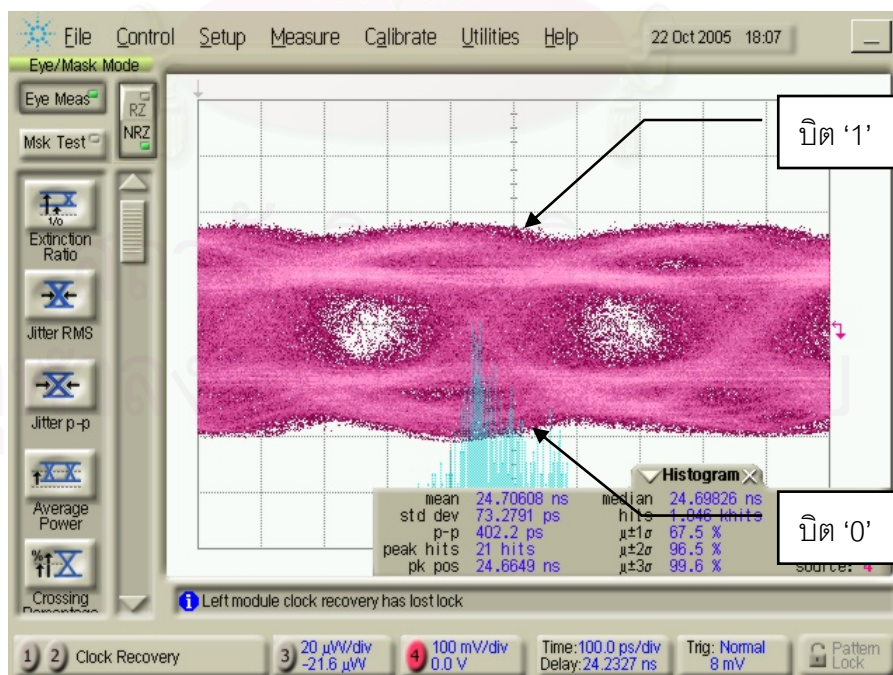
รูปที่ 4.8 แผนภาพบล็อกการทดลองต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง

ทำการทดสอบบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 โดยการจัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.8 คือป้อนสัญญาณข้อมูล 16 ช่องสัญญาณแบบ 2^7-1 PRBS และสัญญาณนาฬิกาจากบอร์ดวงจรรวมชนิด FPGA เข้ากับบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นในรูปที่ 4.7 (รายละเอียดของบอร์ด FPGA แสดงในภาคผนวก ข) การทดลองนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นจาก Evaluation boards ของอุปกรณ์แต่ละตัวมา

ประกอบกันในหัวข้อที่ 3.1.4 วัดสัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ และ สัญญาณขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเลเซอร์ได้สัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ

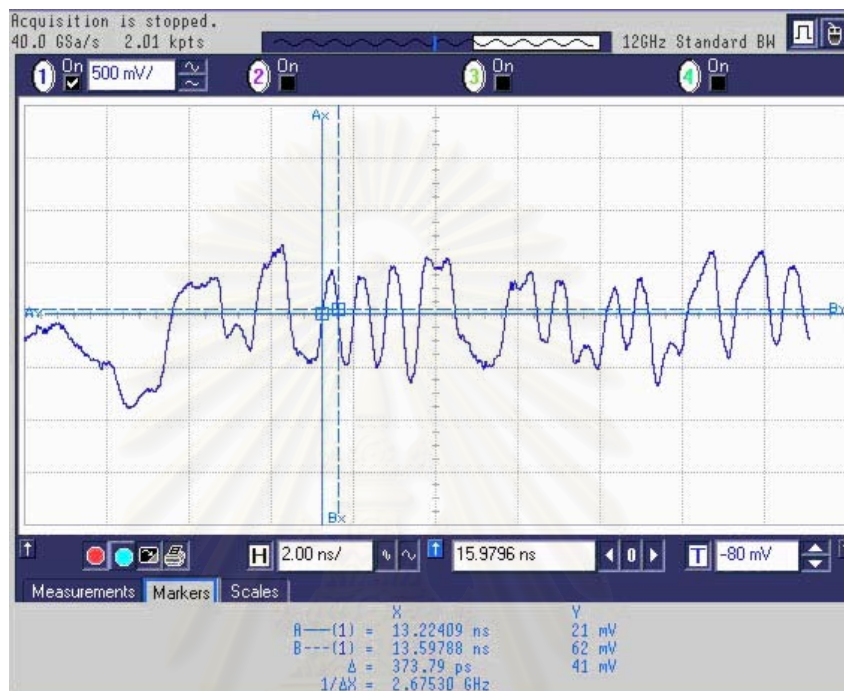


รูปที่ 4.9 สัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเลเซอร์วัดโดย DCA

ปัญหาที่พบคือจากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าที่ระดับสัญญาณของบิต '0' และบิต '1' มีลักษณะเป็นแทบหนา เพื่อเป็นการวิเคราะห์ถึงสาเหตุการเกิดความหนานี้ จึงทำการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งนี้ใหม่อีกครั้งโดยใช้ตัว MSO (Mixed Signal Oscilloscope) เพื่อดูลักษณะของรูปแบบข้อมูล ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัญญาณขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเซอร์วัดโดย MSO

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าการแกว่งเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานของบิต '1' และบิต '0' สาเหตุน่าจะเกิดจากการไม่คงที่หรือการแกว่งของไฟเลี้ยง ซึ่งรายละเอียดการแก้ไขจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2

4.3.2 PCB แบบที่ 2

จากการทดสอบต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 ในหัวข้อที่แล้วสามารถทำการปรับปรุงบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงได้โดยการออกแบบเป็น 4 ชั้น เพื่อให้มีชั้นของกราวด์กั้นระหว่างสัญญาณกับไฟเลี้ยงเพื่อป้องกันการรบกวนกันโดยกำหนดแต่ละชั้นดังนี้

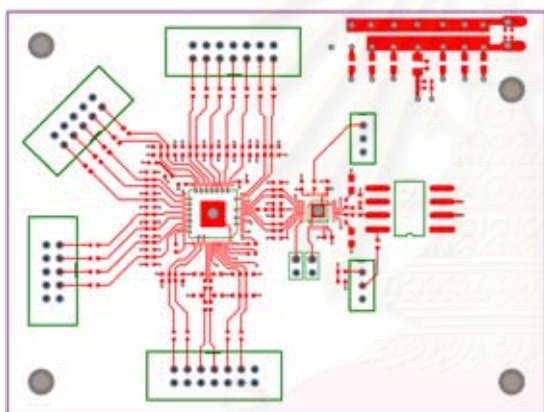
ชั้นที่ 1 TOP ใช้สำหรับเดินเส้นสัญญาณ

ชั้นที่ 2 GND ใช้เป็นเพลนกราวด์

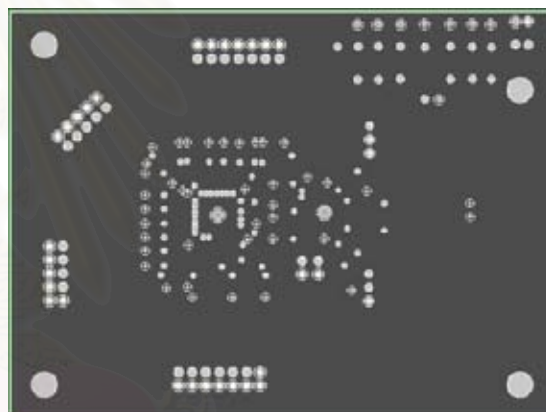
ชั้นที่ 3 VCC1 ใช้สำหรับเดินแหล่งจ่ายไฟ (VCCDIG, VCCO, VCCPLL, VCCVCO, VCCL, VCCD และ VCCR)

ชั้นที่ 4 VCC2 ใช้สำหรับเดินแหล่งจ่ายไฟ (VCCPECL)

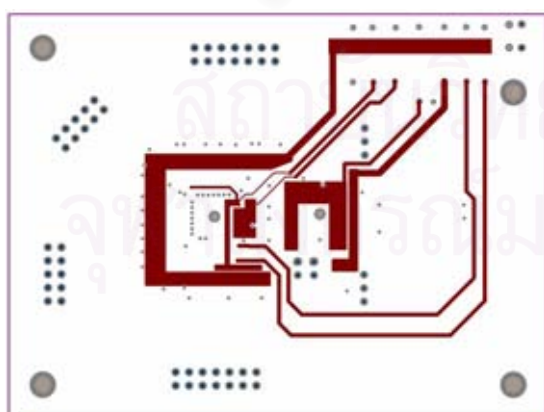
ที่แยกแหล่งจ่ายไฟ VCCPECL ออกจากแหล่งจ่ายไฟตัวอื่นเนื่องจากสัญญาณ LVPECL มีการแกว่งสูงถึง 800 mV ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนสูงที่สุด เพื่อเป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนจาก VCCPECL ไปสู่แหล่งจ่ายไฟตัวอื่นจึงทำการแยกออกมาอีกชั้นหนึ่งนั่นเอง แผ่น PCB นี้มีขนาด 3×4 นิ้ว เช่นเดียวกับแบบที่ 1 ลักษณะของแผ่น PCB แสดงดังรูปที่ 4.12 รูปที่ 4.12 (ก) แสดงชั้นที่ 1 ของแผ่น PCB ซึ่งมีลาย PCB เช่นเดียวกับแบบที่ 1 รูปที่ 4.12 (ข) แสดงชั้นที่ 2 ของแผ่น PCB รูปที่ 4.12 (ค) แสดงชั้นที่ 3 ของแผ่น PCB และรูปที่ 4.12 (ง) แสดงชั้นที่ 4 ของแผ่น PCB



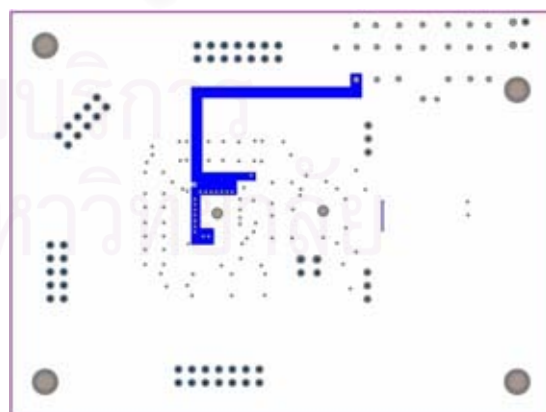
(ก) ชั้นที่ 1 ของแผ่น PCB



(ข) ชั้นที่ 2 ของแผ่น PCB



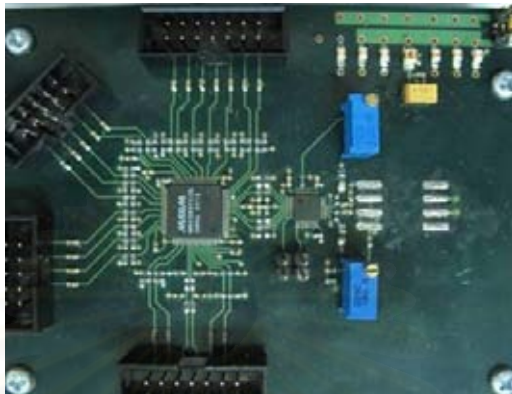
(ค) ชั้นที่ 3 ของแผ่น PCB



(ง) ชั้นที่ 4 ของแผ่น PCB

รูปที่ 4.12 ลักษณะ PCB ของบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2

นำแบบ PCB ที่ได้ปรับปรุงแล้วส่งไปทำยังบริษัทที่ผลิตแผ่น PCB เมื่อได้รับแผ่น PCB มากก็บัดกรีอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงบนแผ่น PCB อีกครั้ง ลักษณะบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.13

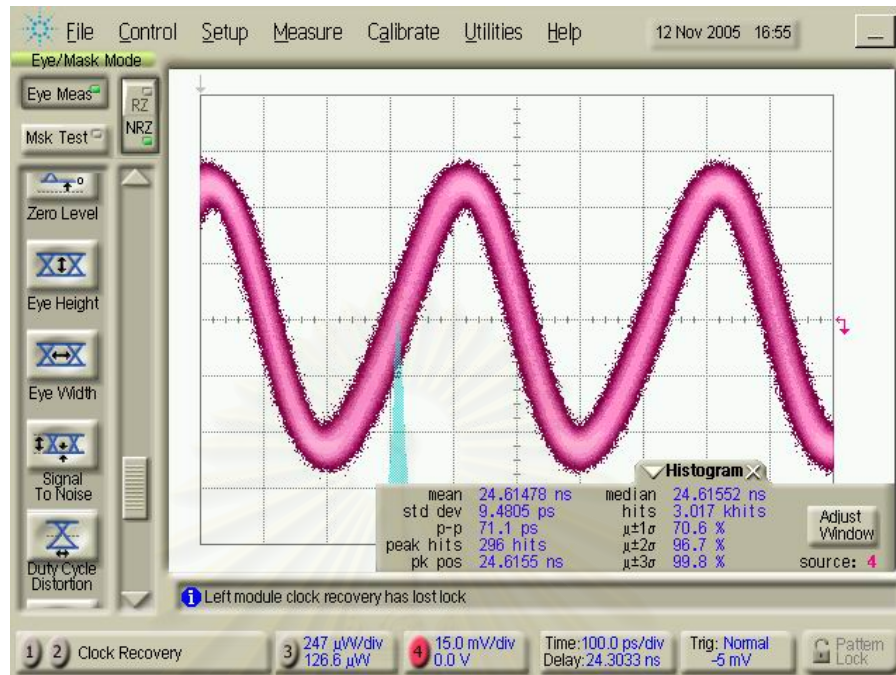


รูปที่ 4.13 บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 ที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ บัดกรีเรียบร้อยแล้ว

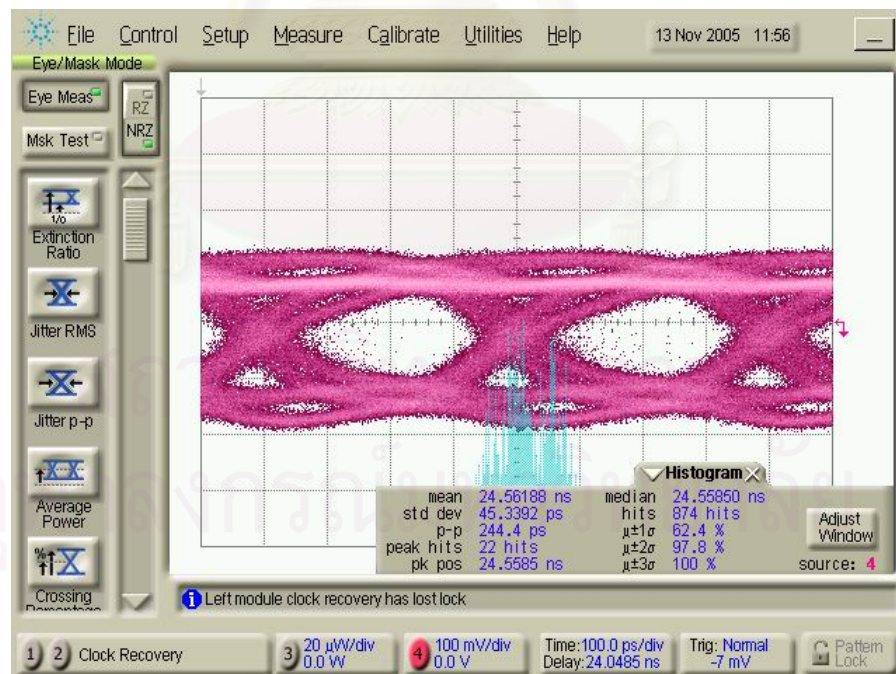
ผลการทดลองและการวิเคราะห์บอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดสอบบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 ในหัวข้อที่ผ่านมาคือป้อนสัญญาณข้อมูล 16 ช่องสัญญาณแบบ 2^7-1 PRBS และสัญญาณนาฬิกาจากบอร์ดวงจรรวมชนิด FPGA เข้ากับบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นในรูปที่ 4.13 วัดสัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ สัญญาณขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์ และสัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 ได้สัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ

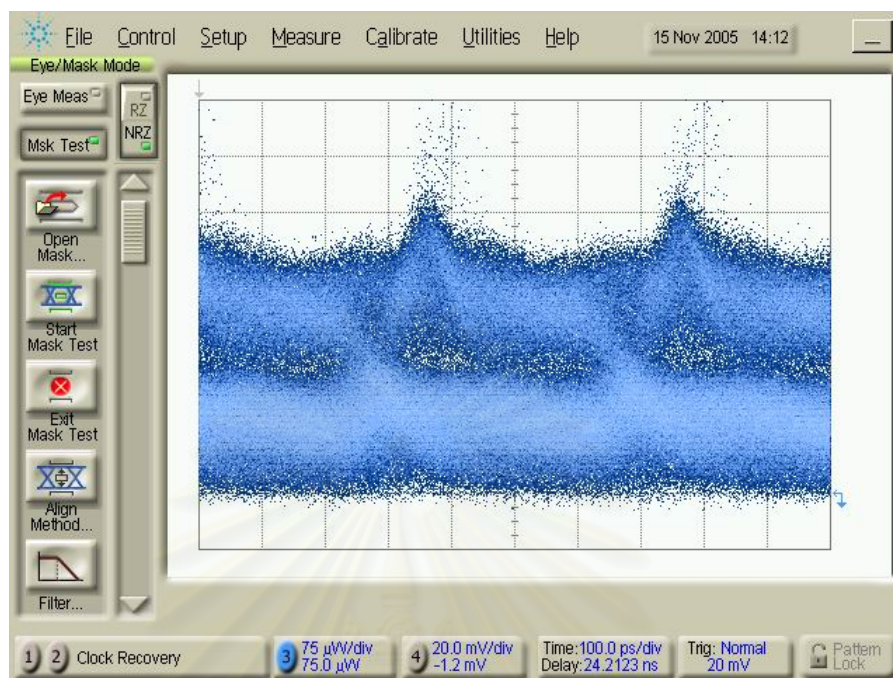
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 สัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 4.15 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเซอร์



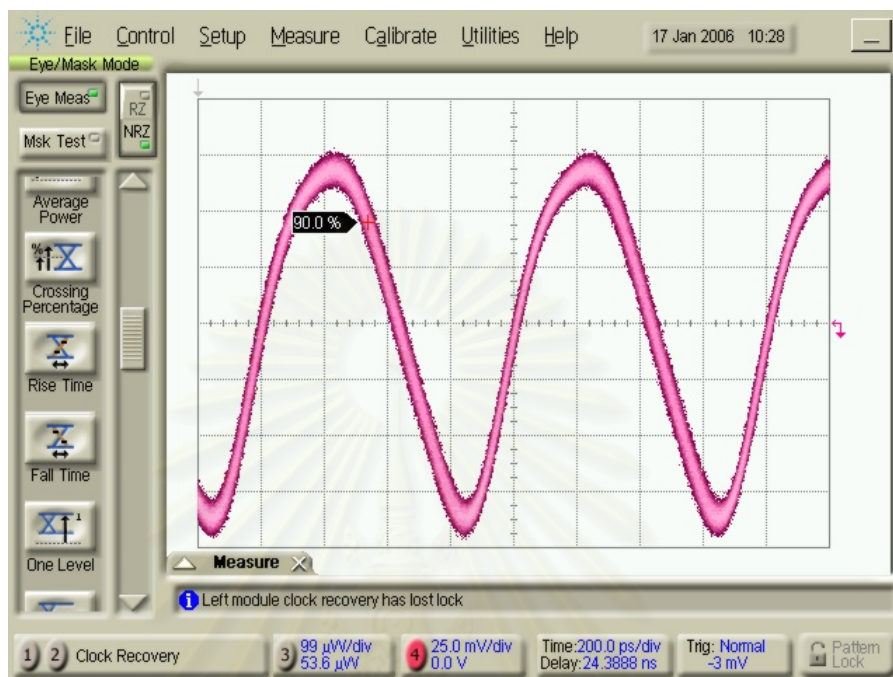
รูปที่ 4.16 สัญญาณขาออกจากบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าค่าการเดินของบอร์ดแบบที่ 2 มีค่าลดลงถึง 44.5 ps คือจาก 115.6 ps เป็น 71.1 ps นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเลเซอร์ของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.15 ยังเห็นได้ว่าตาของสัญญาณจากบอร์ดแบบที่ 2 มีการเปิดกว้างเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

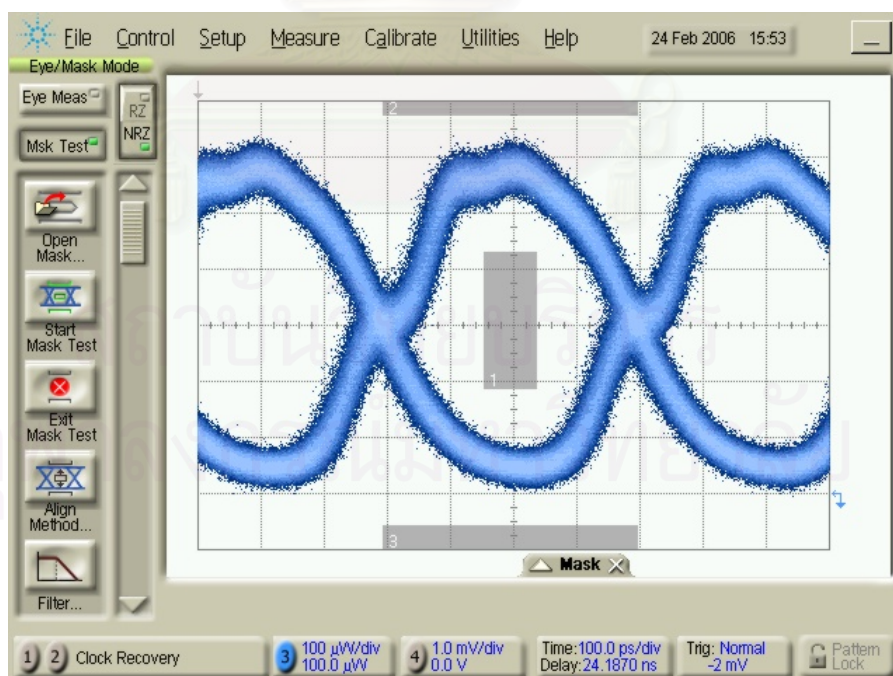
แม้ว่าสัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 จะมีค่าการเดินน้อยลงเป็น 71.1 ps ซึ่งเท่ากับ 0.18 UI แต่ค่าการเดินนี้ยังคงมากกว่า 0.10 UI ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน นอกจากนี้เมื่อสังเกตสัญญาณที่ตำแหน่งขาออกของชิพตัวขับเคลื่อนเลเซอร์ยังพบว่าสัญญาณรบกวนและการสะท้อนเกิดขึ้น จากที่กล่าวมาสามารถสรุปปัญหาที่พบได้เป็น (1) ค่าการเดินที่ตำแหน่งสัญญาณนาฬิกามีค่าสูงเกินไป (2) สัญญาณรบกวน (3) การสะท้อน

ข้อสันนิษฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนน่าจะเกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณขาเข้าจากภายนอกเข้าสู่บอร์ด ซึ่งคอนเนคเตอร์ในการเชื่อมต่อมีลักษณะเป็นแท่ง ๆ ติดกัน เพื่อเป็นการพิสูจน์จึงทำการทดลองส่งสัญญาณข้อมูล 1010 โดยไม่ใช้สัญญาณขาเข้าจากภายนอก

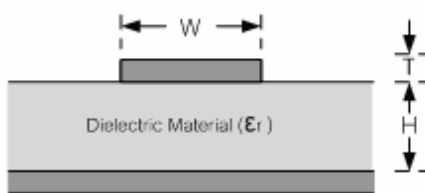
สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกของชิพตัวขับเคลื่อนและสัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแสดงดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อน โดยส่งข้อมูล 1010



รูปที่ 4.18 สัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 โดยส่งข้อมูล 1010



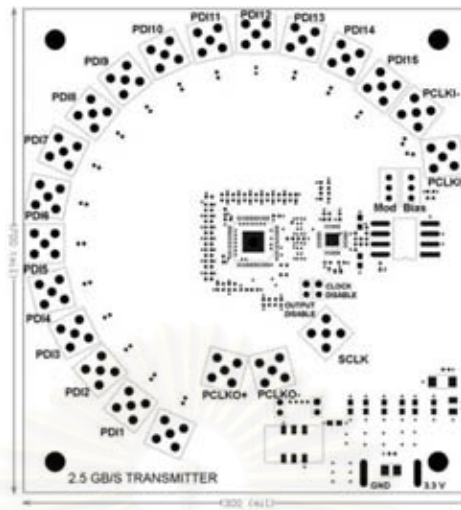
รูปที่ 4.20 ภาคตัดขวางของ microstrip line

$$Z_0 \approx \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \cdot \ln\left(\frac{5.98 \cdot H}{0.8 \cdot W + T}\right) \quad (4.1)$$

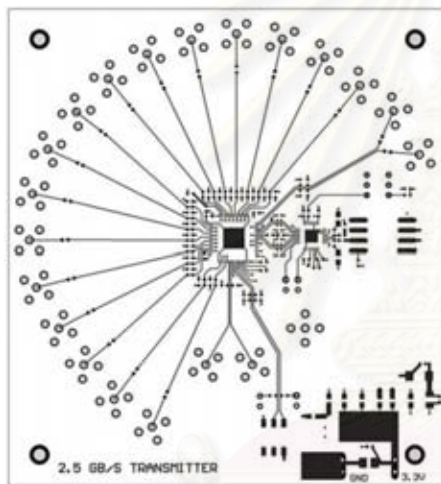
โดยที่ ϵ_r เป็นค่า dielectric constant ของแผ่นบอร์ด สำหรับ FR4 มีค่าประมาณ 4.5

ในการออกแบบเพื่อให้ค่า impedance ใกล้เคียงกับ 50 โอห์มมากที่สุดจึงกำหนดให้ $W = 12$ mils $T = 1.4$ mils และ $H = 13$ mils (1 mil = 0.001 นิ้ว) ซึ่งจะได้ค่า impedance ประมาณ 70 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากค่า W ถูกจำกัดด้วยพื้นที่เพราะความห่างระหว่างขาของชิปมีค่าน้อยทำให้ W หนาสุดได้เพียง 12 mils ส่วนค่า T และ H ถูกจำกัดด้วยความสามารถในการผลิตบอร์ดของบริษัทที่ใช้ ซึ่ง T สามารถหนาสุดได้ 1.4 mils และ H สามารถบางสุดได้ 13 mils จากการที่ impedance ไม่ match อาจจะทำให้เกิดการลดทอนมากขึ้น และมีการสะท้อนกลับของสัญญาณบ้าง

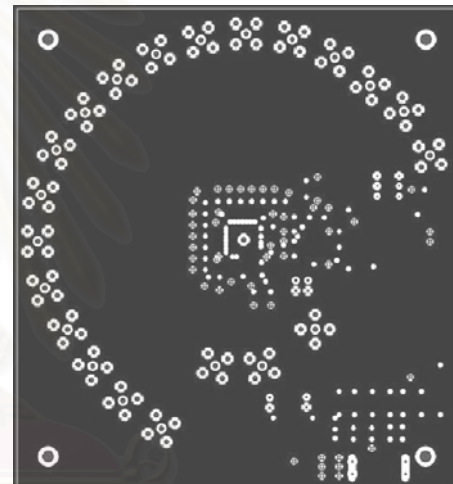
จากข้อกำหนดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถออกแบบแผ่น PCB จากลายวงจรรูปที่ 4.2 ได้ลักษณะของแผ่น PCB แบบที่ 3 ซึ่งเป็นแบบสุดท้ายได้ดังแสดงใน แผ่น PCB ที่ได้มีขนาด 4.7×4.3 นิ้ว รูปที่ 4.21 (ก) แสดงการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ลงบนแผ่น PCB รูปที่ 4.21 (ข) แสดงเส้นสัญญาณในชั้นที่ 1 ของแผ่น PCB รูปที่ 4.21 (ค) แสดงเพลนกราวนในชั้นที่ 2 ของแผ่น PCB รูปที่ 4.21 (ง) แสดงเส้นแหล่งจ่ายไฟในชั้นที่ 3 ของแผ่น PCB และรูปที่ 4.21 (จ) แสดงเส้นแหล่งจ่ายไฟในชั้นที่ 4 ของแผ่น PCB



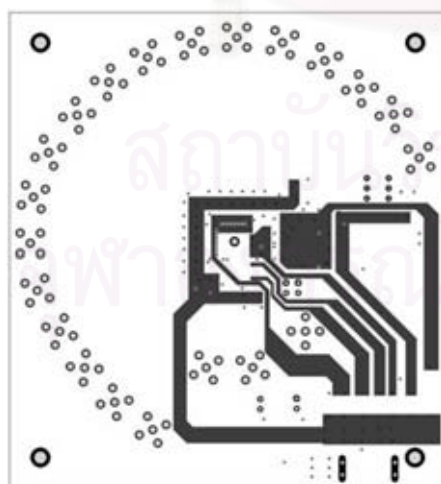
(ก) การจัดวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB



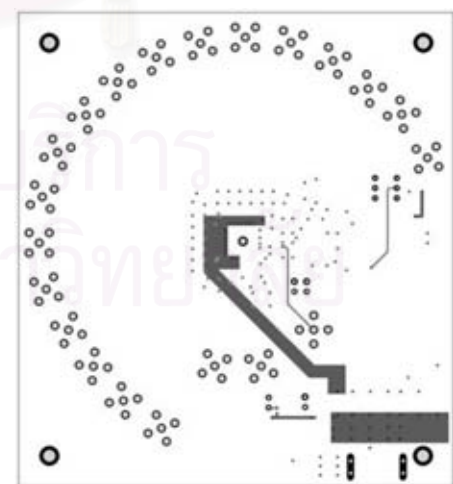
(ข) ชั้นที่ 1 ของแผ่น PCB



(ค) ชั้นที่ 2 ของแผ่น PCB



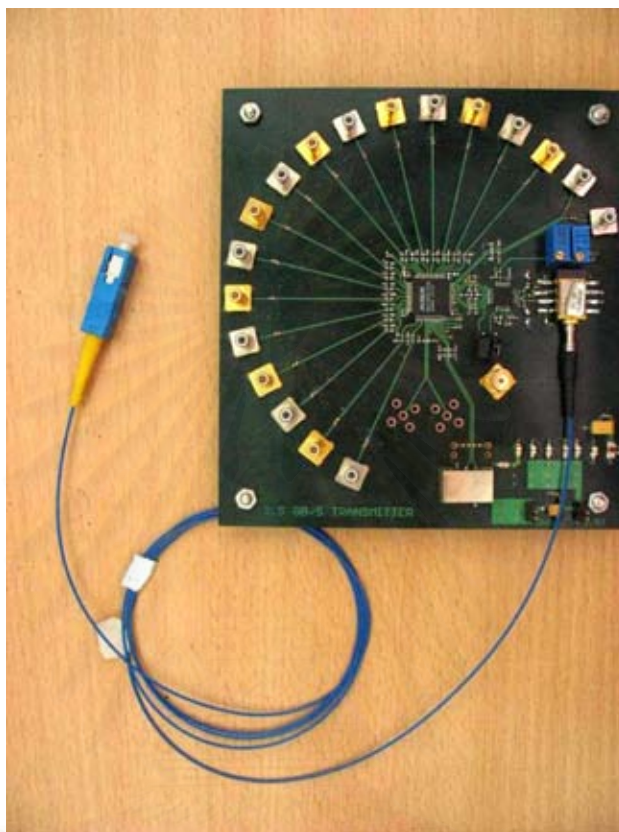
(ง) ชั้นที่ 3 ของแผ่น PCB



(จ) ชั้นที่ 4 ของแผ่น PCB

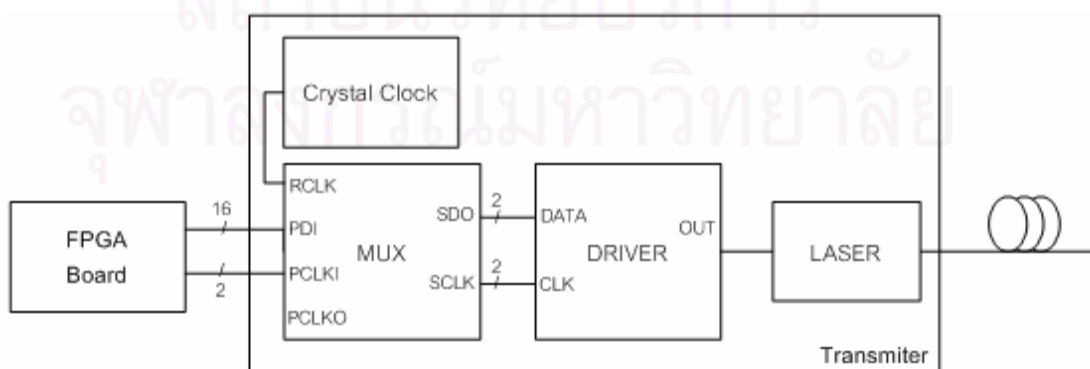
รูปที่ 4.21 ลักษณะ PCB ของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง

แบบของแผ่น PCB ที่ได้นี้จะถูกส่งไปทำยังบริษัทที่ผลิตแผ่น PCB เมื่อได้รับแผ่น PCB มากก็ทำการบัดกรีอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงบนแผ่น PCB อีกครั้งหนึ่ง ได้เป็นบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงดังแสดงในรูปที่ 4.22



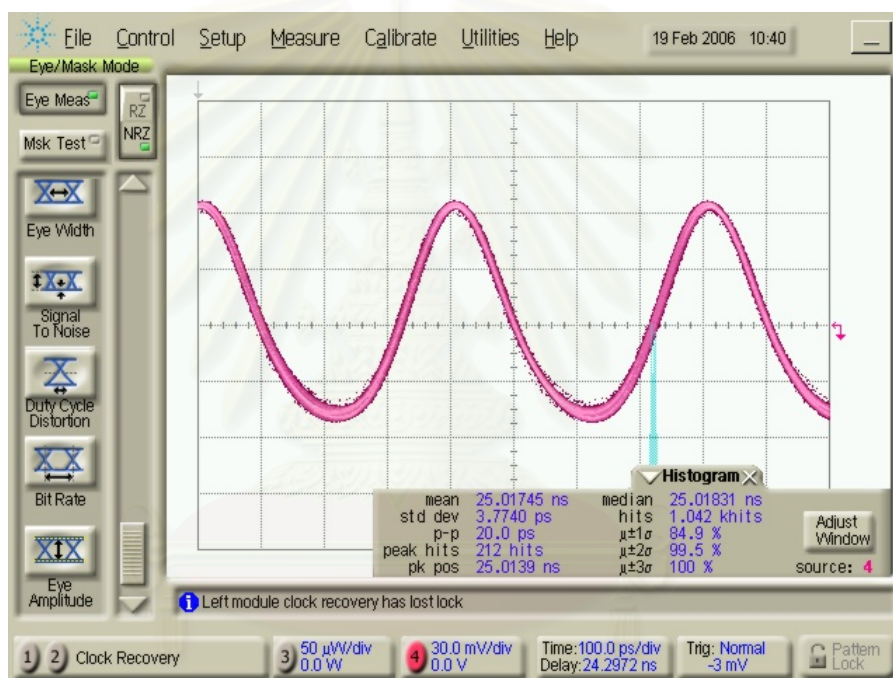
รูปที่ 4.22 บอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 ที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ บัดกรีเรียบร้อยแล้ว

ผลการทดลองและการวิเคราะห์บอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3

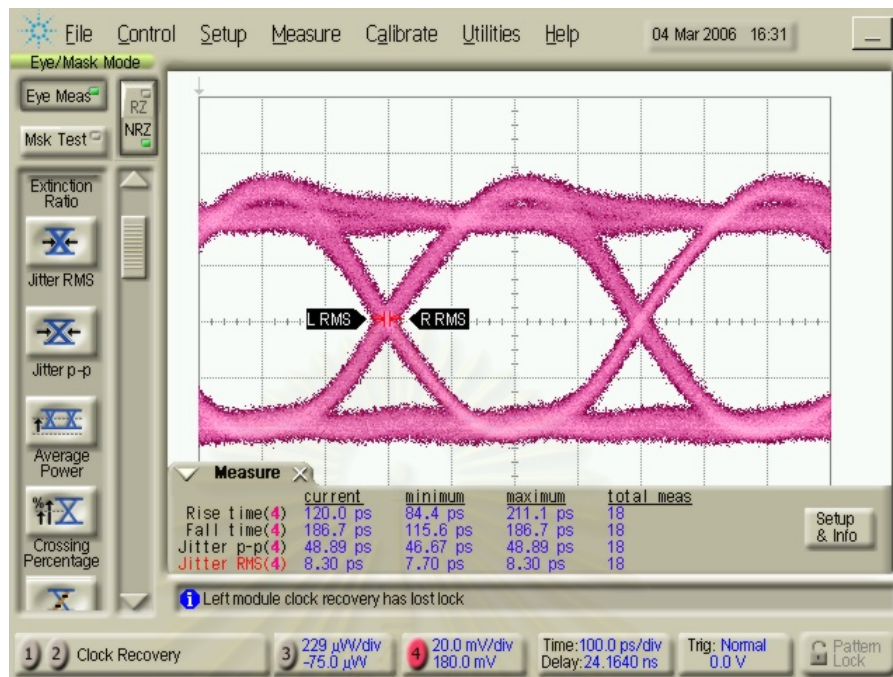


รูปที่ 4.23 แผนภาพบล็อกการทดลองต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3

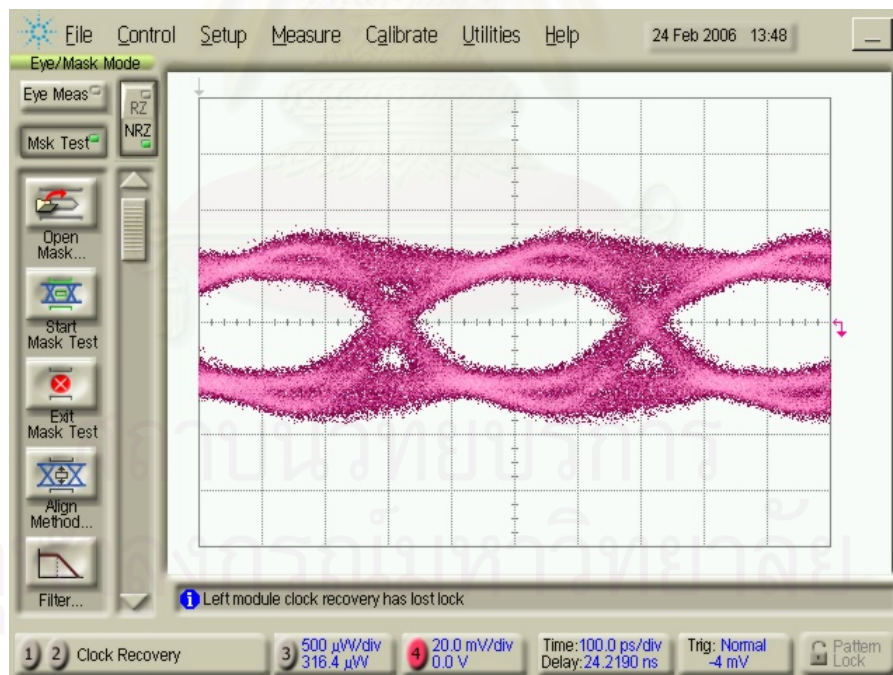
ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดสอบบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 1 และ 2 ในหัวข้อที่ผ่านมา คือป้อนสัญญาณข้อมูล 16 ช่องสัญญาณแบบ 2^7-1 PRBS เข้ากับบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นแต่จะเปลี่ยนจากการป้อนสัญญาณนาฬิกาจากบอร์ดวงจรรวมชนิด FPGA เข้าสู่ขาเข้าของสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง (RCLK) เป็นการต่อ crystal clock เข้าสู่ RCLK แทน แผนภาพบล็อกการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 วัดสัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ สัญญาณข้อมูลที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์ สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์ และสัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 ได้สัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.24 รูปที่ 4.25 รูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 ตามลำดับ



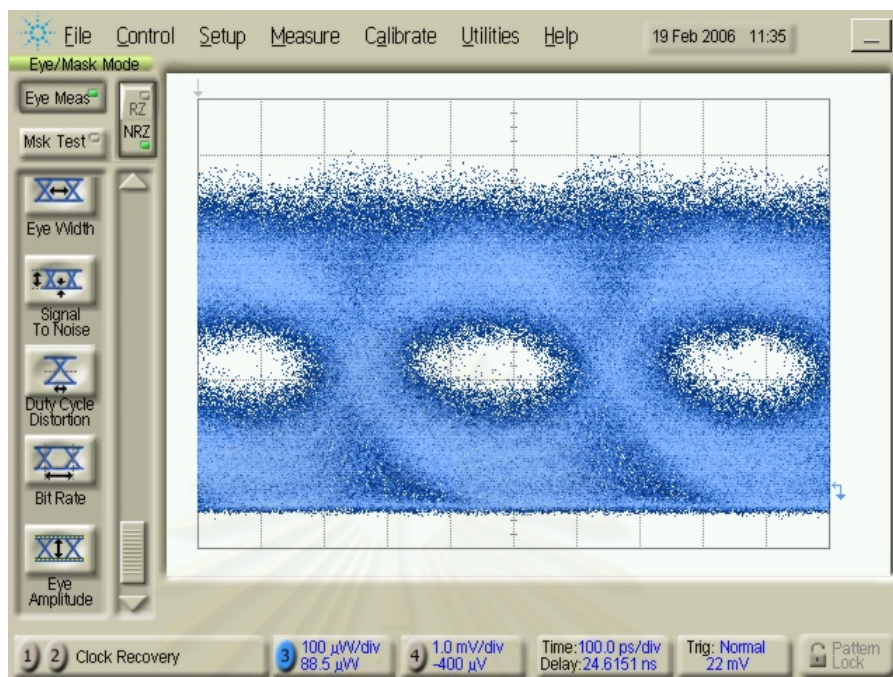
รูปที่ 4.24 สัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 4.25 สัญญาณข้อมูลที่ตำแหน่งขาออกจากชิพมัลติเพล็กซ์



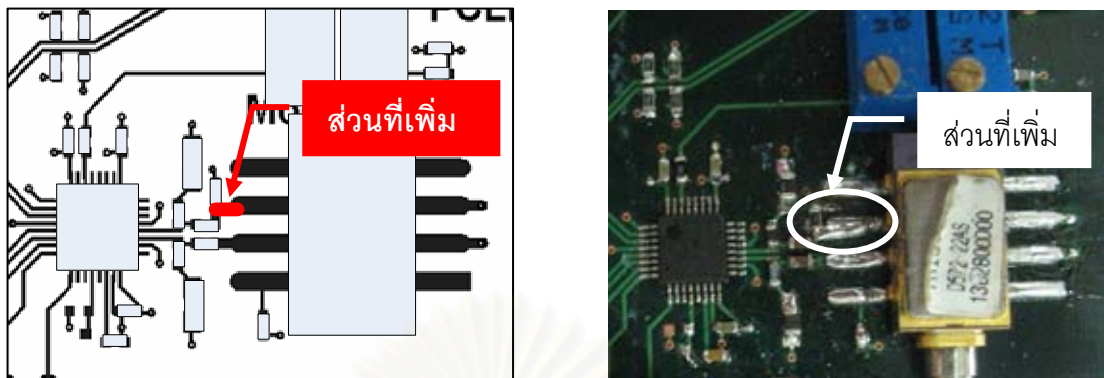
รูปที่ 4.26 สัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเคลื่อนเซอร์



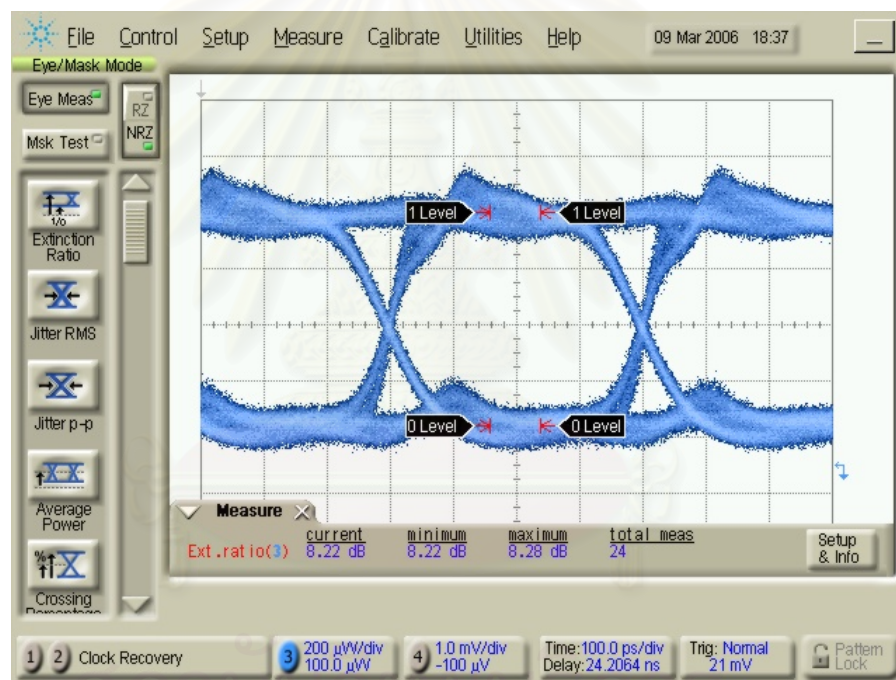
รูปที่ 4.27 สัญญาณขาออกจากบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณนาฬิกาที่ตำแหน่งขาออกจากชิพผลิตเพิลิกซ์ของบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าค่าการเดินของบอร์ดแบบที่ 3 มีค่าลดลงจาก 71.1 ps เป็น 20 ps หรือก็คือค่าการเดินเหลือเพียง 0.05 UI ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1 UI ตามต้องการ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่ตำแหน่งขาออกจากชิพตัวขับเลเซอร์ และสัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 ยังเห็นได้ว่าตาของสัญญาณจากบอร์ดแบบที่ 3 มีการเปิดกว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับบอร์ดแบบที่ 2

แม้ว่าสัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 ได้มีการปรับปรุงขึ้นจากเดิม แต่ลักษณะการเปิดออกของตายังน้อยอยู่ นอกจากนี้ยังมีความหนาของเส้นสัญญาณมาก ซึ่งน่าจะเกิดจากการไหลของกระแสไม่สม่ำเสมอ หรืออาจเกิดจากการไม่เท่ากันระหว่าง impedance ทั้งสองข้างของขาออกของชิพตัวขับเลเซอร์ (ค่าออกของชิพตัวขับเลเซอร์เป็นแบบผลต่าง) เพื่อเป็นการปรับปรุงสัญญาณขาออกนี้จึงเปลี่ยนวิธีการขับแบบข้างเดียวมาเป็นการขับแบบผลต่างแทนซึ่งสามารถทำได้โดยการเชื่อมวงจรจุด A กับจุด B ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เข้าด้วยกัน ลักษณะการเชื่อมต่อบนแผ่น PCB แสดงดังรูปที่ 4.28 สัญญาณขาออกจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงโดยการขับแบบผลต่างนี้แสดงดังรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ลักษณะของตาที่มีการเปิดกว้าง ชัดเจน ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.28 การเชื่อมต่อการกรับแบบข้างเดียวเป็นการรับแบบผลต่าง



รูปที่ 4.29 สัญญาณขาออกจากบอร์ดต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบที่ 3 โดยกรับแบบผลต่าง

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปวิธีการออกแบบ PCB สำหรับวงจรความถี่สูงได้ดังนี้

- การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นบอร์ด ควรคำนึงถึงค่าการลดทอนที่ความถี่ที่ต้องการใช้
- สัญญาณขาเข้าซีพีดิเฟล็กซ์ 16 ช่องสัญญาณและสัญญาณนาฬิกา ซึ่งเป็นสัญญาณขนานกันจะต้องออกแบบให้มีความยาวเท่ากัน

- สัญญาณที่เป็นคู่ผลต่างต้องออกแบบให้มีความยาวเท่ากัน และมีระยะห่างระหว่างคู่สัญญาณทางกันตลอดเส้นทางเดิน
- ระหว่างสัญญาณแบบข้างเดียวกับแบบข้างเดียว และสัญญาณแบบผลต่างกับแบบผลต่าง ต้องออกแบบให้ห่างกันเพื่อป้องกันการแทรกสัญญาณข้าม (crosstalk)
- ต้องมีการกรองสัญญาณรบกวนออกจากแหล่งจ่ายไฟเสมอ โดยเฉพาะตำแหน่งใกล้ที่สุดที่ป้อนเข้าสู่ชิพ
- ในการเชื่อมต่อกราวด์ควรออกแบบให้มีระยะทาง Return Path สั้นที่สุด
- ในการออกแบบควรทำเป็นหลายชั้น เพื่อป้องกันการรบกวนกันระหว่างสัญญาณกับไฟเลี้ยง
- ควบคุมการ match ของ impedance ในเส้นวงจรให้เท่ากับ 50 โอห์ม

บทที่ 5

ผลการทดสอบสมรรถนะตัวส่งสัญญาณทางแสงและการวิเคราะห์

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง ผลทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงว่าสามารถให้ผลได้ตรงตามมาตรฐาน ITU-T G.957 [18] ซึ่งรายละเอียดของมาตรฐานจะกล่าวในหัวข้อที่ 5.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยตัว DCA (Digital Communication Analyzer) และ ตัว OSA (Optical Spectrum Analyzer) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อที่ 5.2 สำหรับการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสงจะทำทั้งในโดเมนเวลาและความยาวคลื่น การทดสอบในโดเมนเวลาจะทำโดยการวัดแผนภาพตาเพื่อหาค่ากำลังทางแสงเฉลี่ย ค่าสัดส่วนเอ็กซ์ทิงชัน ค่า Rise time/Fall time ค่าการเดิน และการทดสอบ eye mask การทดสอบในโดเมนความยาวคลื่นจะทำโดยการวัดสเปกตรัมทางแสงเพื่อหาค่าความกว้างของสเปกตรัม และค่า Side Mode Suppression Ratio (SMSR) เพื่อให้ได้ผลตรงตามมาตรฐาน ITU-T G.957 ซึ่งวิธีการทดสอบและผลการทดสอบนี้จะกล่าวในหัวข้อที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ จากนั้นเพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของตัวส่งสัญญาณทางแสงในระบบจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยจะใช้ตัวรับสัญญาณทางแสงตามมาตรฐาน SONET/SDH รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการทดสอบและผลการทดสอบจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

5.1 มาตรฐานของสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณทางแสง

ในการส่งแบบ Intermediate Reach ที่ระยะทางประมาณ 15 กิโลเมตร ทาง ITU-T ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวส่งสัญญาณทางแสงสำหรับการเชื่อมต่อทางแสง และขนาดของ eye mask ใน STM-16 ไว้ใน ITU-T G.957 [18] ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2ตามลำดับ ค่า x และ y ของ eye mask เทียบได้ในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดสำหรับการเชื่อมต่อทางแสงใน STM-16

Parameter	Unit	Values
Operating wavelength range	nm	1430-1580
Transmitter		
Spectral characteristics:		
- maximum -20 dB width	nm	< 1
- minimum side mode suppression ratio	dB	30
Mean launched power:		
- maximum	dBm	0
- minimum	dBm	-5
Minimum extinction ratio	dB	8.2

ตารางที่ 5.2 ค่า x และ y ของ eye mask ใน STM-16

	STM-16
x_3-x_2	0.2
y_1/y_2	0.25/0.75

5.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดสัญญาณทางแสง

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณทางแสงมีด้วยกัน 2 ตัว
คือตัว DCA และ OSA

5.2.1 ตัว DCA (Digital Communication Analyzer)

DCA เป็นเครื่องออสซิลอสโคปสมรรถนะสูงที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณดิจิทัลออกมาได้เป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น signal to noise ratio, rise time, fall time, eye height and width เป็นต้น นอกจากนี้จะวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้แล้วยังสามารถตรวจจับสัญญาณทางแสงได้อีกด้วย โดยใช้ตัวรับสัญญาณทางแสงแบบ PIN ที่มีอยู่ภายใน ตัว DCA ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท Agilent รุ่น 86100C ซึ่งมีค่าความไวที่ -15 dBm และมีค่า electrical bandwidth สูงถึง 40 GHz เครื่องมือวัดตัวนี้สามารถที่จะหาค่า Q factor ได้จากค่า SNR (Signal to Noise Ratio) บนหน้าจอ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.2

$$SNR = \frac{Mean\ logic\ '1' - Mean\ logic\ '0'}{\sigma_{1'} + \sigma_{0'}} \quad (5.1)$$

5.2.2 ตัว OSA (Optical Spectrum Analyzer)

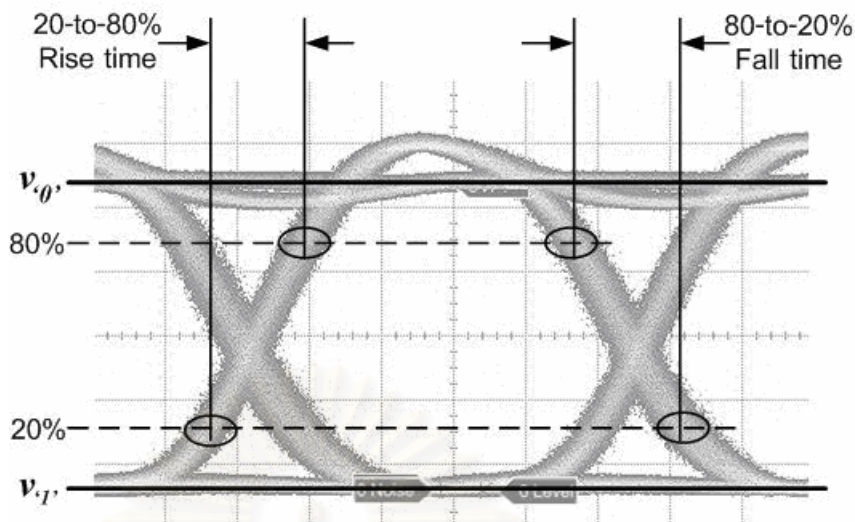
OSA เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณแสงในแต่ละความยาวคลื่น โดยภายในตัวเครื่องจะมี optical bandpass filter ซึ่งสามารถปรับจูนความยาวคลื่นได้ไว้ใช้สำหรับตรวจจับระดับพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นแสง ความถูกต้องแม่นยำของผลการวัดนี้จะขึ้นอยู่กับค่า resolution bandwidth ของเครื่อง ตัว OSA ที่ใช้นี้เป็นของบริษัท Agilent รุ่น 86140B สามารถปรับความละเอียดของ resolution bandwidth ได้แคบสุดที่ 0.06 nm

5.3 วิธีการวัดสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสง

ในการทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบในโดเมนเวลา กับในโดเมนความยาวคลื่น

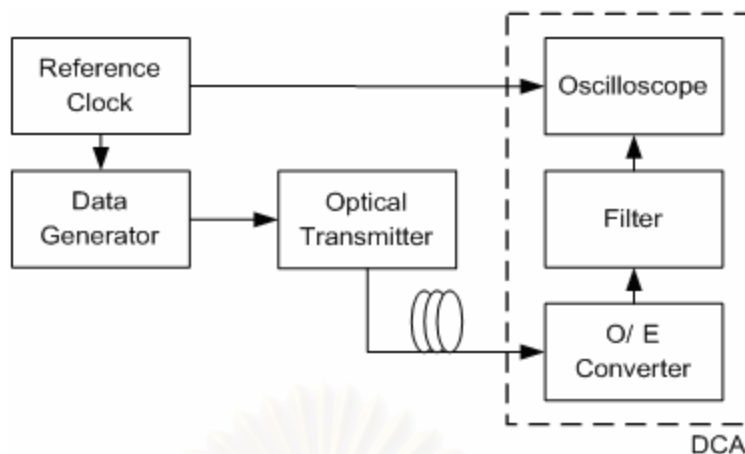
5.3.1 การทดสอบในโดเมนเวลา

ในการทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงในโดเมนเวลาจะทำโดยการวัดแผนภาพตาของสัญญาณที่ถูกส่งมาจากตัวส่งดังแสดงในรูปที่ 5.1 เพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่สนใจ ซึ่งประกอบด้วย (1) กำลังทางแสงเฉลี่ย (2) ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน (3) Rise time/Fall time (4) ค่าการเดิน และทำการทดสอบ eye mask



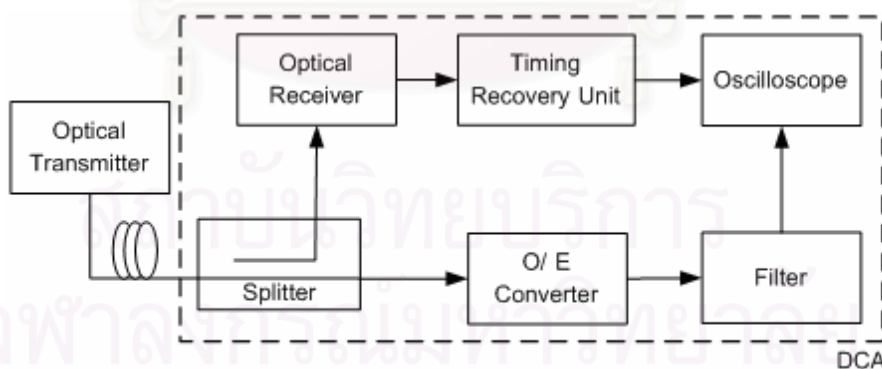
รูปที่ 5.1 แผนภาพตา

- **กำลังทางแสงเฉลี่ย** เป็นตัวบอกระดับกำลังทางแสงเฉลี่ยที่ถูกส่งออกไป ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดระยะทางที่สามารถส่งไปได้ ค่านี้จะใช้ในการคำนวณ Power budget
- **ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน** เป็นตัวบอกการเปิดกว้างของตา ยิ่งตาเปิดกว้างมากยิ่งดี ค่านี้สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของค่ากำลังทางแสงของบิต '1' (v_{i1}) และบิต '0' (v_{i0}) ตามสมการที่ (2.2)
- **ค่า Rise time/Fall time** เป็นตัวบอกเวลาในการเปลี่ยนแปลงจากบิต '0' ไปเป็นบิต '1' และบิต '1' ไปเป็นบิต '0' ตามลำดับ โดยวัดจากเวลาในการเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่ง 20% ไปเป็น 80% ของผลต่างของค่าเฉลี่ยบิต '0' และบิต '1' ค่านี้เรียกเป็น 20-80% rise time หรือบางครั้งอาจวัดจากตำแหน่ง 10% ไปเป็น 90% ค่านี้เรียกว่า 10-90% rise time
- **ค่าการเดิน** เป็นตัวบอกการสั่นของสัญญาณ โดยถ้ามีค่าน้อยจะเป็นตัวบอกว่าสัญญาณมีคุณภาพดี ถ้ามีค่ามากจะทำให้ไม่สามารถกู้คืนสัญญาณนาฬิกาได้และจะทำให้มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตสูงขึ้น การวัดค่าการเดินก็คือการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของขอบขาขึ้นและขอบขาลงของแผนภาพตา ที่ตำแหน่งจุดตัดของขอบขาขึ้นและขอบขาลงของตาดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยค่า Peak to Peak Jitter คือความกว้างทั้งหมดของจุดตัดของตา และค่า RMS (Root Mean Square) Jitter คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ยของฮิสโทแกรมของตำแหน่งจุดตัด



รูปที่ 5.4 แผนภาพบล็อกพื้นฐานของการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสง

การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำได้โดยการวัดแผนภาพตาด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป แผนภาพบล็อกพื้นฐานของการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสงแสดงดังรูปที่ 5.4 ในการทดสอบจำเป็นต้องมีตัวกำเนิดสัญญาณข้อมูล สัญญาณนาฬิกาอ้างอิง ตัวแปลงสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวกรอง และตัวออสซิลโลสโคป สำหรับตัว DCA ซึ่งเป็นออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถวัดสัญญาณทางแสงได้เลยโดยมีตัว PIN ภายใน นอกจากนั้นยังมีตัวกรองภายในด้วย ตัวกรองนี้เป็นแบบ Fourth Bessel-Thomson ตรงตามมาตรฐานของตัวรับสัญญาณใน SONET/SDH ในการทดลองนี้ทำโดยการป้อนสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงภายนอกไปเป็นตัว Trigger ให้ตัว DCA



รูปที่ 5.5 แผนภาพบล็อกของการทดสอบตัวส่งสัญญาณทางแสง

โดยการใช้ระบบกู้คืนสัญญาณนาฬิกา

สำหรับระบบที่ไม่มีสัญญาณนาฬิกาภายนอกจะต้องใช้ระบบกู้คืนสัญญาณนาฬิกาเข้ามาแทน เพื่อกู้คืนสัญญาณนาฬิกามาเป็นตัว Trigger ระบบกู้คืนสัญญาณนาฬิกา

ประกอบด้วย ตัวแยกสัญญาณแสง ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสง และวงจรถูกคั้นสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้จะถูกรวมอยู่ในมอดูลที่ใช้กับตัว DCA

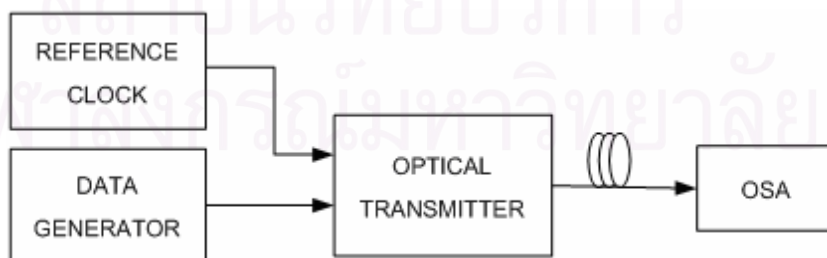
การใช้ตัวกรองมีเหตุผลอยู่ 2 อย่างด้วยกัน อย่างแรกคือเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรงกันสำหรับระบบการวัดที่แตกต่างกัน อย่างที่สองคือเพื่อกำหนดขอบเขตของแถบความถี่ ซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วยตัวรับสัญญาณที่ใช้งานทั่วไป การวัดแบบนี้จะใช้ในการทดสอบ eye mask เป็นต้น สำหรับการวัดแบบไม่ใช้ตัวกรองใช้เพื่อดูพฤติกรรมของตัวส่งสัญญาณโดยตรง เช่น ringing overshoot

ในการทดลองนี้ใช้ตัวกรองสำหรับการหาค่าการเดินที่ฝั่งรับ และการทดสอบ eye mask และไม่ใช้ตัวกรองสำหรับการหาค่ากำลังทางแสงเฉลี่ย ค่าสัดส่วนเอ็กซ์ทิงชัน ค่า Rise time/Fall time และค่าการเดินที่ฝั่งส่ง

5.3.2 การทดสอบในโดเมนความยาวคลื่น

ในการทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสงในโดเมนความยาวคลื่นจะทำการวัดสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกส่งมาจากตัวส่ง เพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่สนใจ ซึ่งประกอบด้วย ความกว้างของสเปกตรัมทางแสง และค่า SMSR

- ความกว้างของสเปกตรัมเป็นตัวกำหนดการกระจายออกของสัญญาณตามสมการที่ (2.6)
- Side Mode Suppression Ratio, SMSR เป็นตัวบอกค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังทางแสงของโหมดข้างเคียงเทียบกับกำลังทางแสงของสัญญาณ



รูปที่ 5.6 การวัดสัญญาณทางแสงในโดเมนความยาวคลื่นแสงด้วย OSA

การหาค่าความกว้างของสเปกตรัม และ SMSR จะทำการวัดสัญญาณแสงด้วยตัว OSA ดังแสดงในรูปที่ 5.6

5.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวส่งสัญญาณทางแสง

รายละเอียดทางไฟฟ้าของต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแสดงดังตารางที่ 5.3

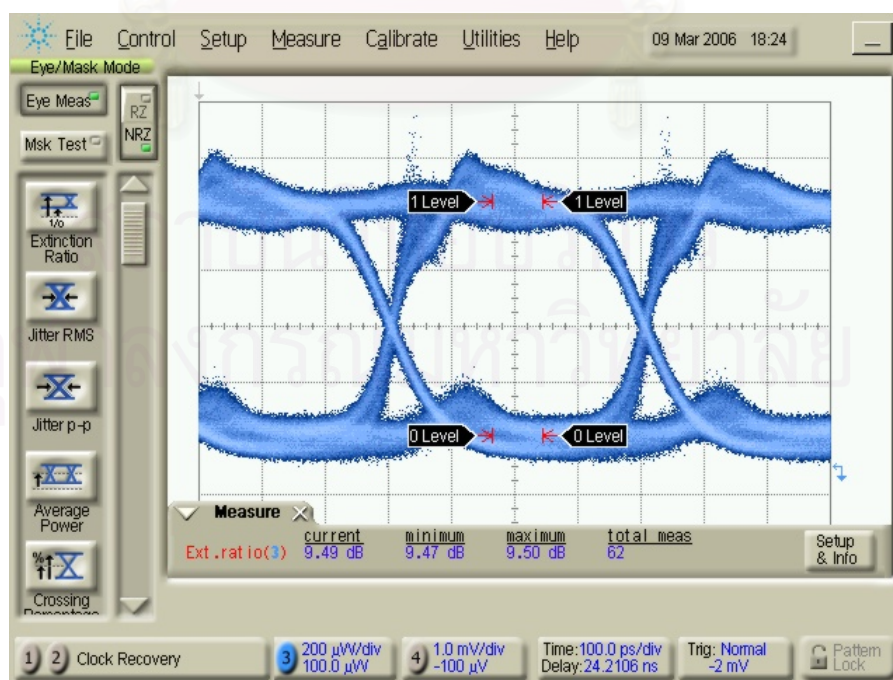
ตารางที่ 5.3 รายละเอียดทางไฟฟ้าของตัวส่งสัญญาณทางแสง

Parameter	Minimum	Typical	Maximum
Supply voltage	-	3.3 V DC	-
Power consumption	-	2.44 W	-
Input sensitivity data and clock voltage	0.3 V	0.8 V	0.9 V

ในการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือการทดสอบสมรรถนะในโดเมนเวลา และการทดสอบสมรรถนะในโดเมนความยาวคลื่น

5.4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะในโดเมนเวลา

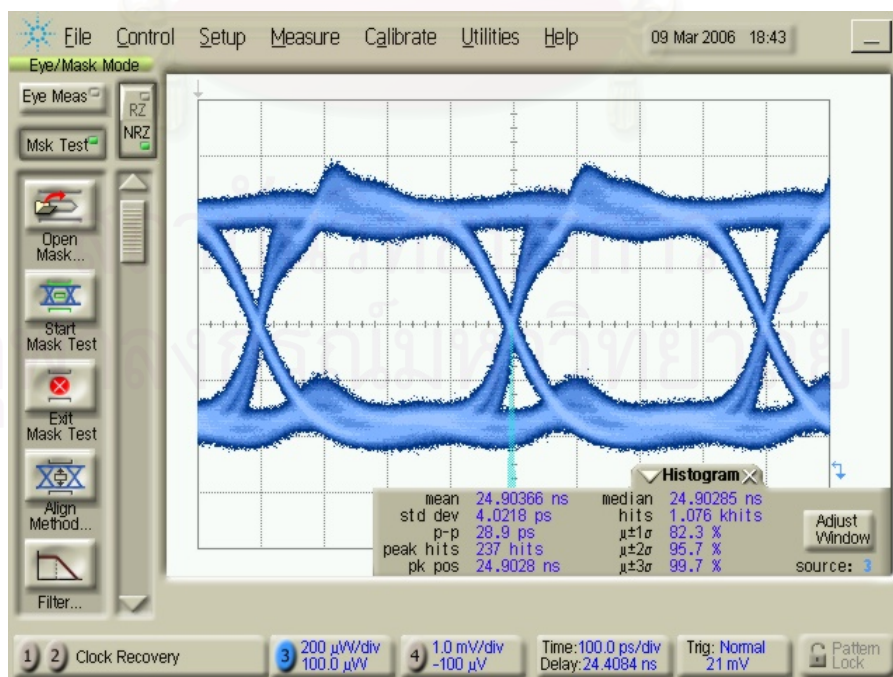
การทดสอบในโดเมนเวลาจะทำการวัดแผนภาพตาเพื่อหาค่ากำลังทางแสงเฉลี่ย ค่าสัดส่วนเอ็กซ์ทิงชัน ค่า Rise time/Fall time ค่าการเดิน และการทดสอบ eye mask



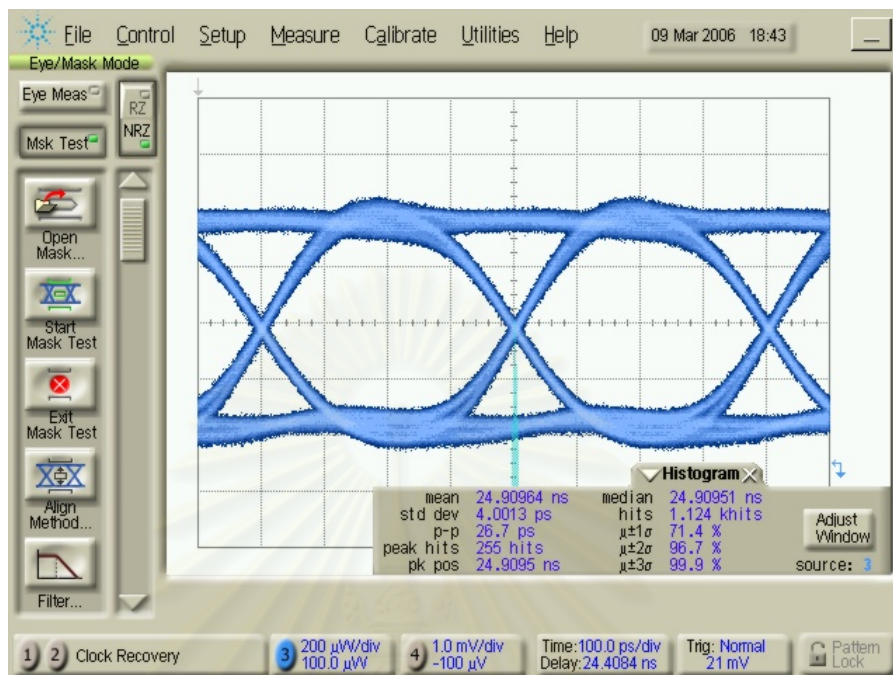
รูปที่ 5.7 สัญญาณขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง

สัญญาณขาออกที่ได้จากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงแสดงดังรูปที่ 5.7 สัญญาณทางแสงที่ได้นี้เป็นแบบ NRZ ซึ่งมีข้อมูลรูปแบบ PRBS ความยาว $2^7 - 1$ ส่งด้วยอัตราความเร็ว 2.5 Gb/s ที่ระดับกำลังทางแสงเฉลี่ย 0 dBm

- ค่ากำลังทางแสงเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 0 dBm ตรงตามมาตรฐาน ITU-T G.957
- ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันที่วัดได้สามารถปรับได้สูงถึงประมาณ 10 dB ซึ่งมีค่ามากกว่า 8.2 dB ตามมาตรฐาน ITU-T G.957 ที่กำหนดไว้
- ค่า 20-80% Rise time และ 80-20% Fall time ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 66.7 ps และ 95.6 ps ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 16.68% และ 23.9% ของคาบบิต ค่า 10-90% Rise time และ 90-10% Fall time ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 89.0 ps และ 143.4 ps ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 22.25% และ 35.85% ของคาบบิต
- ค่า Jitter p-p ที่วัดได้เท่ากับ 28.9 ps คิดเป็น 7.22% ของคาบบิต และค่า Jitter RMS เท่ากับ 4.02 ps คิดเป็น 1.01% สำหรับการรับสัญญาณข้อมูลนั้นต้องมีตัวกรองอยู่ด้วย ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.9 ชนิดของตัวกรองที่ใช้คือ fourth-order Bessel-Thomson filter ตามมาตรฐาน SONET/SDH จะได้ค่า Jitter p-p เท่ากับ 26.7 ps คิดเป็น 6.68% และค่า Jitter RMS เท่ากับ 4.00 ps คิดเป็น 1.00% ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยลงกว่าเดิม ผลของการเกิดการเดินจึงนับว่ามีค่าน้อยและสามารถยอมรับได้



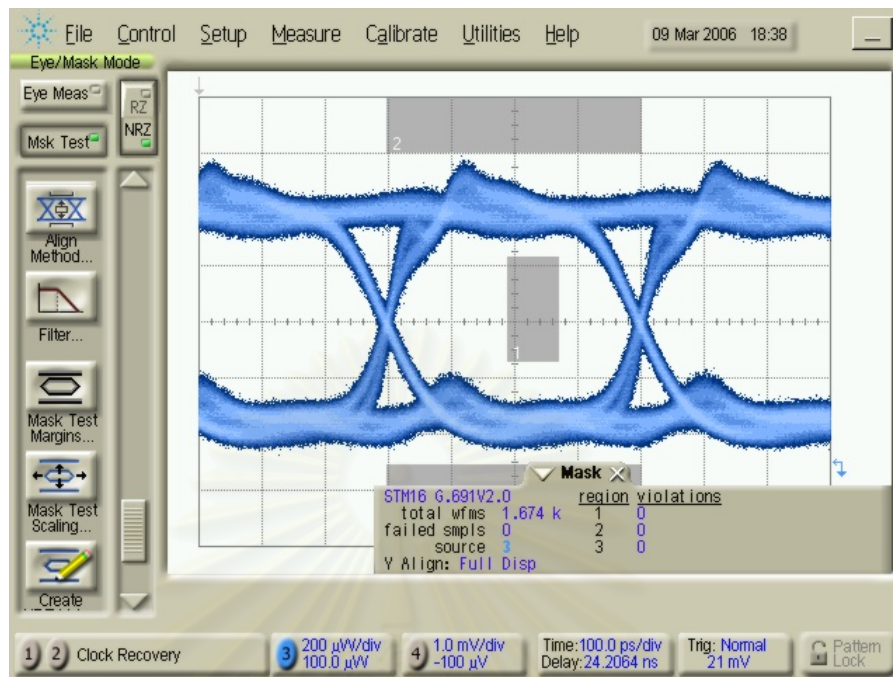
รูปที่ 5.8 ผลการวัด Jitter ของสัญญาณที่ฝั่งรับ (ไม่ใช่ filter)



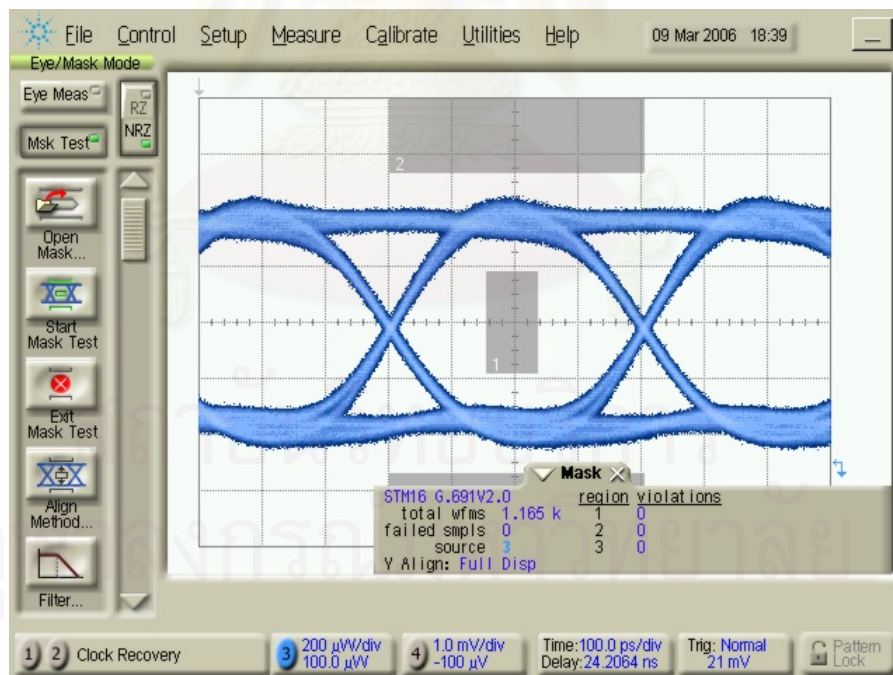
รูปที่ 5.9 ผลการวัด Jitter ของสัญญาณที่ฝั่งรับ (ใช้ fourth-order Bessel-Thomson filter)

- ผลการทดสอบ eye mask ของสัญญาณที่ไม่ผ่านและผ่านตัวกรองแสดงดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ จากการทดสอบรูปคลื่นมากกว่า 1000 ลูกพบว่าไม่มีบิตผิดพลาดเกิดขึ้น (error free) ทั้งสองกรณี จึงเป็นการพิสูจน์ได้ว่าบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นนี้สามารถใช้ส่งสัญญาณข้อมูลได้ สำหรับมาตรฐาน ITU-T G.957 นั้นการทดสอบ eye mask จะทำผ่านสัญญาณที่ผ่านตัวกรองดังรูปที่ 5.11 ซึ่งสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณนี้สามารถผ่าน eye mask ตามมาตรฐานได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบ eye mask ของสัญญาณที่ไม่ผ่านตัวกรอง

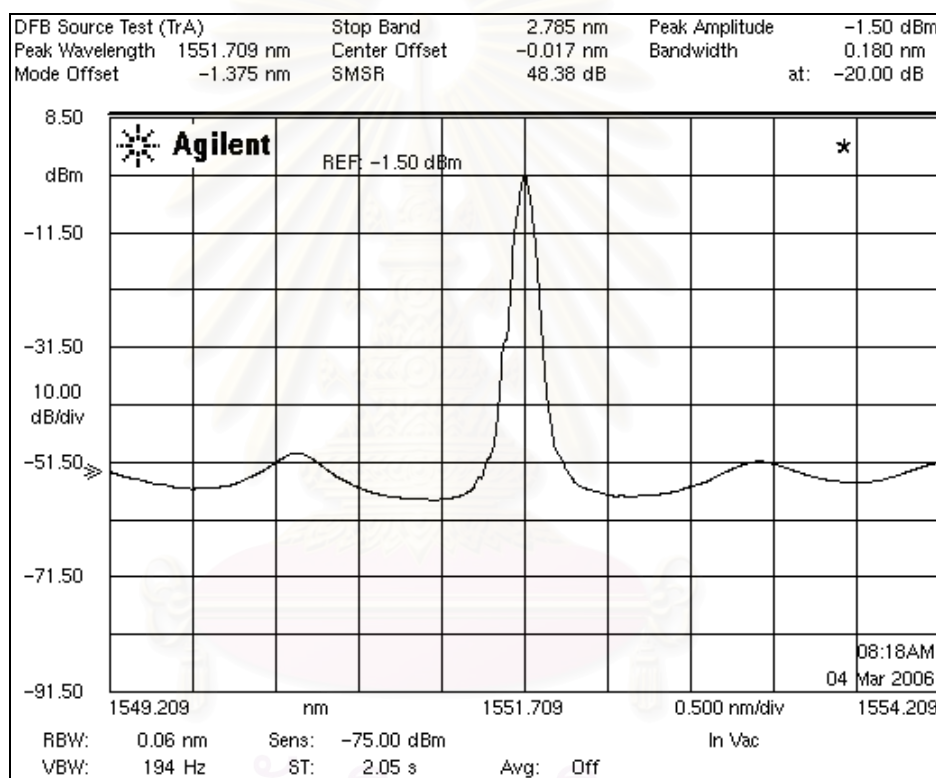


รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบ eye mask

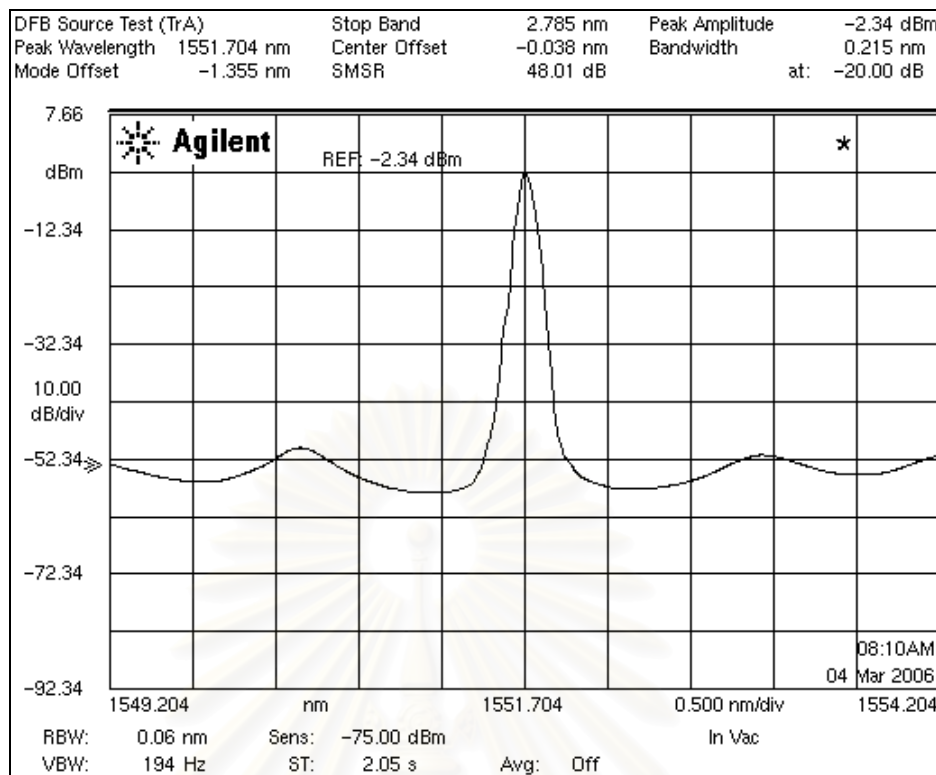
5.4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะในโดเมนความยาวคลื่น

การทดสอบสมรรถนะของสัญญาณทางแสงในโดเมนความยาวคลื่นจะทำการวัดสเปกตรัมทางแสงเพื่อหาค่า Peak Wavelength ค่า Maximum spectral width (Bandwidth) และค่า SMSR

สเปกตรัมของสัญญาณทางแสงของตัวเลเซอร์ก่อนมอดูเลตและหลังมอดูเลตด้วยสัญญาณ PRBS 2.5 Gb/s แสดงดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของสัญญาณทางแสงก่อนการมอดูเลต



รูปที่ 5.13 สเปกตรัมของสัญญาณทางแสงหลังจากมอดูเลตด้วยสัญญาณ PRBS 2.5 Gb/s

- ค่า Peak Wavelength ของสัญญาณก่อนมอดูเลตอยู่ที่ 1551.709 nm หลังมอดูเลตอยู่ที่ 1551.704 nm จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสในการมอดูเลตตัวเลเซอร์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า laser chirping
- ค่า Maximum spectral width (Bandwidth) ของสัญญาณทางแสงที่ -20 dB ก่อนการมอดูเลตมีค่า 0.180 nm หลังการมอดูเลตมีค่า 0.215 nm ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 nm ตรงตามมาตรฐาน ITU-T G.957 จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตมีการกว้างออกเพิ่มขึ้นเพียง 0.035 nm สำหรับในการคำนวณหาค่ากระจายออกของพัลส์จะใช้ค่าแบนด์วิดท์ที่ -3 dB ซึ่งมีค่าหลังการมอดูเลตเท่ากับ 0.105 nm ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าการกระจายออกของพัลส์เนื่องจากการกระจายโครมาติกในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวแบบมาตรฐาน (SSMF) ระยะทาง 15 กิโลเมตรได้เป็น $t_{GVD} = 18 \times 15 \times 0.105 = 28.35$ ps คิดเป็น 7.09% ของคาบพิต
- ค่า SMSR ก่อนมอดูเลตมีค่า 48.38 dB หลังการมอดูเลตมีค่า 48.01 dB สำหรับค่า SMSR นี้ยังมีค่ามากกว่า 30 dB ตามมาตรฐาน ITU-T G.957 ที่กำหนด

จากการทดสอบต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงทั้งในโดเมนเวลา และโดเมนความยาวคลื่นจะเห็นได้ว่าต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงสามารถให้สมรรถนะได้ตรงตามมาตรฐานมาตรฐาน ITU-T G.957 ตามที่ต้องการ

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาคำนวณ Rise-time Budget โดยสมมติให้ค่าแบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวรับมีค่าเท่ากับ 2.5 GHz จะได้ $t_{total} = \sqrt{(t_{rx}^2 + t_{GVD}^2 + t_{tx}^2)} = \sqrt{(89^2 + 28.35^2 + 140^2)} = 257.35$ ps คิดเป็น 64.34% ซึ่งยังคงน้อยกว่า 70% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการส่งสัญญาณแบบ NRZ [27] ดังนั้นจึงสามารถส่งได้ไกลถึง 15 กิโลเมตรตามที่ต้องการได้

5.5 วิธีการหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)

มีมาตรฐานมากมายในการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่เกิดขึ้นกับข้อมูลดิจิทัล วิธีที่ใช้ในทางปฏิบัติทั่วไปคือการทดสอบส่ง-รับสัญญาณข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงเวลา t แล้วหาสัดส่วนระหว่างจำนวนบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้น (N_e) เทียบกับจำนวนบิตทั้งหมดที่ทดลองส่งไป (N_t) ดังแสดงในสมการที่ (5.2)

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{B \times t} \quad (5.2)$$

โดยที่ B คืออัตราบิต (Bit rate) ในการส่งข้อมูลซึ่งเท่ากับ $1/T_b$

นอกจากการทดสอบส่ง-รับโดยตรง ก็ยังสามารถคำนวณหาอัตราความผิดพลาดบิตที่ภาครับได้จากการแจกแจงความน่าจะเป็นของสัญญาณข้อมูลที่ตรวจจับ โดยที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะเท่ากับค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด (P_e) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

$$BER = P_e = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (5.3)$$

ซึ่งค่าแฟกเตอร์ Q สามารถหาได้จากสมการที่ (5.4)

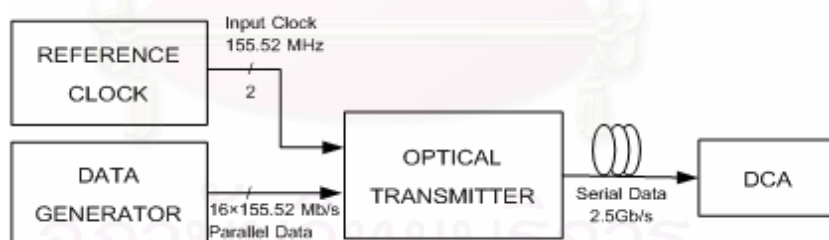
$$Q = \frac{v_{th} - v_{0'}}{\sigma_{0'}} = \frac{v_{1'} - v_{th}}{\sigma_{1'}} \quad (5.4)$$

- โดยที่ v_{th} คือค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน
 $v_{1'}$ คือค่าแรงดันที่บิต '1'
 $v_{0'}$ คือค่าแรงดันที่บิต '0'
 $\sigma_{0'}$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต '1'
 $\sigma_{1'}$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต '0'

ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ยอมรับได้ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ซึ่งโดยทั่วไปค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-12}

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตจากสมการที่ (5.3) ค่า Q หาได้จากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ในการวัดแผนภาพตาด้วยตัว DCA

ในการทดลองหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตนี้ จำเป็นต้องกำหนดลำดับของสัญญาณข้อมูลส่งเพื่อจำลองสภาพของการจราจรข้อมูลให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงให้มากที่สุด ซึ่งก็มีมาตรฐานของลำดับข้อมูลที่ใช้ส่ง-รับสัญญาณเป็นที่รู้จักกันคือรูปแบบ Pseudo-Random Bit Sequence (PRBS) ด้วยความยาว $2^n - 1$ บิต ซึ่งรายละเอียดการสร้างสัญญาณ PRBS แสดงในภาคผนวก ข

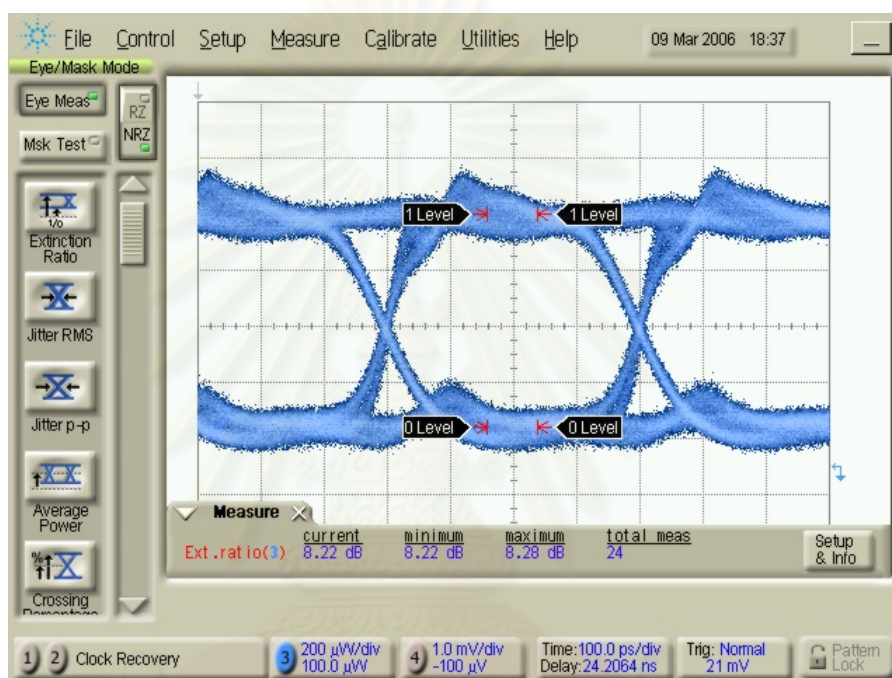


รูปที่ 5.14 การวัดหาค่า BER

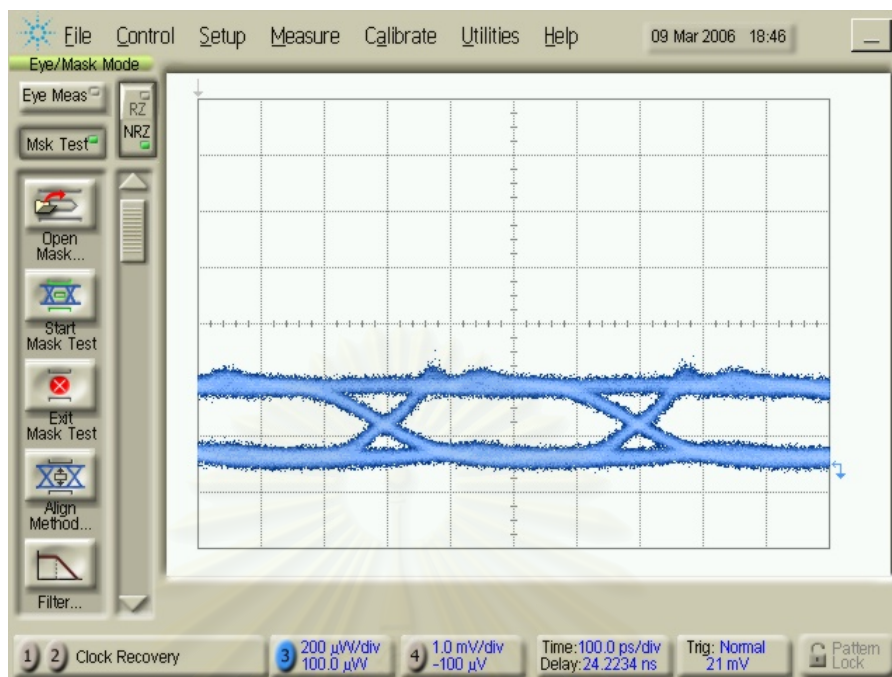
ในการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะทำการทดลองโดยใช้ DCA วัดสัญญาณทางแสงหลังเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวชนิดมาตรฐาน (Standard SMF, SSMF) ความยาว 15 กิโลเมตรดังรูปที่ 5.14

5.6 ผลการทดสอบส่งสัญญาณข้อมูลเพื่อวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิต

ในการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะทำการทดลองส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวแบบมาตรฐาน (SSMF) ระยะทางประมาณ 15 กิโลเมตร (Intermediate reach) โดยใช้ข้อมูลรูปแบบ 2^7-1 PRBS ส่งผ่านต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น โดยกำหนดให้ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันเท่ากับ 8.22 dB และกำลังทางแสงเฉลี่ยเท่ากับ 0 dBm



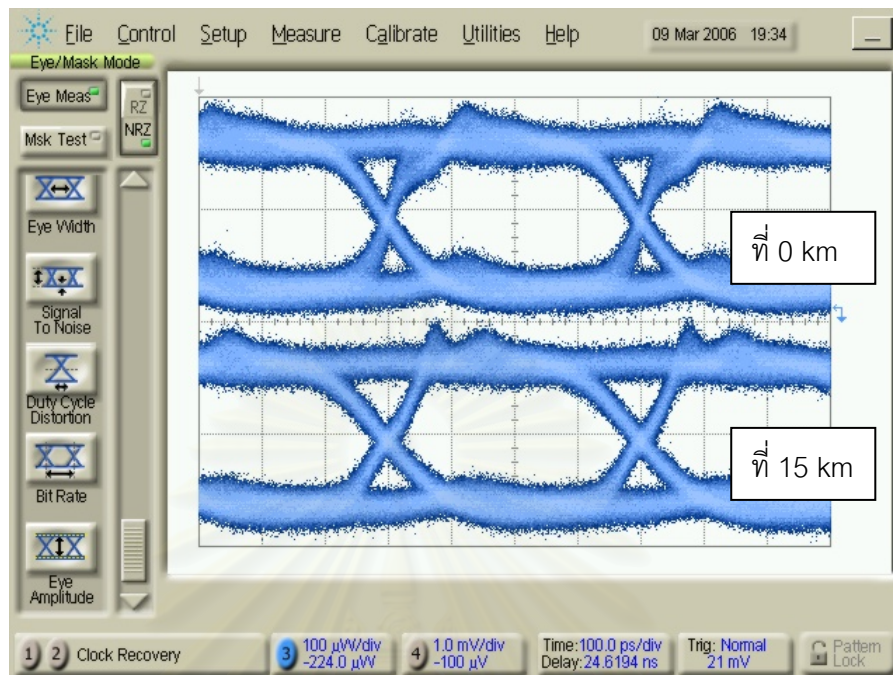
รูปที่ 5.15 แผนภาพตาของสัญญาณทางแสงก่อนส่งผ่านเส้นใยนำแสง



รูปที่ 5.16 แผนภาพตาของสัญญาณทางแสงหลังจากส่งผ่านเส้นใยนำแสงแบบ SSMF ระยะทาง 15 กิโลเมตร

แผนภาพตาของสัญญาณทางแสงก่อนและหลังจากส่งผ่านเส้นใยนำแสงแบบ SSMF ระยะทาง 15 กิโลเมตรแสดงดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ตามลำดับ วัดค่าการสูญเสียพลังงานในระบบได้เท่ากับ 5 dB ซึ่งมีความสูงกว่าการคำนวณค่าลดทอนพลังงานในเส้นใยนำแสงที่ได้ (3 dB) ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียพลังงานที่ตำแหน่ง Fusion splices 12 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงกับคอนเนคเตอร์ชนิด SC 14 ตำแหน่ง รวมทั้งอาจจะเกิดจากความบกพร่องภายในสายและความสะอาดในการเชื่อมต่อคอนเนคเตอร์ของ SSMF จำนวน 6 ม้วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

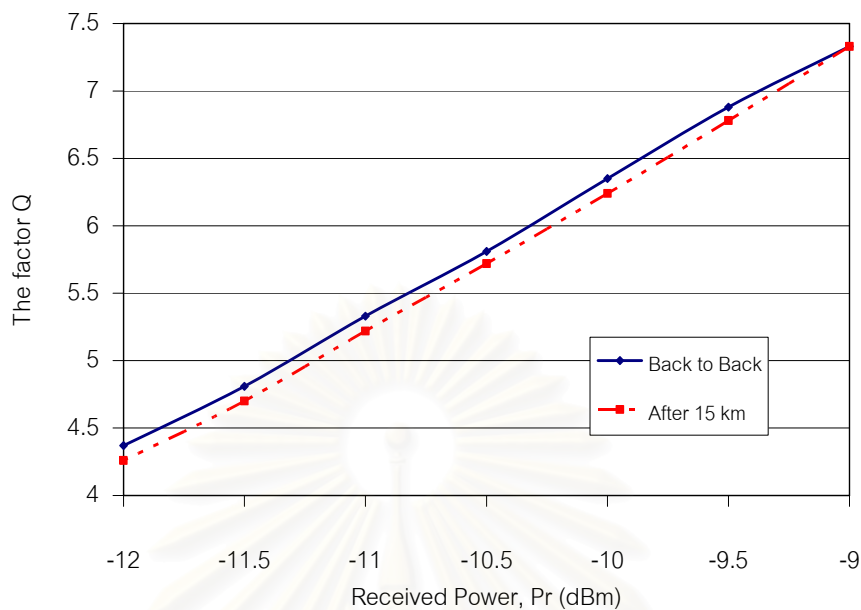


รูปที่ 5.17 การกระจายออกของพัลส์ของสัญญาณทางแสงที่ตำแหน่ง 0 กิโลเมตรเทียบกับที่ตำแหน่ง 15 กิโลเมตร ที่ระดับกำลังทางแสงเท่ากับ -5 dBm

จากรูปที่ 5.17 สามารถวัดค่าการกระจายออกของพัลส์จากตำแหน่ง 0 กิโลเมตร เป็น 15 กิโลเมตร ที่ระดับกำลังทางแสงเท่ากับ -5 dBm ได้เป็น 21.17 ps (425.82 ps - 404.65 ps) ซึ่งค่าที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกระจายออกที่คำนวณได้ (28.4 ps)

ในการวัดค่าแฟกเตอร์ Q ระดับกำลังงานของสัญญาณทางแสงก่อนต่อเข้ากับ DCA จะถูกวัดโดย power monitor ซึ่ง power monitor นี้สามารถปรับค่าการลดทอนสัญญาณทางแสงได้ด้วย เมื่อใช้ DCA ทำการวัดค่าแฟกเตอร์ Q จากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ระดับกำลังงานขาเข้าค่าต่าง ๆ แล้ว สามารถนำมาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 5.18

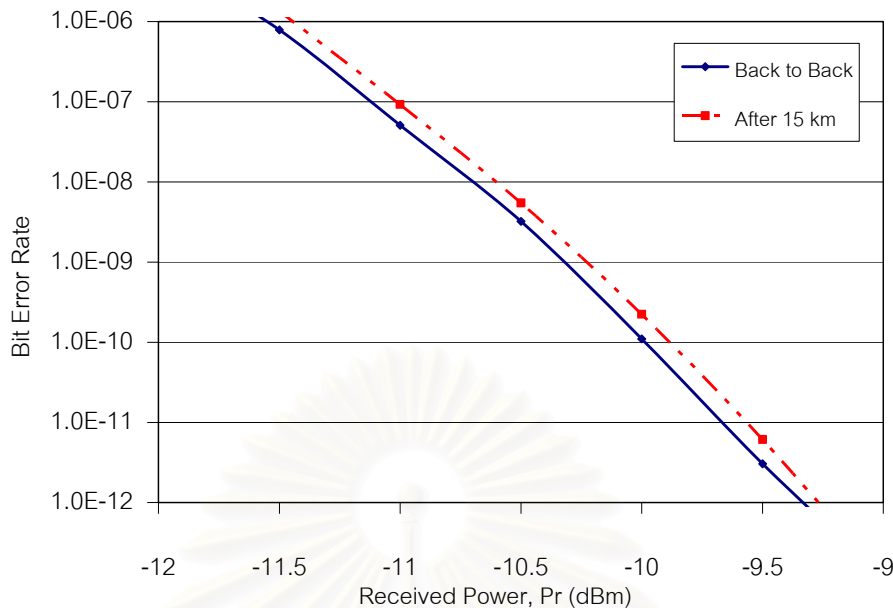
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.18 กราฟค่าแฟกเตอร์ Q กับกำลังทางแสงที่ได้รับ

กราฟค่าแฟกเตอร์ Q กับกำลังทางแสงที่ได้รับในรูปที่ 5.18 นี้ ได้จากการทดลอง 2 กรณีด้วยกัน คือ แบบ back-to-back และแบบส่งผ่าน SSMF ระยะทาง 15 กิโลเมตร เมื่อนำค่าแฟกเตอร์ Q ที่ได้มาคำนวณเป็นค่าอัตราความผิดพลาดบิตตามสมการที่ (5.3) จะได้กราฟอัตราความผิดพลาดบิตดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยที่แฟกเตอร์ Q มีค่าเท่ากับ 5.99781 จะได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-9} ตามมาตรฐานการส่งสัญญาณ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นนี้สามารถส่งผ่านระบบได้ด้วยอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า 10^{-9} ตามมาตรฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 กราฟอัตราความผิดพลาดบิต

จากรูปที่ 5.19 เส้นอัตราความผิดพลาดบิตของ back-to-back จะเป็นตัวบอกสมรรถนะพื้นฐานของตัวส่งสัญญาณทางแสงซึ่งใช้เป็นเส้นอ้างอิงสำหรับการหาค่า power penalty ของการส่งสัญญาณในกรณีอื่น จากรูปจะได้ power penalty ที่ BER เท่ากับ 10^{-9} เป็น 0.1 dB ค่า penalty นี้มีสาเหตุมาจากการกระจายโครมาติกภายในเส้นใยนำแสง และอาจจะเกิดจากการสะท้อนกลับของพลังงานที่คอนเนคเตอร์ และ จุด splice หลายตำแหน่งด้วยกัน

จะเห็นได้ว่าเส้นใยนำแสงที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีจุดเชื่อมต่อ และตำแหน่ง splice มากมายซึ่งสามารถเทียบได้กับระบบที่ใช้งานอยู่จริงอย่างเช่นเครือข่ายเส้นใยนำแสงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงคาดได้ว่าตัวส่งสัญญาณทางแสงนี้สามารถส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายจริงได้ด้วยอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่า 10^{-9} เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา ออกแบบ ประกอบ และทดสอบต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรงที่ความเร็ว 2.5 Gb/s เพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงต่อไป การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงจะพิจารณาถึงประสิทธิภาพ ความเหมาะสมในการใช้งาน ข้อดี ข้อเสียของวิธีและเทคนิคที่ใช้ในการส่งสัญญาณ เพื่อให้ได้วิธีที่มีความสะดวกและเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน การวัดประสิทธิภาพของต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่สร้างขึ้นทำโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ITU-T G.957 ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

ในตัวส่งสัญญาณทางแสง วิธีที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้ากับแสงมี 3 ทางด้วยกันคือ ทางความเข้ม ทางเฟส และทางความถี่ จากการศึกษางานที่เกี่ยวข้องพบว่า การมอดูเลตข้อมูลทางความเข้มเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุด เนื่องจากความไม่ยุ่งยากของวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ นอกจากนี้แล้วยังเป็นวิธีที่สามารถตรวจจับได้ง่ายที่สุด เพราะสามารถทำได้โดยใช้ตัวตรวจจับแสงเพียงตัวเดียวในการแปลงสัญญาณแสงมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีนี้ในการออกแบบตัวส่งสัญญาณแสง ส่วนวิธีในการมอดูเลตสัญญาณเข้ากับแหล่งกำเนิดนั้นใช้การมอดูเลตโดยตรง เนื่องจากใช้พลังงานน้อยและราคาตัวเลเซอร์ที่ใช้ถูกกว่าราคารวมของตัวมอดูเลตทางแสงกับตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่องที่ใช้ในการมอดูเลตภายนอก

เนื่องจากการส่งข้อมูลจากผู้ใช้ทั่วไปจะมีลักษณะเป็นสัญญาณความเร็วต่ำ เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจึงได้นำการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลามาใช้ในตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วย จากวิธีและเทคนิคที่เลือกใช้ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ตัวส่งสัญญาณทางแสงจึงประกอบไปด้วย ตัวมัลติเพล็กซ์ ตัวขับเลเซอร์ และตัวเลเซอร์ ในการเลือกอุปกรณ์เหล่านี้จะคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการลดทอนและบิดเบี้ยวไปของสัญญาณ คือ การลดทอนกำลังทางแสง และการกระจายโครมาติก ซึ่งเป็นปัจจัยในการกำหนดระยะทางไกลสุดและความเร็วสูงสุดในการส่งสัญญาณแสง

จากการทดลองกับตัวเลเซอร์ เมื่อปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันพบว่าควรปรับค่ากระแสหลอดและกระแสไบแอสให้ระดับสัญญาณของบิต '0' อยู่เหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเล็กน้อยเพื่อป้องกันการแกว่งของสัญญาณเนื่องจากการพุ่งเกินและการตัดของรูปคลื่น สำหรับการทดสอบวัดค่าการเดินของสัญญาณพบว่า ค่าการเดินจะแปรผกผันกับความชันของสัญญาณขาเข้า และยังสรุปได้ว่าตัวเลเซอร์ และตัวขับเลเซอร์ที่เลือกใช้นั้นมีความเหมาะสมในการใช้งานที่ความเร็ว 2.5 Gb/s ตามที่ต้องการ

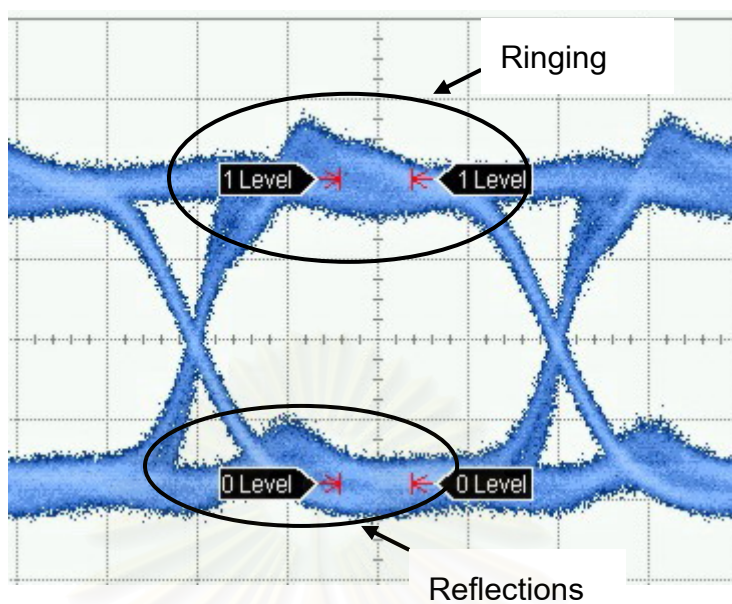
ในการออกแบบวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง ซึ่งเป็นวงจรที่ความเร็วสูงนอกจากต้องคำนึงถึงระดับสัญญาณที่ต้องการ ซึ่งภายในบอร์ดตัวส่งสัญญาณส่วนใหญ่ต้องการเป็นแบบ LVPECL แล้ว ก็ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงความยาวของระยะทาง การ match impedance และการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วย

จากการทดลองกับต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความยาวคลื่น พบว่าสามารถให้สมรรถนะได้ตรงตามมาตรฐาน ITU G.957 นอกจากนี้ยังสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวแบบมาตรฐานระยะทาง 15 กิโลเมตร ได้ต่ำกว่า 10^{-9} เมื่อใช้ตัวรับตามมาตรฐาน ITU-T

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานที่ควรได้รับการศึกษาหรือพัฒนาต่อไปในอนาคตคือ

1. ควรเพิ่มวงจรป้องกันกลับสำหรับควบคุมกระแสไบแอสที่ป้อนเข้าสู่ตัวเลเซอร์ให้คงที่ เนื่องจากตัวเลเซอร์จะมีคุณลักษณะสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ทำงาน
2. เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำแผ่น PCB ให้มีคุณสมบัติของการลดทอนสัญญาณน้อยลง เช่น RO4350 ของบริษัท Roger ซึ่งมีค่าการลดทอนต่ำกว่า FR4 ถึงประมาณ 3 เท่า และสามารถใช้ได้ถึงความถี่สูงถึง 10 GHz [28]
3. ปรับปรุงสัญญาณทางแสงที่ตัวเลเซอร์ให้ดีขึ้นโดยการ match impedance ให้ได้เท่ากับ 25 โอห์มตามที่ขาออกของตัวขับเลเซอร์ต้องการ เพื่อลดปัญหา Ringing และการสะท้อน (reflections) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 หรือทำการต่อ Network Resistor ดังที่กล่าวใน [22]



รูปที่ 6.1 ปัญหา Ringing และ Reflections

4. ศึกษาถึงตัวรับสัญญาณทางแสงเพื่อนำไปพัฒนาเป็นตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transponder) ต่อไป
5. จัดทำตัวส่งสัญญาณทางแสงที่มีหลาย ๆ ความยาวคลื่น เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ใน WDM ได้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Shin, D.S., et al. 10 Gb/s transmission over 50 km nonzero dispersion-shifted fibre using 1.3 μm directly modulated uncooled transmitters. Electron. Lett. 38 16 (Aug. 2002): 864-865.
2. Green, M.M., et.al. OC-192 Transmitter in Standard 0.18 μm CMOS. IEEE ISSCC Dig. Tech. Papers 1 (Feb. 2002): 248-250.
3. Muthali, H.S., Thomas, T.P., and Young, I.A. A CMOS 10-Gb/s SONET Transceiver. IEEE J. Solid-State Circuits 39 7 (July 2004): 1026-1033
4. Suzuki, H., Takachio, N., Masuda, H., and Iwatsuki, K. Super-dense WDM transmission technology in the zero-dispersion region employing distributed raman amplification. J. Lightwave Technol. 21 (April 2003): 973 – 981.
5. Sotobayashi, H., Chujo, W., and Kitayama, K. Highly Spectral-Efficient Optical Code-Division Multiplexing Transmission System. IEEE J. Select. Quantum Electron. 10 2 (March-April 2004): 250-258.
6. Sotobayashi, H., Chujo, W., and Kitayama, K. 1.52 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM \times 19 WDM \times 20 Gbit/s) transmission experiment. Electron. Lett. 37 11 (May 2001): 700-701.
7. Breuer, D., Ennser, K., and Petermann, K. Comparison of NRZ- and RZ-modulation format for 40-Gb/s TDM standard-fiber systems. IEEE Photon. Technol. Lett. 9 (March 1997): 398-400.
8. Ludwig, R., et.al. Experimental comparison of 40 Gbit/s RZ and NRZ transmission over standard singlemode fibre. Electron. Lett. 35 25 (December 1999): 2216-2218.
9. Yi, D., et.al. Pulsewidth-tunable CS-RZ signal format with better tolerance to dispersion and nonlinear degradation in optical transmission system. IEEE Photon. Technol. Lett. 16 5 (May 2004): 1409-1411.
10. Hui, R., et.al. Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems. Kansas: The University of Kansas and Sprint Corp., Jan. 2004.

11. Gnauck, A.H., Liu, X., Wei, X., Gill, D.M., and Burrows, E.C. Comparison of modulation formats for 42.7-gb/s single-channel transmission through 1980 km of SSMF. IEEE Photon. Technol. Lett. 16 3 (March 2004): 909-911.
12. Razavi, B. Design of Integrated Circuits for Optical Communications. Singapore: McGraw-Hill, 2003.
13. Wonglumsom, D. Maximization of spectral efficiency in packet-switched wavelength division multiplexing metropolitan area networks. Doctoral dissertation. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Stanford University, 2002.
14. Kolimbris, H. Fiber Optics Communications. New Jersey: Prentice-Hall, 2004.
15. Keiser, G. Optical Fiber Communications. 3 rd ed., Singapore: McGraw-Hill, 2000.
16. Gnauck, A.H., and Winzer, P.J. Phase-Shift-Keyed Transmission [Power Point]. Lucent Technologies, 2004.
17. Agrawal, G.P. Nonlinear Fiber Optics. 3rd ed., USA: Academic Press, 2001.
18. ITU-T Recommendation G.957: Digital Sections and Digital Line Systems – Optical Interfaces for Equipments and Systems Relating to the Synchronous Digital Hierarchy. Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunications Union (ITU-T): July, 1995.
19. Data Sheet: MAX3869 +3.3V, 2.5Gbps, SDH/SONET Laser Driver with Current Monitors and APC. Maxim Integrated Products, 2003. Available from: <http://www.maxim-ic.com>
20. Data Sheet: MAX3891 16:1 Serializer, 3.3V, 2.5Gbps, SDH/SONET, with Clock Synthesis and LVPECL Inputs. Maxim Integrated Products, 2001. Available from: <http://www.maxim-ic.com>
21. Holland, N. Interfacing Between LVPECL, VML, CML, and LVDS Levels. Texas Instruments, 2002. Available from: <http://www.ti.com>
22. Interfacing Maxim Laser Drivers with Laser Diodes. MAXIM Integrated Products, 2000. Available from: <http://www.maxim-ic.com>
23. Introduction to LVDS, PECL, and CML. MAXIM Integrated Products, 2000. Available from: <http://www.maxim-ic.com>

24. Lu, X. Building a 3.3 to 3.8 GHz 802.16a WiMAX LNA in FR4 Material. J. Microwave 49 2 (February 2006)
25. Application Note: High-Speed Board Layout Guidelines. Altera Corporation, 2003.
Available from: <http://www.altera.com>
26. Application Note: Characterizing High-Speed Optical Transmitters: Compliance Testing with the Agilent 86100A Infiniium DCA. Agilent Technologies, 2004.
Available from: <http://www.agilent.com>
27. Sackinger, E. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
28. Stephen, T.C. High-Speed Circuit Board Signal Integrity. USA: Artech house Inc., 2004.
29. Choosing AC-Coupling Capacitors. MAXIM Integrated Products, 2000. Available from: <http://www.maxim-ic.com>
30. Linear Feedback Shift Registers. New wave instruments. Available from: <http://www.newwaveinstruments.com>



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



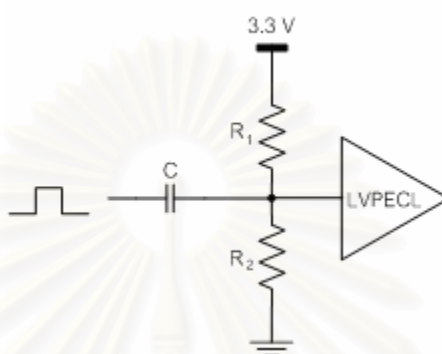
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ลักษณะการเชื่อมต่อระดับสัญญาณแบบ LVPECL

ก.1 การเชื่อมต่อแบบ AC-coupling



รูปที่ ก.1 การเชื่อมต่อแบบ AC-coupling เข้าสู่ขาเข้า LVPECL

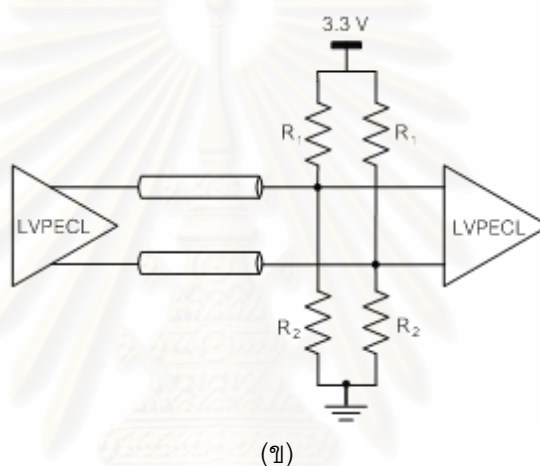
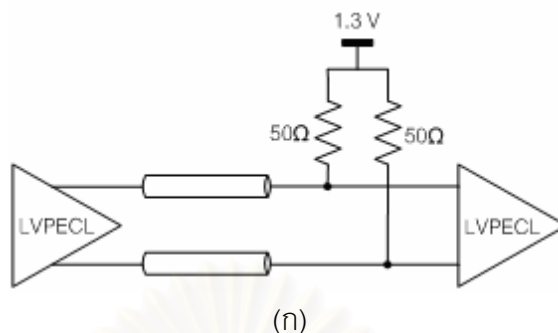
ลักษณะการเชื่อมต่อแบบ AC-coupling แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยจะมีตัวเก็บประจุ C เป็นตัวกรองเอาสัญญาณ DC ออกยอมให้แต่สัญญาณ AC ผ่านไป หรือที่เรียกว่า low frequency cutoff ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะการเดินของระบบเมื่อมีข้อมูลบิต '1' หรือ บิต '0' ยาว ๆ ดังที่กล่าวรายละเอียดใน [29] ดังนั้นในการเลือกค่าตัวเก็บประจุนี้จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการใช้ การเลือกค่าตัวต้านทาน R_1 และ R_2 พิจารณาจากระดับแรงดัน DC จะต้องมีค่าคงอยู่ที่ 2.0 V และต้อง matching impedance กับ Transmission line คือ 50 โอห์ม [22] จากเงื่อนไขทั้งสองข้อจะได้สมการดังนี้

$$\frac{R_2 \times (3.3V)}{R_1 + R_2} = 2V \quad (ก.1)$$

$$R_1 // R_2 = 50\Omega \quad (ก.2)$$

จากสมการที่ (ก.1) และ (ก.2) จะได้ค่า $R_1 = 82$ โอห์ม และ $R_2 = 130$ โอห์ม ตามลำดับ

ก.2 การเชื่อมต่อแบบ DC-coupling



รูปที่ ก.2 การแปลงวงจรสมมูลแบบเทเวนิน

สัญญาณขาออกแบบ LVPECL ถูกออกแบบให้ใช้ขับโหลด 50 โอห์ม ไปที่ระดับ 1.3 V ดังแสดงในรูปที่ ก.2 (ก) ในการเชื่อมต่อแบบนี้จึงจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดไฟ DC 1.3 V เพิ่มอีกตัวหนึ่ง เพื่อความสะดวกในการใช้จึงนิยมใช้วงจรสมมูลแบบเทเวนิน (Thevenin equivalent circuit) แทน ลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ ก.2 (ข) ค่า R_1 และ R_2 หาได้จากสมการที่ (ก.3) และ (ก.4)

$$1.3V = 3.3V \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (\text{ก.3})$$

$$R_1 // R_2 = 50\Omega \quad (\text{ก.4})$$

จากสมการที่ (ก.3) และ (ก.4) จะได้ค่า $R_1 = 130$ โอห์ม และ $R_2 = 82$ โอห์ม ตามลำดับ

ภาคผนวก ข

การสร้าง Pseudo-Random Bit Sequence

ในการทดลองหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตนี้ จำเป็นต้องกำหนดลำดับของสัญญาณข้อมูลส่งเพื่อจำลองสภาพของการจราจรข้อมูลให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงให้มากที่สุด ซึ่งก็มีมาตรฐานของลำดับข้อมูลที่ใช้ส่ง-รับสัญญาณเป็นที่รู้จักกันคือรูปแบบ Pseudo-Random Bit Sequence (PRBS) ด้วยความยาว $2^n - 1$ บิต โดยที่ n เป็นค่าจำนวนเฉพาะที่กำหนดไว้ (7, 10, ..., 31) รูปแบบ PRBS ถูกสร้างโดยใช้ Linear-Feedback Shift Register (LFSR) ด้วยการป้อนกลับที่เหมาะสม ถ้า LFSR มี n ส่วน ความยาวของลำดับสูงสุดคือ $2^n - 1$ บิต การสร้าง LFSR สามารถทำได้ 2 วิธีซึ่งจะได้ผลลัพธ์เหมือนกัน คือ Fibonacci LFSR และ Galois LFSR [30]

(1) Fibonacci LFSR

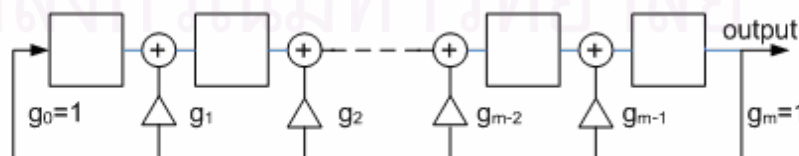
จะต่อเกตแบบ XOR (exclusive-OR gates) ภายนอกของเรจิสเตอร์แบบเลื่อนดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 Fibonacci LFSR

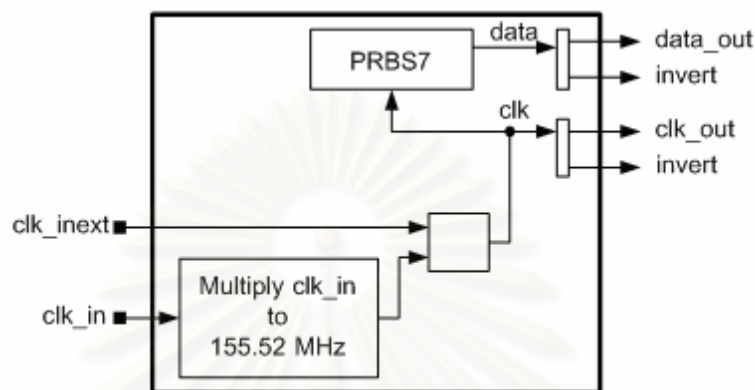
(2) Galois LFSR หรือ LFSR

จะต่อเกตแบบ XOR ภายในการเชื่อมต่อของเรจิสเตอร์แบบเลื่อนดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 Galois LFSR

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรรวม (Integrated Circuit) ชนิด FPGA (Field Programmable Gate array) ของบริษัท Xilinx รุ่น Spartan 3 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณข้อมูล โดยใช้ภาษา VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) ในการโปรแกรมข้อมูล โดยใช้การสร้างข้อมูลแบบที่ 2 ลักษณะการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 แผนภาพการทำงานภายในชิพ Spartan3

ในการทำงานสามารถเลือกใช้สัญญาณนาฬิกาอ้างอิงได้จาก 2 ที่คือ (1) เลือก clk_inext ซึ่งเป็นสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกความถี่ 155.52 MHz ให้เป็น clk และ (2) เลือก clk_in ซึ่งเป็นสัญญาณนาฬิกาภายในบอร์ดวงจรรวมที่มีความถี่ 25 MHz และจะถูกนำมาคูณความถี่เพิ่มไปเป็น 155.52 MHz โดยใช้ฟังก์ชันภายในชิพ Spartan 3 สัญญาณนาฬิกาใหม่ที่ได้นี้คือ clk สัญญาณ clk ที่ได้จากที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำไปเป็นสัญญาณนาฬิกาสำหรับสร้างสัญญาณข้อมูลแบบ PRBS ความยาว 2^7-1 ที่ความเร็ว 155.52 Mb/s สัญญาณข้อมูลที่ได้นี้คือ $data$ สัญญาณ clk และ $data$ จะมีระดับสัญญาณเป็นแบบ LVTTTL (Low Voltage Transistor Transistor Logic) ที่มีผลต่างของระดับสัญญาณ 3.3 V แต่เนื่องจากบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบขึ้นต้องการสัญญาณขาเข้าที่มีผลต่างของระดับสัญญาณไม่เกิน 800 mV จึงต้องแปลงระดับสัญญาณ $data$ และ clk ไปเป็นแบบผลต่าง LVDS (Low Voltage Differential Signaling) ซึ่งมีผลต่างของระดับสัญญาณประมาณ 300 mV ได้เป็น $data_out$ และ clk_out ตามลำดับ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. Pattanakul, K., Tantivongapai, P., and Wonglumsom, D. Design and Experimentation of 2.5 Gb/s Directly Modulated Optical Transmitter. The second National Conference on Optics and Applications (NCOA-2, Bangkok, Thailand), 4 February 2005.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การออกแบบและการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง 2.5 Gbps กิกะบิตต่อวินาที Design and Experimentation of 2.5 Gb/s Directly Modulated Optical Transmitter

คำขวัญ พัฒนากล, พลวัฒน์ ต้นดวงศ้ออำไพ และ ดร.ดวงฤดี วงศ์ลำชำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร. 0-2218-6909 โทรสาร 0-2218-6912 E-mail: kumkwan_p@yahoo.com, mail2oak@yahoo.com and Duangrudee.W@Chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความตีพิมพ์นี้จะนำเสนอรายละเอียดในการออกแบบและการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) ที่ความเร็ว 2.5 Gb/s โดยการนำสัญญาณที่มีความเร็ว 155 Mb/s จำนวน 16 ช่องสัญญาณมารวมกัน ในส่วนของกรทดลองจะทดสอบการส่งผ่านข้อมูลจากตัวส่งสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว ไปยังตัวรับสัญญาณที่ใช้วิธีการตรวจจับโดยตรง (Direct Detection) โดยให้ค่าอัตราผิดพลาด (Bit Error Rate) จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณบิตน้อยกว่า 10^{-9}

คำสำคัญ : การมอดูเลตโดยตรง, ตัวส่งสัญญาณทางแสง

Abstract

This paper will elaborate on the design and assembly of 2.5 Gb/s directly modulated optical transmitter. The 2.5 Gb/s data rate is generated by combining 16 parallel channels, each with 155 Mb/s bit rate. The experimentation of data transmission between the assembled optical transmitter and the direct detection receiver over single mode fibers will be conducted. The bit error rate (BER) results given by our bit comparison circuit is expected to be less than 10^{-9} .

Keywords: direct modulation, optical transmitter

1. บทนำ

ความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์สำหรับสื่อสารมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล สืบเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและการเติบโตอย่างรวดเร็วของระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อที่จะรองรับปริมาณข้อมูลส่งที่มากขึ้น จึงมีการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณและเร่งอัตราการส่งข้อมูล รวมทั้งการเปลี่ยนสื่อตัวกลางเป็นเส้นใยนำแสงแทนที่สายเคเบิลทองแดงแกนร่วม (Coaxial Cable) ที่ใช้กันทั่วไป เพราะเส้นใยนำแสงสามารถรองรับจำนวนช่องสัญญาณได้มากถึง 100 กว่าช่องสัญญาณ โดยอาศัยเทคโนโลยี Wavelength Division Multiplexing (WDM) [1] ข้อดีอื่น ๆ ของการใช้เส้นใยนำแสงก็มีอีก อาทิเช่น (1) มีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยนำแสงต่ำมากเมื่อเทียบกับสายทองแดง ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและประหยัด

จำนวนอุปกรณ์ทวนสัญญาณ, (2) เส้นใยนำแสงมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา จึงติดตั้งได้ง่ายและใช้พื้นที่น้อย, (3) เนื่องจากเส้นใยนำแสงถูกผลิตจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น ข่าวสารที่ส่งไปกับแสงจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ดังนั้นการลักลอบใช้สัญญาณทางแสงเพื่อแอบดักฟังข้อมูลจึงไม่สามารถกระทำได้

จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้น ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย มีงานวิจัยเกี่ยวกับการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงในหลากหลายแนวทาง ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการมอดูเลตที่แตกต่างกัน [2]-[4] การส่งผ่านเส้นใยนำแสงต่างชนิด [3] หรือการส่งข้อมูลความเร็วสูงอย่าง 10, 40 และ 42.7 Gb/s [3]-[5] โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้การมอดูเลตสัญญาณทางความเข้ม (Intensity Modulation) มากกว่าการมอดูเลตทางเฟสหรือความถี่ เพราะความง่ายกว่าในการส่งและตรวจจับสัญญาณ โดยเฉพาะที่ภาคตัวรับสัญญาณทางแสงซึ่งจะนิยมใช้วิธีการตรวจจับโดยตรง (Direct Detection) สำหรับการมอดูเลตสัญญาณทางความเข้มนั้นมี 2 วิธี คือแบบโดยตรง (Direct Modulation) และแบบภายนอก (External Modulation) ซึ่งแบบแรกไม่ใช้ตัวมอดูเลตทางแสง (Optical Modulator) และไม่มี ความซับซ้อนของวงจรมากนัก จึงมีราคาถูกกว่าและเป็นที่ยอมรับใช้กันมากกว่าแบบสอง หากแต่อัตราการส่งข้อมูลจะไม่ได้ไม่สูงมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การมอดูเลตแบบโดยตรงเช่นเดียวกับงานวิจัย [5] แต่ที่ความยาวคลื่นแสงต่างกันและด้วยความเร็วต่ำกว่าเนื่องจากความไม่พร้อมทางด้านเครื่องมือวัด

ในประเทศไทยถึงแม้จะมีการใช้งานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงมากขึ้น แต่เป็นการนำเข้าทั้งระบบจากต่างประเทศ เนื่องจากขาดวิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ในการออกแบบและประกอบอุปกรณ์ให้เป็นระบบ จึงเป็นที่มาของกรริเริ่มงานวิจัยด้านนี้ โดยจะทำการประกอบตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสงที่ความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s เป็นชุดทดลองในการทดสอบส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว (Single Mode Fiber, SMF) และสำหรับใช้ในงานวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อพัฒนาความรู้และเพิ่มศักยภาพของผลงานวิจัยให้เทียบเท่าระดับสากล

บทความนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรง เริ่มต้นจากหัวข้อที่ 2 อธิบายวิธีการมอดูเลตโดยตรงที่ใช้ในภาคตัวส่ง ต่อด้วย

หัวข้อที่ 3 อธิบายวิธีการตรวจจับโดยตรงที่ใช้ในภาคตัวรับ ส่วนหัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนไปของสัญญาณเมื่อส่งผ่านเส้นใยนำแสง หัวข้อที่ 5 จะให้รายละเอียดของวงจรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบ รวมทั้งการทดลองวัดค่าอัตราบิดผิดผลาดของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นให้ได้ตามมาตรฐาน ปิดท้ายด้วยหัวข้อที่ 6 ปัญหาและการวิเคราะห์

2. การมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation)

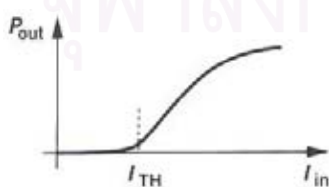
การมอดูเลตโดยตรงเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกกว่าการมอดูเลตภายนอก เพราะไม่ต้องใช้ตัวมอดูเลตทางแสงเพิ่มเติมจากตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave Laser) สัญญาณข้อมูลจะถูกป้อนตรงเข้ากับเลเซอร์ได้เลย อีกทั้งตัวเลเซอร์ที่มอดูเลตโดยตรงได้ (Directly Modulated Laser) ยังใช้พลังงานน้อยกว่า และมีราคาถูกกว่าราคาของตัวมอดูเลตทางแสงร่วมกับตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง แต่การมอดูเลตโดยตรงนี้มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วสูงสุดในการส่งข้อมูล ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวเลเซอร์ที่มอดูเลตโดยตรงได้ที่ความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s

เมื่อตัวเลเซอร์ถูกขับ โดยตรงด้วยสัญญาณข้อมูล ระดับความเข้มแสงของออกจะแปรผันตามระดับของสัญญาณที่ป้อนอันเนื่องจากคุณลักษณะของเลเซอร์ซึ่งจะอธิบายถัดไป ข้อมูลส่งส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลดิจิทัลที่เข้ารหัสแบบไบนารี ดังนั้นการมอดูเลตสัญญาณทางความเข้มด้วยค่าสองระดับนี้จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่ออื่น ๆ อีกเช่น Amplitude Shift Keying (ASK) หรือ On-Off Keying (OOK)

อุปกรณ์สำคัญในการมอดูเลตโดยตรงคือตัวเลเซอร์ที่มอดูเลตโดยตรงได้และตัวขับเลเซอร์ ซึ่งจะให้รายละเอียดในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

2.1 ตัวเลเซอร์

ตัวเลเซอร์ที่ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงส่วนใหญ่เป็นชนิดเซมิคอนดักเตอร์ มันจะผลิตพลังงานแสงออกตามขนาดกระแสที่ป้อนดังเส้นกราฟแสดงในรูปที่ 1 เอาต์พุตทางแสงจะถูกสร้างขึ้นและรักษาให้คงที่ด้วยค่ากระแสไบแอสคงที่ค่าหนึ่งเหนือค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current, I_{th}) ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้งานของตัวเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง



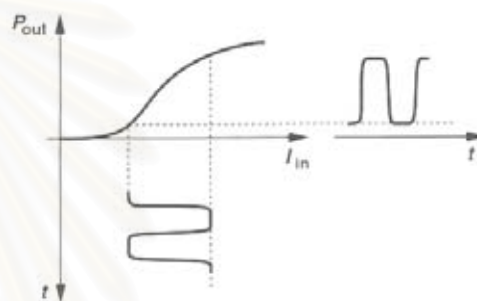
รูปที่ 1. คุณลักษณะของตัวเลเซอร์ [6]

ในกรณีที่มีการเปลี่ยนค่ากระแสขึ้นลงอย่างรวดเร็วให้สอดคล้องกับระดับสัญญาณไบนารี จำเป็นต้องใช้ตัวเลเซอร์ที่มอดูเลตโดยตรงได้ และตัวเลเซอร์นี้จะถูกไบแอสให้อยู่เหนือค่ากระแสขีดเริ่ม

เปลี่ยนไปอีก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหน่วงเวลา (Delay) ระหว่างการเปิดปิดของเลเซอร์ และเพื่อให้มีพลังงานแสงมากเพียงพอที่จะส่งไปได้ ระยะทางไกลคงที่ออกแบบไว้ โดยที่ระดับเอาต์พุตทางแสงนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสขับและประสิทธิภาพการแปลงกระแสไปเป็นพลังงานแสงของตัวเลเซอร์

2.2 ตัวขับเลเซอร์

ตัวขับเลเซอร์สามารถมองเป็นการสวิตช์ของกระแสที่ใช้เปลี่ยนแปลงการเปิดปิดของตัวเลเซอร์ตามสัญญาณข้อมูลไบนารี หลักการทำงานของตัวขับเลเซอร์คือการเตรียมระดับของกระแสให้เหมาะสมสำหรับไบแอส และสามารถมอดูเลตสัญญาณค่าลอจิก ‘1’ และ ‘0’ ที่ตัวเลเซอร์ได้เร็วตามอัตราความเร็วข้อมูลที่ป้อนเข้า ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2. การทำงานของตัวขับเลเซอร์ [6]

ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้ตัวขับเลเซอร์คือ

- (1) วงจรต้องมีความเร็วเพียงพอที่จะสวิตช์ระดับกระแสเพื่อให้แสงที่ถูกมอดูเลตมีการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-Symbol Interference) น้อยที่สุด, (2) สามารถป้อนกระแสได้มากพอที่จะไปขับตัวเลเซอร์ให้ผลิตพลังงานแสงของค่าลอจิก ‘1’ ออกได้มากตามที่ออกแบบไว้, (3) ช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าต้องไม่สูงเกินกว่าที่ตัวเลเซอร์จะทนรับได้ [6]

3. การตรวจจับโดยตรง (Direct Detection)

การตรวจจับโดยตรงเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการตรวจจับพลังงานแสง ทำโดยใช้ตัวโฟโตไดโอด (Photodiode) เพียงตัวเดียวในการแปลงสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วสุ่มอ่านค่าระดับสัญญาณทุก ๆ คาบของบิต ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงเพื่อตัดสินใจว่าเป็นข้อมูลบิต ‘1’ หรือ ‘0’ คุณลักษณะของตัวโฟโตไดโอดคือการผลิตกระแสแสง (Photocurrent, I_p) ซึ่งแปรผันตรงตามขนาดของพลังงานแสง (P_o) ที่ตรวจจับได้ ดังสมการที่ 1

$$I_p = RP_o \tag{1}$$

โดยที่ R คือค่าการตอบสนอง (Responsivity)

ตัวโฟโตไดโอดชนิดเซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงส่วนใหญ่ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ PIN และ APD

(Avalanche Photodiode) โดยตัว APD เป็นอุปกรณ์รับแสงที่ได้รับ การพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความไว (Sensitivity) ที่ดีกว่าตัว PIN มาก อันเนื่องมาจากโครงสร้างของตัว APD ที่ใช้ปรากฏการณ์การถล่ม (Avalanche) ในการคูณเพิ่มของกระแสทำให้ได้กระแสตรวจจับที่มากกว่า ดังนั้นตัว APD จึงถูกเลือกใช้ในการทดลองนี้

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนไปของสัญญาณ

ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง สัญญาณที่ได้รับที่ปลายทางจะมีการผิดเพี้ยนไปไม่เหมือนกับสัญญาณที่ภาคส่ง เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการลดทอนกำลัง, การกระจาย, สัญญาณรบกวน, ความไม่เป็นเชิงเส้น และอื่น ๆ [7]-[8] ดังนั้นการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ความเร็วไม่เกิน 2.5 Gb/s จึงมีปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา คือ การลดทอนกำลัง, การกระจายโครมาติก และสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสง ซึ่งสามปัจจัยที่กล่าวมานี้จะส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงที่ถูกออกแบบ ตัวอย่างเช่น ระยะทางไกลสุดระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสง, อัตราการส่งข้อมูลเร็วสุด, และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ที่จะให้ค่าอัตราผิดพลาด (Bit Error Rate, BER) ที่ค่า 10^{-9} ระยะเฉลี่ยของสามปัจจัยขึ้นต้นจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ

4.1 การลดทอนกำลัง (Attenuation)

การลดทอนกำลังของสัญญาณแสงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง เพราะมันเป็นปัจจัยหลักในการจำกัดระยะทางไกลสุดระหว่างตัวส่งแสง กับตัวรับแสง หรือตัวขยายกำลังแบบในสาย (In-line Amplifier) กลไกการลดทอนกำลังในเส้นใยนำแสงมีที่มาจาก 3 ปรากฏการณ์คือ การดูดซึม (Absorption), การกระเจิง (Scattering), และการสูญเสียพลังงานจากการปล่อยรังสี (Radiative Losses) [7]

เมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสง กำลังงานของมันจะถูกลดทอนลงอย่างรวดเร็วตามระยะทาง โดยแปรผันตามแบบเลขชี้กำลัง (Exponentially decrease with distance) สมมติให้ $P(0)$ เป็นกำลังงานทางแสงในเส้นใยนำแสงที่จุดเริ่มต้นคือ ที่ระยะทาง $Z = 0$ จะได้ว่ากำลังงานหลังจากที่แสงเดินทางไปเป็นระยะทาง Z หรือ $P(Z)$ เป็นดังสมการที่ 2

$$P(Z) = P(0) 10^{-(\alpha Z/10)} \quad (2)$$

โดยที่ α คือค่าการลดทอนกำลังของเส้นใยนำแสงในหน่วย dB/km ซึ่งค่านี้จะต่างกันขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าการลดทอนกำลังนี้มีผลกระทบต่อระยะทางการส่งสัญญาณแสง การออกแบบวงจรจึงต้องออกแบบตัวส่งให้มีพลังงานแสงมากเพียงพอที่จะครอบคลุมระยะทางส่งที่ต้องการ

4.2 การกระจายโครมาติก (Chromatic Dispersion)

การกระจายโครมาติกคือการขยายความกว้างของพัลส์แสงตามความยาวคลื่นเมื่อพัลส์แสงเดินทางไปตามเส้นใยนำแสง การขยายความกว้างออกนี้มีต้นเหตุมาจากความกว้างของสเปกตรัมที่แหล่งกำเนิดแสงปล่อยออกมาในหลายค่าความยาวคลื่น ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าความเร็วกลุ่ม (Group Velocity) ไม่เท่ากัน จึงไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันทำให้พัลส์แสงขยายออก ปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งคือการกระจายตามความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion, GVD) เนื่องจากการกระจายนี้เป็นผลของความเร็วก่อนซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น นั่นก็คือการกระจายโครมาติกขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นนั่นเอง ดังนั้นถ้าความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงเพิ่มขึ้นการผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากการกระจายนี้จะเพิ่มขึ้นด้วย

ค่าการกระจายโครมาติก (D) สามารถหาได้จากสมการที่ 3 ซึ่งมีหน่วยเป็น ps/(nm·km)

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{V_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3)$$

โดยที่	L	คือระยะทางทั้งหมดที่แสงเดินทาง
	τ_g	คือค่าการหน่วงเวลา (Time Delay) หรือการหน่วงแบบกลุ่ม (Group Delay)
	λ	คือค่าความยาวคลื่นของแสง
	V_g	คือค่าความเร็วกลุ่ม
	c	คือค่าความเร็วแสง
	β_2	คือค่าพารามิเตอร์ของ GVD

การกระจายโครมาติกนำมาซึ่งขีดจำกัดในอัตราเร็วสูงสุดที่สามารถส่งได้ในระบบ เนื่องจากการกระจายโครมาติกทำให้สัญญาณแสงที่ส่งกระจายออกแปรผันตามกับระยะทางส่งและความกว้างของสเปกตรัมแสง ส่งผลให้เกิดการเหลื่อมทับกันของบิตข้อมูลที่ผู้คิดกันจนเกิดปัญหาแทรกสอดของสัญญาณที่ภาครับเมื่ออัตราเพิ่มเร็วมากขึ้น วิธีการแก้ไขโดยทั่วไปทำโดยการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิดชดเชยการกระจาย (Dispersion Compensation Fiber) สลับกันเส้นใยที่ต้องการส่งทุก ๆ ช่วงระยะความยาวค่าหนึ่ง [7]

4.3 สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector Noises)

สัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวตรวจจับแสงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนลดลง เนื่องจากมีสัญญาณอื่น ๆ เข้าไปรวมกับสัญญาณข้อมูล ทำให้เพิ่มโอกาสที่บิตจะผิดพลาดสูงขึ้น สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสงนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 เทอม คือ สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อต (Quantum or Shot Noise), สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise) และสัญญาณรบกวนความร้อน

(Thermal Noise) [7] ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อ 4.3.1-4.3.3 ตามลำดับ

4.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อต (Quantum or Shot Noise)

สัญญาณรบกวนควอนตัมหรือช็อตเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเปลี่ยนโฟตอนไปเป็นอิเล็กตรอน เกิดจากการแกว่งค่าของกระแสที่เกิดขึ้นเองเนื่องจากสภาพความไม่ต่อเนื่องของโฟตอนที่เดินทางมาถึงตัวตรวจจับแสง ลักษณะการเกิดของสัญญาณรบกวนนี้เป็นแบบปัวซอง (Poisson Process) ซึ่งจะแปรตรงกับกระแสแสง (Photocurrent) ค่ากระแสสัญญาณรบกวนควอนตัม (i_Q) หาได้จากสมการที่ 4

$$\langle i_Q^2 \rangle = \sigma_Q^2 = 2qI_p B M^2 F(M) \tag{4}$$

โดยที่ I_p คือค่าเฉลี่ยของกระแสแสง
 B คือค่าแบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสง
 M คือค่าคูณเพิ่มของกระแสแสงเมื่อใช้ตัว APD
 $F(M)$ คือตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) ที่เกิดจากลักษณะการสุ่ม (Random Nature) ของกระบวนการถล่ม

4.3.2 สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current Noise)

สัญญาณรบกวนกระแสมืดเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มีแสงมาตกกระทบตัวตรวจจับแสงเลย แต่ยังคงมีกระแสแสงผลิตขึ้นมาบ้างอันเนื่องจากไบแอสย้อนกลับที่ป้อนไว้ตลอดเวลา สัญญาณรบกวนนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบโครงสร้างของตัวโฟโตไดโอด รวมถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่เลือกใช้ ค่ากระแสมืด (i_D) หาได้จากสมการที่ 5

$$\langle i_D^2 \rangle = 2qI_D B M^2 F(M) + 2qI_L B \tag{5}$$

โดยที่ I_D คือค่ากระแสรวมปฐมภูมิของตัวตรวจจับ (Primary Detector Bulk Dark Current)
 I_L คือค่ากระแสรั่วของผิว (Surface Leakage Current)

4.3.3 สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal Noise)

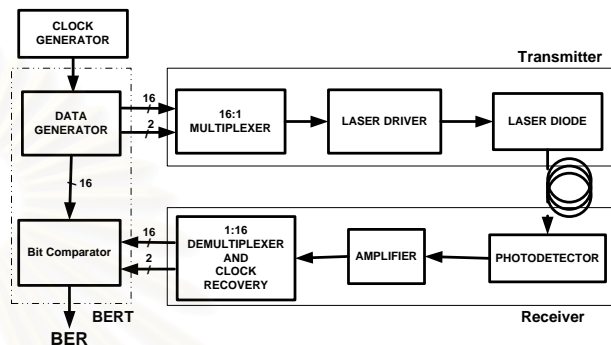
สัญญาณรบกวนความร้อนเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากตัวต้านทานโหลด (Load Resistor, R_L) เกิดจากการแกว่งของกระแสที่เกิดขึ้นเองอันเนื่องจากการเคลื่อนที่อย่างสุ่มของอิเล็กตรอนในตัวต้านทานโหลดของตัวตรวจจับ สัญญาณรบกวนนี้มีแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distribution) ซึ่งจะแปรตรงกับอุณหภูมิ ค่ากระแสสัญญาณรบกวนความร้อน (i_T) หาได้จากสมการที่ 6

$$\langle i_T^2 \rangle = \sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} B \tag{6}$$

โดยที่ T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ หน่วยเป็นองศาเคลวิน
 k_B คือค่าคงที่ของ Boltzmann

5. การประกอบและการทดลอง

เริ่มต้นจากการออกแบบและการประกอบตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสง หลังจากนั้นจะทำการทดสอบชุดตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสงให้มีความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s



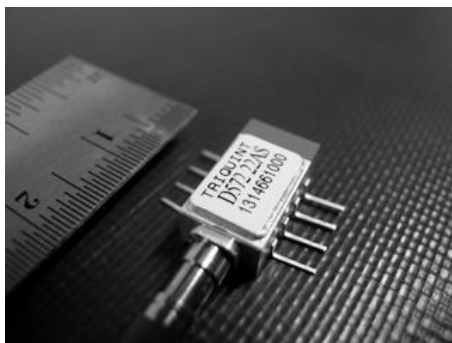
รูปที่ 3. ส่วนประกอบตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสงในการทดลอง

ในการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรงที่ความเร็ว 2.5 Gb/s นอกจากการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter) แล้วยังต้องมีส่วนประกอบอีกสองส่วนคือ ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver) และส่วนที่ใช้ตรวจสอบอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate Tester) ส่วนประกอบต่าง ๆ ทั้งหมดมีดังแสดงในรูปที่ 3 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) ภาคส่ง (Transmitter) (2) ภาครับ (Receiver) และ (3) ตัวตรวจสอบอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate Tester, BERT) ดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

5.1 ภาคส่ง (Transmitter)

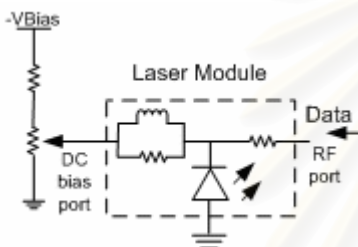
ในส่วนภาคส่งนี้จะมีการทำงานโดยรับข้อมูลความเร็ว 155 Mb/s ที่ขนานกันเข้ามา 16 สัญญาณ ก่อนทำการรวมสัญญาณด้วยตัวรวมสัญญาณ (Multiplexer) จาก 16 สัญญาณเป็น 1 สัญญาณที่มีความเร็ว 2.5 Gb/s ต่อจากนั้น นำสัญญาณที่ผ่านการรวมสัญญาณแล้วเข้าไปมอดูเลตโดยตรงที่ตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) ซึ่งทำหน้าที่ขับตัวเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้า 2.5 Gb/s ไปเป็นสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s แล้วทำการส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมคเดียวต่อไป

ในส่วนของตัวเลเซอร์ไดโอด เราใช้ตัวเลเซอร์ชนิด Distributed Feedback Laser, DFB ที่ความยาวคลื่น 1550 nm แบบ Uncooled ซึ่งจะมีขนาดเล็กและมีวงจรที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบที่มี Thermo Electric Cooler (TEC) รวมอยู่ด้วย ดังภาพแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4. เลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง
(ของบริษัท Triquint Semiconductor model D572)

การต่อเลเซอร์ให้ใช้งานได้ต้องทำการต่อเลเซอร์เข้าไปในวงจรที่ใช้สำหรับขับตัวเลเซอร์ วงจรการต่อมีลักษณะดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5. วงจรส่วนที่ต่อกับเลเซอร์

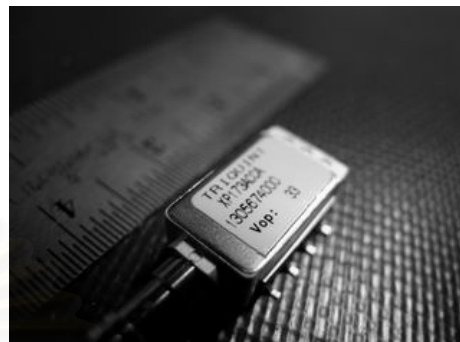
ในการไบแอสตัวเลเซอร์ทำได้โดยการป้อน -VBias เข้าไปที่ DC Bias port ให้เลเซอร์อยู่ในสภาวะ Forward Biased และในการมอดูเลตสัญญาณแสงทำได้โดยการป้อนสัญญาณข้อมูลเข้าสู่ RF port โดยให้มีขนาด peak-to-peak ที่มากพอที่จะให้ค่า extinction ratio เกิน 10 dB ซึ่งตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้นี้มีค่า Modulation bandwidth กว้างถึง 2.5 Gb/s

ในส่วนของตัวรวมสัญญาณ (Multiplexer) ใช้วงจรรวมรวมสัญญาณขนานเป็นสัญญาณอนุกรม (Serializer IC) เพื่อสร้างสัญญาณ 2.5 Gb/s จากสัญญาณ 155 Mb/s วงจรรวมที่ใช้เป็นของบริษัท MAXIM รหัส MAX3891 โดยตัววงจรรวมนี้จะทำการคูณความถี่ของสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงให้ด้วย

5.2 ภาครับ (Receiver)

เมื่อข้อมูลแสงที่ถูกมอดูเลตด้วยความเร็ว 2.5 Gb/s จากภาคส่งถูกส่งผ่านเส้นใยนำแสงเข้าไปยังตัวรับแสง (Photodetector) เพื่อทำการแปลงสัญญาณแสงออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ความเร็ว 2.5 Gb/s สัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสม ก่อนทำการแยกสัญญาณที่ตัวแยกสัญญาณ (Demultiplexer) โดยสัญญาณที่ได้ออกมาจากตัวแยกสัญญาณนั้นจะมีความเร็ว 155 Mb/s เหมือนกับสัญญาณข้อมูลเริ่มต้นก่อนเข้าไปในตัวเปรียบเทียบบิตข้อมูลเพื่อใช้หาค่าอัตราบิตผิดพลาด

ตัวรับแสงทำหน้าที่รับสัญญาณแสงที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เราเลือกใช้ตัวรับแสงแบบ APD ที่มีค่าความไวในการตอบสนองน้อยมากอยู่ที่ค่า -34 dBm และสามารถตรวจจับแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 nm ได้ ดังภาพแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6. ตัวรับแสงที่ใช้ในการทดลอง
(ของบริษัท Triquint Semiconductor model P173A)

ในส่วนของตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ใช้วงจรเพื่อขยายสัญญาณให้มีขนาดเหมาะสมก่อนแยกสัญญาณ 2.5 Gb/s เป็น 155 Mb/s วงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณเป็นวงจรจากบริษัท MAXIM รหัส MAX3866

ส่วนของตัวแยกสัญญาณ (Demultiplexer) ใช้วงจรแยกสัญญาณอนุกรมเป็นสัญญาณขนาน (Deserializer IC) เพื่อแยกสัญญาณ 2.5 Gb/s เป็น 155 Mb/s วงจรที่ใช้เป็นของบริษัท MAXIM รหัส MAX3880 โดยตัววงจรตัวนี้จะทำการคูณสัญญาณนาฬิกาจากข้อมูลที่ได้รับมาด้วย

5.3 ตัวตรวจสอบอัตราผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester)

ตัวตรวจสอบอัตราความผิดพลาดบิตมีหน้าที่หลักสองส่วนคือ ส่วนสร้างสัญญาณ (Data Generator) และส่วนเปรียบเทียบสัญญาณบิต (Bit Comparator) ในส่วนสร้างสัญญาณ จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณต้นแบบออกมาเป็นแบบรูปของบิต (Bit pattern) ที่มีความถี่ 155 Mb/s ทั้งหมด 16 สัญญาณ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลส่งผ่านระบบทดสอบ โดยสัญญาณจะถูกสร้างออกมา 2 ชุดที่เหมือนกัน ชุดแรกถูกส่งเข้าไปยังภาคส่ง ส่วนชุดสองถูกส่งเข้าไปยังส่วนเปรียบเทียบสัญญาณบิต เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราบิตผิดพลาดของการส่งข้อมูล

โดยส่วนสร้างสัญญาณและส่วนเปรียบเทียบสัญญาณบิตที่รวมกันเป็นตัวตรวจสอบอัตราผิดพลาดบิตในการทดลองนี้ เราใช้วงจรรวม (Integrated Circuit) ชนิด FPGA (Field Programmable Gate array) ในการสร้างสัญญาณและเปรียบเทียบสัญญาณโดยใช้ภาษา VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) ในการโปรแกรมข้อมูล ส่วนวงจรรวม FPGA ที่ใช้เป็นของบริษัท Xilinx รุ่น Spartan 3

5.4 กระบวนการทดลอง

หลังจากที่ทำการประกอบชุดทดลองแล้ว จะนำชุดทดลองไปทดสอบการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมคเดียวในห้องทดลอง โดยข้อมูลที่ใช้ส่งจะเป็นแบบ Pseudo Random Binary Sequences (PRBS) $2^7 - 1$ polynomial ซึ่งเป็นรูปแบบตามมาตรฐาน ITU-T V.29 ที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำหรับหาค่าอัตราบิดผิดพลาดของระบบการรับส่งสัญญาณทางแสงนี้

ในลำดับต่อไปของงานวิจัยนี้ จะนำชุดตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงที่ประกอบขึ้นไปทดสอบการรับส่งข้อมูลบนเครือข่ายจริงคือ CUNET ซึ่งเป็นเครือข่ายเส้นใยนำแสงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีความยาวรวมของเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดียวเป็นระยะทางทั้งสิ้น 8.9 km เป้าหมายค่าอัตราความผิดพลาดบิดของการส่งผ่านเครือข่ายนี้จะต้องน้อยกว่า 10^{-9} ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

6. ปัญหาและการวิเคราะห์

ปัญหาที่คาดว่าจะพบในการทดลองส่งสัญญาณแสงคือ การลดทอนกำลังในเส้นใยนำแสง และการกระจายออกของสัญญาณเนื่องจากการกระจายโครมาติก ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับในกรณีที่จะส่งสัญญาณแสงด้วยระยะทางไม่เกิน 10 km การลดทอนของกำลังแสงโดยคำนวณได้จากสมการที่ 2 ด้วยค่า $\alpha_{1550} = 0.3$ dB/km จะมีเพียงแค่ 3 dB ซึ่งถือว่าน้อยมาก ส่วนการกระจายออกของสัญญาณโดยคำนวณได้จากสมการที่ 3 ด้วยค่า $D = 18$ ps/(nm·km) และความกว้างของสเปกตรัมแสงเท่ากับ 1 nm จะได้ค่าการกระจายออกของสัญญาณเกิดขึ้นประมาณ 180 ps เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้กับความกว้างของคาบบิตที่ส่งด้วยอัตราความเร็ว 2.5 Gb/s ซึ่งมีค่า 400 ps จะได้ว่า การกระจายออกของสัญญาณนั้นสูงมาก ทำให้สัญญาณมีการผิดเพี้ยนไปเนื่องจากปัญหาการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference) ยิ่งสูงมากขึ้น ในท้ายที่สุดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ได้ออกแบบมานี้อาจจะไม่สามารถส่งได้ด้วยระยะทางไกลถึง 10 km หรือด้วยอัตราความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s ดังที่คาดการณ์ไว้

7. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนและรายละเอียดในการประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงแบบมอดูเลตโดยตรงที่ความเร็ว 2.5 Gb/s เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการในการประกอบตัวส่ง ศึกษาถึงปัญหาที่พบและหาแนวทางการแก้ไขขณะทำการประกอบ พร้อมทั้งเสริมสร้างประสบการณ์ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตราความเร็วสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] H. Suzuki, N. Takachio, H. Masuda and K. Iwatsuki, "Superdense WDM transmission technology in the zero-dispersion region employing distributed Raman amplification," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 973 – 981, Apr. 2003.

[2] R. Ludwig, U. Feiste, E. Dietrich, H.G. Weber, D. Breuer, M. Martin, and F. Kuppers, "Experimental comparison of 40 Gb/s RZ and NRZ transmission over standard singlemode fibre," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 25, pp. 2216-2218, Dec. 1999.

[3] R. Hui, S. Zhang, B. Zhu, R. Huang, C. Allen, and D. Demarest, *Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems*, Kansas: The University of Kansas and Sprint Corp., Jan. 2004.

[4] A.H. Gnauck, X. Liu, X. Wei, D.M. Gill, and E.C. Burrows, "Comparison of modulation formats for 42.7-gb/s single-channel transmission through 1980 km of SSMF," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 909-911, Mar. 2004.

[5] D.S. Shin, J. Wang, F. Bosch, P.A. Kie.y, N. Chand, M. Fischer, K. Kojima, B.L. Kasper, E.M. Peral, and H. Ransijn, "10 Gb/s transmission over 50 km nonzero dispersion-shifted fibre using 1.3 μ m directly modulated uncooled transmitters," *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 16, pp. 864-865, Aug. 2002.

[6] B. Razavi, *Design of Integrated Circuits for Optical Communications*, Singapore: McGraw-Hill, 2003.

[7] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, Third Ed., Singapore: McGraw-Hill, 2000.

[8] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, USA, 3rd ed., pp. 97-134, 2001.

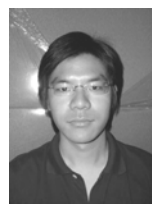
[9] H. Kolimiris, *Fiber Optics Communications*, New Jersey: Prentice-Hall, 2004.



ดร. ดวงฤดี วงศ์คำชำ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีในสองสาขาวิชาคือ B.S. in electrical engineering และ engineering physics จาก Lehigh University, USA รวมทั้งได้จบการศึกษาระดับปริญญาโทและเอก (M.S. and Ph.D.) ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก Stanford University, USA ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



นางสาวกาญจวิญ พัฒนากุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



นายพลวัฒน์ ดันดวงศ์อำไพ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวคำขวัญ พัฒนกุล เกิดวันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี การศึกษา 2545 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย