การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟซึ่งใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
แบบหยาบ เมื่ออัตราข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps

นางสาวพิมพ์ชนก มณฑา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE ANALYSIS OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS USING COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING WHEN DATA RATES PER WAVELENGTH ARE 10 GBPS AND 40 GBPS

Miss Pimchanok Montha

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟซึ่งใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ เมื่ออัตราข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps
โดย	นางสาวพิมพ์ชนก มณฑา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ)

พิมพ์ชนก มณฑา : การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟซึ่งใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ เมื่ออัตราข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps (PERFORMANCE ANALYSIS OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS USING COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING WHEN DATA RATES PER WAVELENGTH ARE 10 GBPS AND 40 GBPS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พสุ แก้วปลั่ง, 118 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโดยใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ (CWDM) ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 20 นาโนเมตร ทั้งหมด 16 ความยาวคลื่น เมื่ออัตราข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps ตามลำดับ โดยพิจารณาผลของการมอดูเลตสัญญาณแบบออนออฟคีย์อิงชนิดกลับสู่ศูนย์ (RZ-OOK), การมอดูเลตสัญญาณแบบออนออฟคีย์อิงชนิดไม่กลับสู่ศูนย์ (NRZ-OOK), การมอดูเลตสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียลเฟสชิฟต์คีย์อิง (DPSK), การมอดูเลตสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียลควอเดรเจอร์เฟสชิฟต์คีย์อิง (DQPSK) และการมอดูเลตสัญญาณเชิงแอมพลิจูดแบบควอเดรเจอร์ (n-QAM) ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของระบบ เช่น ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation) ดิสเพอร์ชัน (dispersion) ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD) และความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity) ของเส้นใยแสง โดยการจำลองระบบ CWDM-PON ด้วยโปรแกรม Optisys8.0 ในการวิเคราะห์สมรรถนะสูงสุดของระบบนั้นสามารถคำนวณระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบได้จากทฤษฎี แล้วจึงตรวจสอบด้วยการจำลองระบบด้วยวิธีการ simulation โดยวัดที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-4} และแนวทางการออกแบบระบบพิจารณาจากค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายส่ง (total link budget) จากชุมสายสำนักงานกลาง (central office) ไปยัง อุปกรณ์ optical network unit ที่ติดตั้งภายในบ้านของผู้ใช้บริการแต่ละราย

เมื่ออัตราข้อมูล 10 Gbps และ 40 Gbps สัญญาณจะมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณและผลของดิสเพอร์ชัน ซึ่งเป็นผลกระทบหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ โดยความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากผลของดิสเพอร์ชันนั้นสามารถทำการแก้ปัญหาได้โดยติดตั้งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (SC-DCU) ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลขึ้น

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2557		

5670314521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ACCESS NETWORK / COARSE WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING / PASSIVE OPTICAL NETWORKS / FIBER ATTENUATION / FIBER DISPERSION

PIMCHANOK MONTHA: PERFORMANCE ANALYSIS OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS USING COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING WHEN DATA RATES PER WAVELENGTH ARE 10 GBPS AND 40 GBPS. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, 118 pp.

This thesis provides the study on the performance limitation of 10-Gbps per wavelength and 40-Gbps per wavelength signal transmission over coarse wavelength division multiplexed passive optical network (CWDM-PON) which all 16 wavelengths range from 1,271 nm to 1,571 nm with the grid 20 nm. The transmission of CWDM based on the return-to-zero On-Off Keying (RZ-OOK), non-return-to-zero On-Off Keying (NRZ-OOK), Differential phase shift keying (DPSK), Differential Quadrature phase shift keying (DQPSK) and Quadrature Amplitude Modulation (n-QAM) modulation formats. The signal distortion caused by attenuation, dispersion, polarization mode dispersion (PMD) and non-linearity effect of optical fiber. The mathematical analysis of CWDM-PON is performed by computer simulations using Optisys8.0 software. The maximum reach for CWDM-PON operated with full 16 CWDM wavelength under FEC limit (BER=10^{-4}). The design of CWDM-PON based on total link budget calculation from central office to different ONUs locating at subscriber end points.

Both fiber attenuation and fiber dispersion are the main factors that limit the achievable reaches of 10-Gbps and 40-Gbps. And, also provides dispersion compensation method by employed-a slope-compensated dispersion compensating unit (SC-DCU) inline.

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2014		

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้เนื่องด้วยความเอาใจใส่และความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้รวมไปถึงแนวคิดต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำงานวิจัย อีกทั้งคอยดูแลเอาใจใส่ให้คำปรึกษา ให้ความอนุเคราะห์และให้คำแนะนำช่วยเหลือในทุกๆด้านอย่างเต็มที่มาโดยตลอด จนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย

ขอขอบคุณโครงการทุนการศึกษาหลักสูตรต่อเนื่อง ศิษย์ก้นกุฏิ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการส่งเสริมการวิจัยปี พ.ศ. 2556 รวมทั้งคอมพิวเตอร์และซอฟแวร์ OptiSystem 8.0 ที่เป็นส่วนสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนายรชฏ มณีขัติ นิสิตชั้นปริญญาเอก และนางสาววราภรณ์ เกตุอุไร มหาบัณฑิต ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา ขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องที่ทำงานร่วมกันในห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ชั้น 13 ทุกคน รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มิได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....จ

กิตติกรรมประกาศ....ฉ

สารบัญ....ช

สารบัญตาราง....ญ

สารบัญรูปภาพ....ฏ

บทที่ 1 บทนำ....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา....1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์....5

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์....6

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน....6

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ....7

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน....8

2.1 เส้นใยแสง....8

2.1.1 เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D....8

2.1.2 ปัจจัยที่จำกัดการส่งของสัญญาณของเส้นใยแสง....11

2.1.2.1 การลดทอนกำลังของสัญญาณของเส้นใยแสง....11

2.1.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง....13

2.1.2.3 ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์....17

2.2 การมอดูเลตสัญญาณ....18

2.2.1 การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด....19

2.2.2 การมอดูเลตเชิงมุม....22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2.2.1 การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK....22
2.2.2.2 การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK....25
2.2.3 การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอเดรเจอร์....29
2.2.4 การเปรียบเทียบการการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ....33
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของ Fiber-to-the-x....34
2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON....34
2.4 ระบบมัลติเพล็กซ์บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON....36
2.4.1 ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงเวลา....36
2.4.2 ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น....39
2.4.3 ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ....40
2.5 สัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากอุปกรณ์รับสัญญาณแสง....41
2.5.1 Thermal noise....41
2.5.2 Shot noise....41
2.5.3 Dark current noise....42
2.6 Link power budget....42
2.7 การแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจาก dispersion....43
2.8 Digital signal processing (DSP)....44
บทที่ 3 โครงสร้างระบบ CWDM-PON....45
3.1 ระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON....45
3.2 ระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON....47
3.3 ระบบ DPSK บน CWDM-PON....48
3.4 ระบบ DQPSK บน CWDM-PON....49
3.5 ระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON....51

หน้า

บทที่ 4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps......................54

4.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON 54

4.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON...................................57

4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DPSK บน CWDM-PON 61

4.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DQPSK บน CWDM-PON 64

4.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON.......................68

4.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON.....................71

บทที่ 5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps......................74

5.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON 74

5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON...................................78

5.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DPSK บน CWDM-PON 82

5.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DQPSK บน CWDM-PON 86

5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON.......................90

5.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON.....................93

บทที่ 6 การวิเคราะห์สมรรถนะทั้งหมดและแนวทางการออกแบบระบบ CWDM-PON.............97

6.1 การวิเคราะห์สมรรถนะทั้งหมดของระบบ CWDM-PON..97

6.2 แนวทางการออกแบบระบบ CWDM-PON 99

6.3 การให้บริการของระบบ CWDM-PON... 103

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 105

รายการอ้างอิง 108

ภาคผนวก.. 111

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 118

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D [13].................9

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตของค่า attenuation coefficient ของ SMF แบบ G.652.D ของความยาวคลื่นในระบบ CWDM ตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,611 นาโนเมตร [14]..............................12

ตารางที่ 2.3 ค่า dispersion ของ SMF แบบ G.652 กับความยาวคลื่นในระบบ CWDM [14].16

ตารางที่ 2.4 ค่าบิตข้อมูลที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM......29

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพสเปคตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ.................................33

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานของระบบ FTTx แบบ TDM-PON...37

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 – 1,571นาโนเมตร...46

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....................54

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....58

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....................61

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DQPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....................65

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร 69

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร 72

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....................74

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....79

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....................83

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DQPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร.....................87

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร 91

ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร 94

ตารางที่ 6.1 สมรรถนะของระบบ CWDM-PON โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ...............98

ตารางที่ 6.2 ค่ากำลังสูญเสียจากปัจจัยต่างๆ ในการส่งสัญญาณผ่าน SMF ของระบบ CWDM-PON.. 100

ตารางที่ 6.3 ระยะทางจำกัดสมรรถนะและ power budget ของระบบการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps.. 101

ตารางที่ 6.4 ระยะทางจำกัดสมรรถนะและ power budget ของระบบการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps.. 102

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 ปริมาณความต้องการใช้อินเทอร์เน็ตของผู้ใช้บริการตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2025 [2] 1

รูปที่ 1.2 ค่ากำลังลดทอนของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง [3] 2

รูปที่ 1.3 โครงข่ายโทรคมนาคมในปัจจุบัน [4] 3

รูปที่ 1.4 PON Standardization Roadmap [2] 5

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแสง [12] 8

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันของ SMFแบบ G.652.D กับความยาวคลื่นของระบบ CWDM [14] 9

รูปที่ 2.3 ค่า attenuation coefficient ที่น้อยที่สุดและมากที่สุดของ SMF แบบ G.652.D แต่ละความยาวคลื่นในระบบ CWDM [14] 12

รูปที่ 2.4 การเกิด ISI [16] 13

รูปที่ 2.5 ความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (GVD) เทียบกับค่าความยาวคลื่น [16] 14

รูปที่ 2.6 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [16] 17

รูปที่ 2.7 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK [19] 19

รูปที่ 2.8 สัญญาณข้อมูลแบบต่างๆ (ก) RZ (ข) NRZ 20

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK [19] 21

รูปที่ 2.10 โครงสร้างวงจรการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ผ่านเส้นใยแสง 21

รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ปรากฏใน eye diagram analyzer แบบ (ก) RZ (ข) NRZ 22

รูปที่ 2.12 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK [19] 23

รูปที่ 2.13 โครงสร้างวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK [19] 24

รูปที่ 2.14 สัญญาณที่ได้จากการดีมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK [23] 24

รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ผ่านเส้นใยแสง 25

รูปที่ 2.16 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ที่ปรากฏใน eye diagram analyzer....25

รูปที่ 2.17 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ (ก) QPSK (ข) DQPSK.........................27

รูปที่ 2.18 โครงสร้างวงจรการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ผ่านเส้นใยแสง (ก) ภาครับและภาคส่ง (ข) subsystem ที่ภาครับ..........28

รูปที่ 2.19 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ที่ปรากฏใน eye diagram analyzer (ก) in-phase (ข) quadrature..........28

รูปที่ 2.20 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM [19]..........30

รูปที่ 2.21 โครงสร้างวงจรภาคส่งของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM [19]..........30

รูปที่ 2.22 โครงสร้างวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM [19]..........31

รูปที่ 2.23 โครงสร้างวงจรภาคส่งของการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM ผ่านเส้นใยแสง........32

รูปที่ 2.24 โครงสร้างวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 2^n-QAM ผ่านเส้นใยแสง..........32

รูปที่ 2.25 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 2^n-QAM ที่ปรากฏใน electrical constellation visualizer (ก) 4-QAM (ข) 16-QAM..........33

รูปที่ 2.26 โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON [14]..........35

รูปที่ 2.27 TDM-PON ภาค downlink [1]..........36

รูปที่ 2.28 TDM-PON ภาค uplink [1]..........37

รูปที่ 2.29 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นประเภทต่างๆ [14]..........39

รูปที่ 2.30 WDM-PON ภาค downlink [1]..........40

รูปที่ 2.31 WDM-PON ภาค uplink [1]..........40

รูปที่ 2.32 การจัดสรรช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2..........41

รูปที่ 2.33 องค์ประกอบของ DSP..........44

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON..........45

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON..........47

รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบ DPSK บน CWDM-PON..48

รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบ DQPSK บน CWDM-PON...49

รูปที่ 3.5 โครงสร้าง subsystem ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON.................................50

รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON 51

รูปที่ 3.7 Transmitter ของระบบ 2^n-QAM บน CWDM-PON..52

รูปที่ 3.8 Receiver ของระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON 52

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 56

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ RZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 56

รูปที่ 4.3 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 60 km..57

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 59

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ NRZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 60

รูปที่ 4.6 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 70 km..60

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ DPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 62

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 63

รูปที่ 4.9 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 70 km.......64

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 66

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DQPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 67

รูปที่ 4.12 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 60 km 68

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร......70

รูปที่ 4.14 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 4-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 71

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร......73

รูปที่ 4.16 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 16-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 73

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 76

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ RZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 76

รูปที่ 5.3 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 4 km 77

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU..........................78

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 80

รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ NRZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 81

รูปที่ 5.7 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 6 km..81

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU......82

รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ DPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 84

รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 85

รูปที่ 5.11 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 5 km 85

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ DPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU......86

รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร 88

รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DQPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี 89

รูปที่ 5.15 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 13 km 89

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU......90

รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร......92

รูปที่ 5.18 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 4-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง..................93

รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร......95

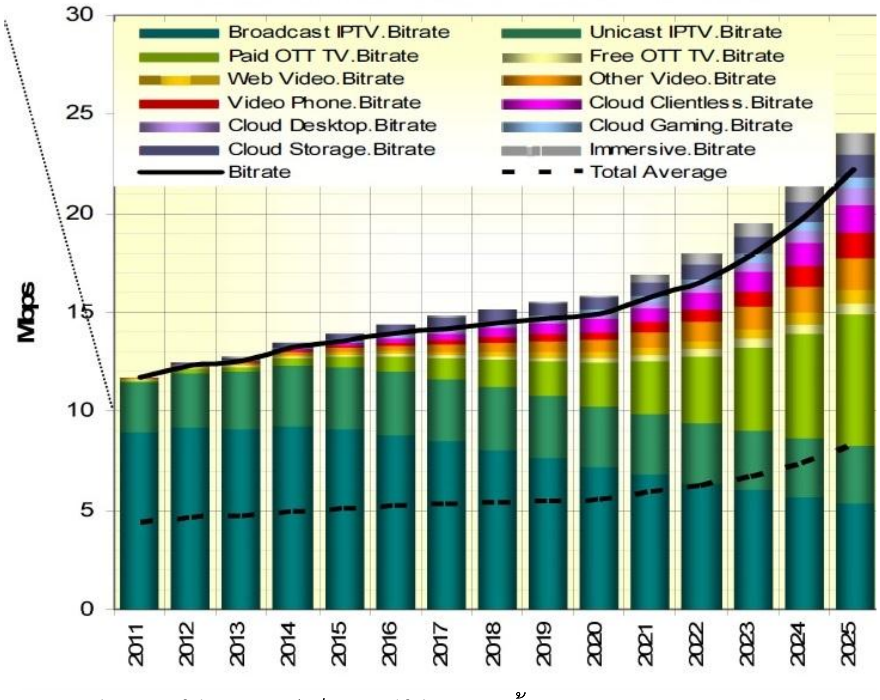
รูปที่ 5.20 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 16-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง................96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

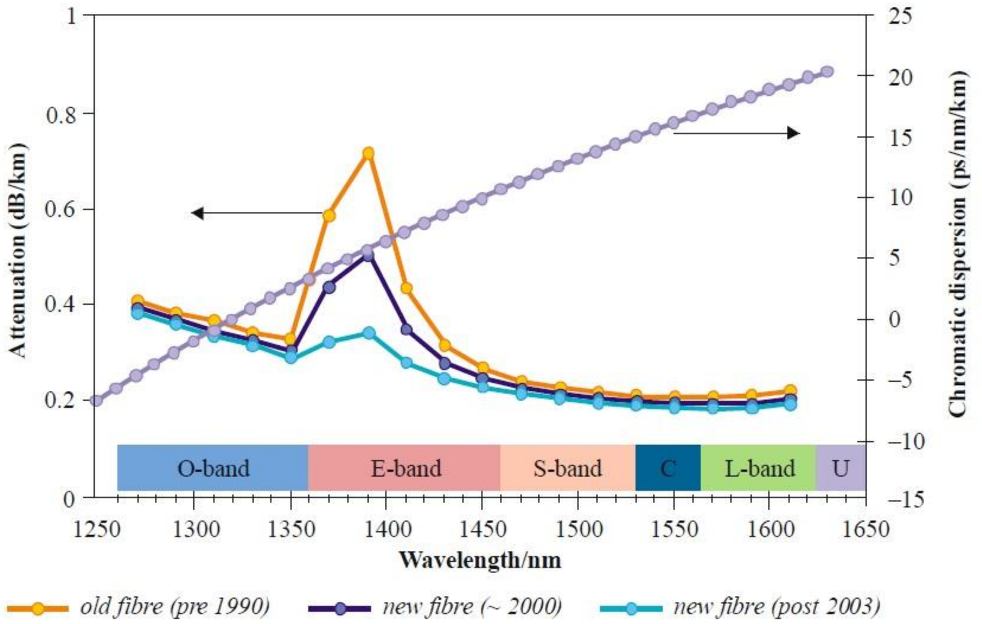
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นยุคแห่งเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เป็นยุคโลกไร้พรมแดนสามารถทำให้โลกที่กว้างแคบลงได้ คนจากซีกโลกหนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารกับคนอีกซีกโลกหนึ่งได้เพียงไม่กี่วินาที ไม่ว่าจะผ่านทาง HD video conference, digital television และ voice over IP (VoIP) โดยเทคโนโลยีการสื่อสารจะช่วยลดระยะเวลาในการส่งข้อมูลข่าวสาร ผู้ใช้บริการสามารถรับส่งข้อมูลและตอบกลับได้ทันที อีกทั้งยังสามารถส่งข้อมูลข่าวสารไปยังผู้ใช้บริการหลายรายในพื้นที่ต่างๆ ได้ในเวลาเดียวกัน จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณความต้องการใช้อินเทอร์เน็ตของผู้ใช้บริการตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2025 มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เช่น เกมออนไลน์ วีดีโอออนไลน์ การแชร์ไฟล์ข้อมูล และสื่อสังคมออนไลน์ (social media) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เองทำให้ผู้ประกอบการพยายามเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะของเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาประเทศอีกด้วย [1]



รูปที่ 1.1 ปริมาณความต้องการใช้อินเทอร์เน็ตของผู้ใช้บริการตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2025 [2]

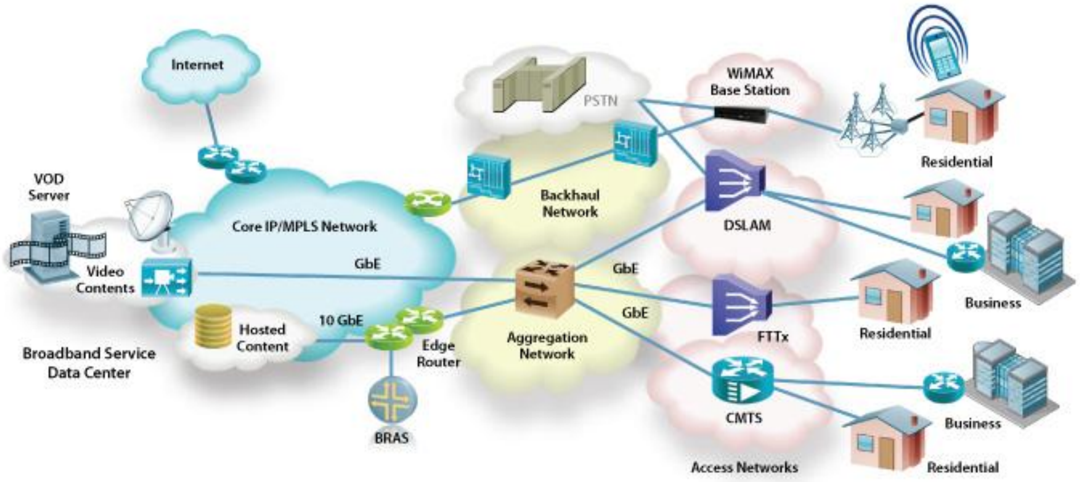
การเติบโตของระบบอินเทอร์เน็ตในอัตราก้าวหน้านั้น ทำให้ ADSL (asynchronous digital subscriber line) มีข้อจำกัดในการให้บริการบรอดแบนด์ (broadband) เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดจะถูกบีบอัดและส่งไปยังสายทองแดง ทำให้มีการลดทอนกำลังของสัญญาณในอัตราที่สูงและไม่เหมาะต่อการให้บริการ จึงได้มีการพัฒนาโดยการนำเส้นใยแสงมาแทนที่สายทองแดงเพื่อการเข้าถึง (access) บ้านผู้ใช้บริการ (subscriber) ด้วยเทคโนโลยี fiber-to-the-x (FTTx) เส้นใยนำแสงมีข้อดีคือ สามารถรองรับแบนด์วิดท์ที่สูงขึ้นได้ (high bandwidth) และมีความปลอดภัยในการรับส่งข้อมูล นอกจากนี้การลดทอนกำลังของสัญญาณยังมีค่าต่ำกว่าทองแดงอีกด้วย แต่มีข้อเสียคือ ต้นทุนของระบบสูงขึ้น เส้นใยแสงจึงเปรียบเสมือนท่อนำสัญญาณขนาดใหญ่ ที่สามารถส่งสัญญาณข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลสูงๆได้ เส้นใยนำแสงนั้นมีข้อจำกัดคือ ค่าลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation) และค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ของเส้นใยแสง ซึ่งเป็นค่าที่จำกัดสมรรถของระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ค่ากำลังลดทอนของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง [3]

โครงข่ายคมนาคม (telecommunication networks) นั้นสามารถรองรับอัตราข้อมูลที่สูงขึ้นผ่านเส้นใยแสงได้ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักคือ โครงข่ายหลัก (core network) และโครงข่ายเข้าถึง (access network) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดย core network ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของการสื่อสารข้อมูลระยะไกล ช่วยให้เกิดการติดต่อถึงกันระหว่างโครงข่าย metropolitan area network (MAN)

ซึ่งเป็นโครงข่ายการสื่อสารที่รับส่งข้อมูลในระดับเมืองจากนั้นโครงข่ายระดับเมืองจะเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการเข้ากับโครงข่ายสื่อสารผ่าน access network



รูปที่ 1.3 โครงข่ายโทรคมนาคมในปัจจุบัน [4]

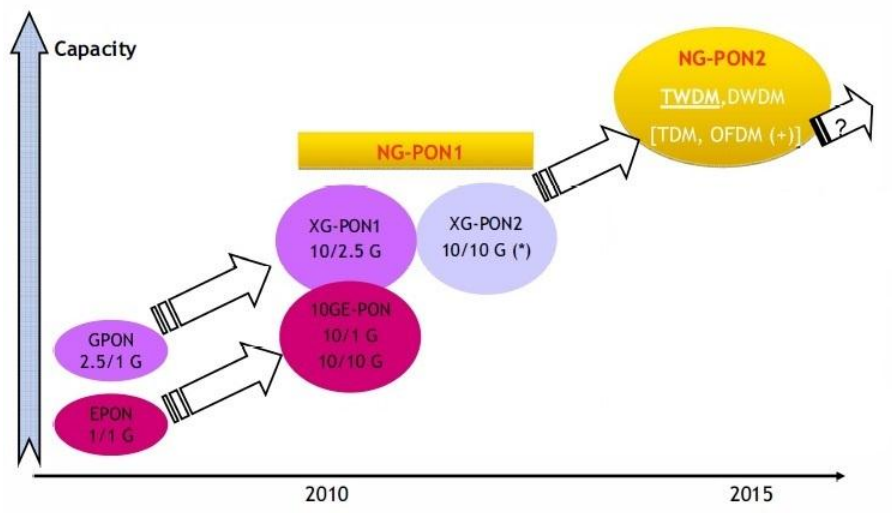
ปัจจุบันนำเทคโนโลยี FTTx บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network : PON) มาใช้ในระดับ access network เพื่อให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้บริการที่เพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถลดปัญหาคอขวดของ core network ได้อีกด้วย เทคโนโลยี FTTx ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณจาก optical line terminal (OLT) ติดตั้งบริเวณ central office (CO) ไปยัง optical network unit (ONU) ซึ่งอุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานทางแสงทั้งหมดตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงไปจนถึงอุปกรณ์รับสัญญาณแสง ทำให้ต้นทุนของระบบค่อนข้างต่ำ เทคโนโลยี FTTx บน PON มีอัตราข้อมูลสูงสุดถึง 10 Gbps ทั้ง uplink และ downlink ภายใต้มาตรฐาน 10G-EPON โดย IEEE [5] และมาตรฐาน XG-PON โดย ITU-T [6] เป็นการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (time division multiplexing : TDM) ซึ่งมีข้อจำกัดของระบบคือผู้ใช้บริการได้รับอัตราข้อมูลได้ไม่เต็มที่ เพื่อให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้นสามารถปรับปรุงระบบ PON โดยวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM) จะช่วยเพิ่มการให้บริการข้อมูลที่หลากหลายผ่านความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถพัฒนาอัตราข้อมูลได้ถึงระดับ 10 Gbps และ 40 Gbps ต่อบ้านผู้ใช้บริการ นอกจากนี้ระบบ WDM สามารถใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ (coarse wavelength division multiplexing : CWDM) บน PON มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมด 18 ความยาวคลื่น ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 [7]

ในปี ค.ศ.2010 ได้มีการพัฒนาอัตราการส่งข้อมูลขึ้นจนสามารถรองรับข้อมูลอัตราสูงถึง 3 Tbps (3×10^{12} บิตต่อวินาที) โดยเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบความหนาแน่นสูง (dense wavelength division multiplexing : DWDM) นับร้อยช่องสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 และ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณจะเห็นได้ว่าอัตราการส่งข้อมูลบน core network เพียงพอที่จะรองรับความต้องการใช้งานในปัจจุบัน [8] การที่ core network ได้พัฒนาไปถึงระดับให้บริการด้วยอัตราข้อมูลถึงระดับ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณนั้น เทคโนโลยี PON ในอนาคตควรที่จะได้รับการพัฒนาให้สามารถรองรับอัตราข้อมูลระดับ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเช่นกัน เนื่องจากอัตราข้อมูลเฉลี่ยในการรับส่งข้อมูลของ access network อยู่ที่ 6-16 Mbps [1] ในขณะที่อัตราข้อมูลเฉลี่ยในการรับส่งข้อมูลที่ต้องการเพื่อรองรับบริการควอดเพลย์ (quad-play) ได้แก่ IPTV, VoIP, อินเตอร์เน็ตความเร็วสูงควรจะมากกว่า 50 Mbps [1] เนื่องจากมีบริการบางประเภทที่ใช้แบนด์วิดท์สูง ได้แก่ 3D-SDTV, 3D-HDTV

การที่ core network ได้พัฒนาไปถึงระดับให้บริการด้วยอัตราข้อมูลถึงระดับ 40 Gbps ขึ้นไป ซึ่งยังไม่มีการนำมาใช้ใน access network งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมรรถนะของการสื่อสัญญาณความเร็ว 40 Gbps บนพื้นฐานจากการส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps บนโครงข่ายเข้าถึงแบบ CWDM-PON โดยอาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบออนออฟคีย์อิงชนิดกลับสู่ศูนย์ (return-to-zero on-off keying : RZ-OOK) ออนออฟคีย์อิงชนิดไม่กลับสู่ศูนย์ (non-return-to-zero on-off keying : NRZ-OOK) ดิฟเฟอเรนเชียลเฟสชิฟต์คีย์อิง (differential phase shift keying : DPSK) ดิฟเฟอเรนเชียลควอเดรเจอร์เฟสชิฟต์คีย์อิง (differential quadrature phase shift keying : DQPSK) และการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอเดรเจอร์ (quadrature amplitude modulation : 2^n-QAM) โดยพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายส่ง (link power budget) ที่เหมาะสมจาก CO ไปยัง ONU ที่บ้านของผู้ใช้บริการแต่ละราย เพื่อนำเสนอแนวทางในการออกแบบระบบ FTTx ให้สามารถตอบสนองบริการสื่อสารข้อมูลในอนาคต

และในปี 2014 ได้มีการกำหนดมาตรฐานของ PON เพิ่มเติมขึ้นคือ NG-PON2 โดย ITU-T [3, 9] ซึ่ง downlink มีอัตราข้อมูล 40 Gbps ส่วน uplink มีอัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 1.4 จะเห็นว่าแนวโน้มเทคโนโลยี PON นั้นอัตราข้อมูลจะสูงมากขึ้นเรื่อยๆ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของการสื่อสัญญาณความเร็ว 40 Gbps บนพื้นฐานจากการส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps บนโครงข่ายเข้าถึงแบบ CWDM-PON สามารถตอบสนองความต้องการข้อมูลในอนาคตได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 1.4 PON Standardization Roadmap [2]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูล พบว่าการนำระบบ CWDM ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อช่องสัญญาณไปเป็นแบบ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ งานวิจัยระบุว่าการส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลสูงระยะไกลระบบจะถูกจำกัดสมรรถนะในการส่งผ่านสัญญาณเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชัน (dispersion) [10, 11] จากข้อจำกัดดังกล่าวในระบบ CWDM-PON จะต้องใช้หน่วยชดเชย dispersion ในการแก้ปัญหา

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้และปัญหาที่จำกัดความสามารถของการนำการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK และ 2^n-QAM มาใช้สำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 10 Gbps และ 40 Gbps โดยวิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

1.2.2 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณ 10 Gbps แบบต่างๆในแง่ของอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดระยะทางการให้บริการไกลสุดและ กำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

1.2.3 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณ 40 Gbps แบบต่างๆในแง่ของอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดระยะทางการให้บริการไกลสุด และกำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

1.2.4 นำเสนอแนวทางการออกแบบการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บน CWDM-PON ให้มีสมรรถนะสูงสุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 โครงข่ายที่ใช้เป็นโครงข่าย FTTx ที่ใช้โครงข่ายแบบ PON เป็นโครงข่ายเข้าถึง

1.3.2 ระบบมัลติเพล็กซ์ในโครงข่าย PON แบบ CWDM ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 nm ถึง 1,571 nm ทั้งหมด 16 ความยาวคลื่นเท่านั้น

1.3.3 การศึกษาและวิเคราะห์จะใช้เฉพาะเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D ในการส่งผ่านสัญญาณเท่านั้น

1.3.4 สาเหตุความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้น จะพิจารณาผลของการสูญเสียกำลังงานในเส้นใยแสง ดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ และปรากฏการณ์เคอร์ของเส้นใยแสงเท่านั้น

1.3.5 ใช้อัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเท่านั้น

1.3.6 หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensating unit : DCU) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ slope compensated dispersion compensating unit (SC-DCU) มีคุณสมบัติชดเชยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ G.652 ในระยะทาง 100 km เท่านั้น

1.3.7 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM และเท่านั้น

1.3.8 ผลการทดลองได้จากการ simulation โดยใช้โปรแกรม OptiSys และการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยไม่มีการทดลองจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการจำกัดสมรรถนะในการสื่อสัญญาณ

1.4.2 ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ เช่น ผลของการสูญเสียกำลังงานในเส้นใยแสง ผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน ปรากฏการณ์เคอร์ของเส้นใยแสง และปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์

1.4.3 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

1.4.4 จำลองระบบ CWDM-PON ที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM โดยการ simulation ด้วยโปรแกรม Optisys

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลของปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของการส่งสัญญาณโดยการมอดูเลตสัญญาณแต่ละแบบ

1.4.6 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีว่าตัวแปรใดที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารระบบ CWDM-PON ที่มีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps

1.4.7 นำเสนอแนวทางในทางทฤษฎีเพื่อใช้ออกแบบการส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps บน CWDM-PON โดยมีพื้นฐานจากการส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps บน CWDM-PON เพื่อให้มีสมรรถนะสูงสุด และตรวจสอบทฤษฎีหรือหลักการแนวทางที่นำเสนอ ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยที่แนวทางการออกแบบนั้นพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายส่ง (total link budget) จาก CO ไปยัง ONU บ้านของผู้ใช้บริการแต่ละรายเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่

1.4.8 เรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps และ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ

1.5.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM รวมทั้งการประยุกต์การมอดูเลตสัญญาณดังกล่าวเข้ากับโครงข่าย FTTx

1.5.3 การส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps บน CWDM-PON เพื่อให้มีสมรรถนะสูงสุดและพิจารณาค่า total link budget จาก CO ไปยัง ONU บ้านของผู้ใช้บริการแต่ละราย ในการออกแบบระบบ

1.5.4 ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

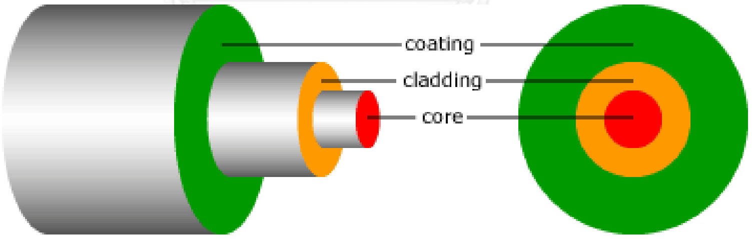
บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

บทนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ เส้นใยแสง การมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx ระบบมัลติเพล็กซ์บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON การคำนวณ Link power budget และการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจาก dispersion

2.1 เส้นใยแสง

เส้นใยแสง (optical fiber) หมายถึง สายนำสัญญาณที่มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกกลมลักษณะโปร่งแสง ผลิตจากสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 125 ไมโครเมตร โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 2.1 คือ

1. core ทำหน้าที่ให้แสงเดินทางผ่าน
2. cladding ทำหน้าที่เป็นตัวหนักเหของแสง
3. coating ทำหน้าที่ป้องกันส่วน core และ cladding

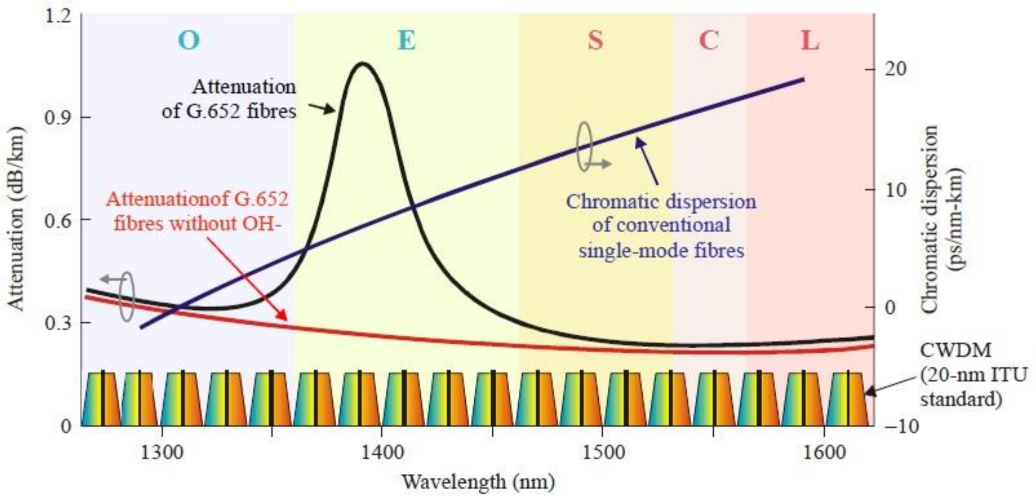


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเส้นใยแสง [12]

2.1.1 เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D

เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว (single mode fiber : SMF) ตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D [13] ถูกออกแบบให้มีการสูญเสียเนื่องจาก attenuation น้อยที่ความยาวคลื่นของ water absorption ดังรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของ SMF แบบ G.652.D กับความยาวคลื่นของระบบ CWDM ตั้งแต่ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,611 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณช่องสัญญาณละ 20 นาโนเมตร ความยาวคลื่นทั้งหมด 18 ความยาวคลื่น [7] ซึ่งทำให้

ช่วงของความยาวคลื่นที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการส่งสัญญาณกว้างขึ้น มีประสิทธิภาพและคุณภาพของสัญญาณมีความเชื่อถือได้สูง คุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.D นั้นคล้ายกันกับคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.B ที่ใช้สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นถึงระดับของ STM-64 เช่น ITU-T G.691 และ ITU-T G.692 หรือ STM-256 สำหรับบางแอปพลิเคชั่นใน ITU-T G.693 และ ITU-T G.959.1 จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่า dispersion ด้วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันของ SMFแบบ G.652.D กับความยาวคลื่นของระบบ CWDM [14]

คุณสมบัติที่สำคัญของ SMFแบบ G.652.D ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับระบบ CWDM ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณ (attenuation coefficient) ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง (chromatic dispersion) คุณสมบัติที่สำคัญของ SMF แบบ G.652.D ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับระบบ CWDW ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps คือ ค่า attenuation coefficient ค่า chromatic dispersion ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD) แสดงดังตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.D

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D [13]

Fiber attribute		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6 - 9.5 μm

	Tolerance	±0.6 μm
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μm
	Tolerance	±1 μm
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding noncircularity	Maximum	1.0 %
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm^2×km

Cable attributes

Attribute	**Detail**	**Value**
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm ±3 nm (Note 3)	0.4 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km
PMD coefficient (Note 4)	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD	0.20 ps/$\sqrt{km}$

NOTE 1 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cable as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm.

NOTE 2 - This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm. In this case, the cable cut-off wavelength should not exceed 1250 nm.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

NOTE 3 - The average attenuation coefficient at this wavelength shall be less than or equal to the maximum value specified for the range of 1310 nm to 1625 nm, after hydrogen ageing. The hydrogen ageing is a type test that shall be done to a sampled fiber, according to [IEC 60793-2-50] regarding the B1.3 fiber category.
NOTE 4 - According to clause 6.2, a maximum PMD_Q value on uncabled fiber is specified in order to support the primary requirement on cable PMD_Q.

2.1.2 ปัจจัยที่จำกัดการส่งของสัญญาณของเส้นใยแสง

2.1.2.1 การลดทอนกำลังของสัญญาณของเส้นใยแสง

attenuation หรือ อัตราการสูญเสียกำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสง เป็นส่วนสำคัญของการกำหนดคุณลักษณะในการออกแบบโครงข่ายทางแสง และเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระยะทางสูงสุดระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยการลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงเกิดจาก 3 สาเหตุหลักคือ การดูดซึม (absorption) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ การกระเจิง (scattering) ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่นจากกระบวนการผลิต และการแผ่รังสี (radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางใดๆ จะเกิดการลดทอนค่ากำลังของสัญญาณดังสมการที่ (1) [15]

$$P(L) = P(0) - \alpha L \qquad (1)$$

โดยที่ $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L กิโลเมตรจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$P(0)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณ [dB/km]

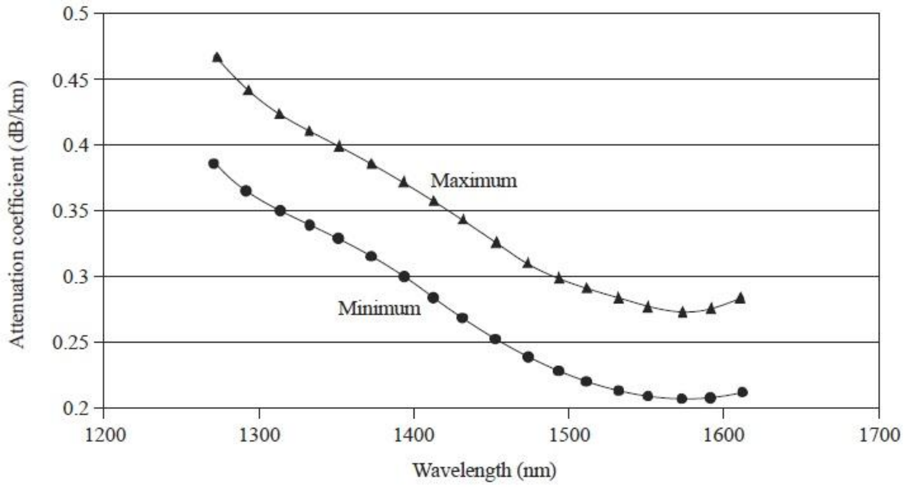
L คือ ระยะทางที่แสงเดินทางจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [km]

ค่า attenuation coefficient (α) มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่น ดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 แสดงขอบเขตของค่า attenuation coefficient ของ SMF แบบ G.652.D ของความยาวคลื่นในระบบ CWDM ตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,611 นาโนเมตร ทั้งหมด 18 ความยาวคลื่น ที่มีค่าน้อยที่สุดและมีค่ามากที่สุด

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตของค่า attenuation coefficient ของ SMF แบบ G.652.D ของความยาวคลื่นในระบบ CWDM ตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,611 นาโนเมตร [14]

Nominal central wavelength (nm)	Minimum attenuation coefficient (dB/km)	Maximum attenuation coefficient (dB/km)	Nominal central wavelength (nm)	Minimum attenuation coefficient (dB/km)	Maximum attenuation coefficient (dB/km)
1271	0.385	0.470	**1451**	0.254	0.326
1291	0.365	0.441	**1471**	0.240	0.312
1311	0.352	0.423	**1491**	0.229	0.300
1331	0.340	0.411	**1511**	0.220	0.290
1351	0.329	0.399	**1531**	0.213	0.283
1371	0.316	0.386	**1551**	0.209	0.277
1391	0.301	0.372	**1571**	0.208	0.273
1411	0.285	0.357	**1591**	0.208	0.275
1431	0.269	0.341	**1611**	0.212	0.283

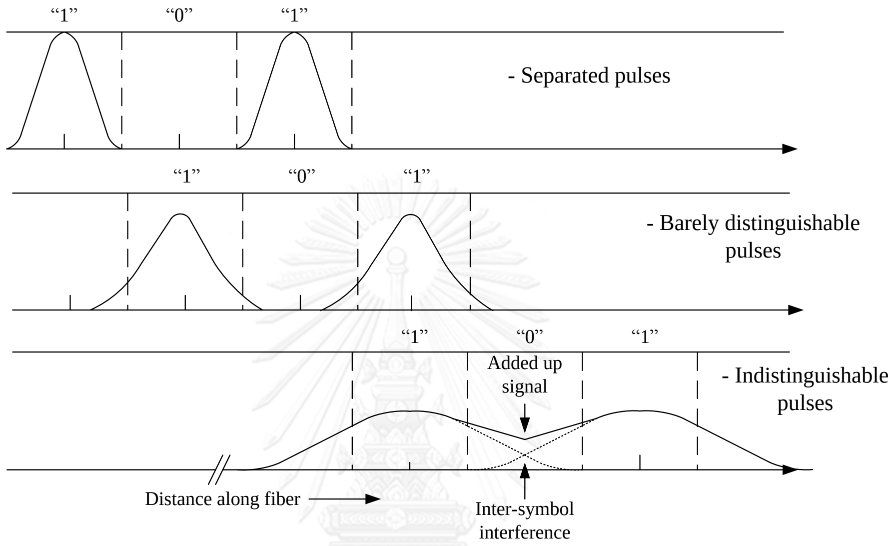
NOTE – These coefficient values include an allowance for maximum central wavelength deviation.



รูปที่ 2.3 ค่า attenuation coefficient ที่น้อยที่สุดและมากที่สุดของ SMF แบบ G.652.D แต่ละความยาวคลื่นในระบบ CWDM [14]

2.1.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง

dispersion เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสง dispersion จะทำให้พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference : ISI) เป็นผลทำให้การรับสัญญาณที่ภาครับมีความผิดพลาดโดยผิดพลาดจากบิต “1” เป็น บิต “0” และผิดพลาดจากบิต “0” เป็น บิต “1” รูปที่ 2.4 แสดงการเกิด ISI จากผลของ dispersion

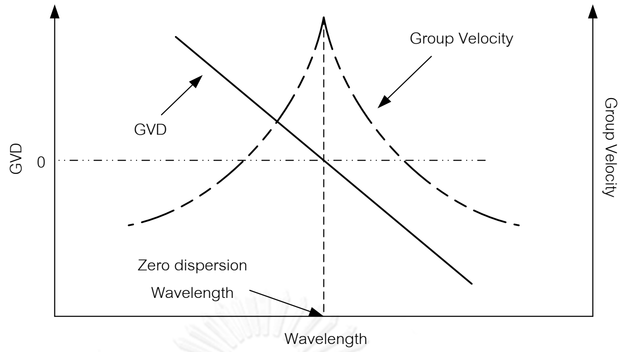


รูปที่ 2.4 การเกิด ISI [16]

dispersion ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกันคือ dispersion ภายนอกแผนคลื่น (inter-modal dispersion) สำหรับเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (multimode fiber : MMF) และ dispersion ภายในแผนคลื่น (intra-modal dispersion) หรือ chromatic dispersion สำหรับ SMF สัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทั้งนี้เราจะเลือกใช้ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงเพราะว่า SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงมีอัตราการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้น dispersion ที่ส่งผลกับระบบจะเป็นแบบ chromatic dispersion

เมื่อแสงเดินทางระยะทางไกลส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง ซึ่งเป็นผลมา chromatic dispersion และผลการประวิงระหว่างโหมด (intramodal delay effect) สามารถตรวจสอบได้ด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocity) ของโหมดการเดินทาง (guided modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มคือความเร็วของพลังงานแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง GVD เป็น

ปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความถี่ที่มีความเร็วกลุ่มต่างกัน ส่งผลให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาแตกต่างกันในการเดินทางซึ่งทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อถึงปลายทาง



รูปที่ 2.5 ความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (GVD) เทียบกับค่าความยาวคลื่น [16]

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความยาวคลื่นแตกต่างกันจะมีค่าความเร็วกลุ่มต่างกันช่วงของ dispersion แบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วง dispersion ปกติ (normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า ช่วง dispersion ผิดปกติ (anomalous dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมี β_2 ความเร็วกลุ่มน้อยกว่าและ dispersion เป็นศูนย์ (zero dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่ความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

เราสามารถคำนวณการขยายตัวออกของสัญญาณพัลส์ (broadening) เนื่องจาก chromatic dispersion ได้ดังสมการที่ (2) โดยพิจารณาให้ τ แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่ ω

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L\frac{\delta\beta}{\delta\omega} = \frac{L}{C}\frac{\delta\beta}{\delta K} \qquad (2)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของเส้นใยแสงหน่วยกิโลเมตร [km]

v_g คือ ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตรงกันที่ความถี่ ω เท่ากับ $v_g = \frac{1}{\beta_1} = \frac{\partial\omega}{\partial\beta}$

β คือ ค่าคงที่การแพร่กระจาย (propagation constant) และ $\beta_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \omega}$

$K = \frac{2\pi}{\lambda}$

จากสมการที่ (2) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \tau}{\partial \omega} = L\frac{\partial}{\partial \omega}\left(\frac{1}{v_g}\right) = L\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = L\beta_2 \quad (3)$$

โดยที่ β_2 คือ group velocity dispersion : GVD parameter

เมื่อ $\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\delta \beta_1}{\delta \omega} = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta \omega}$ ถ้าสัญญาณมีความกว้างสเปกตรัมความถี่เท่ากับ $\Delta\omega$ ดังนั้นความแตกต่างการประวิงแพร่กระจายในแต่ละส่วนประกอบของสเปกตรัมสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (4)

$$\Delta \tau = \left|\frac{\partial \tau}{\partial \omega}\right| \Delta \omega = \left|\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}\right| L \Delta \omega = |\beta_2| L \Delta \omega \quad (4)$$

เมื่อเขียนในรูปความยาวคลื่น

$$\Delta \tau = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta \lambda} \Delta \lambda = DL\Delta\lambda \quad (5)$$

$$D = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta \lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \quad (6)$$

เมื่อ D คือ ค่า dispersion ของเส้นใยแสง [ps/nm/km]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\tau_{GVD} = D(\lambda)L\sigma_{\lambda} \tag{7}$$

โดยที่ τ_{GVD} คือ เวลาของความเร็วในการกระจายตัวของกลุ่ม (group velocity dispersion time) [ps]

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

σ_{λ} คือ ความกว้างของสเปคตรัมของเลเซอร์ [nm]

ในการออกแบบระบบสื่อสัญญาณทางแสงแบบ RZ ค่าของ τ_{GVD} ในสมการที่ (7) ควรจะน้อยกว่า 35% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) จะได้สมการคือ [17]

$$0.35T = D(\lambda)L\sigma_{\lambda} \tag{8}$$

เมื่อ T คือ bit period ของสัญญาณ RZ

ในการออกแบบระบบสื่อสัญญาณทางแสงแบบ NRZ ค่าของ τ_{GVD} ในสมการที่ (7) ควรจะน้อยกว่า 70% ของ bit period จะได้สมการคือ [17]

$$0.70T = D(\lambda)L\sigma_{\lambda} \tag{9}$$

เมื่อ T คือ bit period ของสัญญาณ NRZ

จากตารางที่ 2.3 แสดงค่า dispersion ของ SMF แบบ G.652 กับความยาวคลื่นในระบบ CWDM ตั้งแต่ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,611 นาโนเมตร ทั้งหมด 18 ความยาวคลื่น โดยมีค่า dispersion ที่มากที่สุดเท่ากับ 21.09 ps/nm/km ที่ความยาวคลื่น 1,611 นาโนเมตร

ตารางที่ 2.3 ค่า dispersion ของ SMF แบบ G.652 กับความยาวคลื่นในระบบ CWDM [14]

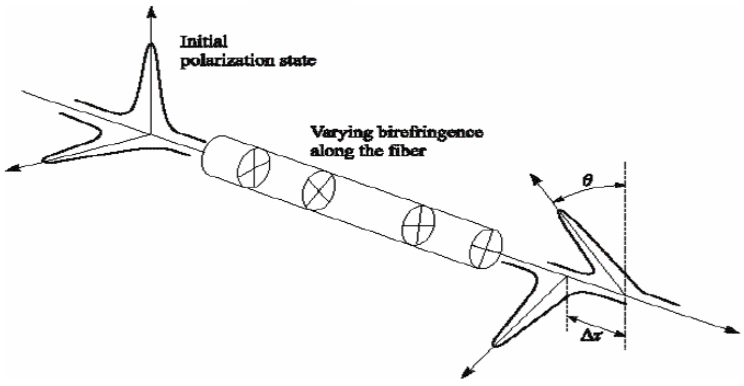
Channel wavelength (nm)	dispersion coefficient (ps/nm/km)		Channel wavelength (nm)	dispersion coefficient (ps/nm/km)	
	Negative	Positive		Negative	Positive
1271	-	-	**1451**	-	11.49

1291	-3.85	-	**1471**	-	12.68
1311	-1.85	1.60	**1491**	-	13.86
1331	-	3.34	**1511**	-	15.06
1351	-	5.02	**1531**	-	16.25
1371	-	6.62	**1551**	-	17.46
1391	-	7.97	**1571**	-	18.66
1411	-	9.14	**1591**	-	19.87
1431	-	10.31	**1611**	-	21.09

2.1.2.3 ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์

ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD) เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้พัลซ์ของสัญญาณขยายตัวกว้างขึ้น อธิบายได้ดังในรูปที่ 2.6 องค์ประกอบของแสง 2 โหมดโพลาไรซ์ซึ่งตั้งฉากกัน (orthogonal) เดินทางผ่านเส้นใยแสงด้วยความเร็วที่ต่างกัน (differential group delay : DGD) เล็กน้อย โดยมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติ (birefringence) ของเส้นใยแสง ซึ่งเกิดจากธรรมชาติของเส้นใยแสง เช่น ความไม่เรียบในบริเวณแกน (core) หรือความเครียดภายในเส้นใยแสง (internal stresses) รวมไปถึงผลกระทบจากภายนอกเช่น การโค้งงอ (bending) และการบิดเกลียว (twisting) ของเส้นใยแสง โดยจะส่งผลกระทบมากในโครงข่ายที่ส่งไปในระยะทางไกล ที่มีอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 10 Gbps โดยสามารถคำนวณความเร็วที่ต่างกันได้จากสมการ (10) และสมการที่ (11)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.6 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [16]

$$\Delta\tau = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \tag{10}$$

โดยที่ $\Delta\tau$ คือ differential time delay [ps]

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

v_{gx}, v_{gy} คือ ความเร็วกลุ่มของแต่ละโหมดโพลาไรซ์เซชันซึ่งตั้งฉากกัน [m/s]

อย่างไรก็ตาม PMD เปลี่ยนแปลงไปอย่างสุ่มระหว่างการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง เนื่องจากผลของคุณสมบัติ (birefringence) ของเส้นใยแสง ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ $\Delta\tau$ จากสมการที่ (10) จึงไม่สามารถใช้ได้โดยตรง เราจึงประมาณค่า $\Delta\tau$ ได้ดังสมการที่ (11) [16]

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD}\sqrt{L} \tag{11}$$

โดยที่ $\langle \Delta\tau \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ย (mean) ของ differential time delay [ps]

D_{PMD} คือ ค่าเฉลี่ย (average) ของพารามิเตอร์ PMD [$ps/\sqrt{km}$]

ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณคือ โหมดโพลาไรซ์ของแสงที่ตั้งฉากกันทั้ง 2 แกนจะเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันและบิดไปจากแกนเดิมอย่างไม่มีแบบแผน (random) จึงส่งผลให้พัลส์ของสัญญาณขยายกว้างออก เมื่อไปถึงภาครับจึงไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกต้องได้

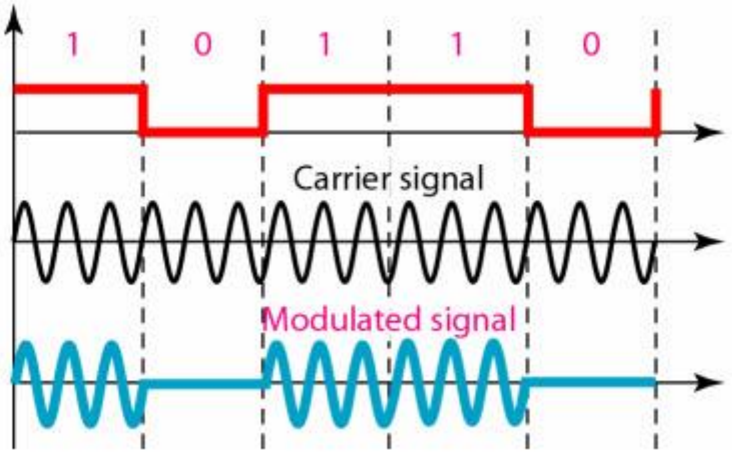
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 การมอดูเลตสัญญาณ

การมอดูเลต (modulation) คือ กระบวนการเปลี่ยนคุณสมบัติของคลื่นพาห์ (carrier) ไปตามคุณสมบัติของสัญญาณ เช่น การเปลี่ยนแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟสของสัญญาณ วิธีการมอดูเลตสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก คือ การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด (amplitude shift keying : ASK) การมอดูเลตเชิงความถี่ (frequency shift keying : FSK) การมอดูเลตเชิงมุม (phase shift keying : PSK) และการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดและเชิงมุม หรือ การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอเดรเจอร์ (quadrature mmplitude modulation : QAM) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการมอดูเลตสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

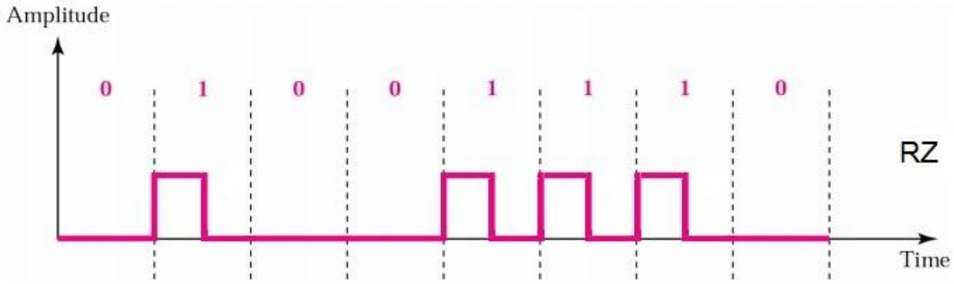
2.2.1 การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด

การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดหรือการมอดูเลตแบบแอมพลิจูดชิฟต์คีย์อิง (amplitude shift keying : ASK) แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์จะเปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณข้อมูลที่ต้องการจะมอดูเลตสัญญาณลงบนคลื่นพาห์ โดยที่ความถี่และเฟสของสัญญาณมีค่าคงที่ในขณะที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลง ข้อดีของการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดคือ เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน แต่การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดจะมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (noise) มาก การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดที่นิยมใช้ในระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง คือ การมอดูเลตสัญญาณแบบออนออฟคีย์อิง (On-Off keying : OOK) กล่าวคือระบบส่งสัญญาณไซนูซอยด์ที่มีแรงดันเท่ากับ A โวลต์แทนข้อมูลบิต "1" และส่งสัญญาณด้วยแรงดันเท่ากับ 0 โวลต์แทนข้อมูลบิต "0" แสดงดังรูปที่ 2.10 สัญญาณแบบ OOK มีรูปสัญญาณแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ กลับสู่ศูนย์ (return-to-zero : RZ) และ ไม่กลับสู่ศูนย์ (nonreturn-to-zero : NRZ) [18-20]

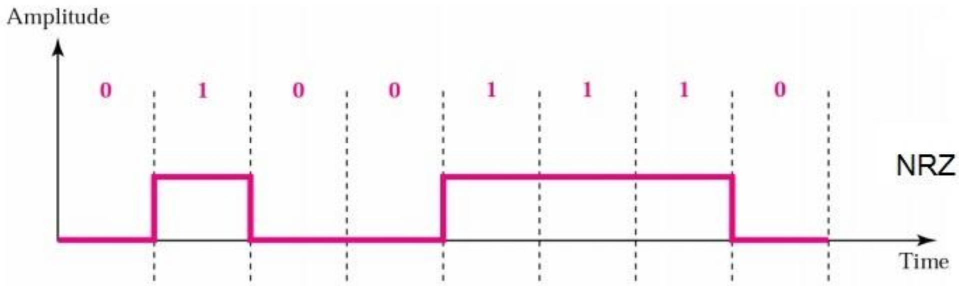


รูปที่ 2.7 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK [19]

รูปที่ 2.11 (ก) สัญญาณข้อมูลแบบ RZ เมื่อส่งข้อมูลบิต "1" จะมีค่า A โวลต์เป็นระยะเวลาครึ่งคาบบิต แล้วปรับให้มีค่าเป็น 0 โวลต์สำหรับช่วงคาบบิตที่เหลือ เมื่อส่งข้อมูลบิต "0" จะมีค่า 0 โวลต์ตลอดช่วงคาบบิต และรูปที่ 2.11 (ข) สัญญาณข้อมูลแบบ NRZ เมื่อส่งข้อมูลบิต "1" จะมีค่า A โวลต์ตลอดช่วงคาบบิต เมื่อส่งข้อมูลบิต "0" จะมีค่า 0 โวลต์ตลอดช่วงคาบบิต ข้อดีของแบบ RZ คือใช้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณน้อยกว่าแบบ NRZ เพราะแบบ RZ ส่งกำลังเพียงครึ่งคาบบิตแต่แบบ NRZ ส่งกำลังตลอดคาบบิต ข้อเสียของแบบ RZ คือ ขนาดของแบนด์วิดท์ที่ต้องใช้ในการส่งสัญญาณแบบ RZ กว้างกว่าแบบ NRZ เท่ากับ 2 เท่า [18]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 สัญญาณข้อมูลแบบต่างๆ (ก) RZ (ข) NRZ

สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK เกิดจากผลคูณของสัญญาณเบสแบนด์ $m(t)$ และสัญญาณคลื่นพาห์ $c(t)$ แสดงดังสมการที่ (17)

$$S_{ASK}(t) = m(t) \cdot c(t) \tag{17}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

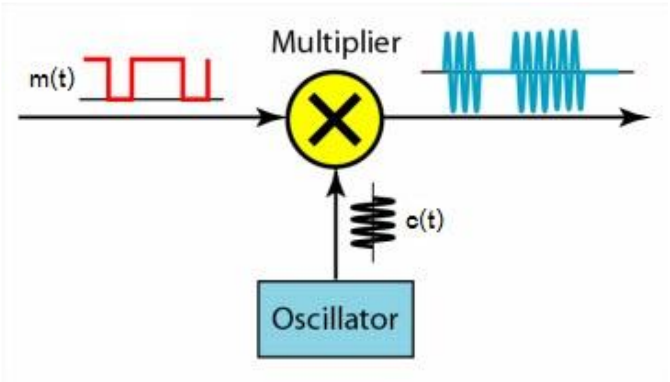
สัญญาณคลื่นพาห์ ดังสมการที่ (18)

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \tag{18}$$

โดยที่ A_c คือ แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์

f_c คือ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์

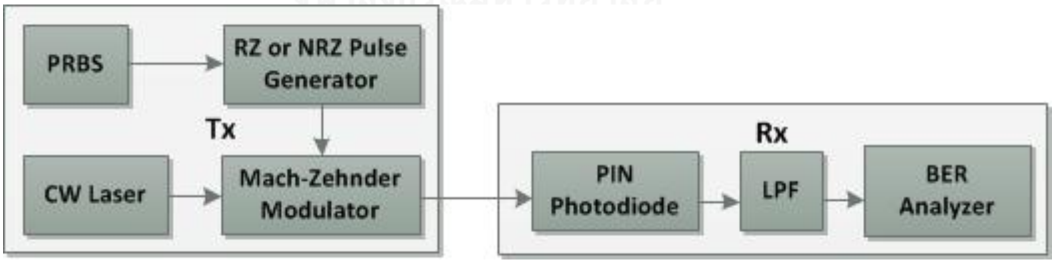
โครงสร้างของวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK จะอาศัยวงจรคูณสัญญาณโดยนำสัญญาณเบสแบนด์มาคูณกับสัญญาณคลื่นพาห์ แสดงดังรูปที่ 2.12



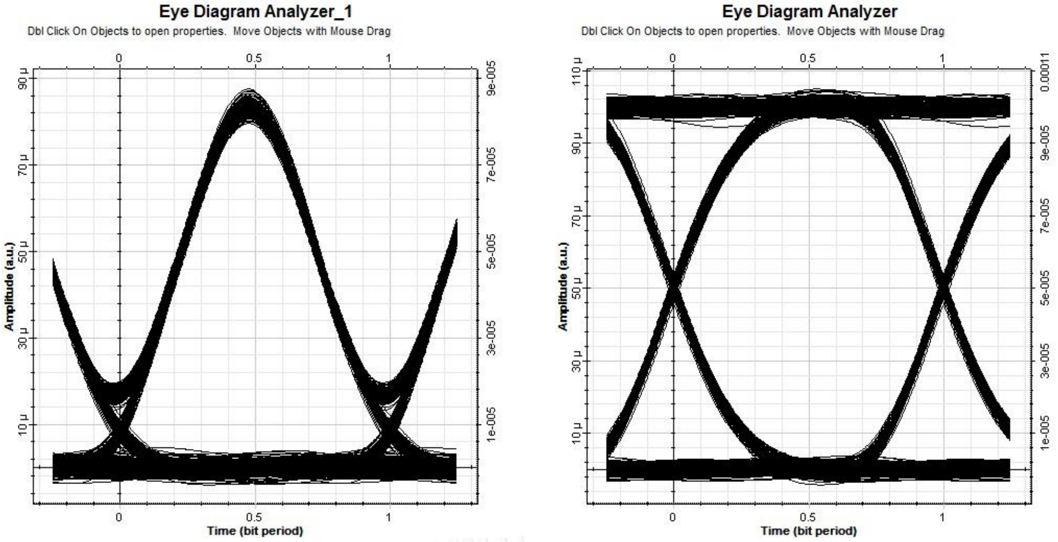
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK [19]

การมอดูเลตสัญญาณแบบ direct modulation (DM) นั้นมีข้อจำกัดไม่สามารถรองรับระบบเมื่อส่งด้วยอัตราข้อมูลที่สูงขึ้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงใช้แบบ external modulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps และ 40 Gbps รูปที่ 2.13 ระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ที่ภาคส่ง (transmitter : Tx) สัญญาณแสงจาก continuous wave laser (CW Laser) จะถูกมอดูเลตเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ RZ หรือ NRZ ที่ Mach-Zehnder modulator (MZM) จะได้สัญญาณแสงที่มีข้อมูลส่งผ่านไปยังเส้นใยแสงไปยังภาครับ (receiver : Rx) ซึ่งรับสัญญาณแสงและเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ photodetector ชนิด PIN และผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ low pass Bessel filter (LPF) สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า Bit error rate (BER) ที่ eye diagram analyzer จะปรากฏสัญญาณแบบ RZ และ NRZ แสดงดังรูปที่ 2.14 (ก) และ (ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างวงจรการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ผ่านเส้นใยแสง



(ก) (ข)

รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ปรากฏใน eye diagram analyzer แบบ (ก) RZ (ข) NRZ

2.2.2 การมอดูเลตเชิงมุม

การมอดูเลตเชิงมุมหรือการมอดูเลตสัญญาณแบบ PSK เป็นวิธีการมอดูเลตสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณคลื่นพาห์ไปตามขนาดของสัญญาณข้อมูล โดยที่แอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณมีค่าคงที่ ข้อดีของการมอดูเลตเชิงมุมคือ มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด ข้อเสียคือ ระบบมีความซับซ้อนในการรับส่งสัญญาณมากกว่าการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด

การมอดูเลตสัญญาณแบบ PSK นั้นที่ภาครับจะต้องใช้เฟสอ้างอิงในการตรวจรับสัญญาณ เพื่อให้สะดวกต่อการตรวจรับสัญญาณข้อมูลจึงมีการพัฒนาการตรวจรับสัญญาณแบบ differential ขึ้นการมอดูเลตเชิงมุมที่นิยมใช้กับระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง คือ การมอดูเลตสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียลเฟสชิฟต์คีย์อิง (differential phase shift keying : DPSK) และการมอดูเลตสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียลควอเดรเจอร์เฟสชิฟต์คีย์อิง (differential quadrature phase shift keying : DQPSK)

2.2.2.1 การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK

การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK นั้นมีพื้นฐานมาจากการมอดูเลตสัญญาณแบบ binary phase shift keying (BPSK) เป็นการมอดูเลตสัญญาณที่เรียบง่ายมากที่สุดในกลุ่มการมอดูเลตสัญญาณแบบเฟสชิฟต์คีย์อิง โดยที่สัญญาณข้อมูลจะได้รับการพิจารณาครั้งละ 1 บิต และมีสัญญาณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

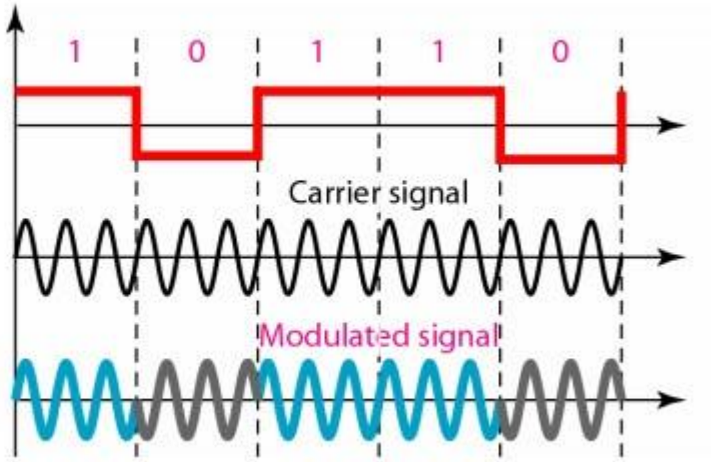
เพียง 2 รูปแบบที่แทนสัญญาณข้อมูลที่แตกต่างกัน กล่าวคือเฟสของสัญญาณจะเปลี่ยนไปตามสัญญาณข้อมูลบิต "0" หรือ บิต "1" โดยมีความต่างเฟสเท่ากับ 180 องศา แสดงดังสมการที่ (19)

$$s(t)=\begin{cases} A_c\cos(2\pi f_c t) & binary\,1 \\ A_c\cos(2\pi f_c t+\pi) & binary\,0 \end{cases} \tag{19}$$

จะได้

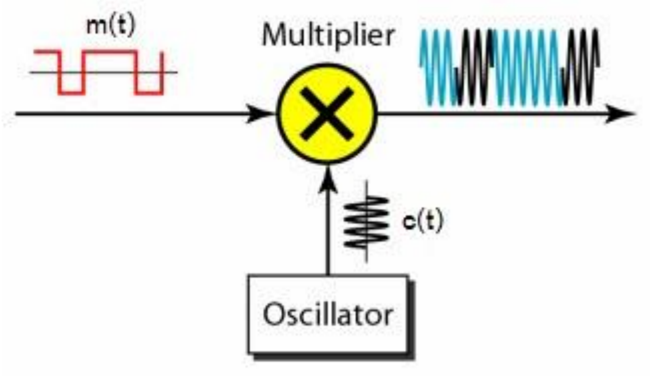
$$s(t)=\begin{cases} A_c\cos(2\pi f_c t) & binary\,1 \\ -A_c\cos(2\pi f_c t) & binary\,0 \end{cases} \tag{20}$$

จากรูปที่ 2.15 ข้อมูลบิต "1" แทนด้วยสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ 0 องศา และ ข้อมูลบิต "0" แทนด้วยสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ 180 องศา



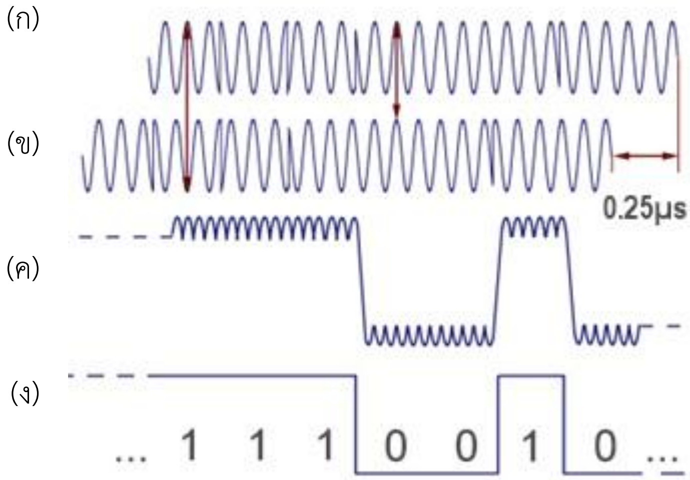
รูปที่ 2.12 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK [19]

โครงสร้างของวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK จะอาศัยวงจรคูณสัญญาณโดยนำสัญญาณเบสแบนด์มาคูณกับสัญญาณคลื่นพาห์ แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.13 โครงสร้างวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK [19]

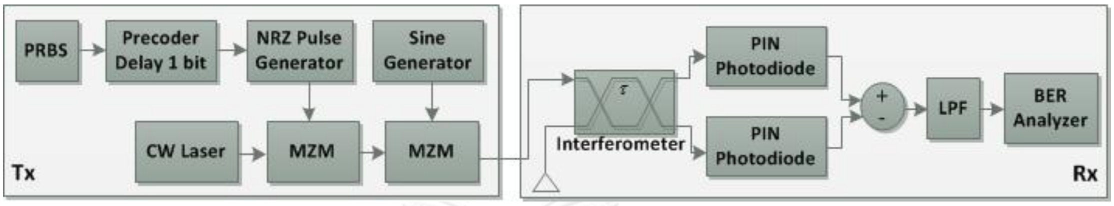
รูปที่ 2.17 การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK จะคล้ายคลึงกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK แต่แตกต่างกันที่ไม่จำเป็นต้องใช้เฟสอ้างอิง เพราะการดีมอดูเลตสัญญาณ DPSK ที่ภาครับมีการเปรียบเทียบบิตก่อน ทำได้โดยทำการ shift บิตไป 1 บิต แสดงดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) แล้วเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2.17 (ค) เมื่อเฟสต่างกัน 180 องศา จะแสดงข้อมูลบิต "1" หากเฟสของสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบไม่มีความต่างเฟส หรือมีค่าเท่ากับ 0 องศา นั้นจะแสดงข้อมูลบิต "0" ดังรูปที่ 2.17 (ง) [21-23]



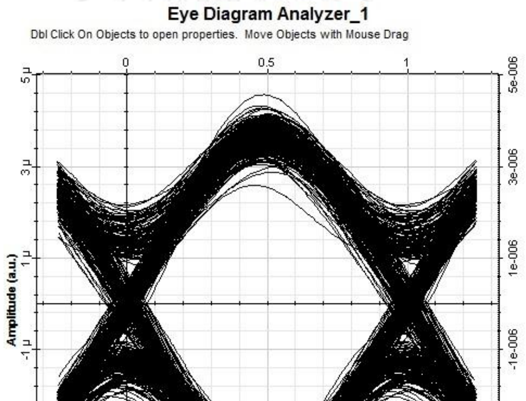
รูปที่ 2.14 สัญญาณที่ได้จากการดีมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK [23]

รูปที่ 2.18 ระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ที่ภาคส่งสัญญาณแสงจาก CW Laser จะถูกมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ ที่ MZM จะได้สัญญาณแบบ differential เพราะมีการทำ precoder delay 1 bit จากนั้นสัญญาณจะถูกมอดูเลต

อีกครั้งที่ MZM ด้วย sine generator เพื่อทำการ pulse carver จะได้สัญญาณแบบ RZ ที่มีข้อมูลส่งผ่านไปยังเส้นใยแสง และภาครับสัญญาณแสงผ่าน Interferometer สัญญาณที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยที่อีกขาหนึ่ง delay ไป 1 บิต ต่อจากนั้นสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ substractor แล้วผ่านไปยัง LPF สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER ที่ eye diagram analyzer จะปรากฏสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.16 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ที่ปรากฏใน eye diagram analyzer

2.2.2.2 การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK

การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK นั้นมีพื้นฐานมาจากการมอดูเลตสัญญาณแบบ quadrature phase-shift keying (QPSK) สัญญาณข้อมูลจะได้รับการพิจารณาครั้งละ 2 บิต และมีสัญญาณ 4 รูปแบบที่แทนสัญญาณข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยสัญญาณจะมีองค์ประกอบคือองค์ประกอบร่วมเฟส (in-phase component : I) และ องค์ประกอบควอเดรเจอร์ (quadrature

component : Q) ข้อดีของระบบ QPSK คือ สามารถรองรับอัตราข้อมูลที่สูงขึ้นได้ เมื่อแบนด์วิดท์คงเดิม ข้อเสียของระบบ QPSK คือ เมื่ออัตราข้อมูลที่สูง อุปกรณ์มีขีดจำกัดความสามารถที่จะทำให้มีความต่างเฟสน้อยๆ [19] สัญญาณของ QPSK จะมีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากัน แต่ความต่างเฟสแตกต่างกันไปทีละ $90°$ คือ $0°$, $90°$, $180°$ และ $270°$ เมื่อข้อมูลเป็น '00', '01', '11' และ '10' ตามลำดับแสดงดังสมการที่ (21) สัญญาณของ DQPSK จะมีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากัน แต่ความต่างเฟสแตกต่างกันไปทีละ $90°$ โดยเฟสของสัญญาณ DQPSK จะถูกเลื่อนไป 45 องศาจากสัญญาณ QPSK คือ $45°$, $135°$, $225°$ และ $315°$ เมื่อข้อมูลเป็น '00', '01', '11' และ '10' ตามลำดับ [24] แสดงดังสมการที่ (22) และ (23)

$$S_{QPSK}(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{\pi}{2}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\pi) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{3\pi}{2}) \end{cases} \tag{21}$$

เมื่อเลื่อนเฟส 45 องศา

$$S_{DQPSK}(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t+\frac{\pi}{4}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{4}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\pi+\frac{\pi}{4}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{3\pi}{2}+\frac{\pi}{4}) \end{cases} \tag{22}$$

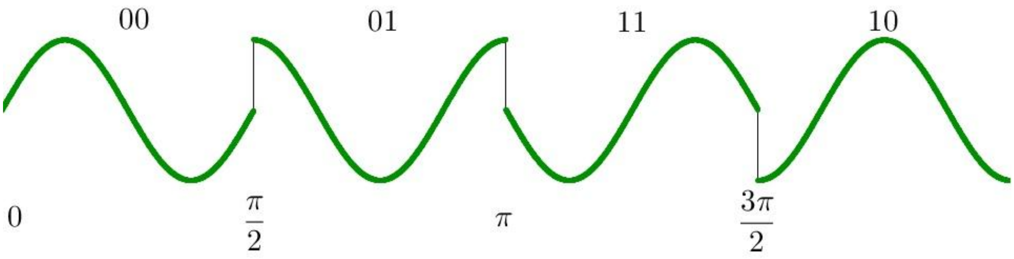
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จะได้

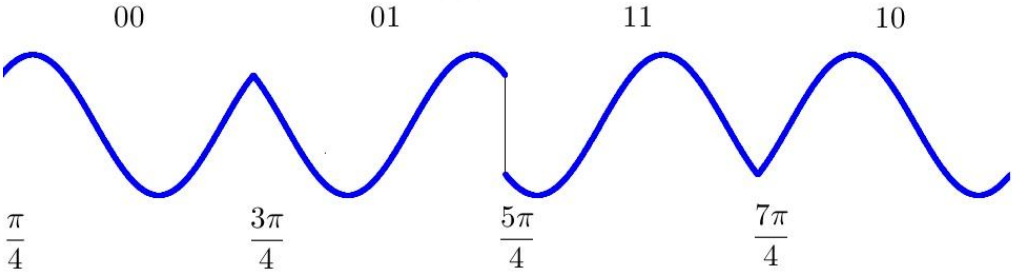
$$S_{DQPSK}(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t+\frac{\pi}{4}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{3\pi}{4}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{5\pi}{4}) \\ A\cos(2\pi f_c t+\frac{7\pi}{4}) \end{cases} \tag{23}$$

รูปที่ 2.20 (ก) สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK ข้อมูลบิต '00', '01', '11' และ '10' แทนด้วยสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ 0, $\frac{\pi}{2}$, π และ $\frac{3\pi}{2}$ ตามลำดับ (ข) สัญญาณที่ได้จาก

การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ข้อมูลบิต '00', '01', '11' และ '10' แทนด้วยสัญญาณที่มีเฟสเท่ากับ $\frac{\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{4}$, $\frac{5\pi}{4}$ และ $\frac{7\pi}{4}$ ตามลำดับ



(ก)



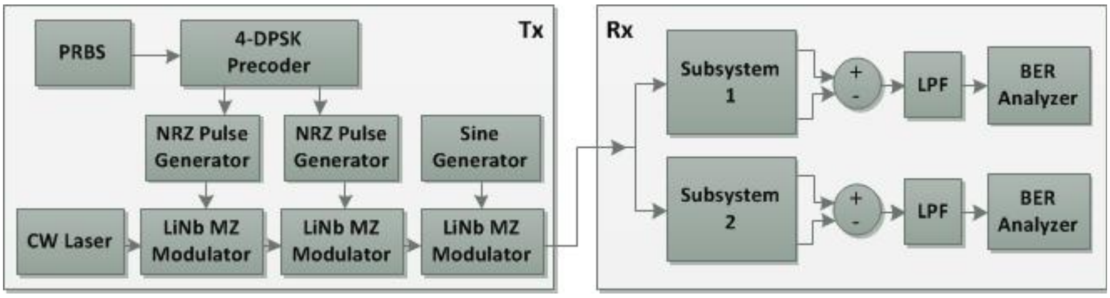
(ข)

รูปที่ 2.17 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ (ก) QPSK (ข) DQPSK

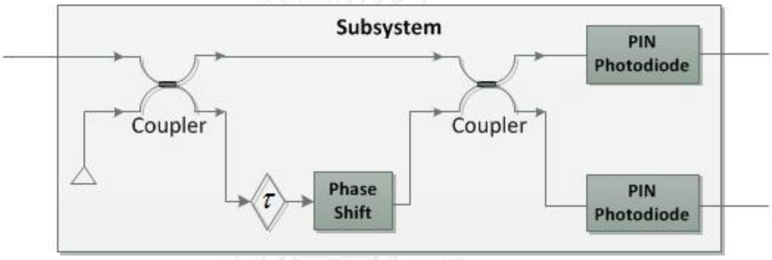
การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK จะคล้ายคลึงกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK แต่แตกต่างกันที่การดีมอดูเลตสัญญาณ DQPSK ที่ภาครับมีการเปรียบเทียบบิตก่อน ทำได้โดยทำการ shift บิตไป 1 บิต และเลื่อนเฟสของสัญญาณไป ± 45 องศา เพื่อเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ โดยไม่ต้องใช้เฟสอ้างอิง

รูปที่ 2.21 (ก) ระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ที่ภาคส่งสัญญาณแสงจาก CW Laser จะถูกมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ ที่ MZM จะได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบคือ I และ Q เพราะมีการทำ 4-DPSK precoder จากนั้นสัญญาณจะถูกมอดูเลตอีกครั้งที่ MZM เพื่อได้สัญญาณ I โดยมอดูเลตอีกครั้งที่ MZM เพื่อได้สัญญาณ Q และมอดูเลตที่ MZM ด้วย sine generator เพื่อทำการ pulse carver จะได้สัญญาณแบบ RZ ที่มีข้อมูลส่งผ่านไปยังเส้นใยแสง ที่ภาครับ subsystem-1 และ subsystem-2 จะได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบ I และ Q ตามลำดับ รูปที่ 2.21 (ข) ภายใน subsystem ประกอบด้วย coupler 3 dB สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนเพื่อเปรียบเทียบความต่างเฟส โดยสัญญาณส่วนแรกจะถูกทำให้ delay ไป 1 บิต และเลื่อนเฟสของสัญญาณไป 45 องศา และ -45 องศา ต่อจากนั้นสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่

PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ substractor แล้วผ่านไปยัง LPF สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER ที่ eye diagram analyzer จะปรากฏสัญญาณที่มีองค์ประกอบของ I และ Q ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.22 (ก) และ (ข)

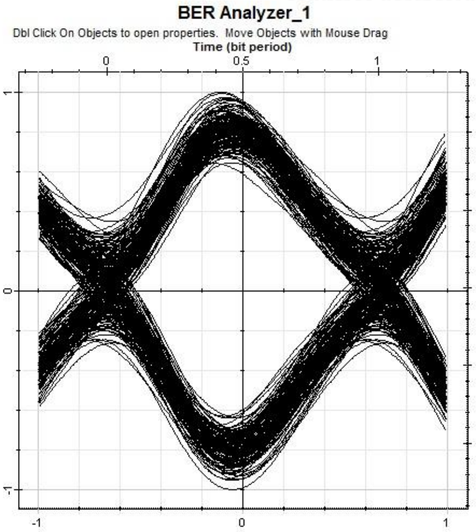


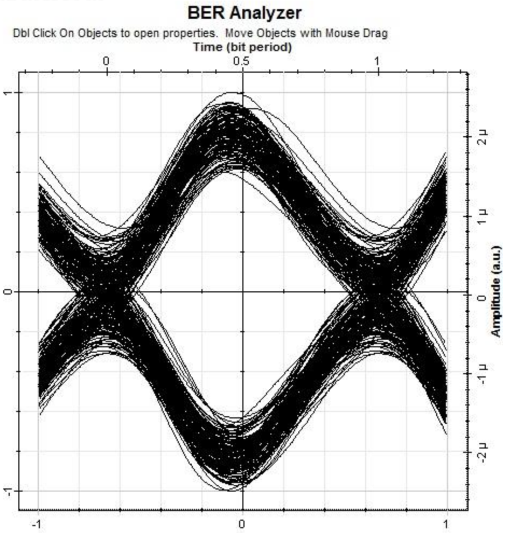
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.18 โครงสร้างวงจรการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ผ่านเส้นใยแสง (ก) ภาครับและภาคส่ง (ข) subsystem ที่ภาครับ





(ก) (ข)

รูปที่ 2.19 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ที่ปรากฏใน eye diagram analyzer (ก) in-phase (ข) quadrature

2.2.3 การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอเดรเจอร์

การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอเดรเจอร์ (quadrature amplitude modulation : QAM) หรือการมัลติเพล็กซ์คลื่นพาห์แบบควอเดรเจอร์ (quadrature-carrier multiplexing) คือการส่งสัญญาณเบสแบนด์ 2 ชุดที่แตกต่างกันมาส่งลงในช่องสัญญาณสื่อสารในสเปกตรัมช่วงเดียวกันได้ ข้อดีคือระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้เพิ่มขึ้นเท่าตัวโดยที่แบนด์วิดท์มีขนาดเท่าเดิม โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM คือการรวมวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK และ PSK เข้าด้วยกัน และเป็นการพัฒนาการมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK กล่าวคือ สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณควบคู่กันไป การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM นั้นมีหลายรูปแบบ เช่น 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM หรือ 64-QAM สามารถเขียนแทนด้วย 2^n-QAM โดย n คือ จำนวนบิตข้อมูลที่แสดงสถานะของแต่ละสัญญาณข้อมูล เช่น 4-QAM มีจำนวนบิตข้อมูลที่แสดงสถานะของแต่ละสัญญาณเท่ากับ 2 บิต ซึ่งสามารถระบุด้วยเลขเชิงซ้อน (complex number) และเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM [18, 19] แสดงดังตารางที่ 2.4

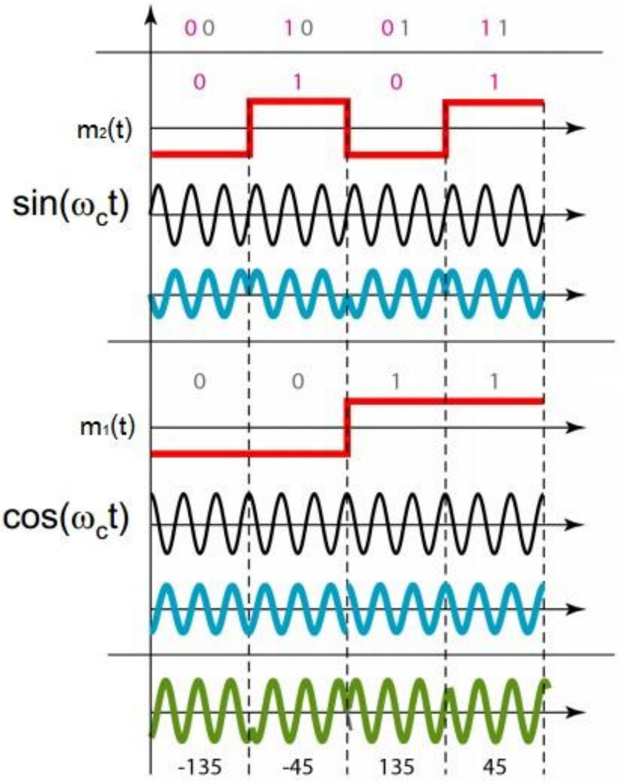
ตารางที่ 2.4 ค่าบิตข้อมูลที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM

Input data bits	Modulated symbols	Phase (degree)
00	1+j	45
10	-1+j	135
11	-1-j	225
01	1-j	315

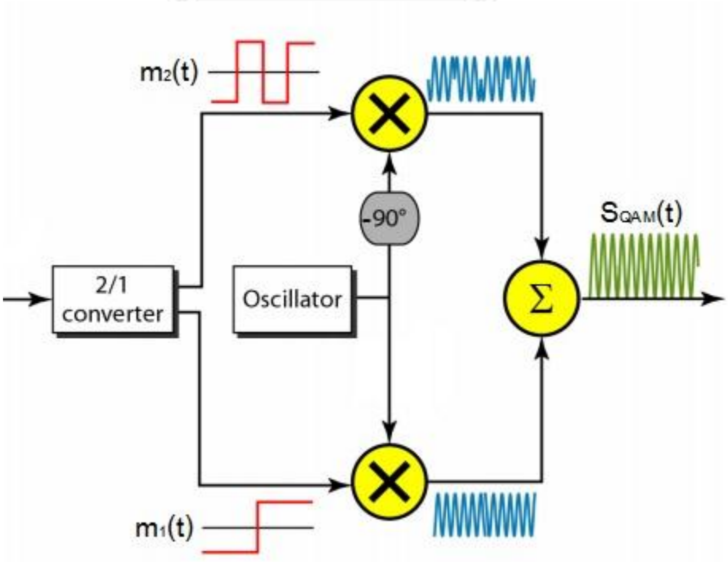
พิจารณาโครงสร้างของวงจรกำเนิดสัญญาณ QAM ในรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24 สัญญาณเบสแบนด์ 2 ชุดคือ $m_1(t)$ และ $m_2(t)$ โดยป้อนเข้าวงจรคูณกับสัญญาณคลื่นพาห์ 2 คลื่นพาห์ที่มีความถี่เดียวกันแต่มีเฟสต่างกัน -90 องศา จากนั้นสัญญาณที่ได้มารวมกันผลลัพธ์ที่ได้คือสัญญาณที่มีค่าเท่ากับ

$$S_{QAM}(t) = A_c m_1(t)\cos(2\pi f_c t) + A_c m_2(t)\sin(2\pi f_c t) \tag{24}$$

จากสมการสัญญาณ QAM นี้ เราจะเรียก $A_c m_1(t)$ เป็นองค์ประกอบร่วมเฟส (in-phase component) และ $-A_c m_2(t)$ เป็นองค์ประกอบควอเดรเจอร์ (quadrature component)



รูปที่ 2.20 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM [19]

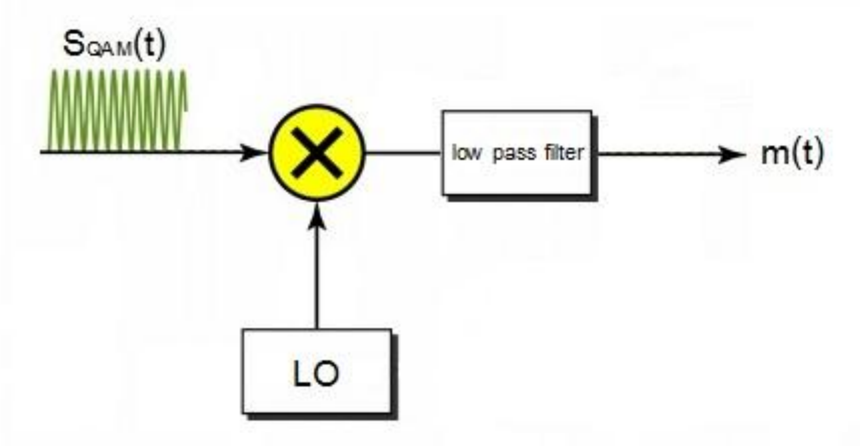


รูปที่ 2.21 โครงสร้างวงจรภาคส่งของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM [19]

ปัญหาหลักของการดีมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM คือ การซิงโครไนซ์สัญญาณคลื่นพาห์ทั้งเชิงความถี่และเฟสระหว่างสัญญาณ QAM กับสัญญาณที่กำเนิดจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ (local

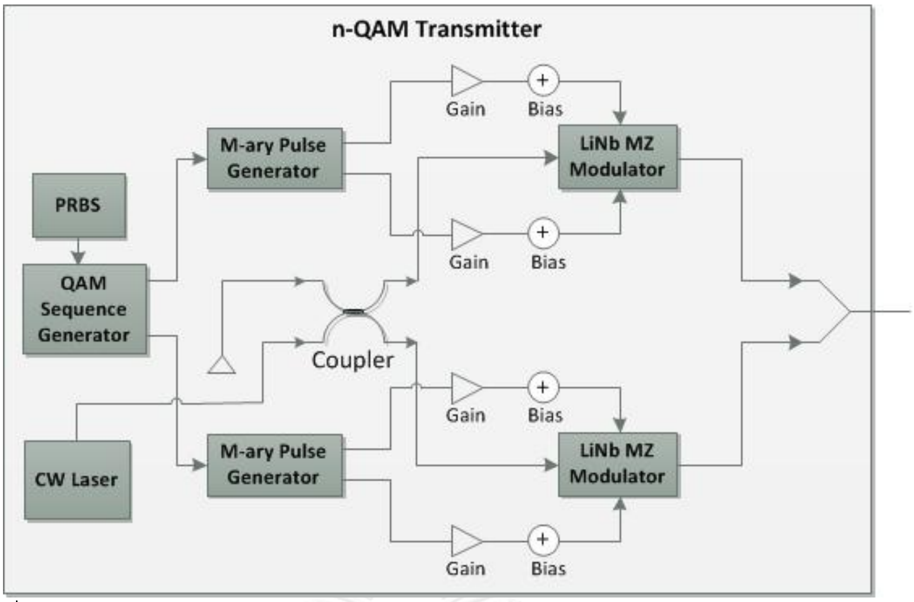
oscillator : LO) ให้ตรงกันตลอดเวลา ถ้าไม่ตรงกันจะเกิดการรบกวนกันระหว่างสัญญาณที่ดีมอดูเลตสัญญาณได้ทั้งสอง การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยอาศัยวงจรภาครับที่สามารถตรวจวัดเฟสของสัญญาณได้โดยตรงและส่งสัญญาณความถี่คลื่นพาห์ที่มีกำลังต่ำควบคู่ไปกับสัญญาณ QAM พร้อมกัน คือ กระบวนการโคฮีเรนท์ดีเทกชัน (coherent detection) [18, 25, 26]

coherent detection สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณที่ได้จากมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ไปคูณกับสัญญาณไซนูซอยด์ที่สร้างขึ้นภายในวงจรภาครับ จากนั้นสัญญาณที่ได้ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำก็จะได้สัญญาณเบสแบนด์ $m(t)$ กลับคืนมา แสดงดังรูปที่ 2.25



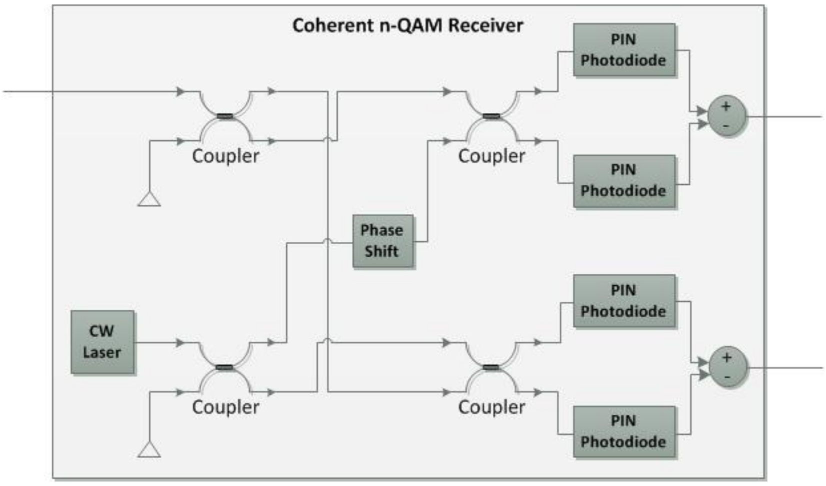
รูปที่ 2.22 โครงสร้างวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM [19]

ระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM แสดงดังรูปที่ 2.26 ภาคส่งของการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM นั้นประกอบด้วย สัญญาณไฟฟ้าจาก QAM sequence generator แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ไปยัง M-ary pulse generator เพื่อทำให้พัลส์ของสัญญาณมีหลายระดับ (multilevel pulse) จะถูกมอดูเลตกับสัญญาณแสงจาก CW laser ที่ MZM จะได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบ I และ Q ที่มีข้อมูลส่งผ่านไปยังเส้นใยแสง

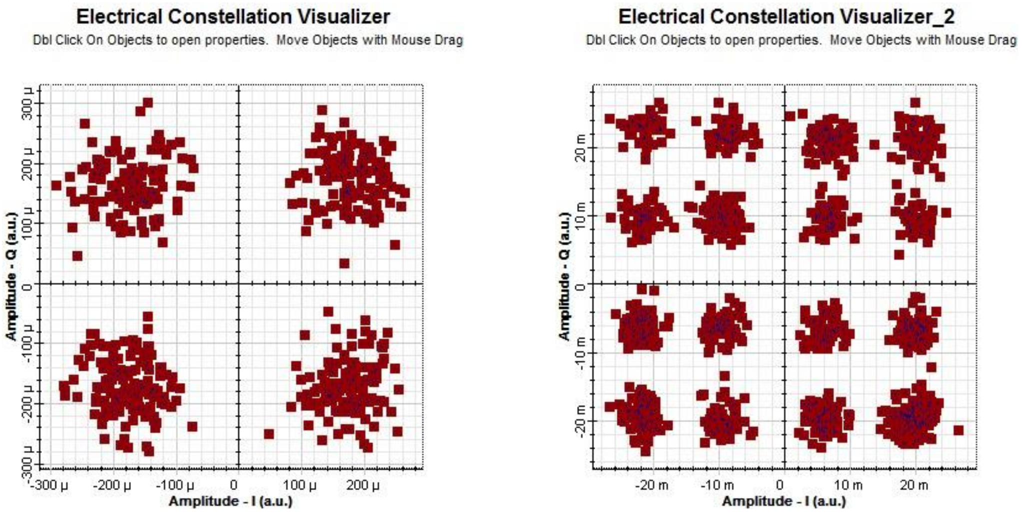


รูปที่ 2.23 โครงสร้างวงจรภาคส่งของการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM ผ่านเส้นใยแสง

จากรูปที่ 2.27 ที่ภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM เป็นแบบ coherent detection สัญญาณแสงจะผ่านไปยัง coupler 3 dB สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน สัญญาณจะถูกคูณกับสัญญาณแสงจาก LO โดยสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ substractor แล้วผ่านไปยัง LPF และ M-ary threshold detector ทำหน้าที่ถอดรหัสพัลส์ของสัญญาณหลายระดับ สัญญาณจะถูกส่งไปยัง QAM sequence decoder เพื่อถอดรหัสสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER โดยใช้ MATLAB ในการคำนวณหาค่า BER ที่ electrical constellation visualizer จะปรากฏสัญญาณที่มีองค์ประกอบของ I และ Q ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.24 โครงสร้างวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 2^n-QAM ผ่านเส้นใยแสง



(ก) (ข)

รูปที่ 2.25 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 2^n-QAM ที่ปรากฏใน electrical constellation visualizer (ก) 4-QAM (ข) 16-QAM

2.2.4 การเปรียบเทียบการการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

2.2.4.1 ประสิทธิภาพสเปคตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

ประสิทธิภาพสเปคตรัม(spectral efficiency) หรือประสิทธิภาพของแบนด์วิดท์ (bandwidth efficiency) คือ อัตราข้อมูลที่สามารถส่งผ่านแบนด์วิดท์ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการมอดูเลตสัญญาณซึ่งจำกัดความถี่ของสเปคตรัม ประสิทธิภาพสเปคตรัมมีหน่วยคือ บิต/วินาที/เฮิรตซ์ (bit/s/Hz) ประสิทธิภาพสเปคตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพสเปคตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

การมอดูเลตสัญญาณ	ประสิทธิภาพสเปคตรัม (bit/s/Hz)
RZ-OOK	0.5
NRZ-OOK	1
RZ-DPSK	0.5
NRZ-DPSK	1
RZ-DQPSK	1
NRZ-DQPSK	2

4-QAM	2
16-QAM	4
64-QAM	6
256-QAM	8

2.3 โครงสร้างพื้นฐานของ Fiber-to-the-x

Fiber-to-the-x (FTTx) เป็นคำที่ใช้เรียกลักษณะโครงสร้างของระบบเครือข่ายความเร็วสูงที่ใช้เส้นใยแสงแทนสายทองแดงทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมดในการเชื่อมระบบเครือข่ายไปยังผู้ใช้บริการ ประกอบด้วย [1, 27]

1) fiber-to-the-building (FTTB) เป็นระบบสื่อสัญญาณที่ใช้เส้นใยแสงตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณของผู้ให้บริการไปจนถึงอาคารของผู้ใช้บริการ และใช้สื่อนำสัญญาณประเภทอื่น เช่น สายทองแดง เพื่อติดตั้งไปยังจุดใช้งาน โครงข่ายแบบนี้ มักถูกนำไปใช้ในอาคารธุรกิจหรืออาคารชุดสำหรับพักอาศัย โดยปกติแล้วความยาวของส่วนที่เป็นโลหะของ FTTB จะสั้นกว่า FTTN/FTTC ดังนั้นต้นทุนในการติดตั้งจึงแพงกว่า แต่ก็ให้แบนด์วิดท์ที่มากขึ้นด้วย

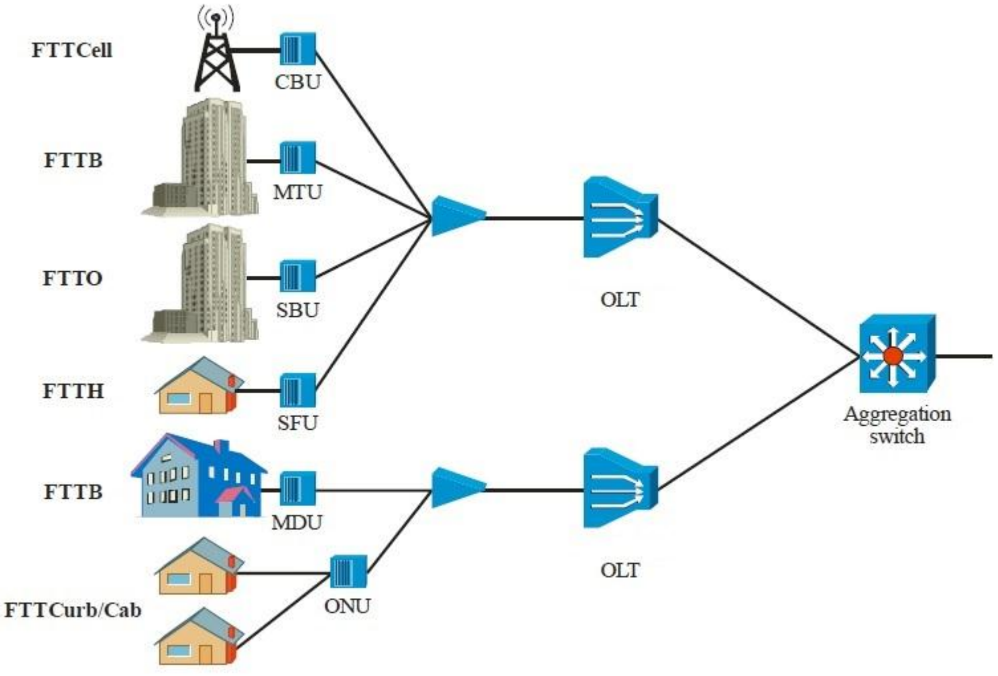
2) fiber-to-the-home (FTTH) เป็นระบบสื่อสัญญาณที่ใช้เส้นใยแสงตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณของผู้ให้บริการไปจนถึงบริเวณจุดใช้งานของผู้ใช้บริการ โครงข่ายนี้ถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า fiber-to-the-premise (FTTP) เป็นระบบที่แพงที่สุดเมื่อเทียบกับระบบที่กล่าวมา แต่ก็เป็นระบบที่ให้บริการแบนด์วิดท์สูงที่สุด อีกทั้งยังเป็นระบบที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เลย ทำให้มีการใช้พลังงานต่ำ และอายุการใช้งานยาวนาน

3) fiber-to-the-curb/cab (FTTC) เป็นระบบสื่อสัญญาณเชิงแสงที่ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณตลอดโครงข่ายไปสิ้นสุดที่หัวถนนหรือปากทางเข้าหมู่บ้านจากนั้นจะใช้สายส่งสัญญาณที่เป็นสายทองแดงเพื่อเชื่อมต่อไปยังบ้านผู้ใช้บริการปลายทางทำให้ระบบมีราคาถูกลง

2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON

ปัจจุบันโครงข่าย FTTx ที่ใช้เทคโนโลยีโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON เป็น access network ที่มีศักยภาพรองรับการสื่อสารข้อมูลระดับ ultra broadband โดยอุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นอุปกรณ์

ที่ทำงานทางแสงทั้งหมดตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงไปจนถึงอุปกรณ์รับสัญญาณแสง ทำให้ต้นทุนของระบบค่อนข้างต่ำในขณะที่ สามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงมากเมื่อเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงประเภทอื่นๆ



รูปที่ 2.26 โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON [14]

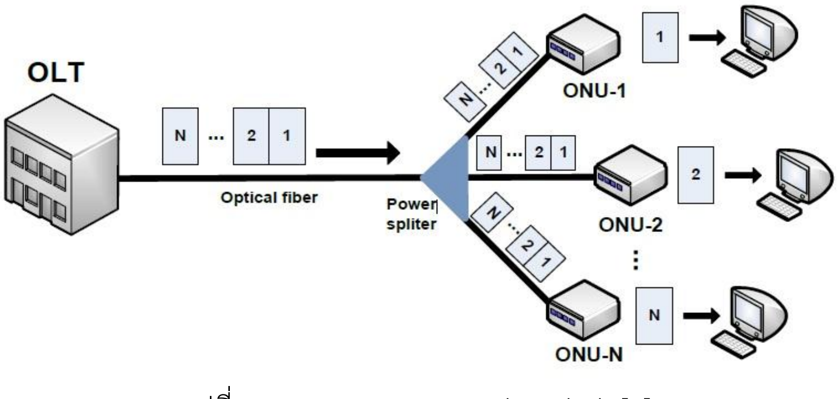
จากรูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx จะมีชุมสายสำนักงานกลาง (central office: CO) ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับสัญญาณการให้บริการไปยังผู้ใช้บริการที่อยู่ในเขตควบคุมของ CO รวมทั้งทำหน้าที่เชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับระบบสื่อสารโทรคมนาคมเพื่อรับส่งข้อมูลไปยังที่ต่างๆ ตามความต้องการของผู้ใช้บริการ ภายในชุมสายจะมี optical line terminal (OLT) เป็นอุปกรณ์รับสายเส้นใยแสงในฝั่งโครงข่ายที่จะติดตั้งในตึกชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้บริการในชุมสายจะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่สำหรับการประมวลสัญญาณ เช่น ตัดต่อหรือสลับสาย (switching) จัดหาเส้นทางการเดินทางของข้อมูล (routing) และอื่นๆ ตามที่จำเป็น จากเส้นทางระหว่างชุมสายกับบ้านผู้ใช้บริการ ประกอบด้วยเส้นใยนำแสงเชื่อมโยงไปยังกลุ่มบ้านผู้ใช้บริการในลักษณะของการกระจาย (distribution) ไปยังชุมชนเข้าสู่บ้านผู้ใช้บริการตามลำดับ ส่วนปลายของเส้นใยนำแสงที่อยู่ภายในบ้านของผู้ใช้บริการ จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ optical network unit (ONU) หรือ optical network termination (ONT) ทำหน้าที่กระจายสัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสงและไฟฟ้า

ไปยังอุปกรณ์ใช้งาน ภายในบ้าน เช่น โทรศัพท์ โทรทัศน์ โทรสารหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้บริการอาจมีได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ขึ้น อยู่กับกับปริมาณข้อมูล (ความเร็ว) ความต้องการใช้บริการ และรูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ (operator) โดยปกติการสื่อสารข้อมูลจาก CO ถึงบ้านผู้ใช้บริการหรือการสื่อสารข้อมูลขาลง (downstream) และจากบ้านผู้ใช้บริการไปยัง CO หรือการสื่อสารข้อมูลขาขึ้น (upstream) จะมีความเร็วแตกต่างกัน [28]

2.4 ระบบมัลติเพล็กซ์บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON

2.4.1 ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงเวลา

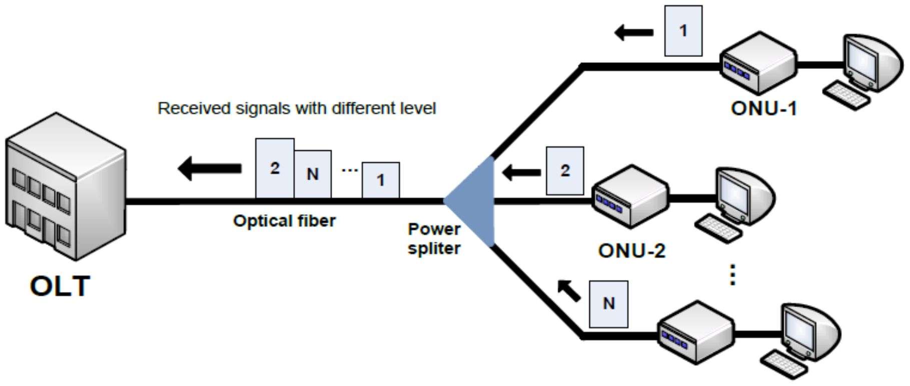
ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงเวลา (time division multiplexing : TDM) บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON หรือ TDM-PON เป็นการแชร์อัตราข้อมูลในทางเวลากันทั้ง uplink และ downlink ระหว่างผู้ใช้บริการที่ส่งหรือรับข้อมูลพร้อมกัน จากรูปที่ 2.30 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณจาก OLT ไปสู่ ONU โดยสัญญาณ downlink ซึ่งมีข้อมูลที่ต้องถูกส่งไปยังบ้านผู้ใช้บริการที่แตกต่างกันนั้น จะเดินทางไปในลักษณะของการกระจาย (broadcast) ไปยัง ONU ทุกตัว โดย passive optical splitter ช่องสัญญาณทางเวลา (time slot) ที่ OLT จัดสรรให้กับบ้านแต่ละบ้านไม่เท่ากันแต่จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของข้อมูลและความจำเป็นในการสื่อสารข้อมูล



รูปที่ 2.27 TDM-PON ภาค downlink [1]

ในทางกลับกัน ONU หลายตัวสามารถติดต่อสื่อสารกับ OLT เพียงตัวเดียวได้โดยการใช้การเข้าถึง multiple access เชิงเวลา หรือ time division multiplexing access (TDMA) สำหรับสัญญาณ uplink แสดงดังรูปที่ 2.31 โดย ONU ใดๆที่ต้องการส่งข้อมูลไปยัง OLT จะทำการร้องขอ

time slot จาก OLT จากนั้น OLT จะจัดสรร time slot ที่เหมาะสมให้กับ ONU นั้น นอกจากนี้ OLT ยังมีการจัดลำดับ (ranking) ตามระยะทางจาก OLT ไปยัง ONU แต่ละตัวเพื่อปรับระยะทางสมมติที่ใช้ในการส่งข้อมูลจาก OLT ไปยัง ONU ทุกตัวให้เท่ากันด้วย [1]



รูปที่ 2.28 TDM-PON ภาค uplink [1]

2.4.1.1. มาตรฐานของระบบ FTTx แบบ TDM-PON [29]

ในปัจจุบันโพรโทคอลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณผ่าน FTTx มีสองโพรโทคอลคือ asynchronous transfer mode (ATM) ของ ITU และ Ethernet ของ IEEE ซึ่งทำให้เกิดมาตรฐานของระบบ FTTx-PON แสดงดังตารางที่ 2.6 GPON (ITU-T G.984) ใช้โพรโทคอล GEM ในการส่งสัญญาณอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุด 2.5 Gbps ระยะการให้บริการมากกว่า 20 กิโลเมตร GEPON (IEEE 802.3ah) ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ อัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุด 1.25 Gbps ระยะการให้บริการมากที่สุด 20 กิโลเมตร 10G-EPON (IEEE 802.3av) ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ อัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุด 10 Gbps XG-PON (ITU-T G.987) ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ อัตราข้อมูล downlink และ uplink 10 Gbps ระยะการให้บริการ 20 กิโลเมตร ขึ้นไป

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานของระบบ FTTx แบบ TDM-PON

ชนิด	BPON	GPON	GEPON	10G-EPON	XG-PON
Standard	ITU G.983 [30]	ITU G.984 [31]	IEEE 802.3ah [32]	IEEE 802.3av [5]	ITU-T G.987 [6]

Downstream speeds	155Mbps, 622Mbps, 1.2Gbps	1.24Gbps, 2.5Gbps	1.25Gbps	10Gbps	10Gbps
Upstream speeds	155Mbps or 622Mbps	155Mbps, 622Mbps, 1.2Gbps, 2.5Gbps	1.25Gbps	10Gbps	XG-PON1 2.5Gbps XG-PON2 10Gbps
Downstream wavelength	1480~1500 nm	1480~1500 nm	1500nm	1575-1580 nm	1575-1580 nm
Upstream wavelength	1260~1360 nm	1260~1360 nm	1310nm	1260-1280 nm	1260-1280 nm
Protocol	ATM	Ethernet over GEM and/or ATM	Ethernet	Ethernet	Ethernet over GEM
Maximum PON splits	32	64	16	32	64
Distance	20km (max)	60km (max)	<20km	<20km	20km
Power Budget	Class A 20 dB	Class A 20 dB Class B 25 dB Class C 30 dB	PX-10U 23 dB PX-10D 21 dB PX-20U 26 dB PX-20D 26 dB	PR10 20 dB PR20 24 dB PR30 29 dB PR40 33 dB	Nominal-1 class: 29 dB Nominal-2 class: 31 dB
SMF	ITU-T G.652.C/D	ITU-T G.652.C/D	ITU-T G.652.C/D	ITU-T G.652.C/D	ITU-T G.657

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แต่ละมาตรฐานของระบบ FTTx เป็นแบบ TDM-PON นั้นเป็นการแบ่งสัญญาณโดยผ่านอุปกรณ์ power splitter ซึ่งส่งผลให้จำนวนของ ONU ถูกจำกัดโดยกำลังสัญญาณที่ลดลงเนื่องจาก

การ split ไปยัง ONU จึงจำเป็นต้องจำกัดจำนวนผู้ใช้งาน การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยใช้ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM)

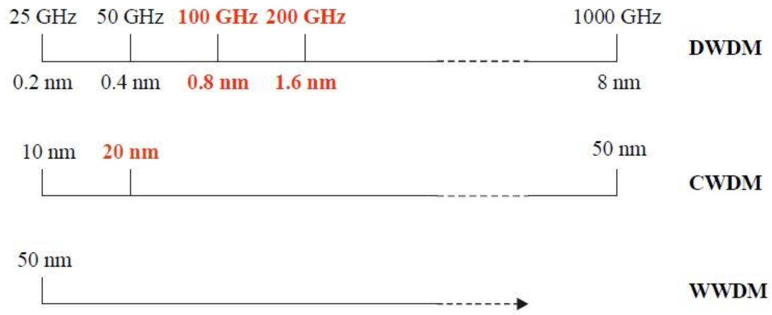
2.4.2 ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น

WDM บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON หรือ WDM-PON เป็นระบบที่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้มากกว่าระบบ TDM-PON เนื่องจากสามารถเพิ่มความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณได้โดยไม่มีการ split กำลังของสัญญาณและสามารถเพิ่มอัตราข้อมูลของระบบได้ โดยที่ผู้ใช้บริการสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่

ระบบ WDM แบ่งเป็น 3 ประเภทตามมาตรฐาน ITU-T G.671 [33] ได้แก่

1) มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ (coarse wavelength division multiplexing : CWDM) โดยที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณน้อยกว่า 50 นาโนเมตร แต่มากกว่า 1,000 GHz ประมาณ 8 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร และ 5.7 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร
2) มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing : DWDM) มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.6 นาโนเมตร
3) มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบกว้าง (wide wavelength division multiplexing : WWDM) มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมากกว่าเท่ากับ 50 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.32

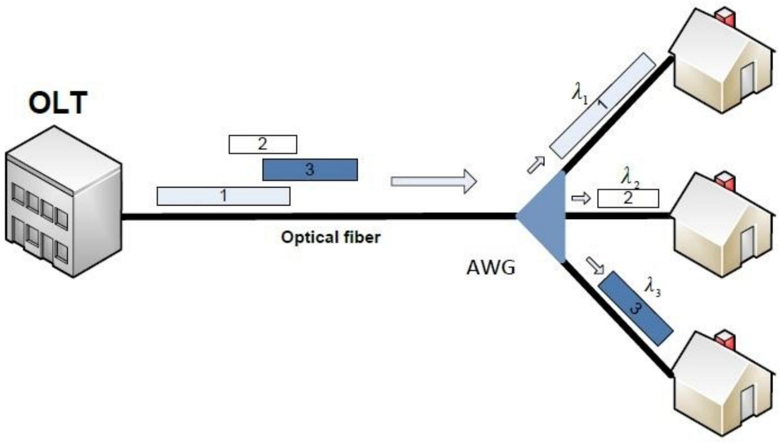
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



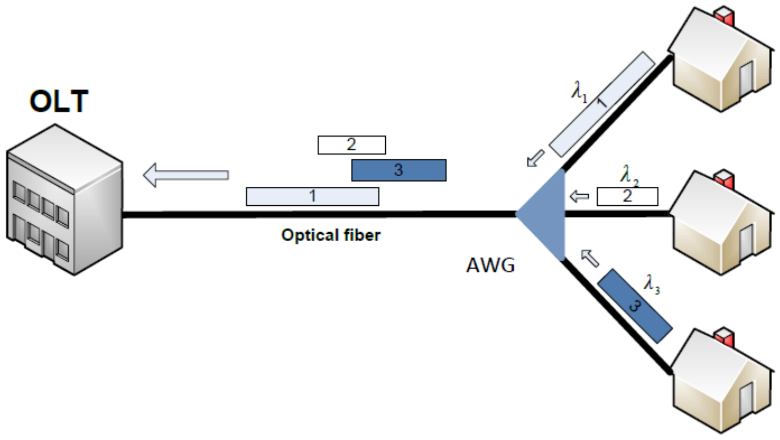
รูปที่ 2.29 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นประเภทต่างๆ [14]

จากรูปที่ 2.33 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณจาก OLT ไปสู่ ONU มีอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ WDM เพื่อรวมสัญญาณและแยกสัญญาณคือท่อนำคลื่นอาร์เรย์ (arrayed waveguide grating : AWG) โดย

สัญญาณ downlink ซึ่งมีข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นของผู้ใช้บริการ จะถูกส่งไปยัง ONU ของผู้ใช้บริการแต่ละราย โดยมี AWG ทำหน้าที่แยกความยาวคลื่น ในทางกลับกันเมื่อผู้ใช้บริการต้องการส่งข้อมูลกลับมายัง OLT ข้อมูลแต่ละความยาวคลื่นจะถูกรวมกันที่ AWG ส่งไปยัง OLT ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.30 WDM-PON ภาค downlink [1]

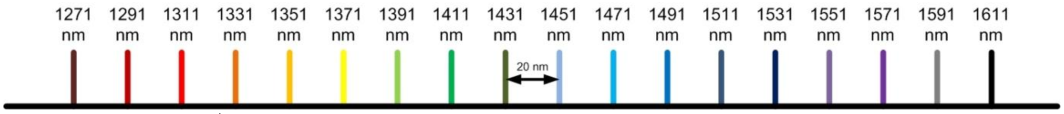


รูปที่ 2.31 WDM-PON ภาค uplink [1]

2.4.3 ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ

ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ (CWDM) บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 [7] ความยาวคลื่นจะถูกจัดเรียงดังรูปที่ 2.35 เริ่มจากความยาวคลื่นที่ 1271 นาโนเมตร มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณช่องสัญญาณละ 20 นาโนเมตร ทุกช่องสัญญาณต่อเนื่องกันไปจนถึงช่องสัญญาณสุดท้ายที่ความยาวคลื่น 1611 นาโนเมตร มีจำนวนความยาวคลื่น

ทั้งหมด 18 ความยาวคลื่น การที่แต่ละความยาวคลื่นมีระยะห่างกัน 20 นาโนเมตร นั้นการเลือกใช้ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ใช้ไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำให้ราคาถูก จึงเหมาะสำหรับ access network แบบ FTTx



รูปที่ 2.32 การจัดสรรช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2

2.5 สัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากอุปกรณ์รับสัญญาณแสง

เมื่อพิจารณาที่ภาครับของระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง อุปกรณ์รับสัญญาณแสงซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (noise) ขึ้น สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

2.5.1 Thermal noise

เกิดจากความร้อนของความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง ดังสมการที่ (25) [16]

$$\left\langle i_T^2 \right\rangle = \frac{4k_B T}{R_L} B \tag{25}$$

โดยที่ $\left\langle i_T^2 \right\rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของ thermal noise current [A^2]

k_B คือ ค่าคงตัว Boltzmann มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} [JK^{-1}]

T คือ อุณหภูมิ [K]

R_L คือ ความต้านทานโหลดของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง [Ω]

B คือ แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง [Hz]

2.5.2 Shot noise

เกิดจากความไม่แน่นอนในการปล่อยอิเล็กตรอนของอุปกรณ์ ดังสมการที่ (26) [16]

$$\left\langle i_s^2 \right\rangle = 2qI_p B \tag{26}$$

โดยที่ $\langle i_s^2 \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของ shot noise current [A^2]

q คือ ประจุไฟฟ้า มีค่า 1.6×10^{-19} [C]

I_p คือ photocurrent [A]

2.5.3 Dark current noise

เกิดจากอุณหภูมิภายในทำให้พาหะตัวนำถูกกระตุ้นกระโดด ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากกระแสค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า dark current noise แสดงดังสมการที่ (27) [16]

$$\langle i_D^2 \rangle = 2qI_D B \tag{27}$$

โดยที่ $\langle i_D^2 \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของ dark current [A^2]

q คือ ประจุไฟฟ้า มีค่า 1.6×10^{-19} [C]

I_D คือ dark current [A]

2.6 Link power budget

ในการคำนวณระยะทางการให้บริการที่ไกลที่สุดของโครงข่าย PON สามารถคำนวณได้จากอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงสะสมทั้งหมดระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณและอุปกรณ์รับสัญญาณแสงที่ยอมรับได้หรือเรียกว่า link power budget ในการออกแบบระบบการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดจะต้องมีค่าไม่เกิน link power budget โดยสามารถคำนวณ link power budget ได้จากสมการที่ (28) [16]

$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum l_c + \sum l_s + \sum l_{other} + G_{margin} \tag{28}$$

โดย P_T คือ ค่า link power budget ทั้งหมด [dB]

P_{Tx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง [dBm]

P_{Rx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสง [dBm]

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของเส้นใยแสง [dB/km]

L คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่สามารถให้บริการได้ [km]

l_c คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากหัวต่อ (connector) [dB]

l_s คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากการสไปลซ์ (splice) [dB]

l_{other} คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกรณีอื่นๆที่พิจารณาร่วมด้วย [dB]

G_{margin} คือ ค่า system margin ที่เผื่อไว้สำหรับระบบ [dB]

หมายเหตุ system margin เป็นค่าที่บวกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อ [34]

- ทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเข้าไปในระบบได้
- เพื่อรองรับการ splice เส้นใยแสงเพิ่มกรณีซ่อมบำรุง
- เพื่อรองรับการขยายหรือเพิ่มเส้นใยแสงในอนาคต
- เพื่อให้สามารถรองรับการเพิ่มความเร็วในการส่งและรองรับการมอดูเลตขั้นสูงได้

การบวกค่า system margin ไม่ได้มีกฎที่แน่นอน แต่อย่างน้อยที่สุดค่า system margin ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 dB หรืออาจมีค่าได้มากถึง 8-10 dB ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาระยะทางไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนของสัญญาณซึ่งสามารถคำนวณได้จาก link power budget และนำระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบที่ได้จากการการทดลองมาคำนวณหาค่า power budget ของระบบ ทั้งนี้ในปัจจุบันมาตรฐานของค่า power budget เป็นของระบบ TDM ในส่วนงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นระบบ CWDM จึงใช้การคำนวณพื้นฐานจากระบบ TDM

2.7 การแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจาก dispersion

ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจาก dispersion สามารถแก้ไขโดยการใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟที่เรียกว่า หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion-compensating unit : DCU) ซึ่ง DCU ภายในประกอบด้วยเส้นใยแสงที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่า dispersion เพื่อให้หักล้างค่า dispersion สะสมของ SMF เส้นใยแสงที่อยู่ด้านในนั้นถูกเรียกว่า dispersion-compensating fiber (DCF) ที่สามารถปรับค่า dispersion ให้สามารถหักล้างกับค่า dispersion สะสมของ SMF เส้นใยแสงดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1) non slope compensated dispersion compensating unit (NS-DCU) เครื่องหมายของความชันค่า dispersion ของ NS-DCU กับเครื่องหมายของความชันค่า dispersion ของ SMF มีค่าเป็นบวกเหมือนกัน

2) slope compensated dispersion compensating unit (SC-DCU) เครื่องหมายของความชันค่า dispersion ของ SC-DCU มีค่าเป็นลบตรงข้ามกับเครื่องหมายของความชันค่า dispersion ของ SMF ซึ่งมีค่าเป็นบวก

เทคนิคการจัดการ dispersion สามารถทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่า dispersion ที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่า dispersion และทำให้ค่า dispersion เฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (29) [16]

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \tag{29}$$

โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/km/nm]

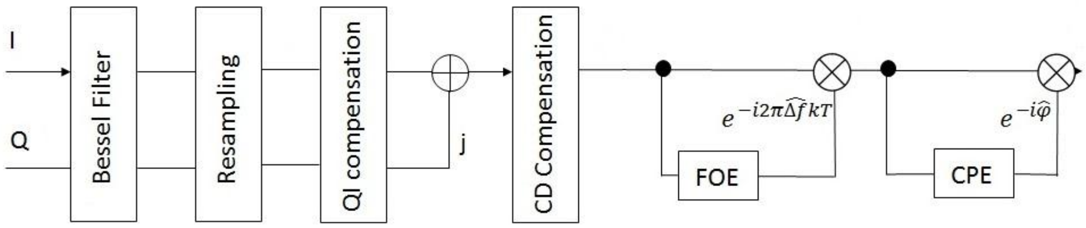
D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]

2.8 Digital signal processing (DSP)

ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบ coherent 2^n-QAM ที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยติดตั้ง DSP [26] กล่าวคือ สัญญาณ I และ Q ผ่านไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำ low pass Bessel filter แล้วทำการ resampling สัญญาณอีกครั้ง สัญญาณจะผ่านไปยัง QI compensation เพื่อทำให้เกิดความ balanced ของสัญญาณ I และ Q จากนั้นสัญญาณจะถูกชดเชยค่า dispersion ที่ CD compensation ไปยัง frequency offset estimation (FOE) โดยปรับความถี่และเฟสของสัญญาณให้ตรงกันกับ LO สัญญาณที่ได้ถูกส่งไปยัง carrier phase estimation (CPE) เพื่อทำการชดเชย เฟสของสัญญาณ จะได้สัญญาณ I และ Q ที่สามารถคำนวณหาค่า BER ได้ [35, 36] แสดงดังรูปที่ 2.33

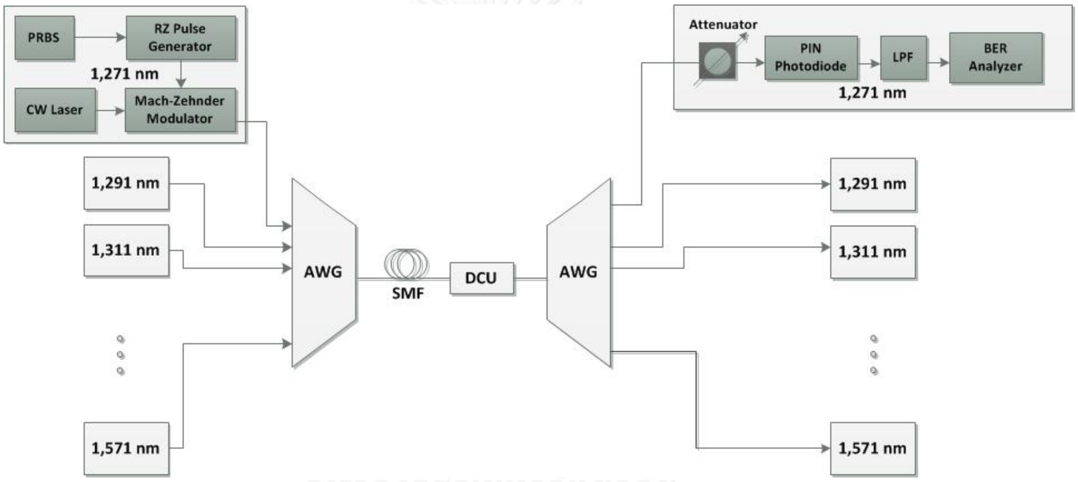


รูปที่ 2.33 องค์ประกอบของ DSP

บทที่ 3
โครงสร้างระบบ CWDM-PON

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างระบบ CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps และ 40 Gbps ด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ทั้งหมด 5 แบบ คือ RZ-OOK NRZ-OOK DPSK DQPSK และ coherent 2^n-QAM

3.1 ระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON

3.1.1 อัตราข้อมูล 10 Gbps

จากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON ภาคส่งประกอบด้วย CW laser มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm สัญญาณแสงจะถูกมอดูเลตเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ RZ อัตราข้อมูล 10 Gbps ที่ MZM ซึ่งมีความยาวคลื่นทั้งหมด 16 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยมีระยะระหว่างช่องสัญญาณ 20 นาโนเมตร และมัลติเพล็กซ์สัญญาณความยาวคลื่น 16 ความยาวคลื่นที่ AWG จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชัน เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ภาครับประกอบด้วย AWG ทำหน้าที่ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ สัญญาณแสงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector และผ่านวงจรกรอง

ความถี่ต่ำ low pass Bessel filter ไปยัง bit error rate analyzer (BER analyzer) เพื่อวัดอัตราผิดพลาดของระบบ

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 – 1,571นาโนเมตร

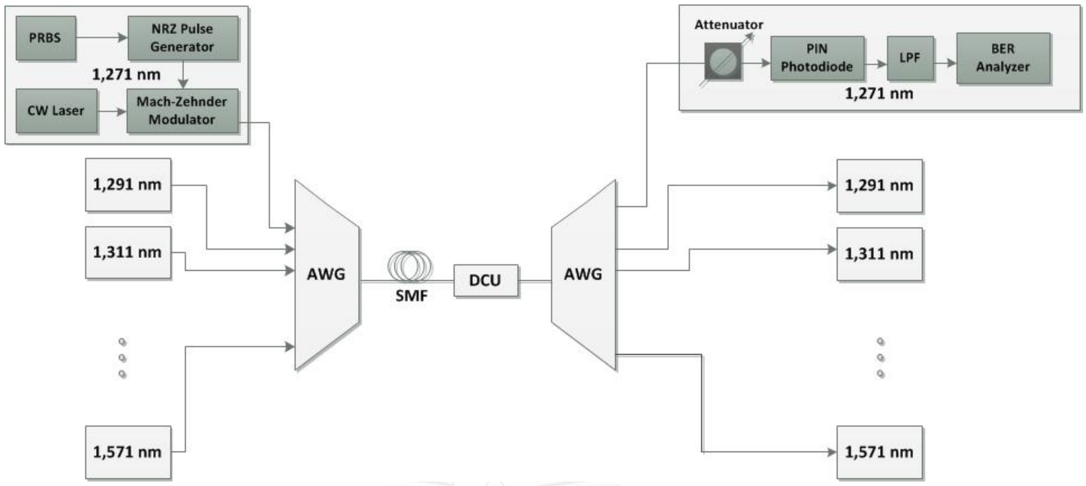
Wavelengths	Attenuation coefficient [dB/km]	Dispersion coefficient (ps/nm/km)
1271 nm	0.385	-4.300
1291 nm	0.370	-2.100
1311 nm	0.350	-0.093
1331 nm	0.340	1.730
1351 nm	0.320	3.473
1371 nm	0.300	5.143
1391 nm	0.320	6.744
1411 nm	0.275	8.283
1431 nm	0.243	9.761
1451 nm	0.225	11.185
1471 nm	0.213	12.557
1491 nm	0.203	13.882
1511 nm	0.196	15.161
1531 nm	0.191	16.399
1551 nm	0.190	17.597
1571 nm	0.192	18.758

3.1.2 อัตราข้อมูล 40 Gbps

โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่ 3.1 มีลักษณะเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยระหว่างภาคส่งกับภาครับได้ติดตั้ง DCU เพื่อทำการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันให้อยู่ในระดับที่ระบบยอมรับได้ ซึ่งภายใน DCU ประกอบด้วย SC-DCU ที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 ระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON

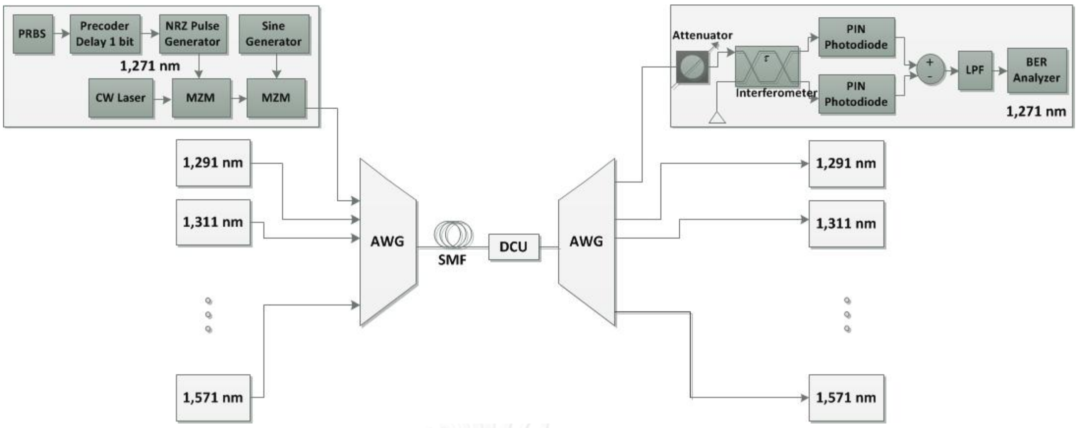
3.2.1 อัตราข้อมูล 10 Gbps

จากรูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON ที่ภาคส่งมีความแตกต่างกันคือ สัญญาณแสงจะถูกมอดูเลตเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ ที่ MZM ด้วยอัตราข้อมูล 10 Gbps แล้วส่งไปยัง AWG

3.2.2 อัตราข้อมูล 40 Gbps

โครงสร้างของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มีลักษณะเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยระหว่างภาคส่งกับภาครับได้ติดตั้ง DCU เพื่อทำการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันให้อยู่ในระดับที่ระบบยอมรับได้ แสดงดังรูปที่ 3.2

3.3 ระบบ DPSK บน CWDM-PON



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบ DPSK บน CWDM-PON

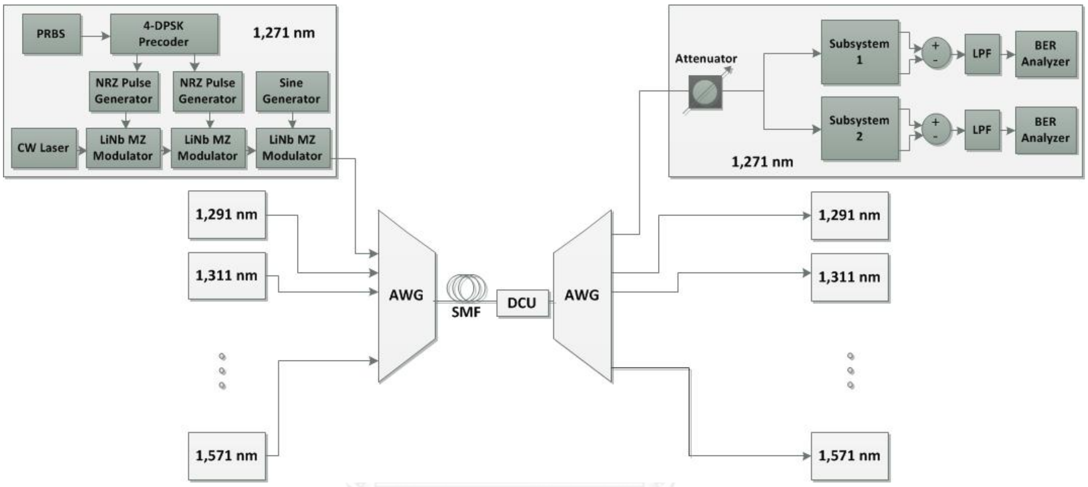
3.3.1 อัตราข้อมูล 10 Gbps

จากรูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของระบบ DPSK บน CWDM-PON ภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าส่งข้อมูลบิตไปยัง precoder delay 1 bit โดยที่สัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ อัตราข้อมูล 10 Gbps จะถูกมอดูเลตเข้ากันที่ MZM หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้ว จะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 20 GHz เพื่อทำการ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ และมัลติเพล็กซ์สัญญาณความยาวคลื่นทั้งหมด 16 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยมีระยะระหว่างช่องสัญญาณ 20 นาโนเมตร ที่ AWG จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชัน เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ภาครับประกอบด้วย AWG ทำหน้าที่ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ สัญญาณแสงจะถูกส่งผ่าน interferometer ซึ่งทำหน้าที่แบ่งสัญญาณเป็นสองส่วนและทำให้สัญญาณขาหนึ่งถูก delay ไป 1 บิต หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแยกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balance detector โดยแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector และผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ low pass Bessel filter ไปยัง BER analyzer เพื่อวัดอัตราผิดพลาดของระบบ

3.3.2 อัตราข้อมูล 40 Gbps

โครงสร้างของระบบ DPSK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มีลักษณะเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของระบบ DPSK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยระหว่างภาคส่งกับภาครับได้ติดตั้ง DCU เพื่อทำการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันให้อยู่ในระดับที่ระบบยอมรับได้ แสดงดังรูปที่ 3.3

3.4 ระบบ DQPSK บน CWDM-PON



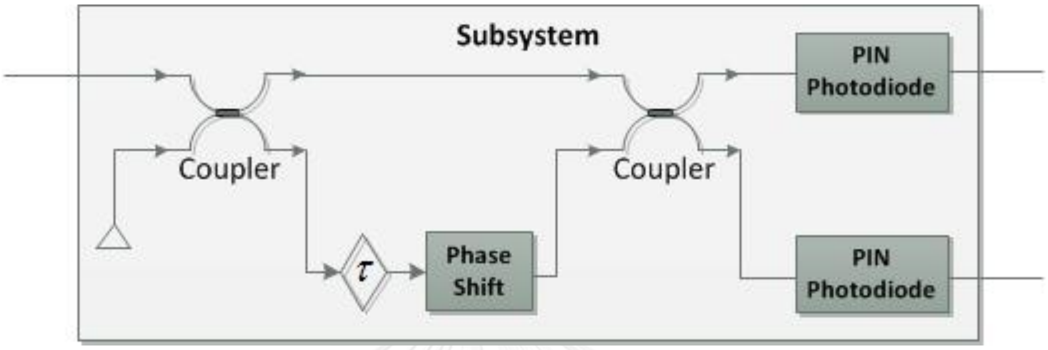
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบ DQPSK บน CWDM-PON

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4.1 อัตราข้อมูล 10 Gbps

จากรูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของระบบ DQPSK บน CWDM-PON ภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าประกอบด้วย PRBS generator ส่งข้อมูลบิตไปยัง 4-DPSK precoder โดยสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แบ่งออกเป็นสองส่วน จะถูกมอดูเลตเข้ากันกับสัญญาณแสงที่ MZM และสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ จะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วย MZM เพื่อทำให้สัญญาณเกิดความต่างเฟส 90 องศา หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกมอดูเลตอีกครั้งที่ MZM สัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 20 GHz ให้ได้สัญญาณแบบ RZ โดยสัญญาณที่ได้นั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ I และ Q สัญญาณมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น 16 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยมีระยะระหว่างช่องสัญญาณ 20 นาโนเมตร ที่ AWG จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของ

สัญญาณและค่าดิสเพอร์ชัน เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ภาครับประกอบด้วย AWG ทำหน้าที่ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ สัญญาณจะถูกแบ่งด้วย power splitter ชนิด 1: 2 โดยสัญญาณ in phase ถูกส่งไปยัง subsystem 1 และสัญญาณ quadrature phase ถูกส่งไปยัง subsystem 2 สัญญาณที่ได้จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ low pass Bessel filter ไปยัง BER analyzer เพื่อวัดอัตราผิดพลาดของระบบ



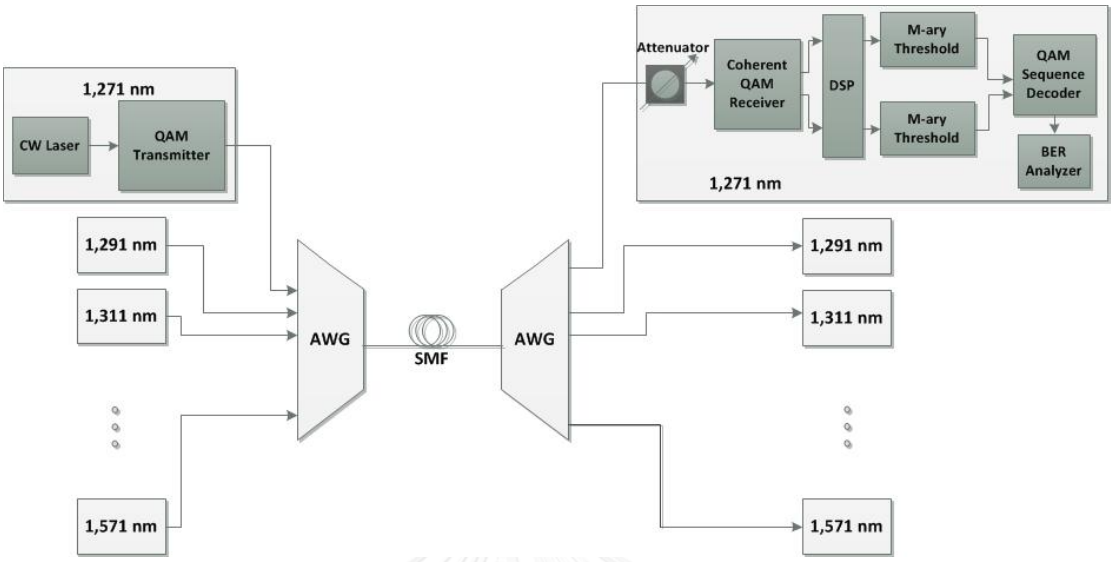
รูปที่ 3.5 โครงสร้าง subsystem ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON

จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้าง subsystem ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON ภายในประกอบด้วย coupler ตัวที่ 1 ทำหน้าที่แยกสัญญาณเป็น 2 ขา สัญญาณขาแรกผ่านโดยตรงไปยัง coupler ตัวที่ 2 สัญญาณขาที่สองถูกทำให้ delay เท่ากับ 2÷(bit rate) ดังนั้นอัตราข้อมูล 10 Gbps ถูกทำให้ delay เท่ากับ 2×10^{-10} วินาที แล้วเลื่อนเฟส 45 องศา ไปยัง coupler ตัวที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณแบบ balance detector แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แล้วส่งไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำ

3.4.2 อัตราข้อมูล 40 Gbps

โครงสร้างของระบบ DQPSK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มีลักษณะเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของระบบ DQPSK บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยระหว่างภาคส่งกับภาครับได้ติดตั้ง DCU เพื่อทำการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันให้อยู่ในระดับที่ระบบยอมรับได้ แสดงดังรูปที่ 3.4

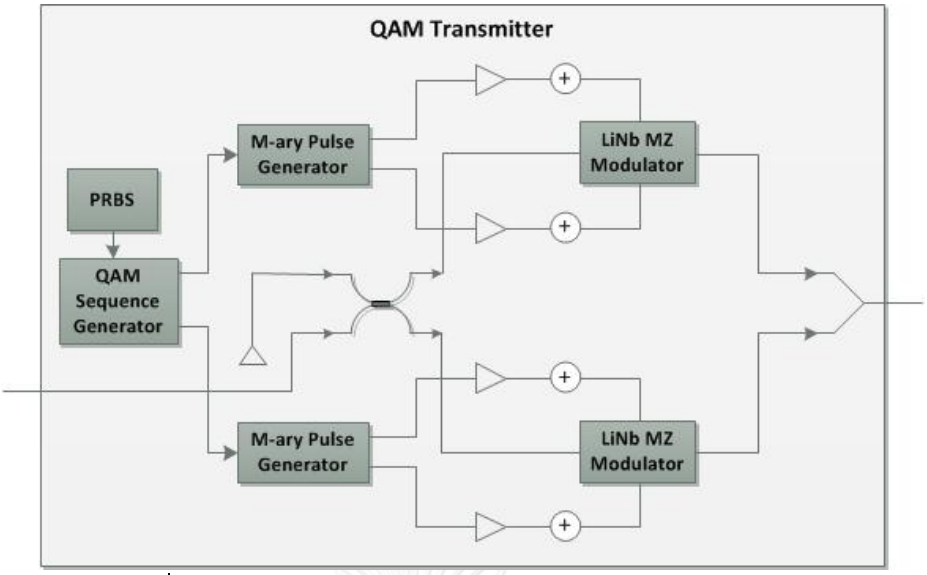
3.5 ระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON

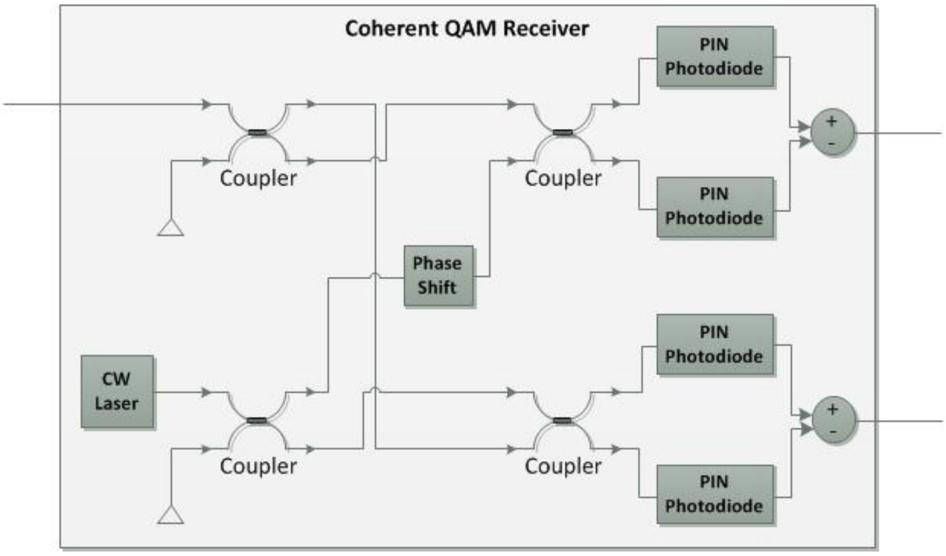
3.5.1 อัตราข้อมูล 10 Gbps

จากรูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON ภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และส่งสัญญาณแสงไปยัง 2^n-QAM transmitter ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น 16 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยมีระยะระหว่างช่องสัญญาณ 20 นาโนเมตร ที่ AWG จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชัน เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ภาครับประกอบด้วย AWG ทำหน้าที่ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ สัญญาณทั้งหมดจะถูกส่งไปยัง coherent 2^n-QAM receiver เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จะได้สัญญาณ I และ Q โดยผ่าน DSP เพื่อทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ไปยัง M-ary threshold detector ที่ทำหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ สัญญาณ I และ Q จะรวมกันที่ QAM sequence decoder และ BER analyzer เพื่อวัดอัตราผิดพลาดของระบบ



รูปที่ 3.7 Transmitter ของระบบ 2^n-QAM บน CWDM-PON

จากรูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้าง transmitter ของระบบ 2^n-QAM บน CWDM-PON ภายในประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า PRBS generator ส่งข้อมูลบิตไปยัง QAM sequence generator โดยสามารถตั้งค่าเพื่อกำหนดจำนวน bits per symbol เช่น 4-QAM คือ 2 bits per symbol หรือ 16-QAM คือ 4 bits per symbol เป็นต้น จากนั้นสัญญาณจะถูกแบ่งไปยัง M-ary threshold generator เข้าสู่ electrical gain และ electrical bias โดย coupler รับสัญญาณแสงจาก CW laser เพื่อมอดูเลตสัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้าที่ MZM จะได้สัญญาณ I และ Q ซึ่งถูกส่งไปยัง AWG



รูปที่ 3.8 Receiver ของระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON

จากรูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้าง receiver ของระบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON เป็นแบบ optical 90° hybrid ซึ่งสามารถรับสัญญาณที่มีองค์ประกอบแบบ in-phase และ quadrature ของสัญญาณแสง โดย LO ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแสงโดยสัญญาณแสงจะคูณกับสัญญาณข้อมูลจากภาครับจะต้องมีเฟสและความถี่ที่เท่ากันด้วย สัญญาณผ่านไปยัง coupler และทำการเลื่อนเฟสไป 90 องศา ไปยัง coupler อีกตัวซึ่งทำหน้าที่รวมรวมสัญญาณแบบ balance detector แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector

เมื่อสัญญาณข้อมูลก่อนเข้ามาคูณกับสัญญาณแสงจาก LO นั้นมีค่าต่ำมาก จะต้องใช้ erbium-doped fiber amplifier (EDFA) เพื่อช่วยในการขยายกำลังของสัญญาณก่อนเข้ามายัง receiver ของระบบ coherent 2^n-QAM และเมื่อสัญญาณข้อมูลคูณกับสัญญาณแสงจาก LO จะต้องมีเฟสที่ตรงกัน แก้ปัญหาเฟสของสัญญาณโดยการติดตั้งอุปกรณ์ DSP ที่ภาครับ

3.5.2 อัตราข้อมูล 40 Gbps

โครงสร้างของระบบ coherent QAM บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มีลักษณะเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของระบบ coherent QAM บน CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยที่ภาครับได้ติดตั้ง DSP เพื่อทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่อัตราข้อมูล 10 Gbps โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK NRZ-OOK DPSK DQPSK 4-QAM และ 16-QAM ทั้งในทางทฤษฎีและการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุด

4.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON

4.1.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

4.1.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาสมรรถนะของระบบที่อัตราข้อมูล 10 Gbps เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx}=10$ dBm, $P_{Rx}=$-30 dBm, $\sum l_c=1$ dB, $\sum l_s=$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG}=$ 8 dB, $G_{margin}=$ 3 dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 145.88 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 71.69 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1

4.1.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 800 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 8591.99 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 42.65 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1

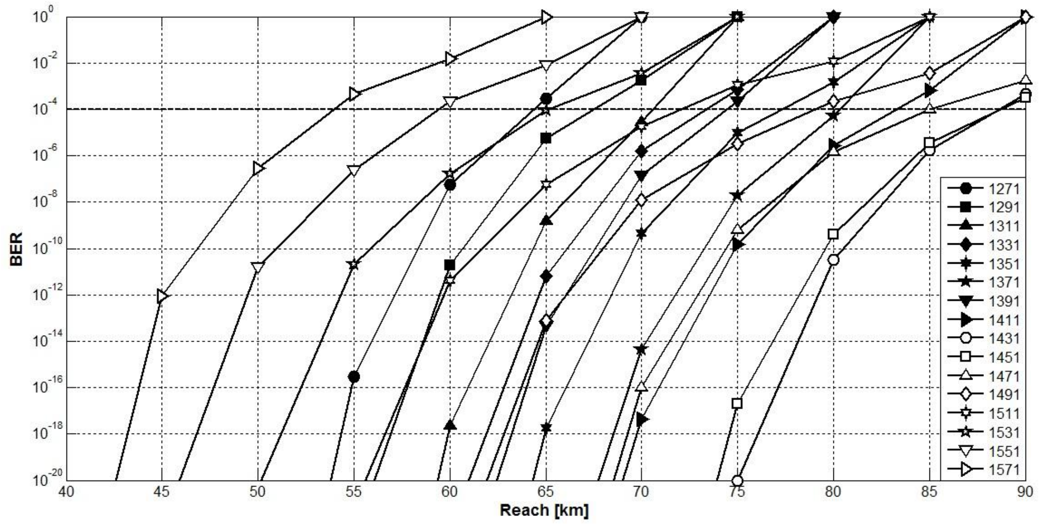
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]

1271 nm	71.69	186.05
1291 nm	74.59	380.95
1311 nm	78.86	8591.99
1331 nm	81.18	462.56
1351 nm	86.25	230.35
1371 nm	92.00	155.56
1391 nm	86.25	118.62
1411 nm	100.36	96.59
1431 nm	113.58	81.95
1451 nm	122.45	71.52
1471 nm	129.76	63.71
1491 nm	136.03	57.63
1511 nm	141.10	52.77
1531 nm	144.65	48.78
1551 nm	145.88	45.46
1571 nm	144.13	42.65

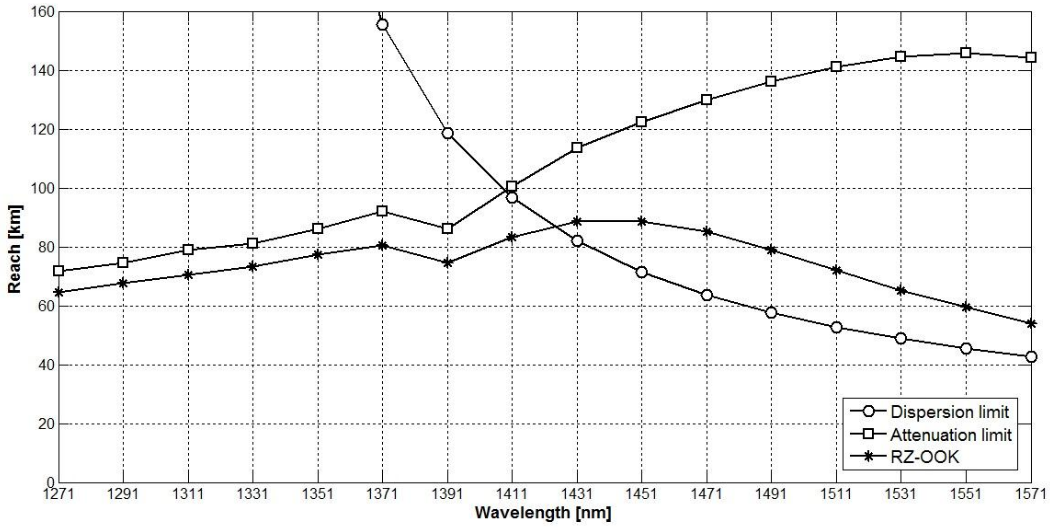
4.1.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion ค่า BER ที่ระบบถือว่ายอมรับได้คือ 10^{-4} โดยการติดตั้ง forward error correction (FEC) ที่ทำหน้าที่เข้ารหัสของสัญญาณเพื่อแก้ไข error อัตโนมัติที่ด้านรับ ทำให้สามารถตรวจสอบ BER ได้ดีขึ้นจาก 10^{-4} เป็น 10^{-9} สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้แสดงดังรูปที่ 4.1 กล่าวคือ ค่า BER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,451 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 88.71 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 53.97 กิโลเมตร



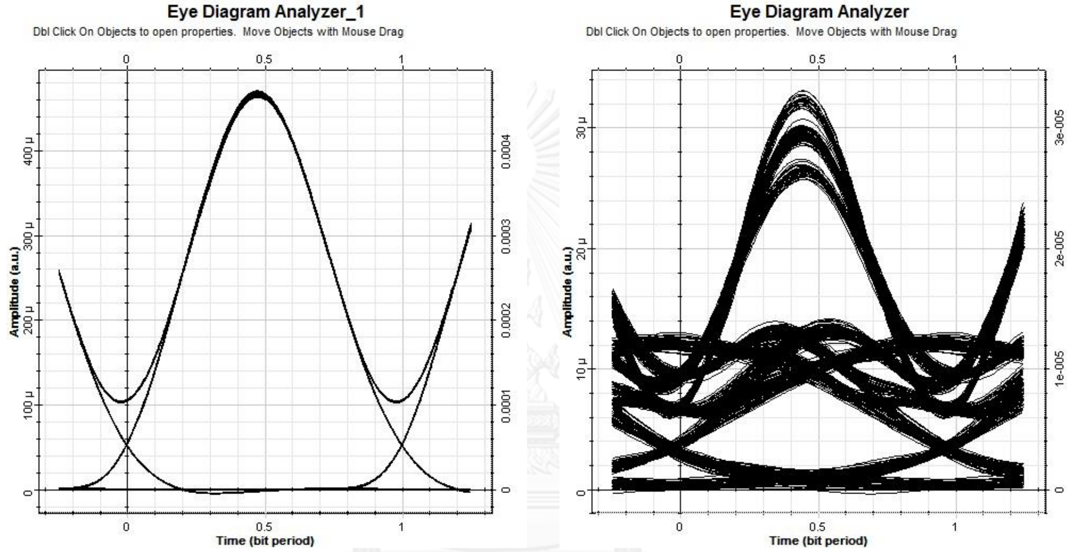
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 4.2 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,411 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,431 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation จะเห็นว่าการจำลองระบบด้วย computer มีความสอดคล้องกับทางทฤษฎีที่ใช้ในการประมาณ และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 53.97 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ RZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 4.3 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ RZ-OOK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 60 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก dispersion ที่ทำให้พัลส์ขยายกว้างออก จนเกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียงและสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก attenuation และที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสงมี noise เกิดขึ้นคือ thermal noise และ shot noise ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ BER ของระบบลดลง ส่งผลให้ระยะทางที่ระบบสามารถส่งสัญญาณไปได้น้อยลงด้วย



(ก) (ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.3 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 60 km

4.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON

4.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

4.2.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx} =$10 dBm, $P_{Rx} =$-30 dBm, $\sum l_c =$1 dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $G_{margin} =$ 3 dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 145.88 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่

จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 71.69 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.2

4.2.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 1,600 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 17183.98 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 85.30 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.2

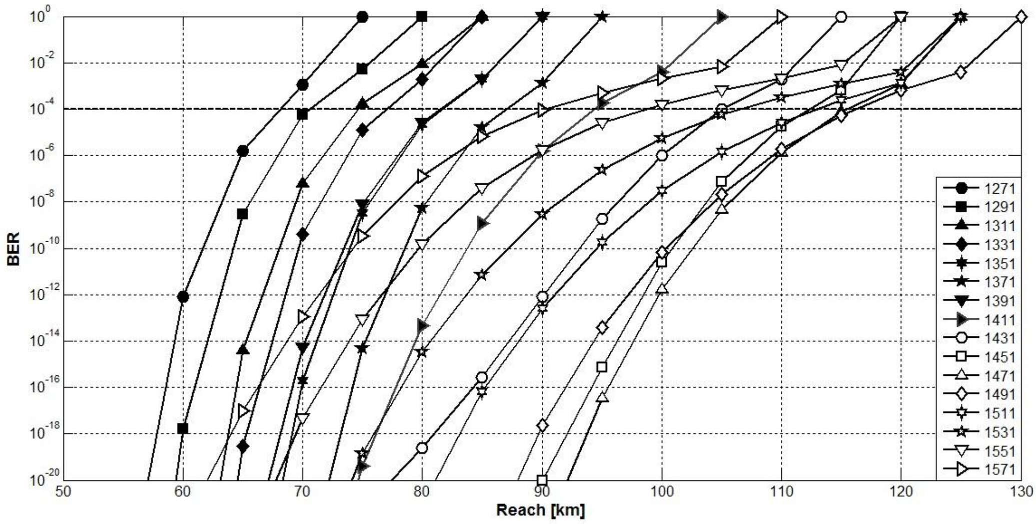
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	71.69	372.10
1291 nm	74.59	761.90
1311 nm	78.86	17183.98
1331 nm	81.18	925.11
1351 nm	86.25	460.70
1371 nm	92.00	311.11
1391 nm	86.25	237.23
1411 nm	100.36	193.18
1431 nm	113.58	163.91
1451 nm	122.45	143.04
1471 nm	129.76	127.41
1491 nm	136.03	115.26
1511 nm	141.10	105.53
1531 nm	144.65	97.57
1551 nm	145.88	90.93
1571 nm	144.13	85.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

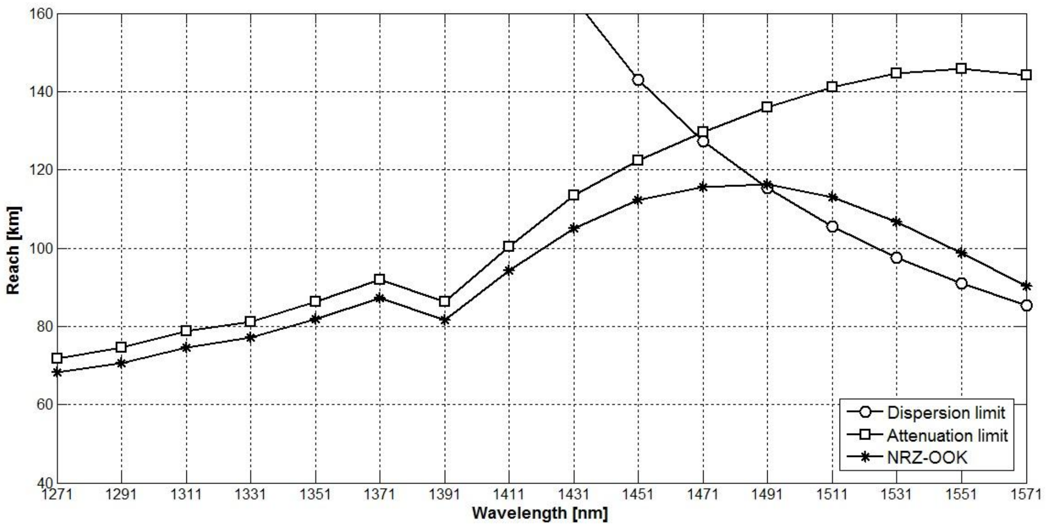
4.2.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางที่ไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้แสดงดังรูปที่ 4.4 กล่าวคือ ค่า BER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,491 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 116.20 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 68.19 กิโลเมตร



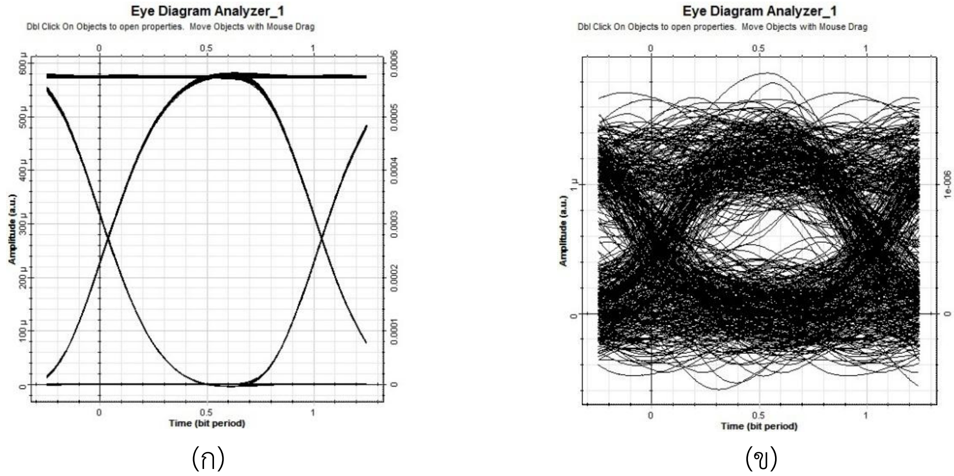
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 4.5 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,471 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,491 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 68.19 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ attenuation



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ NRZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 4.6 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ NRZ-OOK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 70 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลงจนความแตกต่างระหว่างบิต 0 และ 1 น้อยมาก และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก dispersion ที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสงมี noise เกิดขึ้นคือ thermal noise และ shot noise ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ BER ของระบบลดลง ส่งผลให้ระยะทางที่ระบบสามารถส่งสัญญาณไปได้น้อยลงด้วย



(ก) (ข)

รูปที่ 4.6 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 70 km

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DPSK บน CWDM-PON

4.3.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

4.3.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx} = 10$ dBm, $P_{Rx} = -33$ dBm, $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $G_{margin} =$ 3 dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK มีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่ภาครับได้ดีกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK อยู่ประมาณ 3 dB ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 161.73 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 79.48 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.3

4.3.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 800 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 8591.99 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 42.65 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

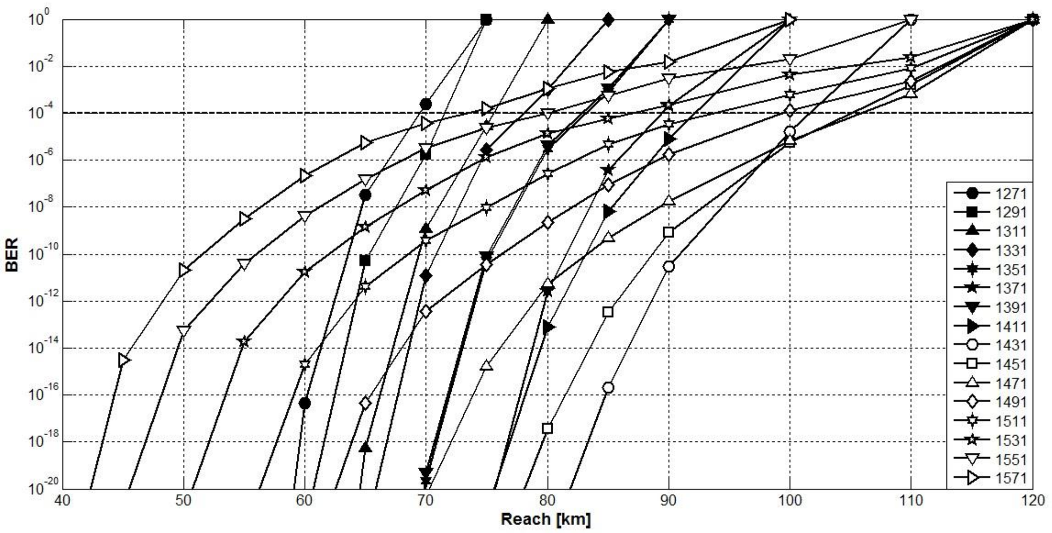
Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	79.48	186.05
1291 nm	82.70	380.95
1311 nm	87.43	8591.99
1331 nm	90.00	462.56
1351 nm	95.63	230.35
1371 nm	102.00	155.56
1391 nm	95.63	118.62
1411 nm	111.27	96.59

1431 nm	125.93	81.95
1451 nm	135.76	71.52
1471 nm	143.86	63.71
1491 nm	150.81	57.63
1511 nm	156.44	52.77
1531 nm	160.38	48.78
1551 nm	161.73	45.46
1571 nm	159.79	42.65

4.3.2 การจำลองระบบ

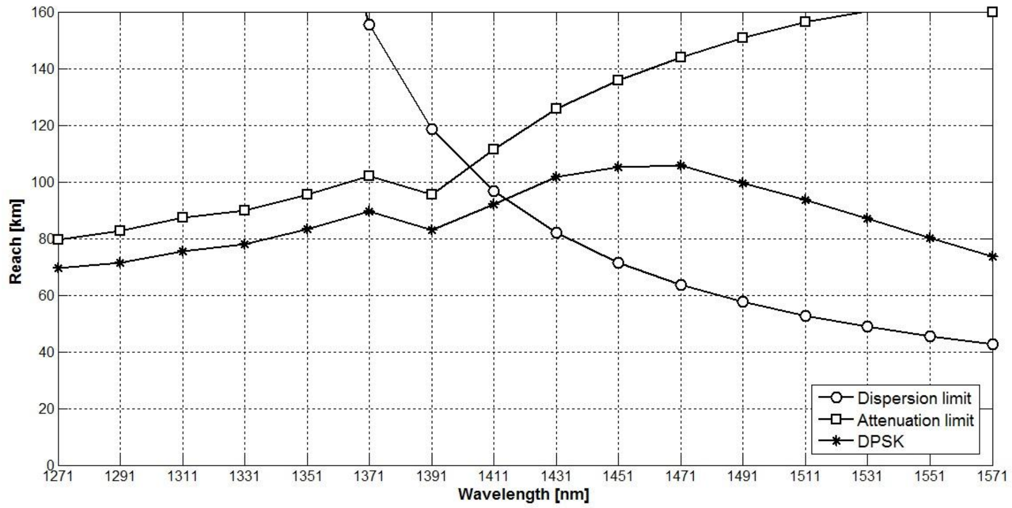
จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้แสดงดังรูปที่ 4.7 กล่าวคือ ค่า BER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,471 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 105.90 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 69.49 กิโลเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



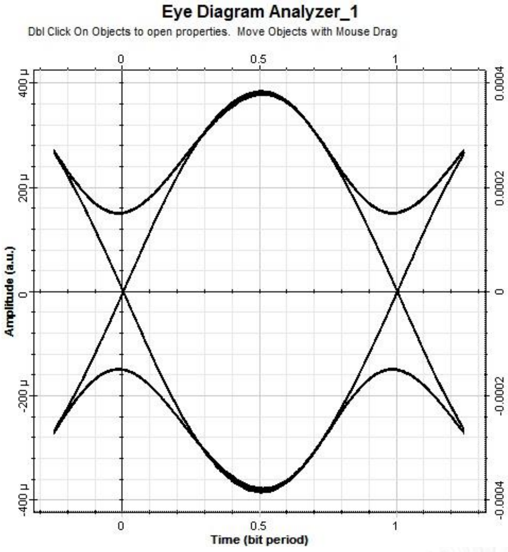
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ DPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 4.8 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,391 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,411 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 69.49 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ attenuation

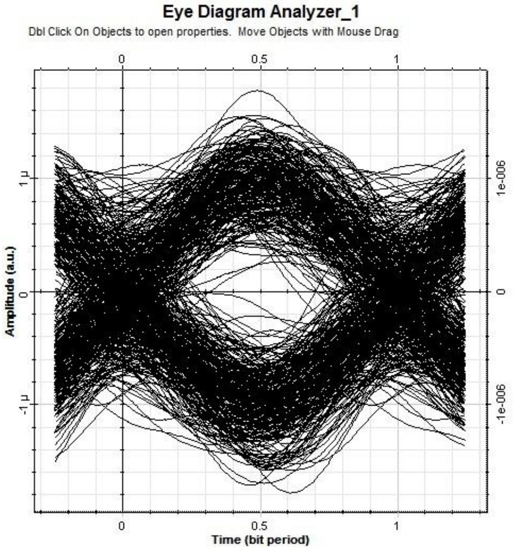


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 4.9 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ DPSK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 70 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลง และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก dispersion ที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสงมี noise เกิดขึ้นคือ thermal noise และ shot noise ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ BER ของระบบลดลงส่งผลให้ระยะทางที่ระบบสามารถส่งสัญญาณไปได้น้อยลงด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 70 km

4.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DQPSK บน CWDM-PON

4.4.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

4.4.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx} = 10$ dBm, $P_{Rx} = -33$ dBm, $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s = 0.4$ dB, $\sum l_{AWG} = 8$ dB, $\sum l_{other} = 6$ dB, $G_{margin} = 3$ dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK มีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่ภาครับได้ดีกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK อยู่ประมาณ 3 dB และมีค่ากำลังลดทอนของสัญญาณที่ภาครับ 6 dB เนื่องจาก power splitter ชนิด 1 : 2 จำนวน 3 dB และจาก coupler จำนวน 3 dB ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 130.02 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 63.90 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.4

4.4.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 1,600 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 17183.98 กิโลเมตร ความยาว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

คลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 85.30 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DQPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

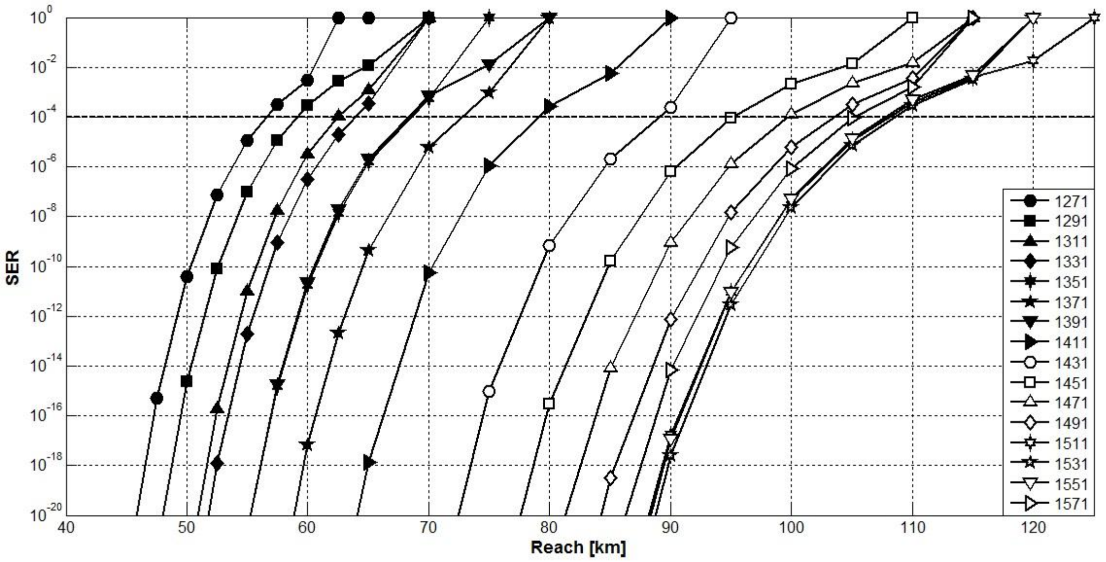
Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	63.90	372.10
1291 nm	66.49	761.90
1311 nm	70.29	17183.98
1331 nm	72.35	925.11
1351 nm	76.88	460.70
1371 nm	82.00	311.11
1391 nm	76.88	237.23
1411 nm	89.45	193.18
1431 nm	101.23	163.91
1451 nm	109.14	143.04
1471 nm	115.66	127.41
1491 nm	121.24	115.26
1511 nm	125.77	105.53
1531 nm	128.93	97.57
1551 nm	130.02	90.93
1571 nm	128.46	85.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.2 การจำลองระบบ

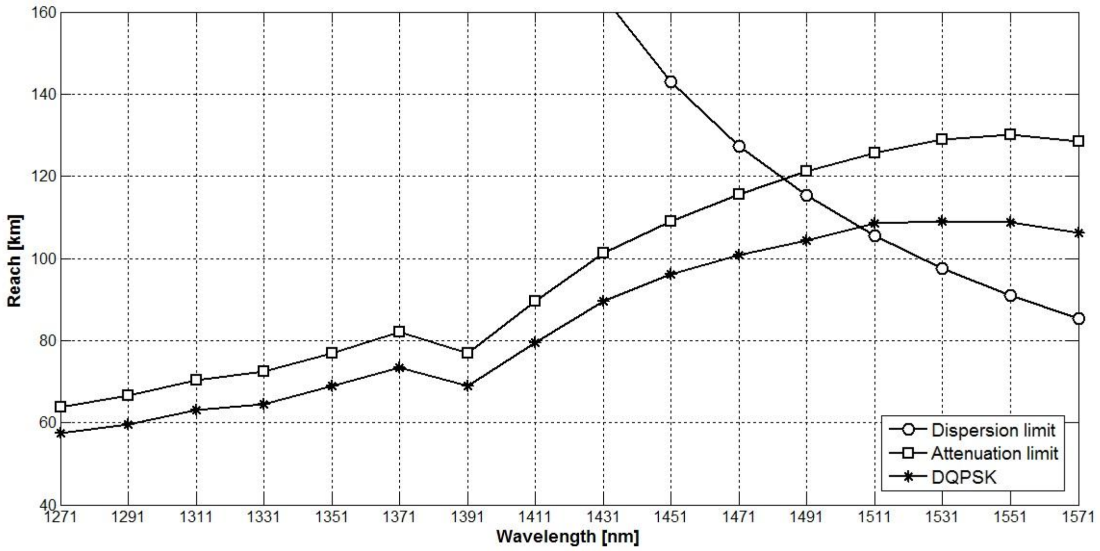
จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ของ I และ Q แสดงดังรูปที่ 4.10 กล่าวคือ ค่า SER มีแนวโน้ม

เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,531 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 108.95 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 57.35 กิโลเมตร



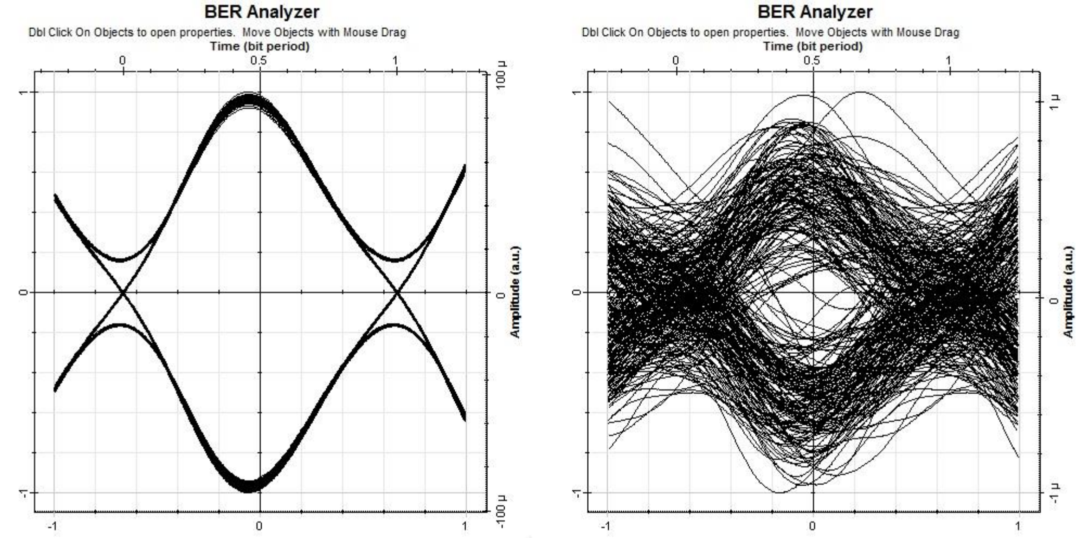
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 4.11 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,471 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,491 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 57.35 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ attenuation



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DQPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 4.12 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ DQPSK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 60 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลง และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก dispersion ที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสงมี noise เกิดขึ้นคือ thermal noise และ shot noise ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ BER ของระบบลดลงส่งผลให้ระยะทางที่ระบบสามารถส่งสัญญาณไปได้น้อยลงด้วย



(ก) (ข)

รูปที่ 4.12 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 60 km

4.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON

4.5.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

4.5.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ SER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาสมรรถนะของระบบที่อัตราข้อมูล 10 Gbps เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สัญญาณก่อนเข้า optical hybrid ที่ภาครับจะเกิดการสูญเสียของกำลังของสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ 15.4 + αL dB เนื่องจาก $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s = 0.4$ dB, $\sum l_{AWG} = 8$ dB, $\sum l_{other} = 3$ dB, $G_{margin} = 3$ dB ซึ่ง α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น และ L มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่ผ่านเส้นใยแสง โดย l_{other} มาจากค่ากำลังลดทอนของสัญญาณที่ภาคส่ง 3 dB จาก coupler 1 ตัว กำลังของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณไม่มีค่ามาตรฐานที่แน่นอน จึงไม่สามารถคำนวณระยะที่จำกัดเนื่องจากด้วยผลของ attenuation ได้ เพราะองค์ประกอบใน optical hybrid มีสัญญาณที่มาจาก LO คูณกับสัญญาณก่อนเข้า optical hybrid และเมื่อสัญญาณต่ำมากๆ ระบบ coherent detection จะต้องใช้ EDFA เพื่อช่วยในการขยายกำลังของสัญญาณ อีกทั้งต้องนำนึงถึงเฟสของสัญญาณต้องมีค่าตรงกัน จึงต้องใช้ DSP ในการแก้ปัญหาดังกล่าวอีกด้วย

4.5.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ SER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 70,000 ps/nm [38] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 751798.95 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3731.72 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.5

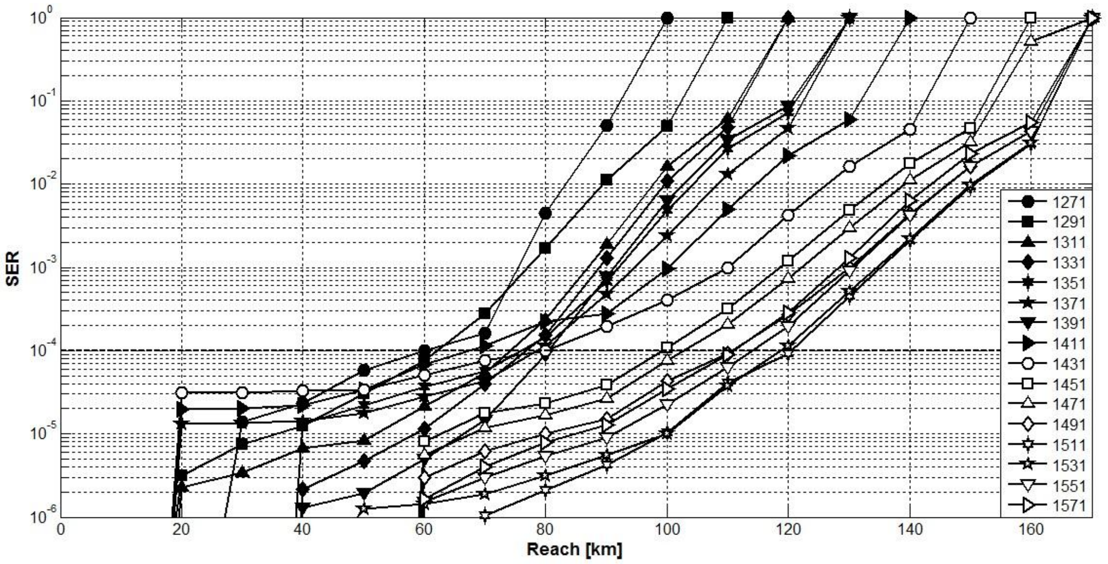
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]	Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	16279.07	1431 nm	7171.05
1291 nm	33333.33	1451 nm	6258.21
1311 nm	751798.95	1471 nm	5574.31
1331 nm	40473.66	1491 nm	5042.54
1351 nm	20155.78	1511 nm	4616.99
1371 nm	13611.10	1531 nm	4268.61
1391 nm	10378.87	1551 nm	3977.97
1411 nm	8451.51	1571 nm	3731.72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

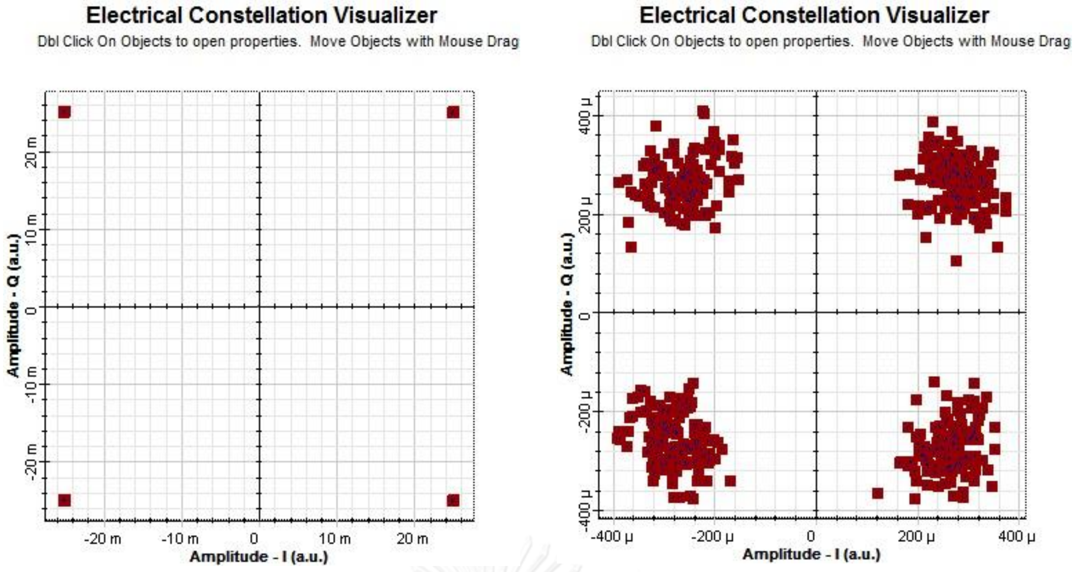
4.5.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ แสดงดังรูปที่ 4.13 กล่าวคือ ค่า SER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดของ coherent 4-QAM คือ 1,511 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 120.53 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 60.34 กิโลเมตร



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

constellation ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 4.14 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ coherent 4-QAM เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 60 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลงและที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสงมี noise เกิดขึ้นซึ่งกระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณทำให้บิตข้างเคียงใกล้กันมากขึ้นเกิดการกระจาย constellation ของสัญญาณ และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนจาก dispersion เล็กน้อย



(ก) (ข)

รูปที่ 4.14 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 4-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 60 km

4.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON

4.6.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

4.6.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ SER ของระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในกรณีนี้จะศึกษาสมรรถนะของระบบที่อัตราข้อมูล 10 Gbps เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สัญญาณก่อนเข้า optical hybrid ที่ภาครับจะเกิดการสูญเสียของกำลังของสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ 15.4 + αL dB เนื่องจาก $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $\sum l_{other} = 3$ dB, $G_{margin} =$ 3 dB ซึ่ง α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น และ L มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่ผ่านเส้นใยแสง โดย l_{other} มาจากค่ากำลังลดทอนของสัญญาณที่ภาคส่ง 3 dB จาก coupler 1 ตัว กำลังของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณไม่มีค่ามาตรฐานที่แน่นอน จึงไม่สามารถคำนวณระยะที่จำกัดเนื่องจากด้วยผลของ attenuation ได้ เพราะองค์ประกอบใน optical hybrid มีสัญญาณที่มาจาก LO คูณกับสัญญาณก่อนเข้า optical hybrid และเมื่อสัญญาณต่ำมากๆ ระบบ coherent detection จะต้องใช้ EDFA เพื่อช่วยในการขยายกำลังของสัญญาณอีกด้วย

4.6.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ SER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 70,000 ps/nm [38] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 751798.95 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3731.72 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.6

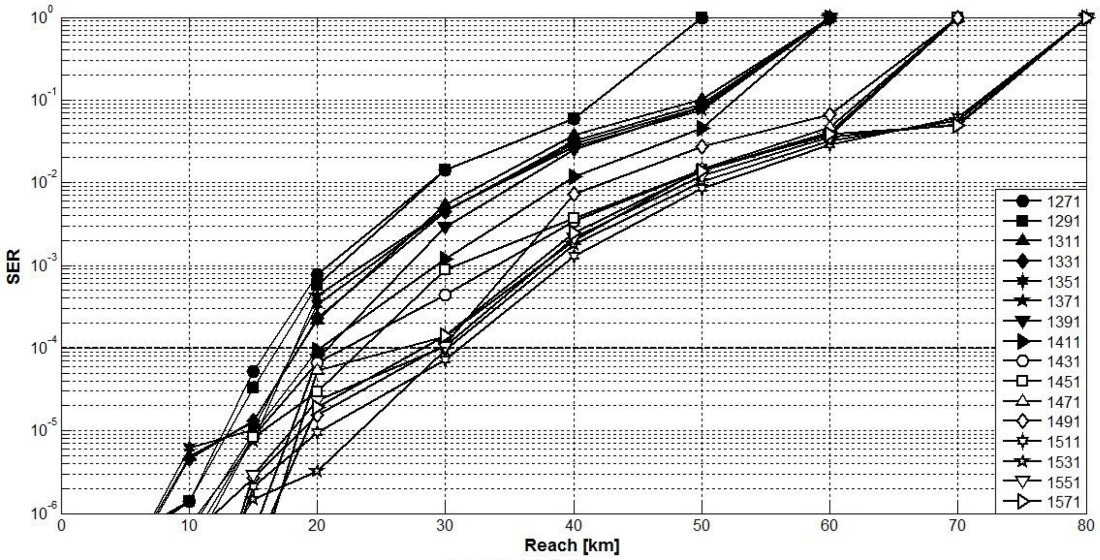
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]	Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	16279.07	1431 nm	7171.05
1291 nm	33333.33	1451 nm	6258.21
1311 nm	751798.95	1471 nm	5574.31
1331 nm	40473.66	1491 nm	5042.54
1351 nm	20155.78	1511 nm	4616.99
1371 nm	13611.10	1531 nm	4268.61
1391 nm	10378.87	1551 nm	3977.97
1411 nm	8451.51	1571 nm	3731.72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.6.2 การจำลองระบบ

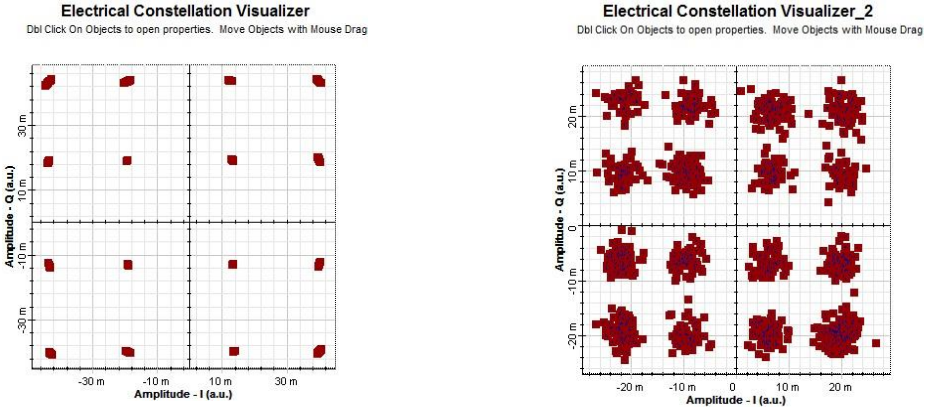
จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ แสดงดังรูปที่ 4.15 กล่าวคือ ค่า SER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.16 ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดของ coherent 16-QAM คือ 1,511 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 30.13 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 16.19 กิโลเมตร



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

constellation ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps แสดงดังรูปที่ 4.16 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ coherent 16-QAM เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 15 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลงและมี noise เพิ่มมากขึ้นที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณทำให้บิตข้างเคียงใกล้กันมากขึ้นเกิดการกระจาย constellation ของสัญญาณ และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนจาก dispersion เล็กน้อย

CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก) (ข)

รูปที่ 4.16 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 16-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 15 km

บทที่ 5
การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่อัตราข้อมูล 40 Gbps โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK NRZ-OOK DPSK DQPSK 4-QAM และ 16-QAM ทั้งในทางทฤษฎีและการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งการพัฒนาระบบโดยการติดตั้ง DCU เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณข้อมูลเพื่อทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุด

5.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON

5.1.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

5.1.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาสมรรถนะของระบบที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx} = 10$ dBm, $P_{Rx} =$ -30 dBm, $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $G_{margin} =$ 3 dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 145.88 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 71.69 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.1

5.1.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 200 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 2148.00 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 10.66 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.1

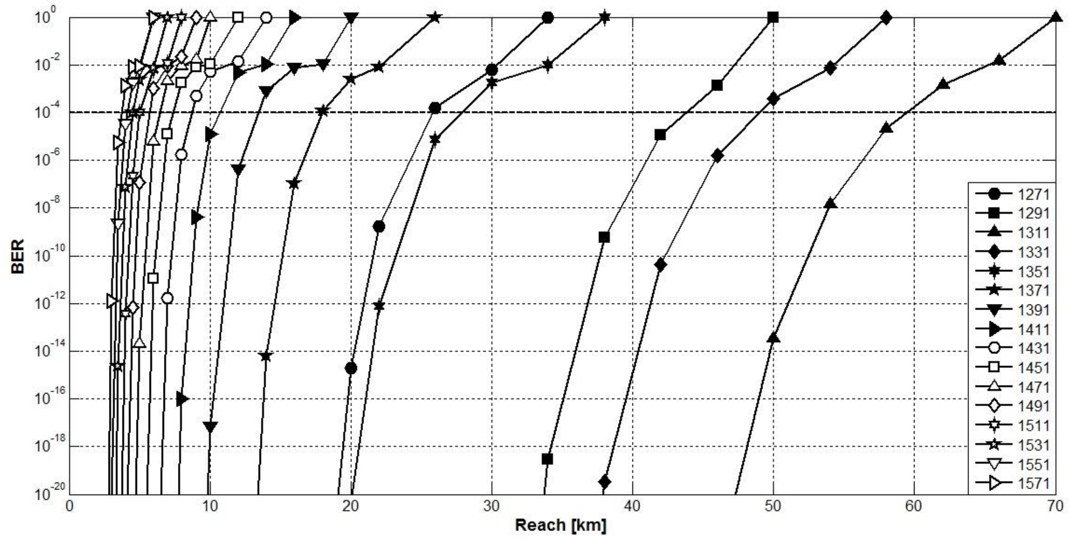
ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]

1271 nm	71.69	46.51
1291 nm	74.59	95.24
1311 nm	78.86	2148.00
1331 nm	81.18	115.64
1351 nm	86.25	57.59
1371 nm	92.00	38.89
1391 nm	86.25	29.63
1411 nm	100.36	24.15
1431 nm	113.58	20.49
1451 nm	122.45	17.88
1471 nm	129.76	15.93
1491 nm	136.03	14.41
1511 nm	141.10	13.19
1531 nm	144.65	12.20
1551 nm	145.88	11.37
1571 nm	144.13	10.66

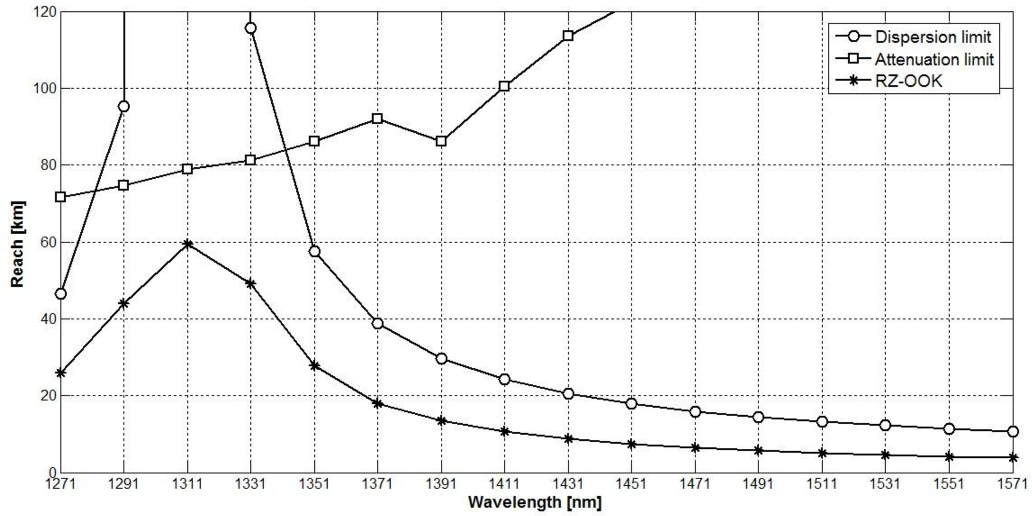
5.1.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้แสดงดังรูปที่ 5.1 กล่าวคือ ค่า BER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 59.45 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3.76 กิโลเมตร



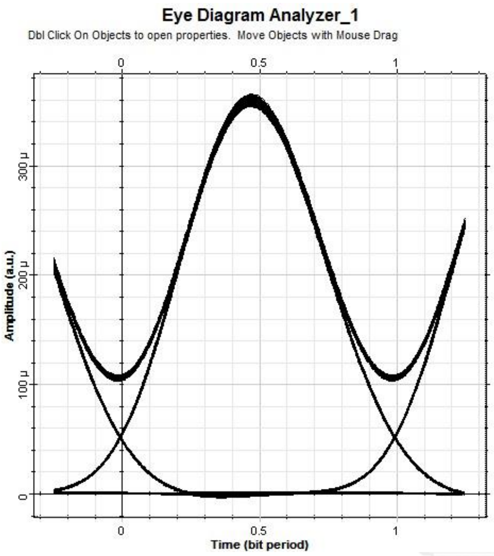
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 5.2 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,331 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,351 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3.76 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion

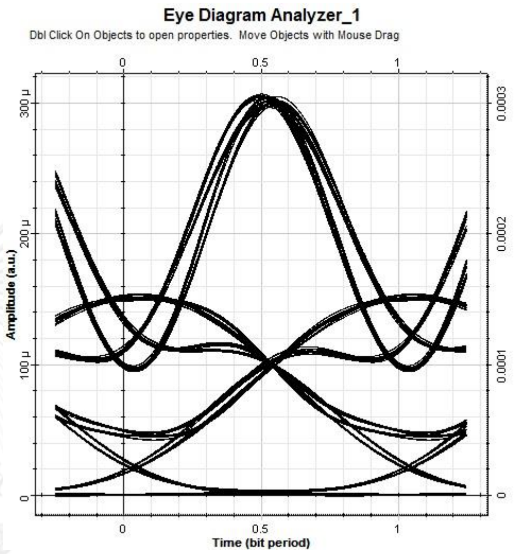


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ RZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่5.3 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ RZ-OOK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 4 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก dispersion ที่ทำให้พัลส์ขยายกว้างออก จนเกิดปรากฏการณ์ ISI และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก attenuation



(ก)

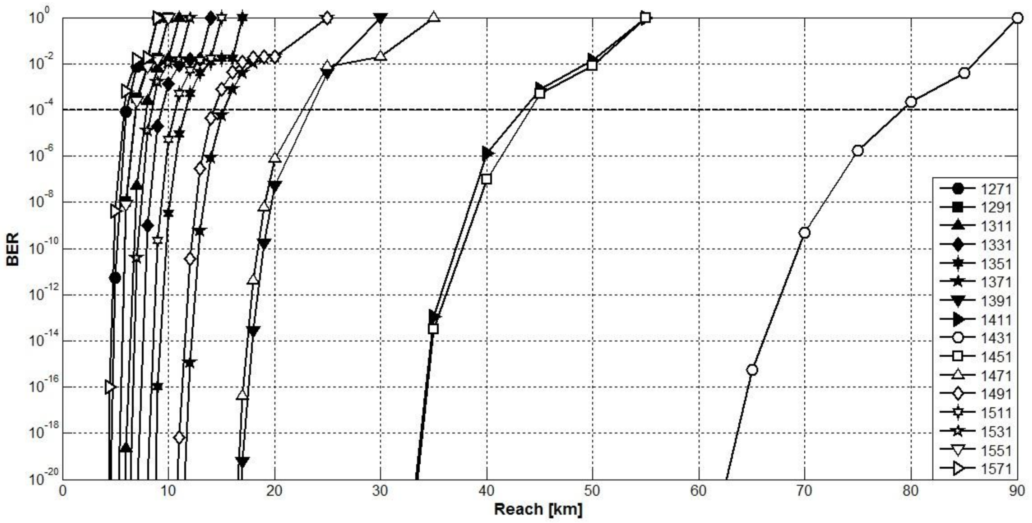


(ข)

รูปที่ 5.3 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 4 km

5.1.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อติดตั้ง DCU

จากการจำลองระบบพบว่าเมื่อเลือกความยาวคลื่น 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเป็น 0 จะได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบมากกว่าความยาวคลื่นแบบอื่น จึงเลือกความยาวคลื่นที่ 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นอ้างอิงในการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันดังสมการที่ (26) ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,431 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 79.20 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 5.84 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU

5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON

5.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

5.2.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx} = 10$ dBm, $P_{Rx} = -30$ dBm, $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s = 0.4$ dB, $\sum l_{AWG} = 8$ dB, $G_{margin} = 3$ dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 145.88 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 71.69 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.2

5.2.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

สัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 400 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 4295.99 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 21.32 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

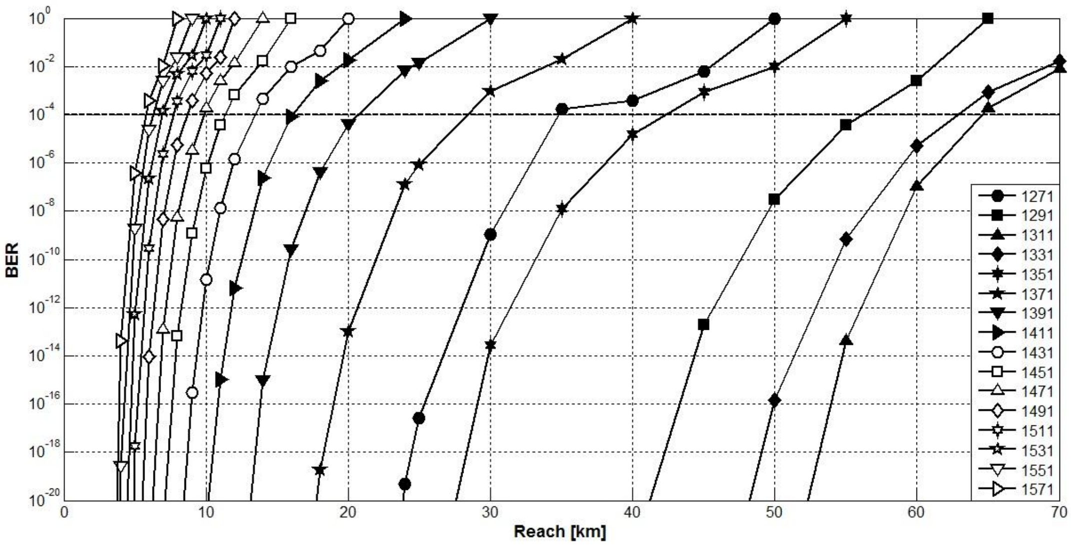
Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	71.69	93.02
1291 nm	74.59	190.48
1311 nm	78.86	4295.99
1331 nm	81.18	231.28
1351 nm	86.25	115.18
1371 nm	92.00	77.78
1391 nm	86.25	59.31
1411 nm	100.36	48.29
1431 nm	113.58	40.98
1451 nm	122.45	35.76
1471 nm	129.76	31.85
1491 nm	136.03	28.81
1511 nm	141.10	26.38
1531 nm	144.65	24.39
1551 nm	145.88	22.73
1571 nm	144.13	21.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2.2 การจำลองระบบ

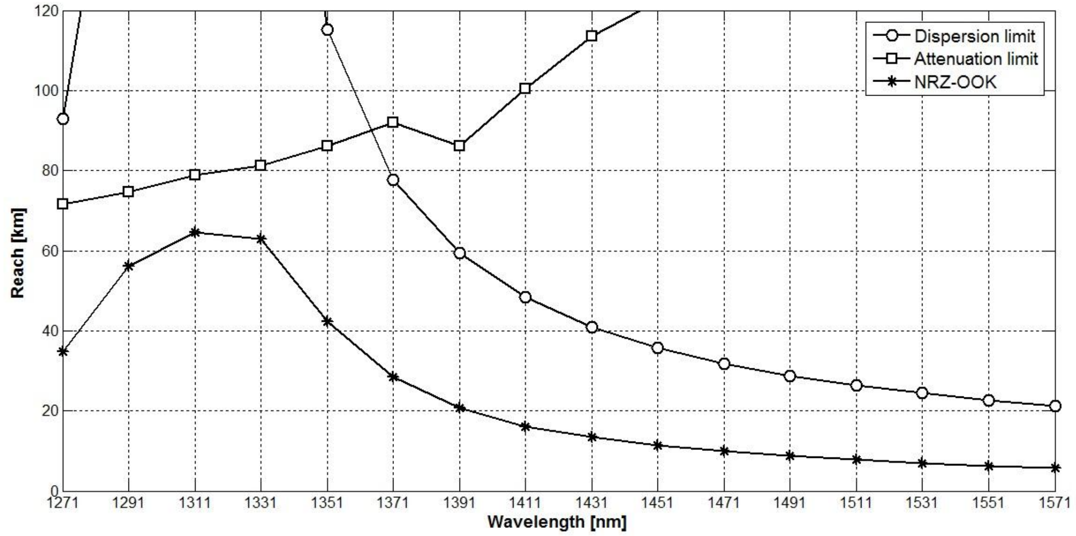
จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้แสดงดังรูปที่ 5.5 กล่าวคือ ค่า BER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 64.59 กิโลเมตร และ

ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 5.81 กิโลเมตร



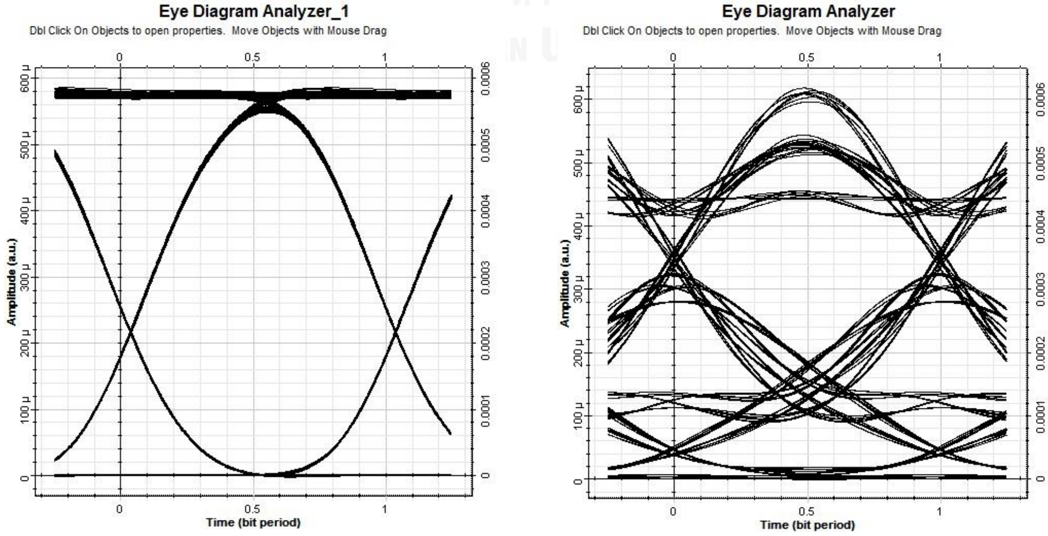
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 5.6 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,351 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,371 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 5.81 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ NRZ-OOK, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่ 5.7 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ NRZ-OOK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 6 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก dispersion ที่ทำให้พัลส์ขยายกว้างออก จนเกิดปรากฏการณ์ ISI และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก attenuation

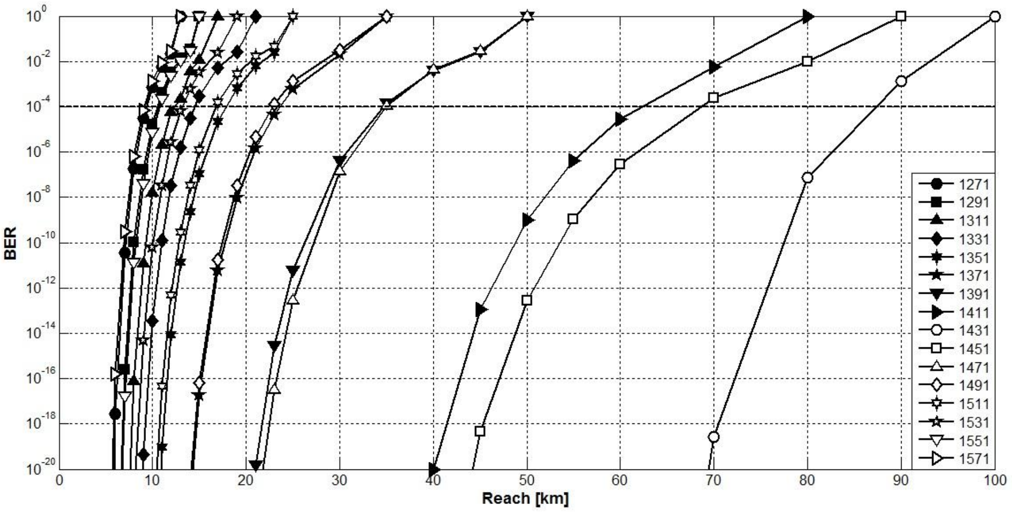


(ก) (ข)

รูปที่ 5.7 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 6 km

5.2.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อติดตั้ง DCU

จากการจำลองระบบพบว่าเมื่อเลือกความยาวคลื่น 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเป็น 0 จะได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบมากกว่าความยาวคลื่นแบบอื่น จึงเลือกความยาวคลื่นที่ 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นอ้างอิงในการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันดังสมการที่ (26) ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,431 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 87.35 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 9.12 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU

5.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DPSK บน CWDM-PON

5.3.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

5.3.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ BER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx} = 10$ dBm, $P_{Rx} = -33$ dBm, $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $G_{margin} =$ 3 dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK มีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่ภาครับได้ดีกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK อยู่ประมาณ 3 dB ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้

ระยะทางเท่ากับ 161.73 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 79.48 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.3

5.3.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ BER ของระบบ

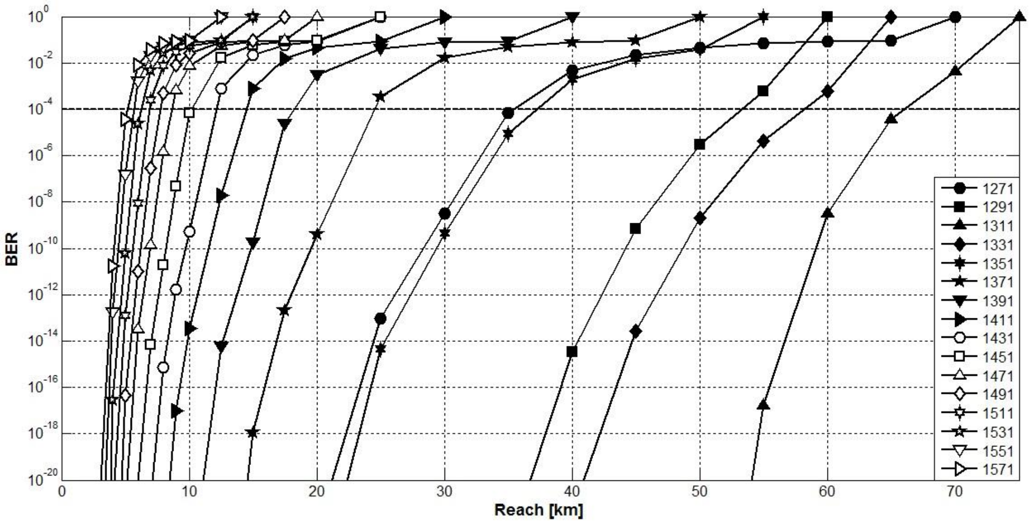
เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 200 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 2148.00 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 10.66 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	79.48	46.51
1291 nm	82.70	95.24
1311 nm	87.43	2148.00
1331 nm	90.00	115.64
1351 nm	95.63	57.59
1371 nm	102.00	38.89
1391 nm	95.63	29.63
1411 nm	111.27	24.15
1431 nm	125.93	20.49
1451 nm	135.76	17.88
1471 nm	143.86	15.93
1491 nm	150.81	14.41
1511 nm	156.44	13.19
1531 nm	160.38	12.20
1551 nm	161.73	11.37
1571 nm	159.79	10.66

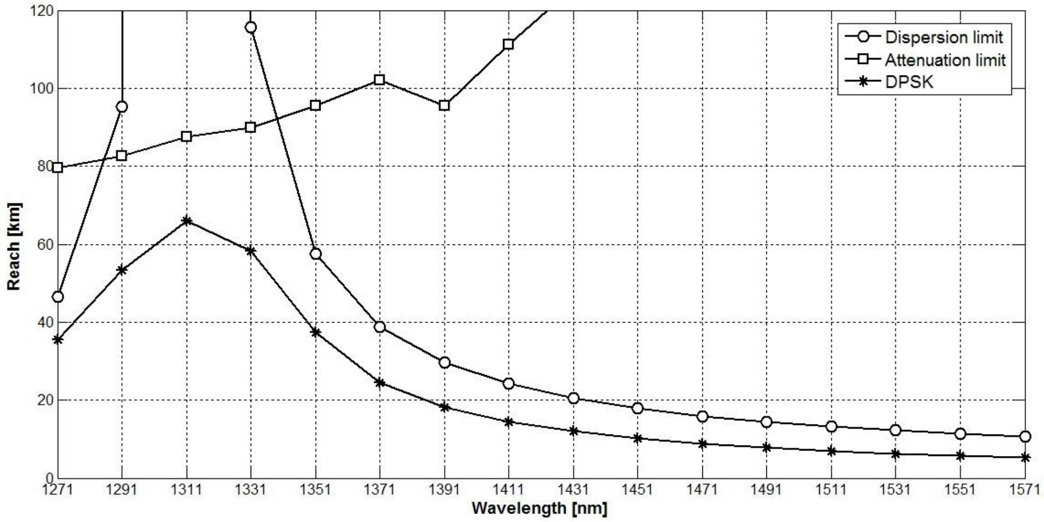
5.3.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้แสดงดังรูปที่ 5.9 กล่าวคือ ค่า BER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 66.07 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 5.18 กิโลเมตร



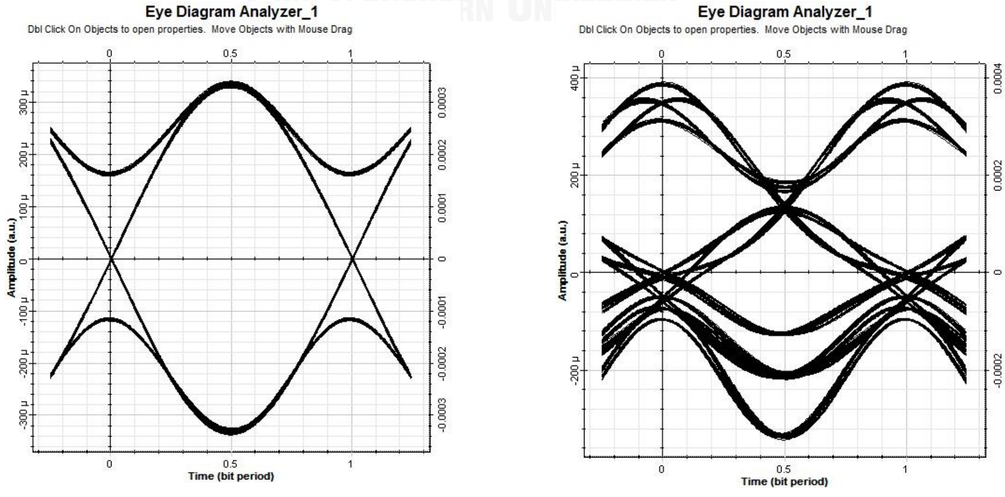
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ DPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

รูปที่ 5.10 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,331 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,351 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 5.18 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่ 5.11 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ DPSK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก dispersion ที่ทำให้พัลส์ขยายกว้างออก จนเกิดปรากฏการณ์ ISI และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก attenuation

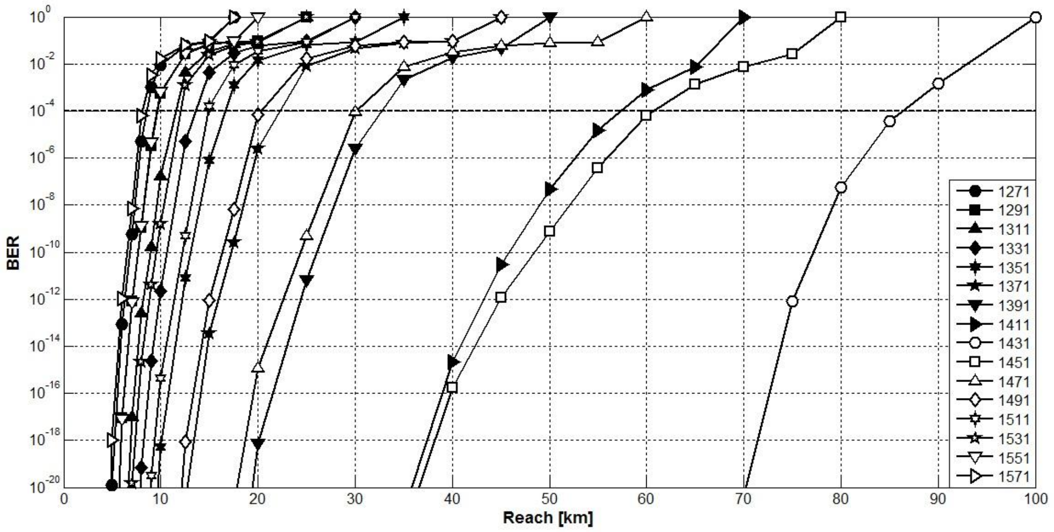


(ก) (ข)

รูปที่ 5.11 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 5 km

5.3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อติดตั้ง DCU

จากการจำลองระบบพบว่าเมื่อเลือกความยาวคลื่น 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเป็น 0 จะได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบมากกว่าความยาวคลื่นแบบอื่น จึงเลือกความยาวคลื่นที่ 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นอ้างอิงในการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันดังสมการที่ (26) ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,431 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 86.35 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 8.12 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 5.12



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER ของระบบ DPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU

5.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DQPSK บน CWDM-PON

5.4.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

5.4.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ SER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) เมื่อแทนค่า $P_{Tx}=10$ dBm, $P_{Rx}=$-33 dBm, $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $\sum l_{other} = 6$ dB, $G_{margin} =$ 3 dB และ α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK มีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่ภาครับได้ดีกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK อยู่ประมาณ 3 dB และมีค่ากำลังลดทอนของสัญญาณที่ภาครับ 6 dB เนื่องจาก power splitter ชนิด 1 : 2 จำนวน 3 dB และจาก coupler จำนวน 3 dB ความยาวคลื่นที่สามารถ

ส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,551 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 130.02 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 63.90 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.4

5.4.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ SER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 400 ps/nm [37] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 4295.99 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 21.32 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ DQPSK บน CWDM-PON เนื่องจาก attenuation และ dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

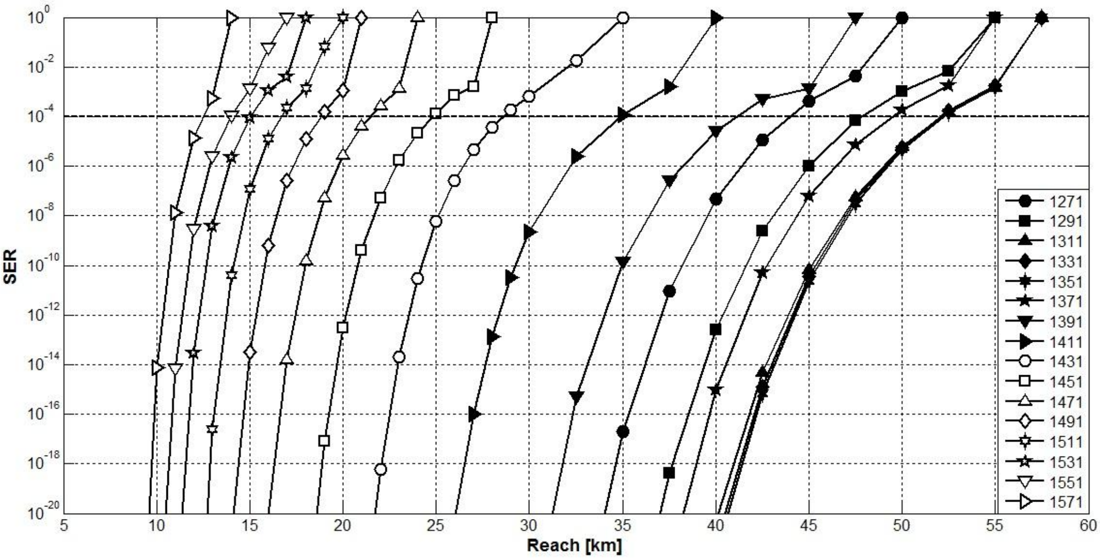
Wavelengths	Reaches limit by fiber attenuation [km]	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	63.90	93.02
1291 nm	66.49	190.48
1311 nm	70.29	4295.99
1331 nm	72.35	231.28
1351 nm	76.88	115.18
1371 nm	82.00	77.78
1391 nm	76.88	59.31
1411 nm	89.45	48.29
1431 nm	101.23	40.98
1451 nm	109.14	35.76
1471 nm	115.66	31.85
1491 nm	121.24	28.81
1511 nm	125.77	26.38
1531 nm	128.93	24.39
1551 nm	130.02	22.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1571 nm	128.46	21.32

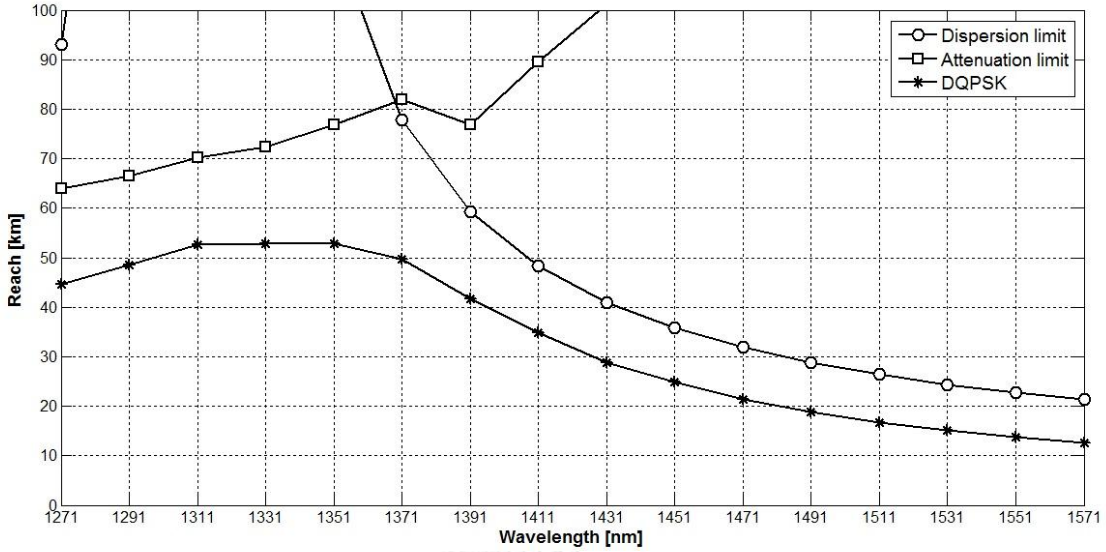
5.4.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ของ I และ Q แสดงดังรูปที่ 5.13 กล่าวคือ ค่า SER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดของ DQPSK คือ 1,331 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 52.89 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 12.61 กิโลเมตร



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

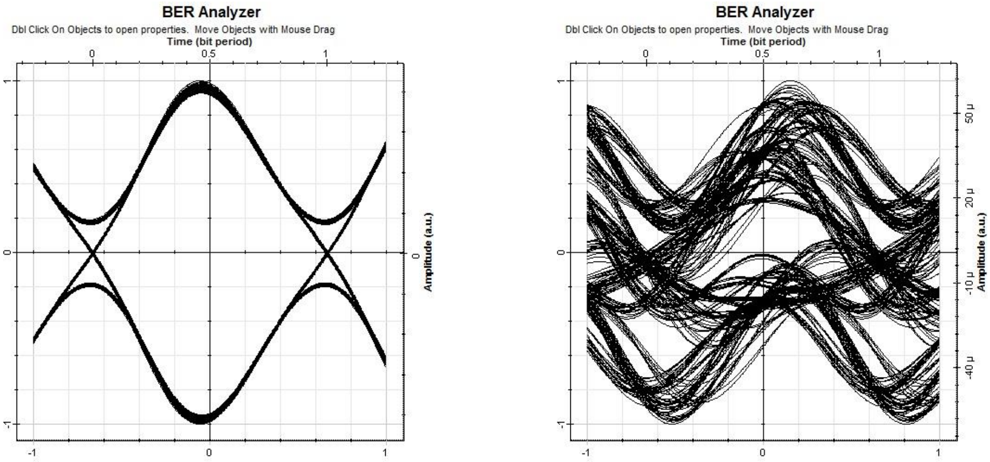
รูปที่ 5.14 จากการจำลองระบบพบว่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,371 นาโนเมตร ผลกระทบจาก attenuation มีค่ามากกว่า dispersion ในทางกลับกันช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,391 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร ผลกระทบจาก dispersion มีค่ามากกว่า attenuation และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 12.61 กิโลเมตร นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถส่งสัญญาณได้จากการจำลองระบบ DQPSK บน CWDM-PON, การคำนวณผลของ attenuation และ dispersion ในทางทฤษฎี

eye-diagram ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่ 5.15 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ DQPSK เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 13 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก dispersion ที่ทำให้พัลส์ขยายกว้างออก จนเกิดปรากฏการณ์ ISI และสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจาก attenuation

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

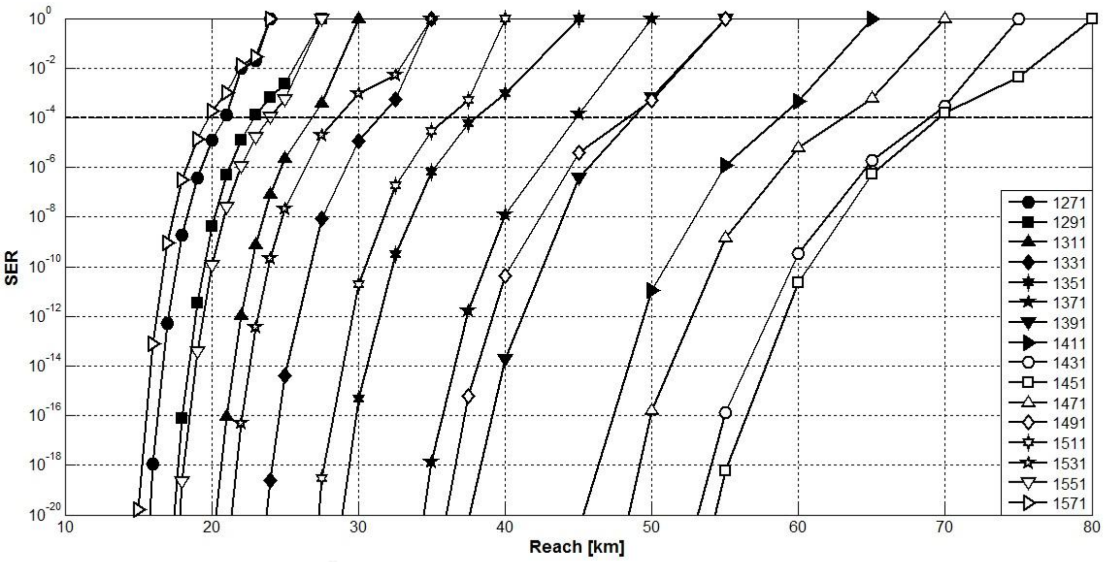


(ก) (ข)

รูปที่ 5.15 Eye-diagram ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,571 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 13 km

5.4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อติดตั้ง DCU

จากการจำลองระบบพบว่าเมื่อเลือกความยาวคลื่น 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเป็น 0 จะได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบมากกว่าความยาวคลื่นแบบอื่น จึงเลือกความยาวคลื่นที่ 1,431 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นอ้างอิงในการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงที่ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันดังสมการที่ (26) จากรูปที่ 5.16 DQPSK พบว่าความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,451 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 70.44 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 19.88 กิโลเมตร



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ DQPSK บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร โดยการติดตั้ง DCU

5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON

5.5.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

5.5.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ SER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สัญญาณก่อนเข้า optical hybrid ที่ภาครับจะเกิดการสูญเสียของกำลังของสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ 15.4 + αL dB เนื่องจาก $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s = 0.4$ dB, $\sum l_{AWG} = 8$ dB, $\sum l_{other} = 3$ dB, $G_{margin} = 3$ dB ซึ่ง α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น และ L มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่ผ่านเส้นใยแสง โดย l_{other} มาจากค่ากำลังลดทอนของสัญญาณที่ภาคส่ง 3 dB จาก coupler 1 ตัว กำลังของสัญญาณที่

ตัวรับสัญญาณไม่มีค่ามาตรฐานที่แน่นอน จึงไม่สามารถคำนวณระยะที่จำกัดเนื่องจากด้วยผลของ attenuation ได้ เพราะองค์ประกอบใน optical hybrid มีสัญญาณที่มาจาก LO คูณกับสัญญาณก่อนเข้า optical hybrid และเมื่อสัญญาณต่ำมากๆ ระบบ coherent detection จะต้องใช้ EDFA เพื่อช่วยในการขยายกำลังของสัญญาณ อีกทั้งต้องคำนึงถึงเฟสของสัญญาณต้องมีค่าตรงกัน จึงต้องใช้ DSP ในการแก้ปัญหาดังกล่าวอีกด้วย

5.5.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ SER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 70,000 ps/nm [38] เมื่อแทนค่า dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 751798.95 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3731.72 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.5

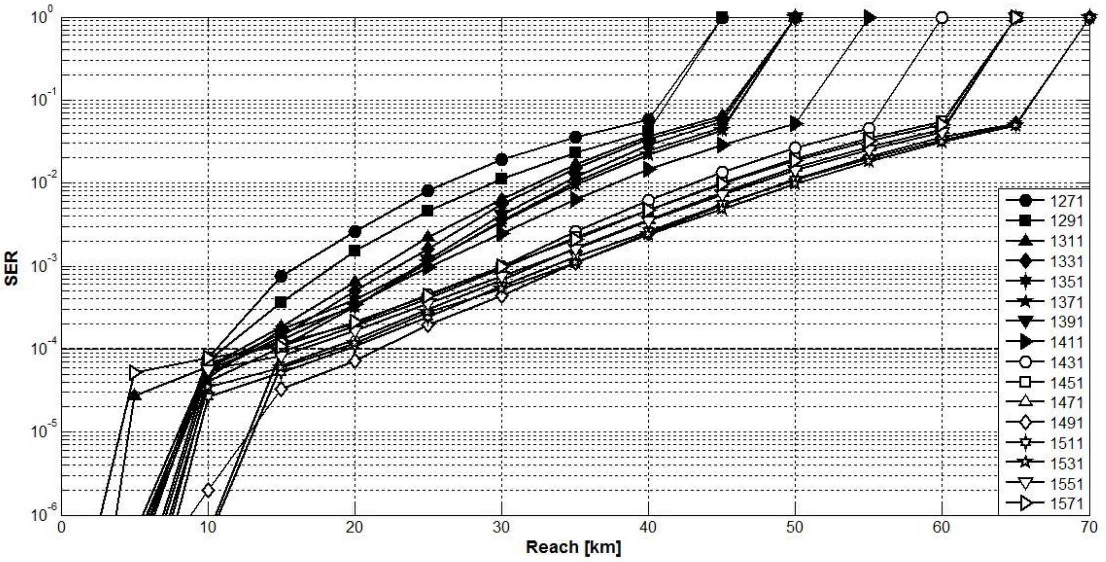
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]	Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	16279.07	1431 nm	7171.05
1291 nm	33333.33	1451 nm	6258.21
1311 nm	751798.95	1471 nm	5574.31
1331 nm	40473.66	1491 nm	5042.54
1351 nm	20155.78	1511 nm	4616.99
1371 nm	13611.10	1531 nm	4268.61
1391 nm	10378.87	1551 nm	3977.97
1411 nm	8451.51	1571 nm	3731.72

5.5.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของ

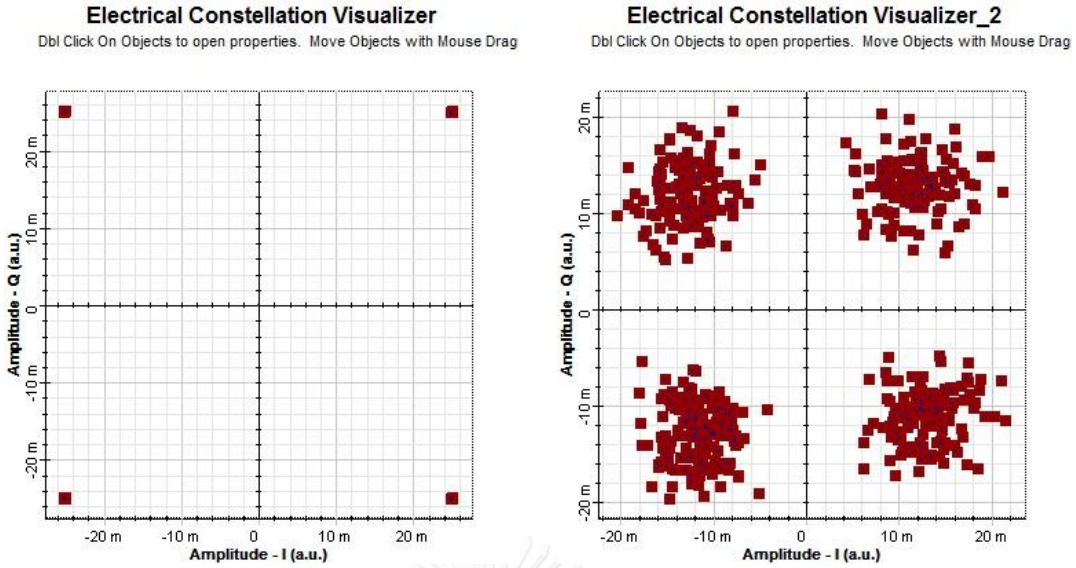
ระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ แสดงดังรูปที่ 5.17 กล่าวคือ ค่า SER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดของ coherent 4-QAM คือ 1,491 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 21.66 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 10.55 กิโลเมตร



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

constellation ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่ 5.18 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ coherent 4-QAM เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลงและมี noise เพิ่มมากขึ้นที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณทำให้บิตข้างเคียงใกล้กันมากขึ้น สัญญาณมีความผิดเพี้ยนจาก dispersion เล็กน้อย



(ก) (ข)

รูปที่ 5.18 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 4-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 10 km

5.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON

5.6.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในทางทฤษฎี

5.6.1.1 ผลของ attenuation ที่มีต่อ SER ของระบบ

การหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation สัญญาณก่อนเข้า optical hybrid ที่ภาครับจะเกิดการสูญเสียของกำลังของสัญญาณทั้งหมดเท่ากับ 15.4 + αL dB เนื่องจาก $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s = 0.4$ dB, $\sum l_{AWG} = 8$ dB, $\sum l_{other} = 3$ dB, $G_{margin} = 3$ dB ซึ่ง α มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่น และ L มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่ผ่านเส้นใยแสง โดย l_{other} มาจากค่ากำลังลดทอนของสัญญาณที่ภาคส่ง 3 dB จาก coupler 1 ตัว กำลังของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณไม่มีค่ามาตรฐานที่แน่นอน จึงไม่สามารถคำนวณระยะที่จำกัดเนื่องจากด้วยผลของ attenuation ได้ เพราะองค์ประกอบใน optical hybrid มีสัญญาณที่มาจาก LO คูณกับสัญญาณก่อนเข้า optical hybrid และเมื่อสัญญาณต่ำมากๆ ระบบ coherent detection จะต้องใช้ EDFA เพื่อช่วยในการขยายกำลังของสัญญาณอีกด้วย

5.6.1.2 ผลของ dispersion ที่มีต่อ SER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของ dispersion ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณได้จากค่า dispersion สะสมเท่ากับ 70,000 ps/nm [38] เมื่อแทนค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

dispersion ในแต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดคือ 1,311 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 751798.95 กิโลเมตร ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,571 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3731.72 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 5.6

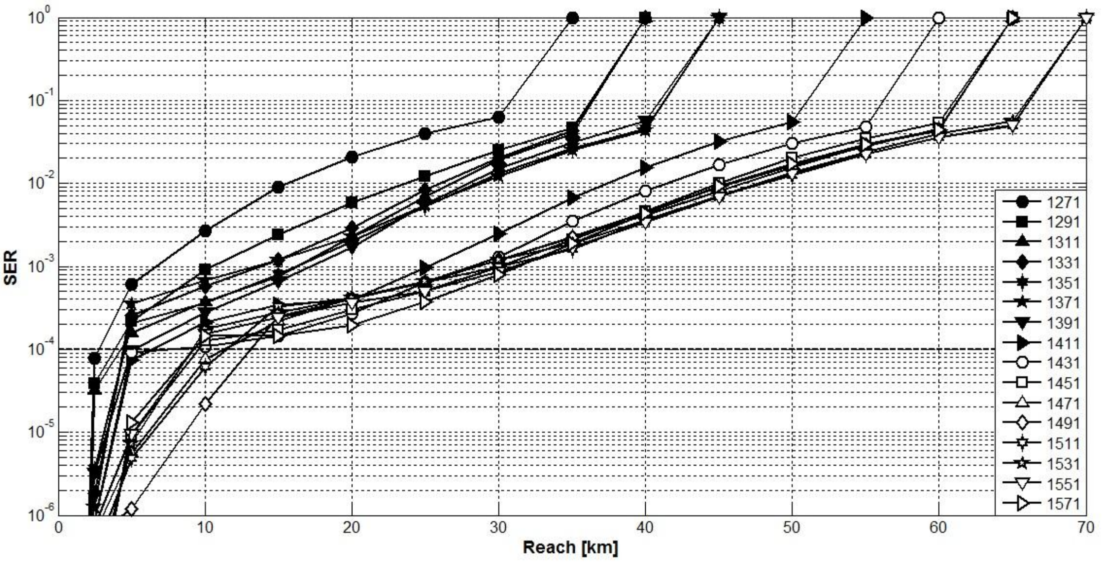
ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON เนื่องจาก dispersion ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 -1,571 นาโนเมตร

Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]	Wavelengths	Reaches limit by fiber dispersion [km]
1271 nm	16279.07	1431 nm	7171.05
1291 nm	33333.33	1451 nm	6258.21
1311 nm	751798.95	1471 nm	5574.31
1331 nm	40473.66	1491 nm	5042.54
1351 nm	20155.78	1511 nm	4616.99
1371 nm	13611.10	1531 nm	4268.61
1391 nm	10378.87	1551 nm	3977.97
1411 nm	8451.51	1571 nm	3731.72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

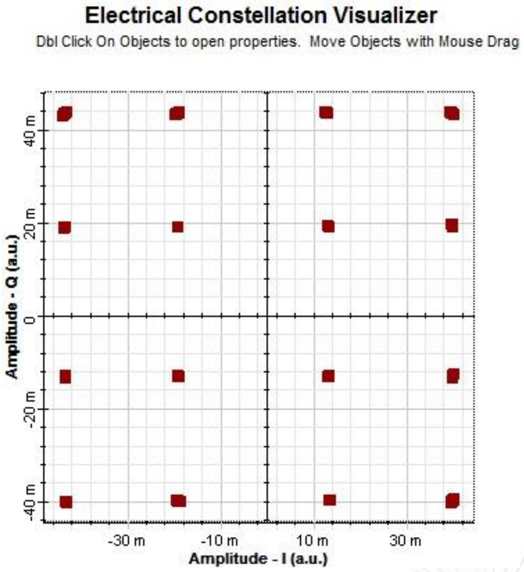
5.6.2 การจำลองระบบ

จากการจำลองระบบด้วยการ simulation ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อ 1 ช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ จำนวน 2^{10}-1 บิต เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation และ dispersion สามารถหาระยะทางไกลที่สุดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบกับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ แสดงดังรูปที่ 5.19 กล่าวคือ ค่า SER มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากที่สุดของ coherent 16-QAM คือ 1,491 นาโนเมตร ได้ระยะทางเท่ากับ 13.10 กิโลเมตร และความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบคือ 1,271 นาโนเมตร ได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 2.80 กิโลเมตร

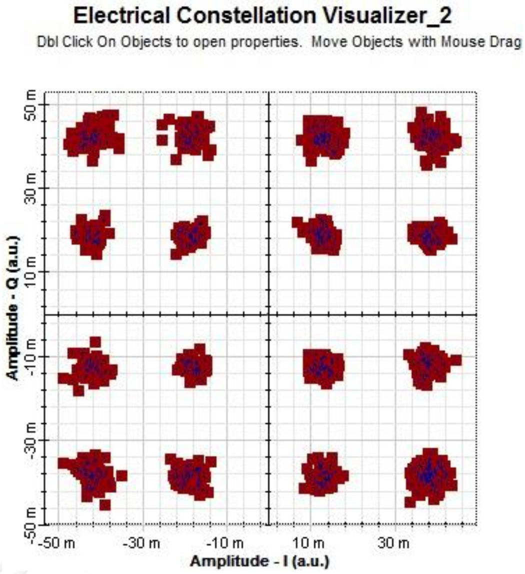


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโนเมตร

constellation ของสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps แสดงดังรูปที่ 5.20 กล่าวคือ ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะของระบบ coherent 16-QAM เมื่อระยะทางผ่านเส้นใยแสงเพิ่มขึ้นจาก 0 กิโลเมตร และ 3 กิโลเมตร ตามลำดับ จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากอันเนื่องมาจาก attenuation ซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลงซึ่งทำให้กำลังของสัญญาณลดลงและมี noise เพิ่มมากขึ้นที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณทำให้บิตข้างเคียงใกล้กันมากขึ้น สัญญาณมีความผิดเพี้ยนจาก dispersion เล็กน้อย



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.20 Constellation ของสัญญาณของความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตร ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 16-QAM โดยผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง (ก) B-B (ข) 3 km

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
การวิเคราะห์สมรรถนะทั้งหมดและแนวทางการออกแบบระบบ CWDM-PON

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะทั้งหมดของระบบ CWDM-PON และแนวทางการออกแบบระบบ CWDM-PON โดยคำนึงถึงกำลังของสัญญาณที่สูญเสียทั้งหมดที่ขึ้นกับระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบในการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

6.1 การวิเคราะห์สมรรถนะทั้งหมดของระบบ CWDM-PON

สมรรถนะของระบบ CWDM-PON แสดงดังตารางที่ 6.1 ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มีค่าเท่ากับ 53.97, 68.19, 69.49, 57.35, 60.34 และ 16.19 กิโลเมตร ตามลำดับ การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion ส่วนการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM นั้นจำกัดด้วยผลของ attenuation

เมื่อเปรียบเทียบการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK กับ NRZ-OOK จะพบว่าสัญญาณแบบ NRZ จะสามารถทนต่อผลของ dispersion ได้ดีกว่าสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากความกว้าง pulse ในการส่งสัญญาณแบบ RZ กว้างกว่าแบบ NRZ 2 เท่า แต่สัญญาณแบบ RZ ทนต่อการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าแบบ NRZ เพราะสัญญาณแบบ NRZ ส่งกำลังของสัญญาณตลอดช่วงคาบบิต ซึ่งสัญญาณแบบ RZ ส่งกำลังของสัญญาณเพียงครึ่งคาบบิต

เมื่อเปรียบเทียบการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK กับ DPSK จะพบว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK สามารถส่งได้ระยะทางที่ไกลกว่าแบบ OOK เนื่องจากที่ภาครับของ OOK เป็นแบบ direct detection ซึ่ง DSPK และ DQPSK เป็นแบบ balanced detection ที่ภาครับของ DPSK และ DQPSK สามารถรับกำลังของสัญญาณได้ดีกว่าแบบ OOK อยู่ 3 dB

นอกจากนี้การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK และ 2^n-QAM นั้นมีการแบ่งองค์ประกอบเป็น 2 ส่วน คือ in-phase และ quadrature อัตราข้อมูลลดลงครึ่งหนึ่ง จึงทนต่อการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าแบบอื่นๆ แต่เนื่องจากการออกแบบระบบโครงสร้างภายในของ DQPSK มีการใช้อุปกรณ์ coupler และ power splitter ส่วนโครงสร้างภายในของ 2^n-QAM ที่ภาครับเป็นแบบ coherent detection มีการใช้อุปกรณ์ coupler อยู่ด้วยจึงทำให้เกิดการลดทอนกำลังของสัญญาณมากขึ้น ทำให้ระยะทางที่ส่งสัญญาณจึงมีค่าลดลง การมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM นั้นมีความ

ผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจาก noise ที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณอีกด้วยทำให้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบมีค่าน้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่นๆ

ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มีค่าเท่ากับ 3.76, 5.81, 5.18, 12.61, 10.55 และ 2.80 กิโลเมตร ตามลำดับนั้น การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM นั้นจำกัดด้วยผลของ dispersion นอกจากนี้การมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM และ 16-QAM นั้นมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากผลของ attenuation และอันเนื่องมาจากเฟสของสัญญาณอีกด้วย

จะเห็นว่าเมื่ออัตราข้อมูลสูงขึ้นผลของ dispersion เป็นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ CWDM-PON จะเห็นว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK และ 4-QAM ซึ่งมีองค์ประกอบ in-phase และ quadrature นั้นทนต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่นทำให้ได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบไกลขึ้น แต่การมอดูเลตสัญญาณแบบ 16-QAM นั้นมีผลจาก noise ที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณทำให้บิตข้างเคียงใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบจึงมีค่าน้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่นๆ

ตารางที่ 6.1 สมรรถนะของระบบ CWDM-PON โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

Modulation	DATA RATES			
	10 Gbps		40 Gbps	
	Reaches limit [km]	Wavelength [nm]	Reaches limit [km]	Wavelength [nm]
RZ-OOK	53.97	1,571	3.76	1,571
NRZ-OOK	68.19	1,271	5.81	1,571
DPSK	69.49	1,271	5.18	1,571
DQPSK	57.35	1,271	12.61	1,571
4-QAM	60.34	1,271	10.55	1,271
16-QAM	16.19	1,271	2.80	1,271

จากการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจาก dispersion ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps โดยการติดตั้ง DCU พบว่าสามารถส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นโดยระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบ RZ-

OOK, NRZ-OOK, DPSK และ DQPSK มีค่าเท่ากับ 5.84, 9.12, 8.12 และ 19.88 กิโลเมตร ตามลำดับ

6.2 แนวทางการออกแบบระบบ CWDM-PON

อัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงสะสมทั้งหมดระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแสงที่ยอมรับได้หรือเรียกว่า link power budget ในการออกแบบระบบการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดจะต้องมีค่าไม่เกิน link power budget โดยสามารถคำนวณ link power budget ได้จากสมการที่ (30)

$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum l_c + \sum l_s + \sum l_{other} + G_{margin} \tag{30}$$

โดย P_T คือ ค่า link power budget ทั้งหมด [dB]

P_{Tx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่งสัญญาณแสง [dBm]

P_{Rx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสง [dBm]

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของเส้นใยแสง [dB/km]

L คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่สามารถให้บริการได้ [km]

l_c คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากหัวต่อ (connector) [dB]

l_s คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากการสไปลซ์ (splice) [dB]

l_{other} คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกรณีอื่นๆที่พิจารณาร่วมด้วย [dB]

G_{margin} คือ ค่า system margin ที่เผื่อไว้สำหรับระบบ [dB]

จากการคำนวณ power budget โดยมีค่ากำลังสูญเสียจากปัจจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 6.2 ระบบ RZ-OOK และ NRZ-OOK คำนวณจาก $\sum l_c = 1$ dB, $\sum l_s =$ 0.4 dB, $\sum l_{AWG} =$ 8 dB, $G_{margin} =$ 3 dB จะมีค่าเท่ากับ 12.4 dB แต่ในระบบ DPSK และ 2^n-QAM มีค่ากำลังสูญเสียเพิ่มคือ $\sum l_{other} = 3$ dB จะมีค่าเท่ากับ 15.4 dB และในระบบ DQPSK มีค่ากำลังสูญเสียเพิ่มคือ $\sum l_{other} =$ 6 dB จะมีค่าเท่ากับ 18.4 dB ดังนั้น การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK และ 2^n-QAM มีค่ากำลังสูญเสียรวมทั้งหมดเท่ากับ 12.4, 12.4, 15.4, 18.4 และ 15.4 dB ตามลำดับ โดยยังไม่คิดผลคูณของ attenuation coefficient ของเส้นใยแสงกับระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบ

ตารางที่ 6.2 ค่ากำลังสูญเสียจากปัจจัยต่างๆ ในการส่งสัญญาณผ่าน SMF ของระบบ CWDM-PON

Item	Total loss	Units
Connector loss	1	dB
Spice loss	0.4	dB
AWG insertion loss	8	dB
System margin	3	dB
Attenuation coefficient (1,271nm)	0.385	dB/km
DPSK loss	3	dB
DQPSK loss	6	dB
QAM loss	3	dB

จากสมการที่ (30) เมื่อแทนค่ากำลังสูญเสียของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ และ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น 1,271 นาโนเมตรกับระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบ จะได้

$$P_{T,OOK} = (0.385)L + 12.4 \tag{31}$$

$$P_{T,DPSK} = (0.385)L + 15.4 \tag{32}$$

$$P_{T,DQPSK} = (0.385)L + 18.4 \tag{33}$$

$$P_{T,n-QAM} = (0.385)L + 15.4 \tag{34}$$

การคำนวณ power budget ของระบบการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps และ 40 Gbps แสดงดังตารางที่ 6.3 และ ตารางที่ 6.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3 ระยะทางจำกัดสมรรถนะและ power budget ของระบบการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps

Modulation	Reaches limit [km]	Power budget [dB]
RZ-OOK	53.97	33.18
NRZ-OOK	68.19	38.65
DPSK	69.49	42.15
DQPSK	57.35	40.48
4-QAM	60.34	38.63
16-QAM	16.19	21.63

จากตารางที่ 6.3 ในการคำนวณ power budget เพื่อใช้ในการออกแบบระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 53.97 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (31) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 33.18 dB

การออกแบบระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 68.19 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (31) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 38.65 dB

การออกแบบระบบ DPSK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 69.49 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (32) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 42.15 dB

การออกแบบระบบ DQPSK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 57.35 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (33) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 40.48 dB

การออกแบบระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 60.34 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (34) จะได้ค่ากำลังของสัญญาณของระบบที่สูญเสียทั้งหมดก่อนเข้า coherent detection มีค่าเท่ากับ 38.63 dB

การออกแบบระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 16.19 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของ

ระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (34) จะได้ค่ากำลังของสัญญาณของระบบที่สูญเสียทั้งหมดก่อนเข้า coherent detection มีค่าเท่ากับ 21.63 dB

ตารางที่ 6.4 ระยะทางจำกัดสมรรถนะและ power budget ของระบบการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps

Modulation	Reaches limit [km]	Power budget [dB]
RZ-OOK	3.76	13.84
NRZ-OOK	5.81	14.64
DPSK	5.18	17.39
DQPSK	12.61	23.25
4-QAM	10.55	19.46
16-QAM	2.80	16.48

จากตารางที่ 6.4 ในการคำนวณ power budget เพื่อใช้ในการออกแบบระบบ RZ-OOK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 3.76 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (31) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 13.84 dB และเมื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นโดยการติดตั้ง DCU จะได้ระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 5.84 กิโลเมตร ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 14.65 dB

การออกแบบระบบ NRZ-OOK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 5.81 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (31) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 14.64 dB และเมื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นโดยการติดตั้ง DCU จะได้ระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 9.12 กิโลเมตร ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 15.91 dB

การออกแบบระบบ DPSK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 5.18 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (32) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 17.39 dB และเมื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นโดยการติดตั้ง DCU จะได้ระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 8.12 กิโลเมตร ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 18.53 dB

การออกแบบระบบ DQPSK บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 12.54 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (33) จะได้ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 23.25 dB และเมื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นโดยการติดตั้ง DCU จะได้ระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 19.88 กิโลเมตร ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 26.05 dB

การออกแบบระบบ coherent 4-QAM บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 10.55 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (34) จะได้ค่ากำลังของสัญญาณของระบบที่สูญเสียทั้งหมดก่อนเข้า coherent detection มีค่าเท่ากับ 19.46 dB

การออกแบบระบบ coherent 16-QAM บน CWDM-PON จากระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสมรรถนะของระบบเท่ากับ 2.80 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้โดยนำระยะทางที่จำกัดสถานะของระบบแทนค่ากลับในสมการที่ (34) จะได้ค่ากำลังของสัญญาณของระบบที่สูญเสียทั้งหมดก่อนเข้า coherent detection มีค่าเท่ากับ 16.48 dB

จากการออกแบบโดยการคำนวณ power budget นั้นจะเห็นได้ว่า ค่ากำลังสัญญาณเป็นค่าสำคัญในการที่จะให้ระบบรองรับผู้ใช้บริการได้มากหรือน้อยและสามารถทราบระยะทางไกลที่สุดที่จำกัดสถานะของระบบ CWDM-PON

6.3 การให้บริการของระบบ CWDM-PON

การส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ในระดับ access network สามารถให้บริการที่ระยะ 20 กิโลเมตร ขึ้นไป เมื่อพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK พบว่า สามารถให้บริการได้ที่ความยาวคลื่นในช่วง 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,351 นาโนเมตร ทั้งหมด 5 ช่องสัญญาณ สามารถรองรับอัตราข้อมูลได้ถึง 200 Gbps (5 × 40 Gbps)

การมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK สามารถให้บริการได้ที่ความยาวคลื่นในช่วง 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,391 นาโนเมตร ทั้งหมด 7 ช่องสัญญาณ สามารถรองรับอัตราข้อมูลได้ถึง 280 Gbps (7 × 40 Gbps)

การมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK สามารถให้บริการได้ที่ความยาวคลื่นในช่วง 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,371 นาโนเมตร ทั้งหมด 6 ช่องสัญญาณ สามารถรองรับอัตราข้อมูลได้ถึง 240 Gbps (6 × 40 Gbps)

การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK สามารถให้บริการได้ที่ความยาวคลื่นในช่วง 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,471 นาโนเมตร ทั้งหมด 11 ช่องสัญญาณ สามารถรองรับอัตราข้อมูลได้ถึง 440 Gbps (11 × 40 Gbps)

จากการพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณทั้งหมด จะเห็นว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK สามารถรองรับอัตราข้อมูลได้มากที่สุด แต่การมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM และ 16-QAM พบว่าไม่สามารถให้บริการได้ในระยะการให้บริการ 20 กิโลเมตร ขึ้นไป เนื่องจากภาครับของระบบเป็นแบบ coherent detection ซึ่งมีความซับซ้อนของวงจรเป็นอย่างมาก จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในระดับ access network

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 7
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันเทคโนโลยี FTTx-PON มาใช้ในระดับ access network เพื่อให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้บริการที่เพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถลดปัญหาคอขวดของ core network ได้อีกด้วย ในระดับ core network มีอัตราข้อมูลถึงระดับ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ เทคโนโลยี PON ในอนาคตควรที่จะได้รับการพัฒนาให้สามารถรองรับอัตราข้อมูลระดับ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเช่นกัน

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะของการสื่อสัญญาณอัตราข้อมูล 40 Gbps บนพื้นฐานจากการส่งสัญญาณอัตราข้อมูล 10 Gbps บนโครงข่ายเข้าถึงแบบ CWDM-PON เพื่อตอบสนองความต้องการข้อมูลที่สูงขึ้นของผู้ใช้บริการแต่ละรายในระดับ access network โดยมีช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาสามารถรองรับอัตราข้อมูล 160 Gbps (16 × 10 Gbps) และ 640 Gbps (16 × 40 Gbps) โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK และ 2^n-QAM และวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีต่อการสื่อสัญญาณอัตราข้อมูล 10 Gbps และ 40 Gbps ตามลำดับ โดยการ simulation ด้วยโปรแกรม Optisys เพื่อนำเสนอแนวทางการออกแบบการส่งสัญญาณของระบบ CWDM-PON ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

จากการศึกษาการสื่อสัญญาณข้อมูลของระบบ CWDM-PON ผ่านเส้นใยแสง พบว่าปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณคือ ผลของ attenuation และผลของ dispersion ในเส้นใยแสง ส่วน PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ไม่มีผลต่อระบบในช่วงที่พิจารณา จากการจำลองระบบจะได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM ที่อัตราข้อมูล 10 Gbps มีค่าเท่ากับ 53.97, 68.19, 69.49, 57.35, 60.34 และ 16.19 กิโลเมตร ตามลำดับ และในการออกแบบระบบ CWDM ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 33.18, 38.65, 42.15, 40.48, 38.63 และ 21.63 dB ตามลำดับ

การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK กับ NRZ-OOK จะพบว่าสัญญาณแบบ NRZ จะสามารถทนต่อผลของ dispersion ได้ดีกว่าสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากความกว้าง pulse ในการส่งสัญญาณแบบ RZ กว้างกว่าแบบ NRZ 2 เท่า แต่สัญญาณแบบ RZ ทนต่อการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าแบบ NRZ เพราะสัญญาณแบบ NRZ ส่งกำลังของสัญญาณตลอดช่วงคาบบิต ซึ่งสัญญาณแบบ RZ ส่งกำลังของสัญญาณเพียงครึ่งคาบบิต การมอดูเลตสัญญาณแบบ DSPK และ DQPSK ที่ภาครับเป็นแบบ balanced detection ซึ่งสามารถรับกำลังของสัญญาณได้ดีกว่าแบบ OOK อยู่ 3

dB และการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK และ 2^n-QAM นั้นมีการแบ่งองค์ประกอบเป็น 2 ส่วน คือ in-phase และ quadrature อัตราข้อมูลลดลงครึ่งหนึ่ง จึงทนต่อการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าแบบอื่นๆ แต่เนื่องจากการออกแบบระบบโครงสร้างภายในของ DQPSK มีการใช้อุปกรณ์ coupler และ power splitter ส่วนโครงสร้างภายในของ 2^n-QAM ที่ภาครับเป็นแบบ coherent detection มีการใช้อุปกรณ์ coupler อยู่ด้วยจึงทำให้เกิดการลดทอนกำลังของสัญญาณมากขึ้น ทำให้ระยะทางที่ส่งสัญญาณจึงมีค่าลดลง การมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM นั้นมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจาก noise ที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณอีกด้วยทำให้ระยะทางจำกัดสมรรถนะของระบบมีค่าน้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่นๆ

จากการจำลองระบบจะได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, 4-QAM และ 16-QAM ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps มีค่าเท่ากับ 3.76, 5.81, 5.18, 12.61, 10.55 และ 2.80 กิโลเมตร ตามลำดับ และในการออกแบบระบบ CWDM ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 13.84, 14.64, 17.39, 23.25, 19.46 และ 16.48 dB ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่ออัตราข้อมูลสูงขึ้นผลของ dispersion เป็นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ CWDM-PON จะเห็นว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK และ 4-QAM ซึ่งมีองค์ประกอบ in-phase และ quadrature นั้นทนต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่น ทำให้ได้ระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบไกลขึ้น แต่การมอดูเลตสัญญาณแบบ 16-QAM นั้นมีผลจาก noise ที่กระทำต่อแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณทำให้บิตข้างเคียงใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบจึงมีค่าน้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่นๆ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอแนวทางการออกแบบการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บน CWDM-PON ให้มีสมรรถนะสูงสุด โดยการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยการติดตั้ง DCU เพื่อชดเชยผลของ dispersion ทำให้ค่า dispersion เฉลี่ยมีค่าเป็น 0 สมรรถนะของระบบ CWDM-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps พบว่าสามารถส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นโดยระยะทางที่จำกัดสมรรถนะของระบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK และ DQPSK มีค่าเท่ากับ 5.84, 9.12, 8.12 และ 19.88 กิโลเมตร ตามลำดับ โดยเลือกความยาวคลื่น 1,431 นาโนเมตรเป็นความยาวคลื่นกลางที่ชดเชยค่า dispersion หมด ค่า power budget มีค่าเท่ากับ 14.65, 15.91, 18.53 และ 26.05 dB ตามลำดับ และสามารถให้บริการที่ระยะ 20 กิโลเมตร ขึ้นไป ของระบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK และ DQPSK รองรับข้อมูลได้ถึง 200 Gbps (5 × 40 Gbps), 280 Gbps (7 × 40 Gbps), 240 Gbps (6 × 40 Gbps) และ 440 Gbps (11 × 40 Gbps)

จากการพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณทั้งหมด จะเห็นว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK สามารถรองรับอัตราข้อมูลได้มากที่สุด แต่การมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM และ 16-QAM พบว่าไม่สามารถให้บริการได้ในระยะการให้บริการ 20 กิโลเมตร ขึ้นไป เนื่องจากภาครับของระบบเป็นแบบ

coherent detection ซึ่งมีความซับซ้อนของวงจรเป็นอย่างมาก จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในระดับ access network

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในระบบมัลติเพล็กซ์เชิงเวลาและเชิงความยาวคลื่น (time and wavelength division multiplexed passive optical network : TWDM-PON) [9] และพัฒนาวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM แบบ coherent detection โดยการใช้ DSP ในการแก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. พสุ แก้วปลั่ง, สู่เทคโนโลยีการสื่อสารความเร็วสูง *Fiber-to-the-x (FTTx)*. 2554: เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์.
2. Vetter, P., *Next generation optical access technologies.* 38th European Conference on Optical Communications (ECOC), 2012: p. 1-42.
3. ITU-T Recommendation G.989.1, 40-*Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. 2013.
4. InfoVistaCorperation. *Broadband Access Network*. Available from: http://www.infovista.com/solutions/broadband-and-triple-play.
5. IEEE Standard 802.3av, *Physical Layer Specifications and Management Parameters for* 10 *Gb/s Passive Optical Networks*. 2009.
6. ITU-T Recommendation G.987, 10-*Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms*. 2012.
7. ITU-T Recommendation G.694.2, *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. 2003.
8. Urban, P.J., et al., *High-Bit-Rate Dynamically Reconfigurable WDM-TDM Access Network.* Journal of Optical Communications and Networking, 2009. 1(2): p. A143-A159.
9. Yuanqiu, L., et al., *Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage* 2 (*NG-PON*2). Journal of Lightwave Technology, 2013. 31(4): p. 587-593.
10. Khairi, K., et al., *CWDM PON system: Next generation PON for access network.* IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), 2009: p. 765-768.
11. Jongdeog, K., B. Hakjeon, and P. Chang-Soo, *Design and Performance Analysis of Passively Extended XG-PON With CWDM Upstream.* Journal of Lightwave Technology, 2012. 30(11): p. 1677-1684.
12. OFSOPTICS. *Optical Fiber Resources*. Available from: http://stage.ofsoptics.com/knowledge_base/fiber101.php.

13. ITU-T Recommendation G.652.D, *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. 2009.
14. International Telecommunication Union., *Optical fibre cables and systems*. 2009, Geneva, Switzerland.
15. Finnie, G. *FTTH in Europe :Forecast& Prognosis,* 2006-2011. 2005; Available from: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/2005/Market_Forecast_January_2005.pdf.
16. Keiser, G., *Optical fiber communications*. 3rd ed. 2000: McGraw Hill Higher Education.
17. A. Selvarajan, S.K., T. Srinivas, *Optical fiber communication*. 2002: McGraw-Hill Education.
18. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. 1 ed. 2546, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. Vlajic, N. *Analog Transmission of Digital Data: ASK, FSK, PSK, QAM* 2010; Available from: http://www.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/F/3213/CSE3213_07_ShiftKeying_F2010.pdf.
20. Winzer, P.J. and R.J. Essiambre, *Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks.* Journal of Lightwave Technology, 2006. 24(12): p. 4711-4728.
21. Proakis, J., *Digital Communications*. 1995, Singapore: McGraw Hill Higher Education.
22. Couch, L.W., *Digital and Analog Communication Systems*. 2012, NJ: Prentice Hall.
23. Haykin, S., *Digital Communications*. 1988, Toronto, Canada: John Wiley & Sons.
24. SHF Communication Technologies AG. *Application note DQPSK BER solution*. Available from: http://www.shf.de/communication/support/application_notes/getfile/230/269/.
25. Ezra Ip, A.P.T.L., Daniel J. F. Barros, Joseph M. Kahn, *Coherent detection in optical fiber systems.* Optical Society of America, 2008. 16(2): p. 753-791.

26. Kikuchi, K., *High Spectral Density Optical Communication Technologies*. 2010.

27. อธิคม ฤกษบุตร, *FTTH – Fiber – To – The - Home.* วารสารสื่อสารของคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, 2549.

28. Vassilopoulos, C., *The New Generation Access Network.* Optical access networks and advance photonics, 2010: p. 258-293.

29. Rujian, L., *Next Generation PON in Emerging Networks.* National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), 2008: p. 1-3.

30. ITU-T Recommendation G.983.1, *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON).* 2005.

31. ITU-T Recommendation G.984.1, *Gigabit-capable passive optical networks (GPON) : General characteristics*. 2008.

32. IEEE Standard 802.3ah, *Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks*. 2004.

33. ITU-T Recommendation G.671, *Transmission characteristics of optical components and subsystems*. 2012.

34. Power Budget Calculations for GarrettCom Inc. *Fiber Transceivers*. 2010; Available from: www.garrettcom.com/techsupport/power_budget.pdf.

35. Kuschnerov, M., et al., *DSP for Coherent Single-Carrier Receivers.* Journal of Lightwave Technology, 2009. 27(16): p. 3614-3622.

36. Taylor, M.G., *Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments.* IEEE Photonics Technology Letters, 2004. 16(2): p. 674-676.

37. ITU-T Recommendation G.957, *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital*. 2006.

38. Xtera Communications Inc. *Introduction To Optical Transmission Systems*. 2013; Available from: http://www.xtera.com/en-US/Media/Resources/ConferencePresentations/2013_09_19-Introduction-To-Optical-Transmission-Sy.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

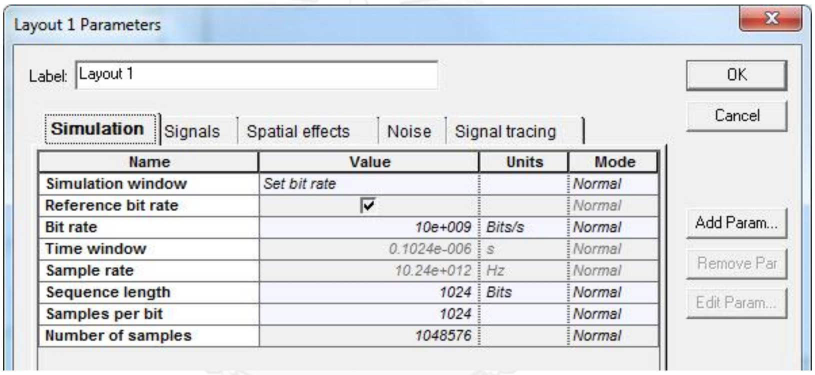
ภาคผนวก ก

โครงสร้างของระบบ CWDM-PON ที่ใช้ใน simulation

ในส่วนนี้จะแสดงโครงสร้างของระบบ CWDM-PON ที่ใช้ในการ simulation ด้วยโปรแกรม Optisys 8.0 และค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ

- Global parameter

การตั้งค่า global parameter ดังนี้ อัตราบิตของระบบ (bit rate) เท่ากับ 10 Gbps หรือ 40 Gbps จำนวนบิตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (sequence length) เท่ากับ 1024 บิต และอัตราการสุ่มในช่วงเวลา 1 คาบบิต (sample per bit) เท่ากับ 1024 แสดงดังรูปที่ ก.1

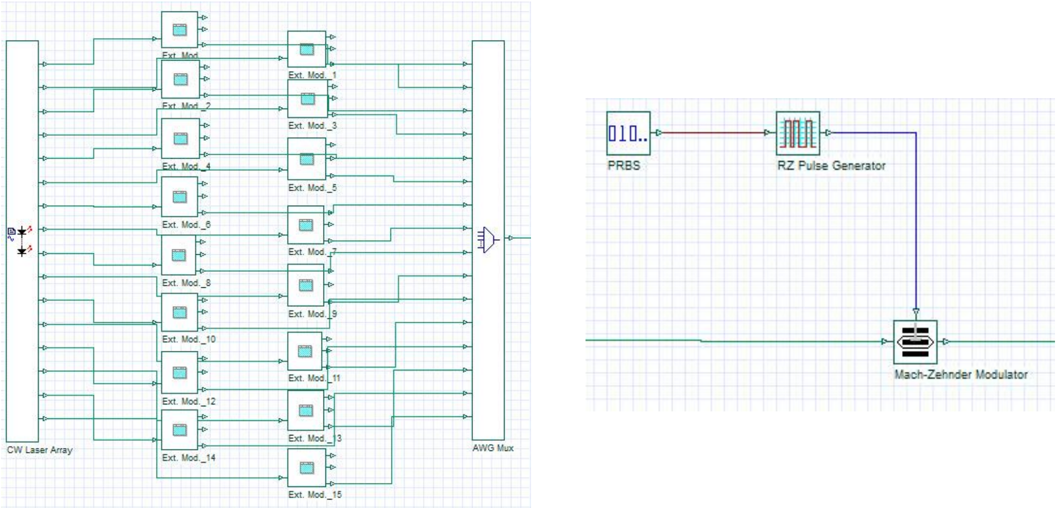


รูปที่ ก.1 ค่า global parameter ที่กำหนดในระบบ CWDM-PON

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- OLT

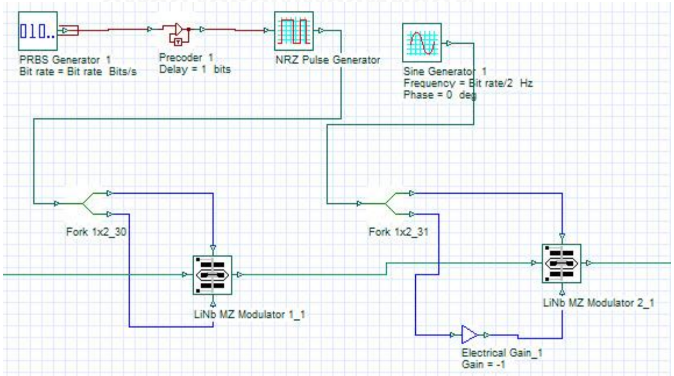
โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK บน CWDM-PON ประกอบด้วย CW laser array ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแสงโดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm โดยมี linewidth เท่ากับ 0.1 MHz และ initial phase เท่ากับ 0 องศา ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,271 นาโนเมตร ถึง 1,571 นาโมเมตร ทั้งหมด 16 ความยาวคลื่น และภายใน external modulation ประกอบด้วย PRBS generator มีอัตราบิตเท่ากับบิตของระบบ สัญญาณแสงจะถูกมอดูเลตเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ RZ หรือ NRZ ที่ MZM แล้วมัลติเพล็กซ์สัญญาณความยาวคลื่น 16 ความยาวคลื่นที่ AWG และส่งไปยัง SMF แสดงดังรูปที่ ก.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) (ข)

รูปที่ ก.2 โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK บน CWDM-PON (ก) ภาคส่ง (ข) โครงสร้างของ external modulation

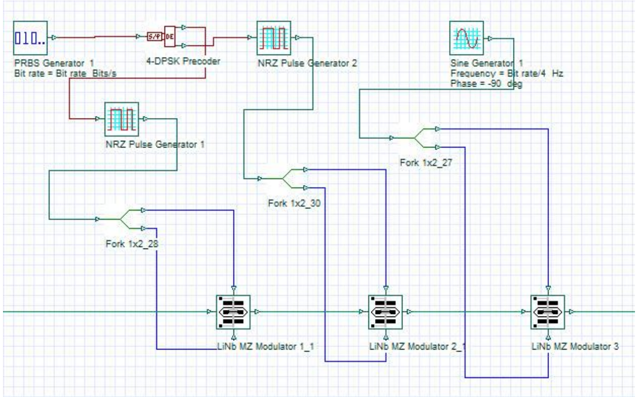
โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK บน CWDM-PON ประกอบด้วย PRBS generator มีอัตราบิตเท่ากับบิตของระบบ สัญญาณแสงจะถูกมอดูเลตเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ ที่ MZM แล้วมัลติเพล็กซ์สัญญาณความยาวคลื่น 16 ความยาวคลื่นที่ AWG และส่งไปยัง SMF โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK บน CWDM-PON

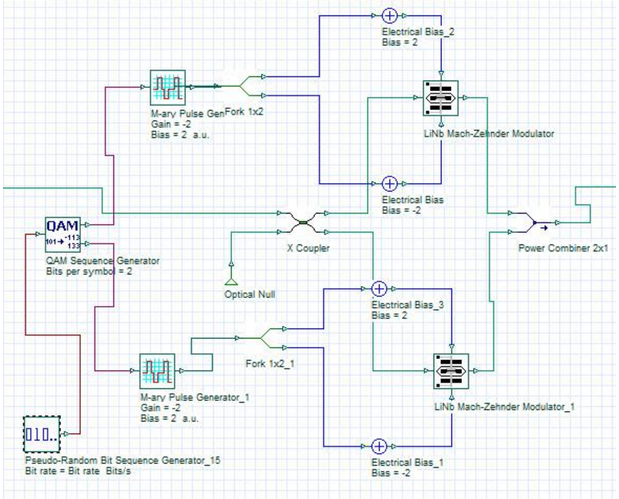
โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK บน CWDM-PON ประกอบด้วย PRBS generator ส่งข้อมูลบิตไปยัง 4-DPSK precoder จะได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบคือ I และ Q เพราะมีการทำ 4-DPSK precoder จากนั้นสัญญาณจะถูกมอดูเลตอีกครั้งที่ MZM เพื่อ

ได้สัญญาณ I โดยมอดูเลตอีกครั้งที่ MZM เพื่อได้สัญญาณ Q และมอดูเลตที่ MZM ด้วย sine generator เพื่อทำการ pulse carver จะได้สัญญาณแบบ RZ ที่มีข้อมูลส่งผ่านไปยัง SMF โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK บน CWDM-PON

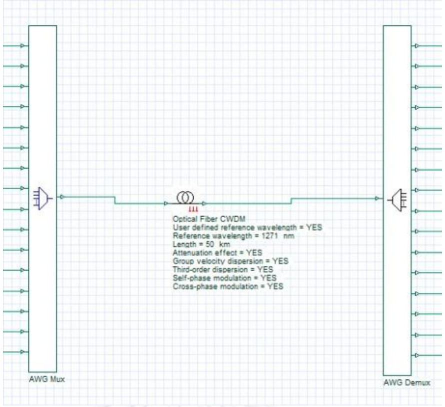
โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM บน CWDM-PON ประกอบด้วย PRBS generator สัญญาณไฟฟ้าจาก QAM sequence generator แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ไปยัง M-ary pulse generator เพื่อทำให้พัลส์ของสัญญาณมีหลายระดับ (multilevel pulse) จะถูกมอดูเลตกับสัญญาณแสงจาก CW laser ที่ MZM ซึ่งมีการ bias สัญญาณ จะได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบ I และ Q ที่มีข้อมูลส่งผ่านไปยัง SMF โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 โครงสร้างภายในของ OLT โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ 2^n-QAM บน CWDM-PON

- SMF

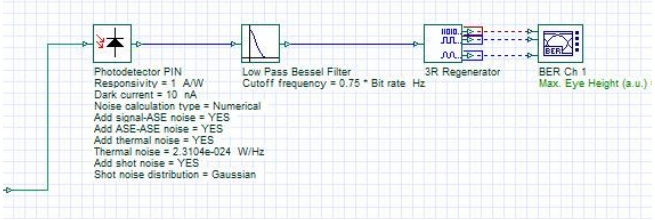
ในการจำลองระบบใช้เส้นใยแสงชนิด ITU-T G652.D โดยปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ตามมาตรฐาน เช่น ความยาว ค่า attenuation coefficient และค่า chromatic dispersion เป็นต้น โดย SMF ติดตั้งอยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ แสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 เส้นใยแสง

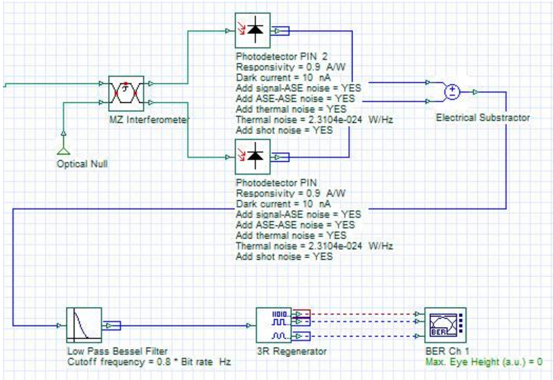
- ONU

โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK บน CWDM-PON สัญญาณแสงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ photodetector ชนิด PIN และผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ low pass Bessel filter สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER ที่ eye diagram analyzer โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.7



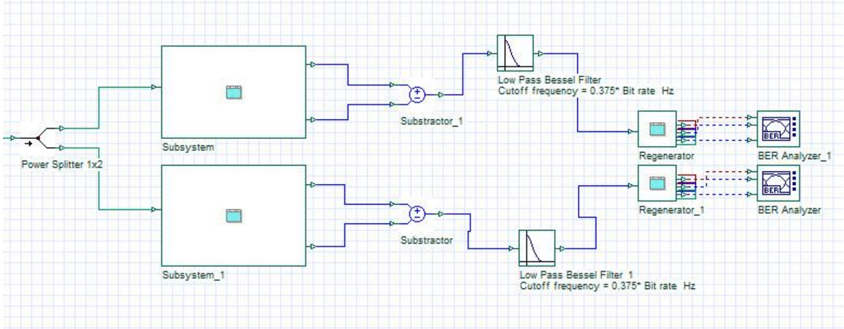
รูปที่ ก.7 โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK บน CWDM-PON

โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK บน CWDM-PON ประกอบด้วย สัญญาณแสงผ่าน Interferometer สัญญาณที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยที่อีกขาหนึ่ง delay ไป 1 บิต ต่อจากนั้นสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ substractor แล้วผ่านไปยัง LPF สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER ที่ eye diagram analyzer โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.8

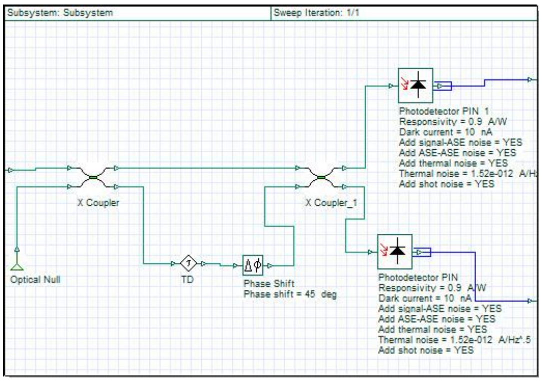


รูปที่ ก.8 โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK บน CWDM-PON

โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK บน CWDM-PON ที่ภาครับ subsystem-1 และ subsystem-2 จะได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบ I และ Q ตามลำดับ ภายใน subsystem ประกอบด้วย coupler 3 dB สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนเพื่อเปรียบเทียบความต่างเฟส โดยสัญญาณส่วนแรกจะถูกทำให้ delay ไป 1 บิต และเลื่อนเฟสของสัญญาณไป 45 องศา และ -45 องศา ต่อจากนั้นสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ substractor แล้วผ่านไปยัง LPF สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER ที่ eye diagram analyzer โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.9



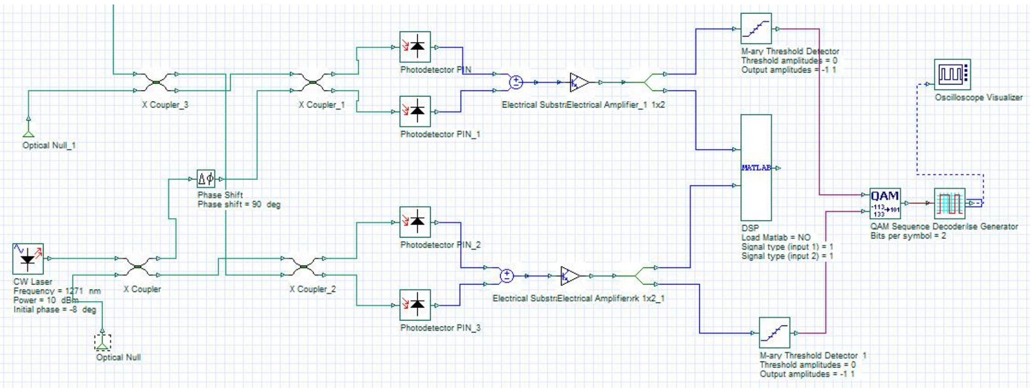
(ก) ภาครับ



(ข) Subsystem

รูปที่ ก.9 โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK บน CWDM-PON

โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON สัญญาณแสงจะผ่านไปยัง coupler 3 dB สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน สัญญาณจะถูกคูณกับสัญญาณแสงจาก LO โดยสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ substractor แล้วผ่านไปยัง LPF และ M-ary threshold detector ทำหน้าที่ถอดรหัสพัลส์ของสัญญาณหลายระดับ สัญญาณจะถูกส่งไปยัง QAM sequence decoder เพื่อถอดรหัสสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำไปตรวจวัดค่า BER โดยใช้ MATLAB ในการคำนวณหาค่า BER ที่ electrical constellation visualizer โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.10 โครงสร้างภายในของ ONU โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 2^n-QAM บน CWDM-PON

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมพ์ชนก มณฑา เกิดที่จังหวัดนครสวรรค์ เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการจำนวน 1 ฉบับ

บทความวิชาการในงานประชุม The 16th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT2014) จัดขึ้น ณ Phoenix Park เมือง PyeongChang จังหวัด Gangwon ประเทศเกาหลีใต้ ในวันที่ 16-19 กุมภาพันธ์ 2557 ในชื่อบทความเรื่อง The Performance Limitation of 10-Gbps-per-Channel-based Coarse Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University