

การศึกษาความเป็นไปได้ของการส่งผ่านสัญญาณ 40 กิกะบิตต่อวินาทีบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบโอไอเค ดีพีเอสเค ดีควีพีเอสเค และเอ็นควีเอ็ม

นางสาววราภรณ์ เกตุอุไร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

FEASIBILITY STUDY OF 40-GBPS SIGNAL TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL
NETWORK USING OOK, DPSK, DQPSK AND n-QAM MODULATION SCHEMES

Miss Varaporn Ket-urai

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ของการส่งผ่านสัญญาณ 40 กิกะบิตต่อวินาทีบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบโอไอเค ดีพีเอสเค ดีควีพีเอสเค และเอ็นควีเอ็ม
โดย	นางสาววราภรณ์ เกตุอุไร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

วราภรณ์ เกตุอุไร : การศึกษาความเป็นไปได้ของการส่งผ่านสัญญาณ 40 กิกะบิตต่อวินาที บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบโอไอเค ดีพีเอสเค ดีคิวพีเอสเค และเอ็นคิวเอเอ็ม. (FEASIBILITY STUDY OF 40-GBPS SIGNAL TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK USING OOK, DPSK, DQPSK AND n-QAM MODULATION SCHEMES) อ. ที่ปริกษานิตยสาร : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 133 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดของความผิดเพี้ยนของสัญญาณในการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง เนื่องจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง นอกจากนี้การวิเคราะห์ที่นำเสนอประกอบด้วย การคำนวณหาค่าระยะทางสูงสุดที่จะให้บริการได้สำหรับโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่ได้รับผลกระทบจากความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากปัจจัยข้างต้น โดยการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงคณิตศาสตร์ ทำโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบการสื่อสารสัญญาณแสงที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ ที่กำหนดพารามิเตอร์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ในเชิงคณิตศาสตร์ เช่น ชนิดของเส้นใยแสง ความยาวคลื่น และระยะทาง โดยที่ค่า bit error rate (BER) ถูกใช้สำหรับประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณขึ้นอยู่กับ ค่าดิสเพอร์ชัน และค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณ โดยมีผลกระทบของดิสเพอร์ชันเป็นผลกระทบหลักต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อเทียบกับผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณ, PMD และ ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสมรรถนะในการส่งผ่านสัญญาณของระบบ PON ที่อัตราข้อมูล 40 กิกะบิตต่อวินาที ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK และ QAM รวมไปถึงการแก้ไขปัญหาดิสเพอร์ชันโดยการติดตั้งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในระบบ (SC-DCU) ทำให้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้เป็นระยะ 20 กิโลเมตรที่อัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่า 10^{-3} (โดยยังไม่ผ่านการแก้ไขความผิดพลาดแบบล่วงหน้า: FEC)

โดยการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปประยุกต์ในการหาความผิดเพี้ยนของการสื่อสารสัญญาณผ่านระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ และนำเสนอแนวทางการออกแบบระบบโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ภาควิชา...วิศวกรรมไฟฟ้า.... ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา...วิศวกรรมไฟฟ้า.... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษานิตยสาร.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5570359721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL FIBER TRANSMISSION / OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING / FIBER DISPERSION / KERR EFFECT

VARAPORN KET-URAI : FEASIBILITY STUDY OF 40-GBPS SIGNAL TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK USING OOK, DPSK, DQPSK AND n-QAM MODULATION SCHEMES. ADVISOR : ASST. PROF PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 133 pp.

This thesis provides the study on the analysis of signal distortion of optical modulation in optical transmission due to attenuation, dispersion, PMD and non-linearity effect. For the dispersion effect. Moreover, the mathematical analysis includes the estimation of the maximum signal transmission length resulted from attenuation, dispersion, PMD and non-linearity effect. To verify the accuracy of the mathematical analysis results, the computer simulations of optical signal transmission are performed under identical parameters used for the mathematical analysis, such as optical fiber types, wavelength, and transmission distance. The bit error rate (BER) is used to evaluate the accuracy of the results obtained from the mathematical calculation when comparing to those obtained from the computer simulations.

According to the analysis results, the amount of signal distortion depends on dispersion and attenuation parameters, and it is obvious that dispersion effect dominantly affects the transmission length, comparing with attenuation, PMD and non-linearity effect.

This thesis demonstrates the feasibility of 40-Gbps signal transmission over PON based on the NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK and QAM modulation formats. And also, provides dispersion compensation method by employed a slope-compensated dispersion compensating unit (SC-DCU) inline. We can extend the reach up to 20 km with the BER smaller than 10^{-3} (without FEC).

The results of the study in this thesis can be applied for the determination of the signal distortion in optical transmission systems, so that to perform a most effective PON system.

Department: ...Electrical Engineering....Student's Signature.....

Field of Study:...Electrical Engineering....Advisor's Signature.....

Academic Year:...2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ให้ความอนุเคราะห์และให้คำแนะนำช่วยเหลือในทุกๆด้านอย่างเต็มที่มาโดยตลอด จนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย

ขอขอบคุณโครงการทุนการศึกษาหลักสูตรต่อเนื่อง ศิษย์ก้นกุฏิ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการส่งเสริมการวิจัยปี พ.ศ. 2555 รวมทั้งคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ OptiSystem 10.0 ที่เป็นส่วนสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนายรชฏ มณีชาติ นิสิตชั้นปริญญาเอกที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณนายธีระ ศักดิ์ชัยชาญชล และนางสาวอรัชพร ชลอคคุณวัฒน์ ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือกันมาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ เพื่อนและน้องที่ทำงานร่วมกันในห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ชั้น 13 ทุกคน รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่	
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
สารบัญตาราง	ญ
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์	13
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	13
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน	14
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	14
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	16
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	17

บทที่	หน้า
2.2	ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง..... 16
2.3	ปัจจัยที่จำกัดการส่งของสัญญาณ..... 17
2.3.1	การลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation loss)..... 18
2.3.2	ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)..... 20
2.3.3	ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD)..... 25
2.3.4	ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity)..... 26
2.4	การมอดูเลตสัญญาณ..... 31
2.4.1	การมอดูเลตความเข้มแสง..... 31
2.4.2	การมอดูเลตเชิงมุม..... 34
2.4.3	การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM..... 40
2.5	Link Power Budget..... 44
2.6	เทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน..... 46
2.7	เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D..... 48
2.8	โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx [54]..... 50
2.9	มาตรฐานของระบบ FTTx-PON [56]..... 52
3	การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของระบบ FTTx PON..... 54
3.1	ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ..... 55
3.2	ผลของดิสเพอร์ชัน ที่มีต่อ BER ของระบบ..... 56
3.3	ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ..... 59
3.4	ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ที่มีต่อ BER ของระบบ..... 60
3.5	ประสิทธิภาพสเปคตรัมของระบบ..... 62

บทที่	หน้า
4 โครงสร้างระบบการส่งสัญญาณและการวิเคราะห์ปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของระบบโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์	64
4.1 โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน PON	64
4.2 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ RZ-OOK...	65
4.2.1 ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ	65
4.2.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ	66
4.2.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ	68
4.2.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	69
4.2.5 ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	70
4.3 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ NRZ-OOK	72
4.3.1 ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ	72
4.3.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ	73
4.3.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ	75
4.3.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	76
4.3.5 ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	77
4.4 โครงสร้างของระบบ RZ-DPSK บน PON	79
4.5 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ RZ-DPSK .	80
4.5.1 ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ	80
4.5.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ	81
4.5.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ	83
4.5.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	84

4.5.5	ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	84
4.6	ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ NRZ-DPSK.....	86
4.6.1	ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ	86
4.6.2	ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ	88
4.6.3	ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ	89
4.6.4	ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	90
4.6.5	ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ	91
4.7	โครงสร้างของระบบ RZ-DQPSK บน PON.....	93
4.8	โครงสร้าง sub-system ของระบบ DQPSK	94
4.9	ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ RZ-DQPSK	95
4.9.1	ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ SER ของระบบ.....	95
4.9.2	ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ	97
4.9.3	ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ	98
4.9.4	ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ.....	99
4.9.5	ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ	100
4.10	ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ NRZ-DQPSK.....	102
4.10.1	ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ SER ของระบบ.....	102
4.10.2	ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ SER ของระบบ.....	104

บทที่	หน้า
4.10.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ SER ของระบบ	105
4.10.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ.....	106
4.10.5 ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เชิงเส้น ของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ	107
4.11 โครงสร้างของระบบ QAM บน PON	109
4.12 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ QAM	110
5 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันและผลการจำลองทางคณิตศาสตร์	112
5.1 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันในระบบ FTTx-PON	112
5.2 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันในระบบ OOK-PON	113
5.3 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันในระบบ DPSK-PON.....	114
5.4 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันในระบบ DQPSK-PON.....	115
6 วิเคราะห์สมรรถนะของระบบรวมและแนวทางการออกแบบระบบ FTTx-PON	116
6.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณต่อการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ	116
6.2 ผลของดิสเพอร์ชันต่อกา รมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ	118
6.3 Power penalty ของการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ.....	120
6.4 แนวทางการออกแบบระบบ FTTx-PON	121
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	125
ข้อเสนอแนะ	127
รายการอ้างอิง	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	132

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 การประมาณการณัปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ต ปี ค.ศ. 2011ถึงปี
 ค.ศ. 2016..... 2

รูปที่ 1.2 โครงข่ายโทรคมนาคมในปัจจุบัน 4

รูปที่ 1.3 อัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการ FTTH/B ในเอเชีย ตั้งแต่มีถุนายน 2009
 ถึงมีถุนายน 2011..... 6

รูปที่ 1.4 XG-PON roadmap 9

รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง 17

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาว
 คลื่น 20

รูปที่ 2.3 การเกิด Inter-symbol interference 21

รูปที่ 2.4 ความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (GVD) เทียบกับค่าความ
 ยาวคลื่น..... 22

รูปที่ 2.5 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD 25

รูปที่ 2.6 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง (ก) ความถี่ (ข)
 สเปกตรัมสัญญาณ 28

รูปที่ 2.7 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง 29

รูปที่ 2.8 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง..... 30

รูปที่ 2.9 ผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลา..... 32

รูปที่ 2.10 สัญญาณแบบ NRZ และ RZ 33

รูปที่ 2.11 spectrum ของสัญญาณ OOK แบบ (ก) NRZ (ข) RZ 33

รูปที่ 2.12 โครงสร้างระบบ RZ-OOK..... 34

รูปที่ 2.13 แสดงผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ในโดเมนเวลา..... 35

รูปที่ 2.14 การถอดรหัสสัญญาณ DPSK 35

รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรมอดูเลตแบบ DPSK..... 36

รูปที่ 2.16 โครงสร้างวงจรมอดูเลตแบบ DPSK..... 36

รูปที่ 2.17 แผนภาพทางเวลาของการมอดูเลตแบบ DQPSK 37

รูปที่ 2.18 constellation diagram ของสัญญาณแบบ QPSK	38
รูปที่ 2.19 แผนผังแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณ DQPSK เมื่อมีสัญญาณ ขาเข้าแบบต่างๆ	38
รูปที่ 2.20 โครงสร้างวงจรภาคส่งแบบ DQPSK	38
รูปที่ 2.21 โครงสร้างวงจรภาครับแบบ DQPSK	39
รูปที่ 2.22 รูป 4-QAM signal Constellation.....	41
รูปที่ 2.23 แบบจำลองวงจรภาคส่งแบบ QAM	42
รูปที่ 2.24 แบบจำลองวงจรภาครับแบบ QAM	43
รูปที่ 2.25 โครงสร้างวงจรภาคส่งแบบ QAM	43
รูปที่ 2.26 โครงสร้างวงจรภาครับแบบ QAM.....	44
รูปที่ 2.27 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน	47
รูปที่ 2.28รูปแบบการส่งสัญญาณระหว่าง central office (CO) ไปยัง Optical Network Unit (ONU) ที่ติดตั้งอยู่ในบ้านผู้ใช้บริการ	51
รูปที่ 3.1 Eye-diagram ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK ของสัญญาณ ความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMD.....	60
รูปที่ 3.2 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่ง ผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อ คิดเฉพาะผลของ non-linear effect	62
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน PON	64
รูปที่ 4.2 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อ คิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK.....	65
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดเบือนของระบบ กับระยะทางที่ส่ง สัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณ ของการมอดูเลต สัญญาณแบบ RZ-OOK	66

- รูปที่ 4.4 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK ... 67
- รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิพลาตของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK 68
- รูปที่ 4.6 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK 69
- รูปที่ 4.7 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK 69
- รูปที่ 4.8 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน, PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK 71
- รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง 71
- รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิพลาตของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK 72
- รูปที่ 4.11 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK 73

- รูปที่ 4.12 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK..... 74
- รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิวดลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK 74
- รูปที่ 4.14 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMD ของการ มอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK..... 75
- รูปที่ 4.15 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK..... 76
- รูปที่ 4.16 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อผลของการลดทอนสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน, PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ NRZ-OOK 77
- รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK..... 78
- รูปที่ 4.18 โครงสร้างของระบบ DPSK-PON 79
- รูปที่ 4.19 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK..... 80
- รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิวดลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 81

รูปที่ 4.21 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 82

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 82

รูปที่ 4.23 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 83

รูปที่ 4.24 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 84

รูปที่ 4.25 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน, PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 85

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK 86

รูปที่ 4.27 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK 87

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK 87

- รูปที่ 4.29 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK..... 88
- รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK..... 89
- รูปที่ 4.31 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK 90
- รูปที่ 4.32 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ NRZ-DPSK 91
- รูปที่ 4.33 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ NRZ-DPSK..... 92
- รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของ attenuation, dispersion, PMD และ non-linear ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK 93
- รูปที่ 4.35 โครงสร้างของระบบ RZ-DQPSK บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ 93
- รูปที่ 4.36 โครงสร้าง sub-system ของระบบ DQPSK..... 94
- รูปที่ 4.37 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK..... 95
- รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK..... 96

- รูปที่ 4.39 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK 97
- รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK 98
- รูปที่ 4.41 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK 99
- รูปที่ 4.42 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK..... 99
- รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่ง สัญญาณไปได้ เมื่อคิดผล การลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK 100
- รูปที่ 4.44 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ RZ-DQPSK..... 101
- รูปที่ 4.45 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK 102
- รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK 103

รูปที่ 4.47 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK 104

รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK..... 105

รูปที่ 4.49 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK 105

รูปที่ 4.50 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK..... 106

รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK 107

รูปที่ 4.52 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK..... 108

รูปที่ 4.53 โครงสร้างของระบบ QAM-PON..... 109

รูปที่ 4.54 (a) ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (b) ลักษณะสเปกตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (c) ลักษณะ constellation diagram ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ AM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง 110

รูปที่ 4.55 (a) ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (b) ลักษณะของสัญญาณทาง เวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการแปลงจากสัญญาณ ทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (c) ลักษณะ constellation diagram ของ การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการส่งผ่านสัญญาณผ่าน เส้นใยแสง	111
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการ ส่งสัญญาณแบบ RZ-OOK.....	113
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการ ส่งสัญญาณแบบ RZ-DPSK และ NRZ-DPSK	114
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการ ส่งสัญญาณแบบ RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK	115
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ให้บริการได้กับ BER ของระบบ เมื่อคิด เฉพาะผลของการลดทอนของสัญญาณที่ split ratio 1:8	116
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ให้บริการได้กับ BER ของระบบ เมื่อคิด เฉพาะผลของ ดิสเพอร์ชันที่ split ratio 1:8	118
รูปที่ 6.3 สเปกตรัมสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK และ RZ-DQPSK.....	119
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการ ส่งสัญญาณประเภทต่างๆ.....	120

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1.1 ความต้องการแบนด์วิดท์สำหรับโครงข่ายเข้าถึงในขนาดต.....	8
ตาราง 1.2 ปริมาณแบนด์วิดท์ต่อผู้ใช้บริการหนึ่งรายสำหรับเทคโนโลยีเข้าถึงประเภท ต่าง ๆ.....	8
ตาราง 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่ มอดูเลตแบบ QAM.....	41
ตาราง 2.2 ค่า link power budget ของ PON.....	45
ตาราง 2.3 มาตรฐาน G.652.D.....	48
ตาราง 2.4 มาตรฐานของPON.....	53
ตาราง 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงชนิด G652.D ที่ใช้ในการจำลองระบบ	55
ตาราง 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแบ่งกำลังต่อค่าการลดทอนกำลัง ของสัญญาณ.....	56
ตาราง 3.3 ระยะเวลาให้บริการสูงสุดของระบบ FTTx-PON ที่ถูกจำกัดด้วยผลของ การลดทอนสัญญาณ.....	56
ตาราง 3.4 ประสิทธิภาพสเปกตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ.....	63
ตาราง 5.1 คุณสมบัติเส้นใยแสงแบบ SMF และDCF.....	113
ตาราง 6.1 ค่ากำลังสูญเสียจากปัจจัยต่างๆ ในการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง	122
ตาราง 6.2 Link power budget ของระบบ FTTx-PON ที่มีการมอดูเลตสัญญาณ แบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-DQPSK, NRZ-DQPSK และ 4-QAM.....	122
ตาราง 6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ PON ที่ระยะทางให้บริการ 20km.....	122

บทที่ 1

บทนำ

ในยุคที่มีการติดต่อสื่อสารระหว่างกันตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารทางเสียง การส่งข้อมูลระหว่างกัน การส่งภาพหรือไฟล์วิดีโอผ่านอินเทอร์เน็ต สิ่งเหล่านี้ทำให้ความต้องการใช้งานแบนด์วิดท์เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก การสื่อสารสัญญาณทางแสงความเร็วสูงถือเป็นความต้องการอย่างยิ่งในการส่งข่าวสารในปัจจุบัน เนื่องจากการสื่อสารสัญญาณด้วยวิธีนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาในส่วนของการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ ดังนั้นการพัฒนาศักยภาพของการสื่อสารสัญญาณจึงได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย ในด้านการวิเคราะห์ระบบที่ได้ทำการพัฒนานั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงสมรรถนะของระบบที่ถูกจำกัดด้วยความผิดเพี้ยนของสัญญาณประเภทต่างๆ จึงจะสามารถพัฒนาระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการหรือเพื่อการออกแบบระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพื่อพัฒนาระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตในยุคโลกาภิวัตน์นี้ถือว่าเป็นแรงกระตุ้นสำคัญที่ทำให้ความต้องการในการสื่อสารข้อมูลขยายตัวสูงขึ้นโดยจากการให้บริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้นในปัจจุบันส่งผลให้ในแต่ละเดือนจะมีจำนวนผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มมากขึ้นและมีปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลทำให้ความต้องการในการสื่อสารข้อมูลปริมาณมากที่มีความเร็วสูงเพิ่มมากขึ้นด้วยตามลำดับโดยจากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นอัตราการเพิ่มของปริมาณการใช้อินเทอร์เน็ตจากบริการบรอดแบนด์ต่างๆ เช่น VoIP, เกมออนไลน์, การแชร์ไฟล์ข้อมูลและ วิดีโอออนไลน์ ส่งผลให้ความต้องการแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 34 ของปริมาณความต้องการแบนด์วิดท์ทั่วโลก ผลักดันให้ผู้ประกอบการพยายามเพิ่มความสามารถในการให้บริการในด้านของความจุและความเร็ว เพื่อให้สามารถ

ตอบสนองความต้องการที่ไม่มีที่สิ้นสุดของผู้ใช้บริการ [1] นอกจากนี้แล้วการศึกษาและพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะของเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมยังจะช่วยในการพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจการศึกษาการพัฒนาสังคมรวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับนานาชาติ



รูปที่ 1.1 การประมาณการณ์ปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ต ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2016 [2]

โดยโครงข่ายโทรคมนาคม (telecommunication networks) ในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักคือ โครงข่ายหลัก (core network) และโครงข่ายเข้าถึง (access network) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยโครงข่ายหลักทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของการสื่อสารข้อมูลระยะไกล ช่วยให้เกิดการติดต่อถึงกันระหว่างโครงข่าย metropolitan area network (MAN) ซึ่งเป็นโครงข่ายการสื่อสารที่รับส่งข้อมูลในระดับเมืองจากนั้นโครงข่ายระดับเมืองจะเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการเข้ากับโครงข่ายสื่อสารผ่านโครงข่ายเข้าถึงในโครงข่ายเข้าถึงจำแนกออกเป็น โครงข่ายแบบมีสาย (fixed line) และโครงข่ายแบบไร้สาย (wireless) โครงข่ายเข้าถึงแบบมีสายจะเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการเข้ากับโครงข่ายโทรคมนาคมผ่านสายสัญญาณ โดยในอดีตใช้การสื่อสารด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าผ่านสายทองแดงชนิดคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) อันได้แก่เทคโนโลยี digital subscriber line (DSL) ที่ใช้สายทองแดงเกลียวคู่จากระบบโทรศัพท์ที่มีอยู่เดิมในการสื่อสารสัญญาณ และได้มีการกำหนดเป็นมาตรฐานออกมาหลายชนิด เช่น asymmetric DSL (ADSL) และ very high bit rate DSL (VDSL) อีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้สายสัญญาณโคแอกเซียล (coaxial cable) ในการสื่อสารสัญญาณได้กำหนดมาตรฐานออกมาเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของ data over cable service interface specification (DOCSIS) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในรูปแบบของเคเบิลทีวี แต่ทว่าการส่งสัญญาณในลักษณะนี้มีแบนด์วิดท์ (bandwidth) ไม่เพียงพอต่อการใช้

งานที่มากขึ้นในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนารูปแบบการสื่อสารจากการสื่อสารทางไฟฟ้าเป็นการสื่อสารทางแสง (optical communication) ผ่านเส้นใยแสง (optical fiber) วิธีนี้โดยมากจะเป็นการเชื่อมต่อผู้ใช้บริการเข้ากับโครงข่ายหลักแบบ point-to-point ผ่านตัวแบ่งกำลังสัญญาณแสงแบบแอคทีฟ (active splitter) หรือ ผ่านตัวแบ่งกำลังสัญญาณแสงแบบพาสซีฟ (passive splitter) โดยสัญญาณจะอยู่ในรูปของแสงทั้งหมด [3] ซึ่งจะสามารถมีแบนด์วิดท์ที่มากกว่า สามารถส่งสัญญาณไปได้ในระยะทางที่ไกลกว่า และมีความสูญเสียกำลังของสัญญาณน้อยกว่า ตัวกลางชนิดอื่น โดยเส้นใยแสงมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวกลางชนิดอื่นดังนี้ [4]-[5]

เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียกำลังสัญญาณน้อยกว่าสายดีเกลือวคูหรือสายทองแดง ซึ่งมีอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณประมาณ 0.2 dB/km ส่งผลให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) และอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) น้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น

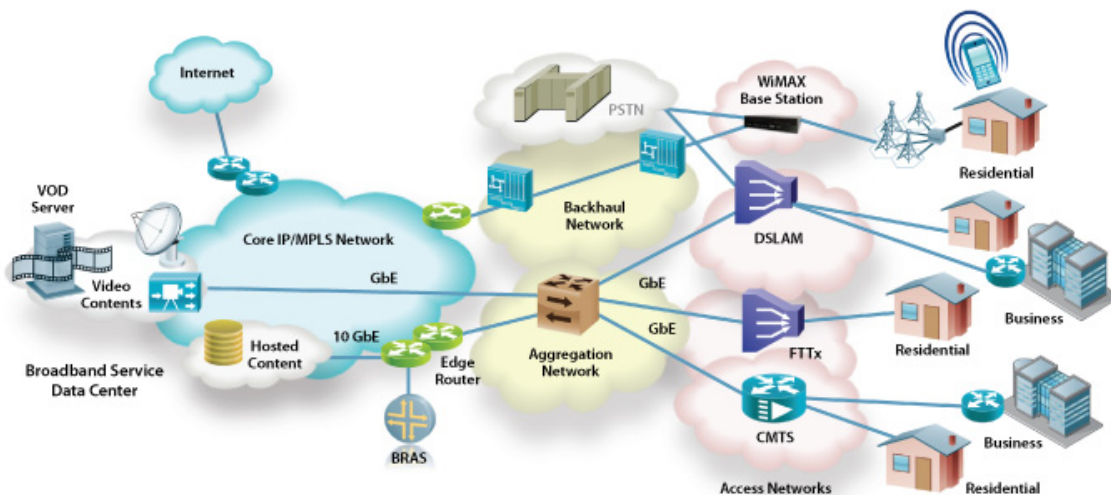
เส้นใยแสงมีขนาดแบนด์วิดท์กว้างเมื่อเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ $10^6 - 10^9$ Hz เพราะความถี่ของคลื่นพาห้แสงจะอยู่ในช่วง $10^{13} - 10^{14}$ Hz

เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกันได้ เป็นการเพิ่มจำนวนช่องทางการสื่อสารในพื้นที่เท่าเดิม

เส้นใยแสงเป็นฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่พบในสายสัญญาณแบบทองแดง อาทิเช่น การเหนี่ยวนำโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการรบกวนระหว่างตัวนำหรือเรียกว่าครอสทอล์คหรือการไม่แมตซ์พอดีทางอิมพีแดนซ์ทำให้มีคลื่นสะท้อนกลับการรบกวนจากปัจจัยภายนอกที่เรียกว่า EMI เป็นต้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถลบล้างสัญญาณได้ทำให้มีความปลอดภัยที่สูง

เส้นใยแสงทนต่อความชื้นและอุณหภูมิ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและต้องการการบำรุงรักษาน้อย

เส้นใยแสงมีความปลอดภัยกว่าระบบสายโลหะในแง่ของอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสายหรือระหว่างสายต่อสาย



รูปที่ 1.2 โครงข่ายโทรคมนาคมในปัจจุบัน [6]

จากข้อดีดังที่ได้กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบเทคโนโลยี broadband แบบต่างๆ แล้วเช่น ADSL, VDSL, cable/modem และ PON เทคโนโลยี PON จะมีข้อดีกว่าในแง่ของอายุการใช้งานของเส้นใยแสงที่ยาวนานต้นทุนในการดำเนินการที่ต่ำเพราะเป็นการลดอุปกรณ์ที่เป็น “active” รวมถึงการได้ระยะทางระหว่างโหนดที่ไกลกว่าและที่สำคัญที่สุดคือมีแบนด์วิดท์ที่สูงมาก [7] และจากการคาดการณ์ของบริษัท ซิสโก้ซิสเต็มส์นั้น ภายในสิ้นปี 2012 วิดีโอออนไลน์จะมีปริมาณกราฟฟิกลงถึงครึ่งหนึ่งของกราฟฟิกลงอินเทอร์เน็ตทั้งหมด และเนื่องจากวิดีโอออนไลน์จะใช้งานแบนด์วิดท์แบบต่อเนื่องเป็นเวลานานนับชั่วโมง เป็นผลให้ในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้บริการสูงสุดจะทำให้มีความต้องการใช้งานแบนด์วิดท์ที่สูงมาก [5] ดังนั้นผู้ประกอบการและภาคอุตสาหกรรมจึงพยายามหาช่องทางใหม่ที่ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและสามารถรองรับต่อความต้องการของผู้ใช้บริการจึงได้มีการนำเทคโนโลยี fiber-to-the-x (FTTx) ที่นำเทคโนโลยี PON มาใช้ใน broadband access network มากขึ้น

การเปลี่ยนเทคโนโลยีไปเป็น FTTx ช่วยให้การเข้าถึงอินเทอร์เน็ตของผู้ใช้งานดีขึ้น ด้วยความเร็วที่เหนือกว่า DSL/cable modem เป็นร้อยเท่าพันเท่าและยังสามารถลดปัญหาคอขวดของโครงข่ายหลักที่มีความจุแทบจะไร้ขีดจำกัดจาก central office ไปยัง “last mile” หรือบ้านของผู้ใช้งานดังที่มีมาในยุคก่อนด้วยการใช้เทคโนโลยี Gigabit ที่ต้นทุนต่ำ และมีความสามารถในการเข้าถึงสูง [8]-[10] โครงข่าย PON ที่นิยมใช้ร่วมกับเทคโนโลยี FTTx มีอยู่หลากหลายชนิดไม่ว่าจะ

เป็น GE-PON (EPON), GPON, 10GE-PON หรือ XG-PON มีการสนับสนุนอัตราข้อมูลทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ที่ความเร็วสูงสุดถึง 10 Gbps ซึ่งมีข้อดีที่สำคัญสรุปได้ดังต่อไปนี้ [11]

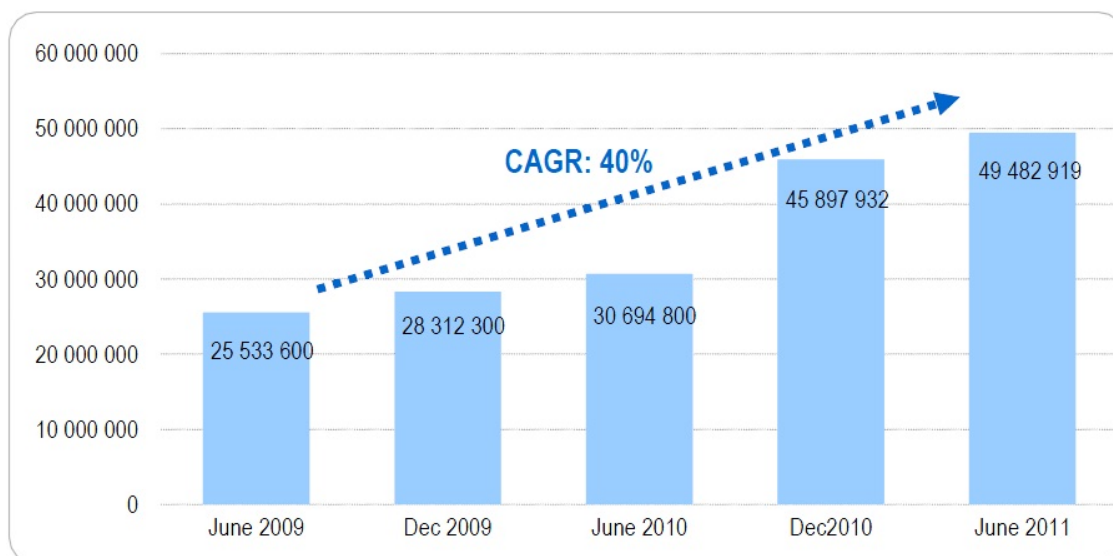
ระบบสามารถรองรับอัตราข้อมูลสูงเนื่องจากเส้นใยแสงสามารถสื่อสารข้อมูลปริมาณมหาศาลได้ จะเห็นได้ว่า ระบบสื่อสารปัจจุบันนิยมส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เพราะให้ข้อมูลที่มีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามการสร้างข้อมูลดิจิทัลจากข้อมูลเดิมที่เป็นแอนะล็อก ทำให้ข้อมูลมีขนาดใหญ่กว่าเดิมมาก หากต้องการส่งให้ถึงปลายทางอย่างรวดเร็วต้องส่งผ่านสายด้วยอัตราเร็ว (bit rate) ที่สูง ซึ่งเส้นใยแสงสามารถรองรับการทำงานนี้ได้

ระบบ FTTx มีความยืดหยุ่นสูง หากมีการปรับปรุงระบบ PON ให้มีสมรรถนะสูงขึ้น หรือมีการนำระบบมัลติเพล็กซ์เชิงแสงที่ใช้แสงเป็นคลื่นพาหามากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น ก็สามารถเพิ่มความเร็วยุทธศาสตร์ของ FTTx ได้

ระบบ FTTx มีความน่าเชื่อถือของระบบสูง เกิดจากระบบสายส่งที่เป็นเส้นใยแสง ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิต คือ SiO₂ ทำให้ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ไม่เป็นสนิม ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนาน อีกทั้งยังเป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้ไม่มีปัญหาของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สัญญาณจึงมีความเชื่อถือได้สูง

ระบบ FTTx ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณไปยังบ้านผู้ใช้บริการผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า optical network unit (ONU) ซึ่งจะติดตั้งอยู่ในบ้านผู้ใช้บริการ ที่หน้าที่กระจายสัญญาณไปยังเครื่องใช้ในบ้าน เช่น คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ และ โทรศัพท์ เป็นต้น เนื่องจากสายส่งเป็นเส้นใยแสง ทำให้ไม่มีส่วนของตัวนำเชื่อมต่อเหมือนระบบโทรศัพท์ ทำให้ช่วยลดแรงไฟกระชาก (electrical surge) ที่อาจเกิดจากฟ้าผ่าและการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ระบบ FTTx ใช้ ONU ที่มีระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่บ้านผู้ใช้บริการที่มีขนาดเล็ก กินไฟต่ำซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ Plain Old Telephone (POT) ที่ต้องใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าจากชุมสาย ทำให้พลังงานรวมในระบบ FTTx มีค่าน้อยกว่า เป็นผลดีกับระบบเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค



รูปที่ 1.3 อัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการ FTTH/B ในเอเชีย ตั้งแต่มิถุนายน 2009 ถึง มิถุนายน 2011[13]

จากข้อดีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงมีแนวโน้มที่ค่อนข้างชัดเจนว่า FTTx จะมาแทนที่ DSL และระบบการให้บริการเคเบิลโมเด็มในอนาคตจากการสำรวจของ IDATE พบว่า 37 เปอร์เซ็นต์ของผู้ใช้บริการในประเทศได้หวั่น เลือกรับบริการบรอดแบนด์ผ่านเส้นใยแสงแทนที่การเลือกใช้บริการผ่าน DSL หรือสายเคเบิล เช่นเดียวกันกับ 42 เปอร์เซ็นต์ของผู้ใช้บริการในฮ่องกง และประเทศญี่ปุ่นกับประเทศเกาหลีใต้ซึ่งถือว่าเป็นผู้ให้บริการการเชื่อมต่อกับโครงข่ายโทรคมนาคมด้วยเส้นใยแสงเป็นรายแรกของภูมิภาคเอเชียก็มีผู้ใช้บริการเลือกใช้งานบริการบรอดแบนด์ผ่านเส้นใยแสงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และ 58 เปอร์เซ็นต์ ของผู้ใช้บริการภายในประเทศทั้งหมดตามลำดับจะเห็นได้ว่าประเทศต่างๆในภูมิภาคเอเชียต่างก็เลือกใช้บริการบรอดแบนด์ผ่านเส้นใยแสงทั้งสิ้นทำให้ผู้ใช้บริการ FTTx ในภูมิภาคเอเชียมีมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นภูมิภาคที่มีการใช้ FTTx มากที่สุดในโลกถึง 73 เปอร์เซ็นต์ โดย fiber to the building (FTTB) เป็นโครงข่ายที่มีผู้ใช้บริการมากที่สุดในภูมิภาคเอเชียจากรูปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการ FTTH/B ในเอเชีย ในเดือนมิถุนายน 2011เพิ่มขึ้นจากช่วงเวลาเดียวกันของปี 2009 ด้วยอัตราการเติบโตโดยเฉลี่ยต่อปีถึง 40 เปอร์เซ็นต์ [12] นอกจากนี้ศักยภาพในการเติบโตของตลาด FTTH/B ในประเทศมหาอำนาจอย่างจีนและอินเดีย เป็นสิ่งที่ทำให้มั่นใจได้ว่าจะมีจำนวนผู้ใช้บริการในแถบภูมิภาคอื่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วยเช่นกัน [13]

โครงข่ายหลักทางแสงที่ติดตั้งหลังปี ค.ศ. 2000 สามารถส่งผ่านสัญญาณได้พร้อมกันถึง 60-80 ช่องสัญญาณ ในการส่งผ่านสัญญาณใช้เทคโนโลยี WDM ในช่วง C-band คือที่ความยาวคลื่นประมาณ 1530-1560 นาโนเมตร เมื่อส่งพร้อมกัน 80 ช่องสัญญาณจะมี channel spacing 50 GHz. และมี spectrum efficiency 0.2 bit/s/Hz หากสามารถลดค่า channel spacing ได้ หรือเพิ่มอัตราในการส่งข้อมูลระบบจะมี spectrum efficiency สูงขึ้น แต่การลด channel spacing ทำให้การส่งผ่านสัญญาณถูกจำกัดด้วยผลของ PMD และ nonlinear crosstalk มากขึ้น ด้วยโดยแต่ละช่องสัญญาณส่งผ่านสัญญาณด้วยเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวที่มีอัตราข้อมูลสูงสุด 10 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ ดังนั้นเมื่อคิดอัตราข้อมูลของทั้งโครงข่ายหลักจะมีอัตราข้อมูลสูงสุด 600-800 Gbps [14]

ถึงกระนั้น ความต้องการแบนด์วิดท์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคตอันใกล้ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว จึงมีงานวิจัยหลากหลายที่ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลบนโครงข่ายหลักจาก 10 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณไปเป็น 40 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ ด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ (optical modulation) การสวิตซ์ซึ่งสัญญาณทางแสง (switching granularity) และการนำระบบ coarse wavelength division multiplexing (CWDM) มาใช้กับโครงข่ายส่วนกลาง [15] ซึ่งในงานวิจัยระบุว่า การส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลสูงระยะไกลระบบจะถูกจำกัดสมรรถนะในการส่งผ่านสัญญาณเนื่องจากผลของ PMD [14] นอกจากนี้ได้มีการทดลองส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 20 Gbps จำนวน 64 ช่องสัญญาณบน core network ในระบบ dense-wavelength-division multiplexing (DWDM) สำหรับการสื่อสัญญาณทางแสงแบบแพ็คเก็ตสวิตซ์ได้เป็นผลสำเร็จ [16] ต่อมาในปี 2010 ได้มีการพัฒนาอัตราการส่งข้อมูลขึ้นจนสามารถรองรับข้อมูลอัตราสูงถึงกว่า 3 Tbps (3×10^{12} บิตต่อวินาที) โดยเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ DWDM นับร้อยช่องสัญญาณที่อัตราข้อมูลถึง 10 และ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเห็นได้ว่าอัตราการส่งข้อมูลบนโครงข่ายหลักเพียงพอที่จะรองรับความต้องการใช้งานในปัจจุบัน [17]

การที่โครงข่ายหลักถูกพัฒนาให้มีอัตราในการส่งข้อมูลถึง 40 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ เทคโนโลยี PON ในอนาคตควรที่จะได้รับการพัฒนาให้สามารถรองรับการส่งสัญญาณอัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ เนื่องจากอัตราข้อมูลเฉลี่ยในการรับส่งข้อมูลของ access network อยู่ที่ 6-16 Mbps [10] ในขณะที่อัตราข้อมูลเฉลี่ยที่ต้องการสำหรับรองรับบริการควอดเพลย์ (Quad-play) ได้แก่ IPTV, VoIP, อินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และ wireless ควรจะมากกว่า 50

Mbps [10] เนื่องจากมีบริการบางประเภทใช้แบนด์วิดท์สูง โดยเฉพาะบริการ 3D SDTV และ 3D HDTV ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 1 เห็นได้ชัดว่าอัตราข้อมูลของการรับส่งข้อมูลในปัจจุบันซึ่งแสดงให้เห็นจากตาราง 1.1 ความต้องการแบนด์วิดท์สำหรับโครงข่ายเข้าถึงในอนาคต [18] ไม่เพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้บริการเข้าถึงบริการดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 1.1 ความต้องการแบนด์วิดท์สำหรับโครงข่ายเข้าถึงในอนาคต [18]

Service	Bandwidth Consumption
SDTV	2 Mbps per channel
HDTV	8 Mbps per channel
3D SDTV	63 Mbps per channel
3D HDTV	187 Mbps per channel
Basic HSI	5 Mbps per channel
Gaming	10 Mbps per channel
Multimedia surfing	8 Mbps per channel
Video-conf. and learning	3 Mbps per channel
Telecommuting	4 Mbps per channel
Voice-over-IP	110 Kbps

ตาราง 1.2 ปริมาณแบนด์วิดท์ต่อผู้ใช้บริการหนึ่งรายสำหรับเทคโนโลยีเข้าถึงประเภทต่าง ๆ [19]

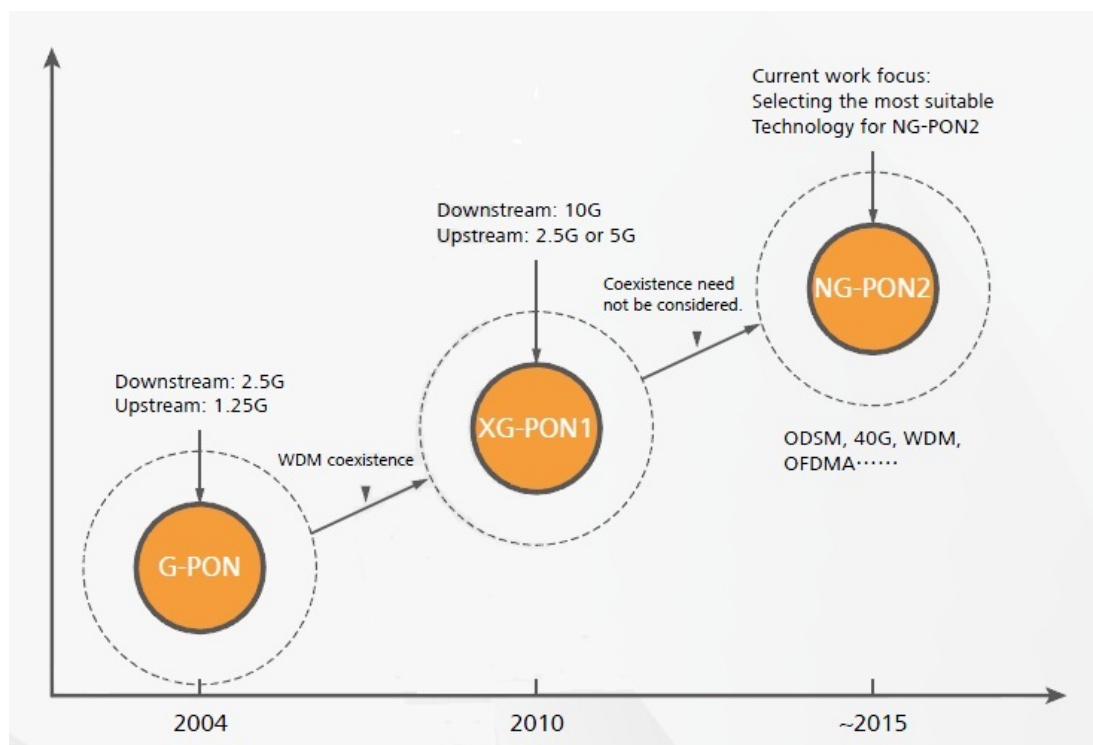
Service	Bandwidth/user	Max Reach
ADSL	2 Mbps(Typical)	5.5 km
VDSL	20 Mbps(Typical)	1 km
Coax	2 Mbps*	0.5 km
Wi-Fi	54 Mbps(Max)	0.1 km
WiMax	28 Mbps(Max)	15 km
BPON	20 Mbps*	20 km
EPON	60 Mbps*	20 km
GPON	40 Mbps*	20 km

*Bandwidth depends on the number of users, and the number listed here is typical Values.

ผู้ให้บริการมีความพยายามอย่างมากในการแข่งขันเพื่อให้บริการเทคโนโลยีเข้าถึงอย่าง ADSL, VDSL, สาย Coaxial, WiFi, WiMax และ FTTx จากตาราง 1.1 แสดงปริมาณแบนด์วิดท์ต่อ ผู้ใช้บริการหนึ่งรายสำหรับเทคโนโลยีเข้าถึงดังประเภทที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีประเภท DSL ถูกจำกัดอัตราการส่งข้อมูลเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสายทองแดงและเทคโนโลยี ประเภท WiFi-WiMax ถูกจำกัดด้วยระยะทางในการส่งสัญญาณ เห็นได้ชัดว่าเทคโนโลยีที่สามารถ พัฒนาต่อไปได้ในด้านอัตราการส่งข้อมูลและระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณ คือเทคโนโลยีทาง แสงหรือ PON

จากแนวโน้มที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี PON อย่างต่อเนื่อง [20] จนล่าสุดได้มีการประกาศมาตรฐาน XG-PON ออกมาเพื่อใช้ในการให้บริการแล้ว มากไปกว่า นั้นยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะเพิ่มอัตราในการส่งข้อมูลของ PON โดยใช้ชื่อเรียกว่า Next Generation PON (NG-PON)

Next Generation PON



รูปที่ 1.4 XG-PON roadmap [21]

10 Gigabit PON (XG-PON: ITU-T G.987) ใช้การรับส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล GPON encapsulation method (GEM) โดยตามมาตรฐานที่ออกมานั้นคือ XG-PON1 มีอัตราการส่งข้อมูลฝั่ง downlink สูงสุดถึง 10 Gbps และอัตราการส่งข้อมูลฝั่ง uplink สูงสุดเท่ากับ 2.5 Gbps โดยมาตรฐานสำหรับ XG-PON2 ซึ่งอยู่ในระหว่างการพิจารณาจะมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดทั้ง downlink และ uplink เท่ากับ 10 Gbps นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานร่วมกับระบบ G-PON เดิมได้ เช่นเดียวกับกับ GE-PON และ 10GE-PON [22]

จากรูปที่ 1.4 แสดงให้เห็นว่า XG-PON1 มีเทคโนโลยีบางอย่างที่สามารถพัฒนาไปเป็น XG-PON2 เทคโนโลยีในอนาคตที่สามารถพัฒนาได้ คือ วิธีที่ 1 เพิ่มอัตราข้อมูลจาก 10 Gbps เป็น 40 Gbps โดยใช้เทคโนโลยี time division multiplexing (TDM) วิธีที่ 2 คือการใช้ WDM-PON เพื่อที่จะเข้าถึงอัตราข้อมูล 40 Gbps วิธีการมัลติเพล็กซ์ที่เป็นไปได้ ได้แก่ CWDM และ DWDM โทโพโลยีอีกอันหนึ่งที่ได้รับความสนใจ คือ opportunistic and dynamic spectrum management PON (ODSM-PON) ซึ่งนำมาใช้กับโครงข่ายที่ใช้เทคโนโลยี time division multiple access (TDMA) ร่วมกับ wavelength division multiple access (WDMA) ซึ่งสามารถจัดการสเปกตรัมของสัญญาณโดยการเปลี่ยน timeslot และ ความยาวคลื่นโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ วิธีที่ 3 คือ การมอดูเลตเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการส่งสัญญาณ เช่น optical code division multiple access PON (OCDMA-PON) โดยการใช้วิธีมอดูเลตแบบ code division multiple access (CDMA) ในการถอดรหัสสัญญาณที่ ONU เพื่อหลีกเลี่ยงการจัดสรรช่วงเวลาการเข้าใช้ช่องสัญญาณในการส่งผ่านสัญญาณจะใช้วิธี TDMA อีกวิธีหนึ่งเป็นวิธีการมอดูเลตแบบ orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์และสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 40 Gbps แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่กล่าวมาข้างต้น ยังอยู่ในกระบวนการศึกษาและวิจัยรวมถึงการทดลองกับระบบจริงเพื่อที่จะสามารถจัดทำออกมาเป็นมาตรฐานที่ใช้ตามท้องตลาดต่อไปในอนาคต [23]

การนำวิธีมอดูเลตสัญญาณ เช่น ออนออฟคีย์อิงชนิคกลับสู่ศูนย์ (return to zero on-off keying : RZ-OOK) ออนออฟคีย์อิงชนิคไม่กลับสู่ศูนย์ (non-return to zero on-off keying : NRZ-OOK) ดิฟเฟอเรนเชียลเฟสชิฟต์คีย์อิง (differential phase shift keying : DPSK) ดิฟเฟอเรนเชียลควอดเรเจอร์เฟสชิฟต์คีย์อิง (differential quadrature phase shift keying : DQPSK) และ ควอดเรเจอร์แอมพลิจูดมอดูเลชัน (quadrature amplitude modulation : QAM) มาใช้กับการสื่อสารสัญญาณเป็นอีกวิธีที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการเพิ่มอัตราข้อมูลจาก 10 Gbps ไปเป็น

40 Gbps ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาการส่งผ่านสัญญาณโดยใช้มอดูเลตชันที่กล่าวมาเป็นจำนวนมาก [24]-[29] แต่ส่วนใหญ่มักใช้กับโครงข่ายหลัก มีงานวิจัยที่นำเอาวิธีมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK มาใช้บนโครงข่ายระยะไกลผ่านเส้นใยแสงด้วยอัตราการส่งข้อมูลตั้งแต่ 2.5-40 Gbps ปรากฏว่าสามารถส่งสัญญาณได้ไกลถึง 1890 กิโลเมตร โดยใช้ semiconductor optical amplifier (SOA) [24] อีกงานวิจัยได้จำลองระบบส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 40 Gbps ด้วยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK และ DQPSK โดยพิจารณาความทนทานของระบบต่อ chromatic dispersion, ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและพิจารณาค่า OSNR ปรากฏว่าระบบ RZ-DPSK มี OSNR sensitivity สูงที่สุด และทนต่อผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่วนระบบ DQPSK มีความทนทานต่อดิสเพอร์ชันมากที่สุดและได้รับผลกระทบจากการลด channel spacing น้อยที่สุดการส่งสัญญาณในระบบระยะทางไกลยิ่งพบว่า RZ-DPSK มีสมรรถนะที่ดีกว่าในการส่งสัญญาณช่องเดี่ยวและการส่งสัญญาณในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz ส่วนระบบ RZ-DQPSK มีสมรรถนะที่ดีกว่าในการส่งสัญญาณในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz [25] ถัดมาได้มีผู้ทำการทดลองส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 10 Gbps โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK และดูความทนทานของระบบต่อ chromatic dispersion, PMD และ self phase modulation ปรากฏว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณไปใน non-dispersion-shifted fiber ได้ไกลถึง 235 km โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณ [26] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ทดลองส่งสัญญาณ RZ-DQPSK ที่มีอัตราการส่งข้อมูลเป็นสองเท่า (8x80 Gbps) เทียบกับ RZ-ASK ผลปรากฏว่า RZ-DQPSK ทนต่อผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมากกว่า RZ-ASK ที่มีอัตราการส่งข้อมูลเพียงแค่ครึ่งหนึ่ง (8x40Gbps) ของ RZ-DQPSK ซึ่งวิธีการมอดูเลตสัญญาณทั้งสองมี channel spacing 100 GHz [27] บริษัท NEC ระบุว่าได้ทำการติดตั้งระบบเส้นใยแสงใต้ทะเล เป็นระบบ WDM ที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูล 10 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ทำให้ความจุของระบบมีมากถึง 1 Tbps ในอนาคตบริษัทจะพัฒนาอัตราเร็วในการส่งข้อมูลให้มากถึง 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเพื่อรองรับความต้องการแบนวิดท์ที่เพิ่มมากขึ้นจากทั่วโลก [28] การมอดูเลชันแบบ QAM ก็ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเช่นกัน ได้แก่ [29] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM sub-carrier multiplexing (SCM) บน PON จำนวน 64/256 ช่องสัญญาณ ปรากฏว่าสามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงยาว 51 กิโลเมตรที่ค่า sensitivity เท่ากับ -22 dBm และ -17.5 dBm ที่ 64 และ 256 ช่องสัญญาณตามลำดับและ [30] ได้จำลองระบบมอดูเลตชั้นแบบ QAM และ DQPSK โดยผลจากการ

simulation แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า incoherent QAM เป็นวิธีที่โดดเด่นและมีประสิทธิภาพ เหมาะกับการใช้เป็นเทคโนโลยี PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ในอนาคต

นอกจากนี้ยังมีอีกเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจ คือ OCDMA-PON และ OFDM-PON ซึ่งหลักการการทำงานของระบบซีดีเอ็มเอเป็นการเข้าถึงโดยผู้ใช้แต่ละรายสามารถเข้าใช้ความถี่เดียวกันพร้อมกันได้ โดยอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายด้วยชุดรหัส (code) ที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้การใช้งานช่องสัญญาณพร้อมๆกันบนความถี่เดียวกันทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ดังนั้นผู้ใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ซีดีเอ็มเอแต่ละคู่จะต้องใช้ชุดรหัสชุดเดียวกันจึงจะสามารถรับและส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง [31] ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการเดียวกับการส่งสัญญาณแบบไร้สาย การมอดูเลตแบบ OFDM เป็นการมอดูเลตสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห้โดยที่แต่ละคลื่นพาห้ย่อยนั้นตั้งฉากกันทำให้สามารถส่งข้อมูลในอัตราข้อมูลที่ต่ำขนานกันผ่านเส้นใยแสงด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำลงทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำลงด้วย [32] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งสองนี้มีความซับซ้อนทำให้อุปกรณ์ในโครงข่ายมีความซับซ้อนสูงและราคาแพง [33]

จากงานวิจัยได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าการใช้ alternative modulation อย่าง OOK, DPSK, DQPSK และ QAM เป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลหรือแบนด์วิดท์ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนไม่มากนักแต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพและขีดจำกัดในการนำการมอดูเลตสัญญาณดังกล่าวเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารสัญญาณที่อัตราส่งข้อมูล 40 Gbps บนโครงข่าย PON ซึ่งก็ต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาหาคอขวดในการให้บริการ broadband ในอนาคต

ในการส่งผ่านสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นจาก attenuation, dispersion, PMD และ ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาหาผลกระทบของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อการสื่อสารสัญญาณอัตราข้อมูล 40 Gbps บน PON โดยอาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK, n-QAM จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลของปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของการส่งสัญญาณโดยการมอดูเลตสัญญาณแต่ละแบบ และนำผลมาสรุปและวิเคราะห์เชิงทฤษฎีว่าตัวแปรใดที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารระบบ PON ที่มีอัตราการส่งข้อมูลเป็น 40 Gbps จากนั้นนำเสนอแนวทางในทางทฤษฎีเพื่อใช้ออกแบบการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บน PON ที่มีสมรรถนะสูงสุด และตรวจสอบทฤษฎีหรือหลักการแนวทางที่นำเสนอ ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยแนวทางการออกแบบนั้น อาศัยการตรวจสอบค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดใน

ระบบสายส่ง (total link budget) จาก CO ไปยัง ONU ที่บ้านของผู้ใช้แต่ละราย เพื่อให้สามารถตอบสนองบริการสื่อสารข้อมูลในยุคหน้าได้อย่างแท้จริง

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

การสื่อสารในปัจจุบัน ความต้องการรับส่งข้อมูลทางภาพและตัวอักษรที่มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจากในอดีตอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งข้อมูล ภาพ เสียง และวีดีโอ ยังมีความละเอียดและความคมชัดที่มากขึ้น เป็นผลให้ไฟล์ข้อมูลมีขนาดใหญ่มากขึ้นตามไปด้วย ขนาดข้อมูลที่ใหญ่ทำให้ความต้องการแบนด์วิดท์ต่อผู้ใช้บริการรายหนึ่งๆ เพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงเกิดปัญหาแบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการและโครงข่ายเข้าถึงไม่สามารถรับส่งข้อมูลที่อัตราข้อมูลที่ผู้ใช้บริการต้องการได้ การนำ alternative modulation อย่าง OOK, DPSK, DQPSK และ QAM มาใช้ในการเพิ่มความเร็วยของโครงข่ายเข้าถึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลหรือแบนด์วิดท์ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนไม่มากนัก วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การมอดูเลตสัญญาณข้างต้นในการเพิ่มอัตราข้อมูลในโครงข่ายเข้าถึงเพื่อลดปัญหาคอขวดของการรับส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้บริการและโครงข่ายหลักที่มีอัตราข้อมูลสูง แต่อย่างไรก็ตามในการส่งผ่านสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นจาก attenuation, dispersion, PMD และ ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวจำกัดสมรรถนะการส่งสัญญาณของระบบ

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาความเป็นไปได้และปัญหาที่จำกัดความสามารถของการนำการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, DPSK, DQPSK และ n-QAM มาใช้สำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network : PON)
- 1.3.2 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณ 40 Gbps แบบต่างๆในแง่ของอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดระยะทางการให้บริการไกลสุดและกำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ เป็นต้น
- 1.3.3 นำเสนอแนวทางการออกแบบการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บน PON ให้มีสมรรถนะสูงสุด

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการจำกัดสมรรถนะในการสื่อสารสัญญาณ
- 1.4.2 ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีอัตราการส่งข้อมูลเป็น 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเช่นผลของการสูญเสียกำลังงานในเส้นใยแสงผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันปรากฏการณ์เคอร์ของเส้นใยแสงและปัญหาการกระจายโหมดโพลาริซ
- 1.4.3 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK และ QAM ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
- 1.4.4 จำลองระบบ PON ที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK และ QAM โดยการ simulation ด้วยโปรแกรม optisys
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลของปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของการส่งสัญญาณโดยการมอดูเลตสัญญาณแต่ละแบบ
- 1.4.6 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีว่าตัวแปรใดที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารระบบ PON ที่มีอัตราการส่งข้อมูลเป็น 40 Gbps
- 1.4.7 นำเสนอแนวทางในทางทฤษฎีเพื่อใช้ออกแบบการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บน PON ที่มีสมรรถนะสูงสุด และตรวจสอบทฤษฎีหรือหลักการแนวทางที่นำเสนอ ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยแนวทางการออกแบบนั้น อาศัยการตรวจสอบค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายส่ง (total link budget) จาก CO ไปยัง ONU ที่บ้านของผู้ใช้แต่ละรายว่าเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่
- 1.4.8 เรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1.5.1 โครงข่ายที่ใช้เป็นโครงข่าย fiber to the x : FTTx ที่ใช้โครงข่ายแบบ PON เป็นโครงข่ายเข้าถึง (access network)
- 1.5.2 การศึกษาและวิเคราะห์จะใช้เฉพาะเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D ในการส่งผ่านสัญญาณเท่านั้น

- 1.5.3 สาเหตุความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้น จะพิจารณาผลของการสูญเสียกำลังงานในเส้นใยแสงดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ และปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr) ของเส้นใยแสงเท่านั้น
- 1.5.4 หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensating unit : DCU) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ slope compensated dispersion compensating unit (SC-DCU) เท่านั้น
- 1.5.5 ใช้อัตราข้อมูล 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเท่านั้น
- 1.5.6 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK และ QAM เท่านั้น
- 1.5.7 ผลการทดลองได้จากการ simulation โดยใช้โปรแกรม optisys และการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยไม่มีการทดลองจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ
- 1.6.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK และ QAM รวมทั้งการประยุกต์การมอดูเลตสัญญาณดังกล่าวเข้ากับโครงข่าย FTTx ระบบ PON ที่มีสมรรถนะสูงสุดเพื่อรองรับอัตราการส่งข้อมูลเป็น 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ
- 1.6.3 ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ในบทนี้แบ่งออกเป็น 9 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงขั้นพื้นฐาน การสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะไกล รวมไปถึงการแนะนำให้รู้จักว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงอย่างไรบ้าง ส่วนที่ 2 จะเป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่ 3 จะเป็นการกล่าวถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงซึ่งได้แก่ การลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ส่วนที่ 4 จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK, DPSK, DQPSK และ QAM ส่วนที่ 5 กล่าวถึง link power budget ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบระบบสื่อสารทางแสง และส่วนที่ 7 ถึงส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงคุณสมบัติของเส้นใยแสง โครงสร้างและมาตรฐานของระบบ PON

2.1 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

สัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงคือสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) พิจารณาจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงดังสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชโรดิงเงอร์ (nonlinear schrödinger equation, NLSE) [34]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma|A|^2 A \quad (2.1)$$

โดยที่ A คือ กรอบคลื่น (Envelope) ของสัญญาณ

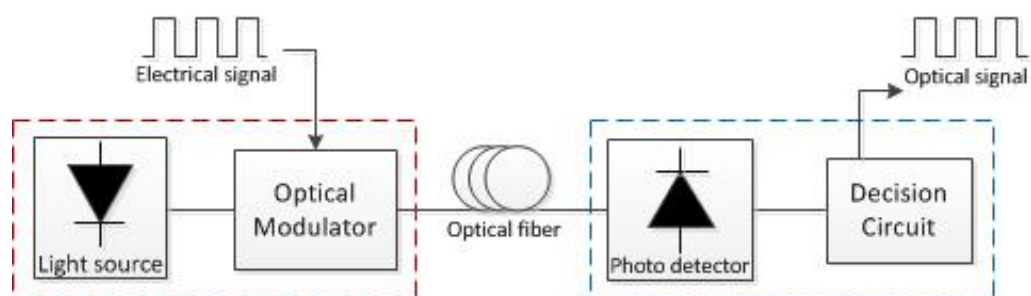
α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation constant)

- β_2 คือ ค่า Group velocity dispersion (GVD)
- γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient)
- z คือ ระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง
- T คือ กรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาจริง t แสดงได้ในสมการที่ (2.2) ดังนี้

$$T = t - \frac{z}{v_g} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) t เป็นเวลาจริงเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.1) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A มี 3 ปัจจัย ปัจจัยแรก คือการสูญเสียของกำลังสัญญาณซึ่งเพิ่มขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสงปัจจัยที่สองคือ GVD (β_2) ส่งผลให้พัลส์สัญญาณขยายกว้างออก และปัจจัยสุดท้ายคือผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงหรือปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ซึ่งส่งผลให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและสเปกตรัมของสัญญาณขยายออกด้วย โดยความรุนแรงของปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นกับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง

2.2 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักคือ ภาดส่ง (transmitter) ตัวกลางหรือเส้นใยแสง (optical fiber) และภาครับ (receiver) โดยทาง ภาดส่งจะส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่าน optical modulator โดยจะทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็น สัญญาณแสง (electro-optical : E-O) โดยการมอดูเลตสัญญาณนั้นมี 2 ประเภทคือ การมอดูเลต ภายนอก (external modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (modulator) แยกออกจากกัน และการมอดูเลตโดยตรง (direct modulation) นั้น แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมเป็นชุดเดียวกัน เมื่อทำการมอดูเลตแล้ว จากนั้นจะส่งผ่านเส้นใยแสง

เส้นใยแสงมีรูปแบบให้เลือกใช้งานหลากหลายคือ เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single mode fiber :SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (attenuation coefficient) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงแบบหลายแผนคลื่น (multi-mode fiber : MMF) ที่มีราคาถูกกว่า เส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion-shifted fiber : DSF) มีคุณสมบัติพิเศษคือ ให้ค่า สัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำสุดที่ความยาวคลื่น zero dispersion (1550 nm) และเส้นใยแสงแบบ เลื่อนค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1550 nm ค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ (non-zero dispersion-shifted fiber: NZ-DSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณทาง ความยาวคลื่น

เมื่อภาครับได้รับสัญญาณแสงแล้ว เครื่องรับสัญญาณแสงที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo detector) และวงจรตัดสินใจ (Decision circuit) อุปกรณ์ตรวจจับ สัญญาณแสงทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้างดรูปที่ 5 โดยทั่วไปจะใช้เป็น positive intrinsic negative junctions (PIN) และ avalanche photodiode (APD) ส่วนวงจร ตัดสินทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำหนดภายใน วงจรตัดสินใจ

2.3 ปัจจัยที่จำกัดการส่งของสัญญาณ

2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation loss)

อัตราการสูญเสียกำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสง เป็นส่วนสำคัญของการกำหนด คุณลักษณะในการออกแบบโครงข่ายทางแสง และเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระยะทางสูงสุด ระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยการลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงเกิดจาก 3 สาเหตุหลักคือ

การดูดซึม (Absorption) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ, การกระเจิง (Scattering) ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่นจากกระบวนการผลิต และการแผ่รังสี (Radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางใดๆ จะเกิดการลดทอนค่ากำลังของสัญญาณดังสมการที่ (2.3) [35]

$$P(L) = P(0) - \alpha L \quad (2.3)$$

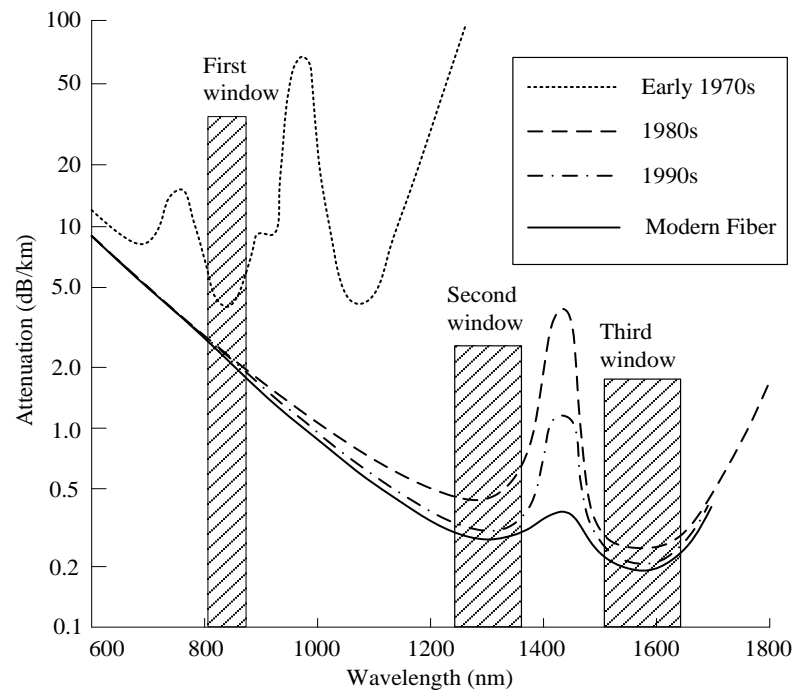
โดยที่

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

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

α คือ ค่าคงตัวของการลดทอน [dB/km]

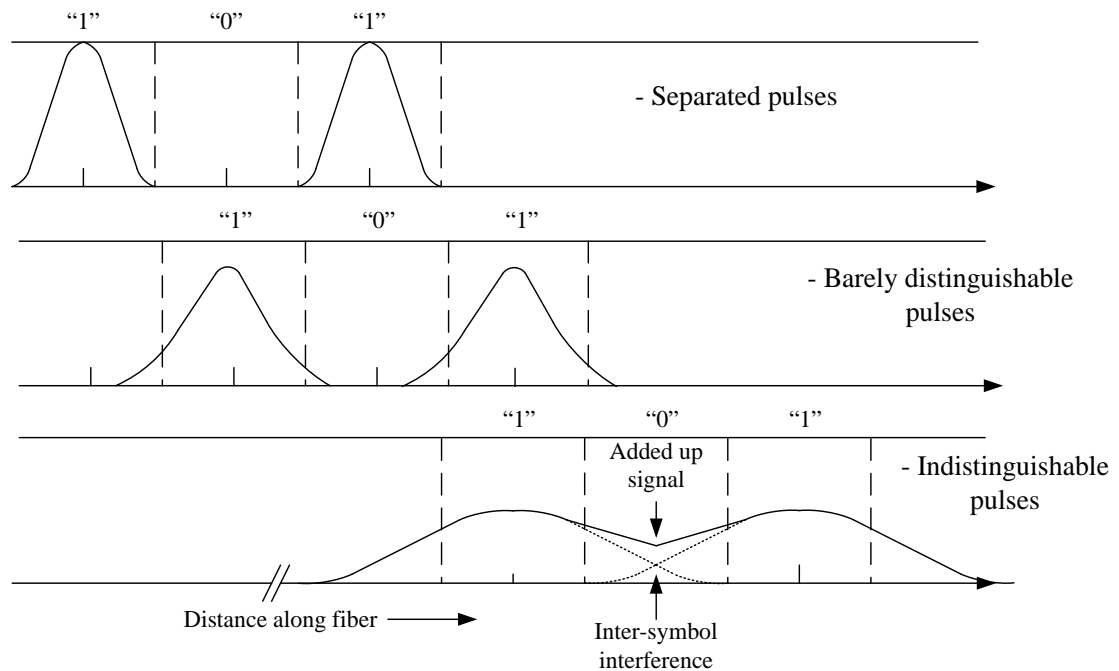
ค่าคงตัวการลดทอน (α) มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นซึ่งแสดงออกตามเส้นโค้ง 4 เส้นโดยแบ่งตามยุคของการสื่อสารในรูปแบบที่ 2.2 ระบบเส้นใยแสงในยุคแรก (first window) จะทำงานในช่วงความยาวคลื่น 850 nm เส้นใยแสงในยุคแรกทำจากซิลิกาที่มีอัตราการลดทอนสัญญาณสูงซึ่งเกิดจากความขุ่นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (rayleigh scattering) ทำให้ในยุคนี้อัตราการลดทอนสัญญาณมีค่าสูง ซึ่งหลักจากอุปกรณ์ได้รับการพัฒนาขึ้นส่งผลให้ในยุคที่สอง (second window) ที่ช่วงความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ต่อมา NTT (nippon telegraph and telephone) ได้พัฒนาระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km โดยปัจจุบันมีการพัฒนาสู่ยุคที่ 4 ซึ่งใช้ความยาวคลื่นช่วง 1625 nm [36]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [37]

2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)

สัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสง ดิสเพอร์ชันจะทำให้พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference : ISI) เป็นผลทำให้การรับสัญญาณที่ภาครับมีความผิดพลาดโดยผิดพลาดจากบิต “1” เป็น บิต “0” และผิดพลาดจากบิต “0” เป็น บิต “1” รูปที่ 2.3 แสดงการเกิด inter-symbol interference (ISI) จากผลของดิสเพอร์ชัน

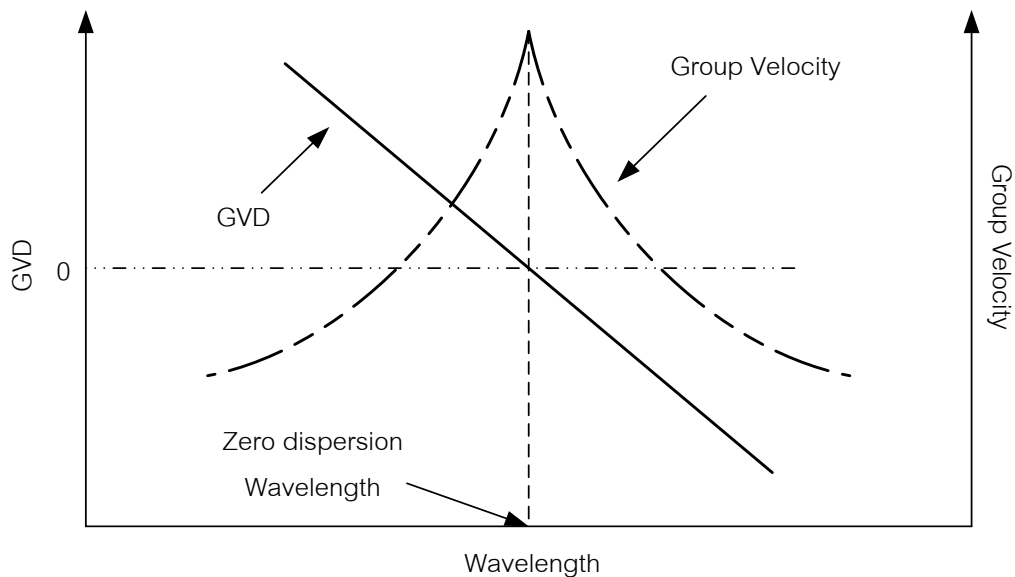


รูปที่ 2.3 การเกิด Inter-symbol interference [37]

ดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกันคือ ดิสเพอร์ชันภายนอกแผนคลื่น (Inter-modal dispersion) สำหรับเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (Multimode fiber : MMF) และดิสเพอร์ชันภายในแผนคลื่น (Intra-modal dispersion) หรือโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic dispersion) สำหรับเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (Single-mode fiber : SMF) สัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทั้งนี้เราจะเลือกใช้ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงเพราะว่า SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงมีอัตราการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นดิสเพอร์ชันที่ส่งผลกับระบบจะเป็นแบบ Chromatic dispersion

เมื่อแสงเดินทางระยะทางไกลส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง ซึ่งเป็นผลมา Chromatic dispersion และผลการประวิงระหว่างโหมด (intramodal delay effect) สามารถตรวจสอบได้ด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocity) ของโหมดการเดินทาง (guided

modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มคือความเร็วของพลังงานแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง GVD เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความถี่ที่มีความเร็วกลุ่มต่างกัน ส่งผลให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาแตกต่างกันในการเดินทางซึ่งทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อถึงปลายทาง



รูปที่ 2.4 ความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (GVD) เทียบกับค่าความยาวคลื่น [37]

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความยาวคลื่นแตกต่างกันจะมีค่าความเร็วกลุ่มต่างกัน ช่วงของดิสเพอร์ชันแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงดิสเพอร์ชันปกติ (Normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า ช่วงดิสเพอร์ชันผิดปกติ (Anomalous dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมี β_2 ความเร็วกลุ่มน้อยกว่าและดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (Zero dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่มีความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

เราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ (broadening) เนื่องจาก Chromatic dispersion ได้ตั้งสมการที่ (2.4) โดยพิจารณาให้ τ แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่ ω

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L \frac{\delta\beta}{\delta\omega} = \frac{L}{C} \frac{\delta\beta}{\delta K} \quad (2.4)$$

โดย

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 คือค่าคงที่การแพร่กระจาย (propagation constant) และ $\beta_1 = \frac{\partial\omega}{\partial\beta}$

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

จากสมการที่ (2.4) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial\tau}{\partial\omega} = L \frac{\partial}{\partial\omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) = L \frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2} = L\beta_2 \quad (2.5)$$

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 (2.6)

$$\Delta\tau = \left| \frac{\partial\tau}{\partial\omega} \right| \Delta\omega = \left| \frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2} \right| L \Delta\omega = |\beta_2| L \Delta\omega \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนในรูปความยาวคลื่น

$$\Delta\tau = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\lambda} \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \quad (2.7)$$

$$D = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.8)$$

โดยที่ D คือ dispersion (ps/nm/km)

$$\tau_{GVD} = DL\sigma_\lambda \quad (2.9)$$

โดยที่ τ_{GVD} คือ เวลาของความเร็วในการกระจายตัวของกลุ่ม (group velocity dispersion time), D คือ ดิสเพอร์ชันของเสี้ยวแสง, L คือ ความยาวของเส้นใยแสง และ σ_λ คือ ความกว้างของสเปกตรัมของเลเซอร์ตามลำดับ ทั้งนี้ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ RZ ค่าของ τ_{GVD} ในสมการที่ (2.9) ควรจะน้อยกว่า 35% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

$$DL\sigma_\lambda = 0.35T \quad (2.10)$$

เมื่อ T คือ bit period ของสัญญาณ RZ

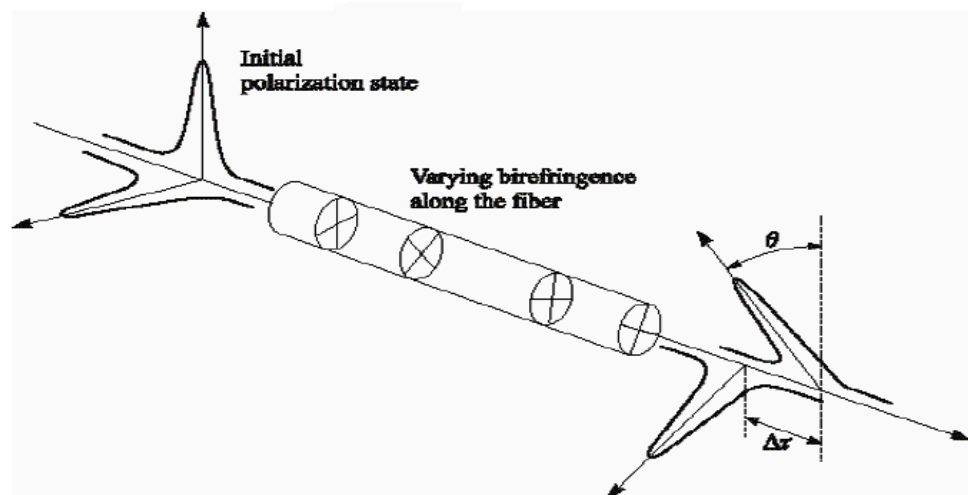
ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ NRZ ค่าของ τ_{GVD} ในสมการที่ (2.9) ควรจะน้อยกว่า 70% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$DL\sigma_{\lambda} = 0.70T \quad (2.11)$$

เมื่อ T คือ bit period ของสัญญาณ NRZ

2.3.3 ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD)

ผลกระทบของ PMD เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้พัลส์ของสัญญาณขยายตัวกว้างขึ้น อธิบายได้ดังในรูปที่ 2.5 องค์ประกอบของแสง 2 โหมดโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกัน (orthogonal) เดินทางผ่านเส้นใยแสงด้วยความเร็วที่ต่างกัน (differential group delay : DGD) เล็กน้อย โดยมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติ (birefringence) ของเส้นใยแสง ซึ่งเกิดจากธรรมชาติของเส้นใยแสง เช่น ความไม่เรียบในบริเวณแกน (core) หรือความเครียดภายในเส้นใยแสง (internal stresses) รวมไปถึงผลกระทบจากภายนอกเช่น การโค้งงอ (bending) และการบิดเกลียว (twisting) ของเส้นใยแสง โดยจะส่งผลกระทบต่อมากในโครงข่ายที่ส่งไปในระยะทางไกล ที่มีอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 10 Gbps โดยสามารถคำนวณความเร็วกว่าที่ต่างกันได้จากสมการ (2.12) และสมการที่ (2.13)



รูปที่ 2.5 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [37]

$$\Delta\tau = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \quad (2.12)$$

โดยที่	$\Delta\tau$	คือ differential time delay [ps]
	L	คือ ความยาวของเส้นใยแสง[km]
	v_{gx}, v_{gy}	คือ ความเร็วกลุ่มของแต่ละโหมดโพลาริเซชันซึ่งตั้งฉากกัน [m/s]

อย่างไรก็ตาม PMD เปลี่ยนแปลงไปอย่างสุ่มระหว่างการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง เนื่องจากผลของคุณสมบัติ (birefringence) ของเส้นใยแสง ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ $\Delta\tau$ จากสมการที่ (2.12) จึงไม่สามารถใช้ได้โดยตรง เราจึงประมาณค่า $\Delta\tau$ ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2.13)$$

โดยที่	$\langle \Delta\tau \rangle$	คือ ค่าเฉลี่ย (mean) ของ differential time delay [ps]
	D_{PMD}	คือ ค่าเฉลี่ย (average) ของพารามิเตอร์ PMD [ps/√km]

ผลของการกระจายโหมดโพลาริเซชันต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณคือ โหมดโพลาริเซชันของแสงที่ตั้งฉากกันทั้ง 2 แกนจะเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันและบิดไปจากแกนเดิมอย่างไม่มีแบบแผน (random) จึงส่งผลให้พัลส์ของสัญญาณขยายกว้างออก เมื่อไปถึงภาครับจึงไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกต้องได้

2.3.4 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity)

ผลของเคอร์ (Kerr effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นกับกำลังงาน

ของสัญญาณเรียกว่าการเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทดังนี้

2.3.4.1 Self-phase modulation (SPM) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเองทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปตามสมการที่ (2.14)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \quad (2.14)$$

โดยที่ $\Delta\omega_{NL}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อหน่วยเวลา

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

โดยที่ค่า $\phi_{NL}(z,T)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.15)

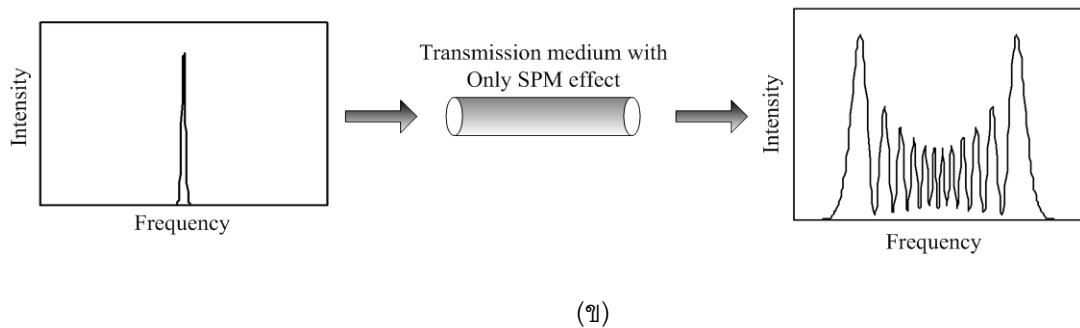
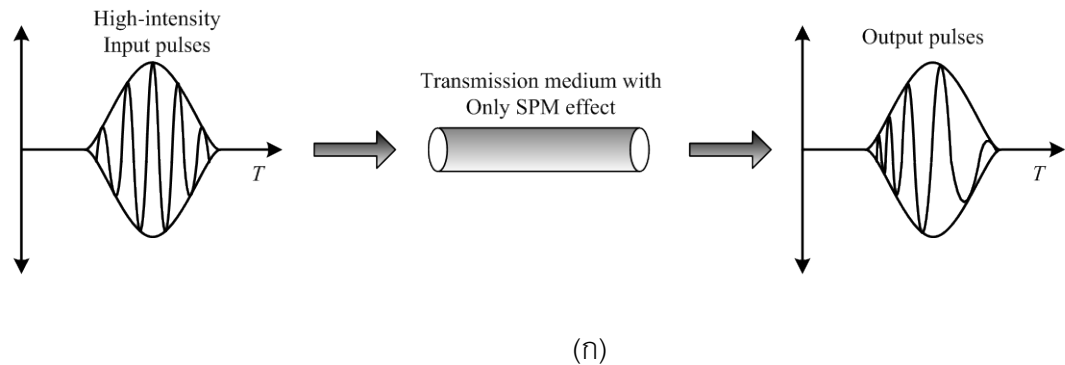
$$\phi_{NL} = n_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) L |E_0|^2 = n_2 k_0 L |E|^2 \quad (2.15)$$

โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear index Coefficient) ซึ่งมีค่าประมาณ $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (Free space wave number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุดแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง (ก) ความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ [37]

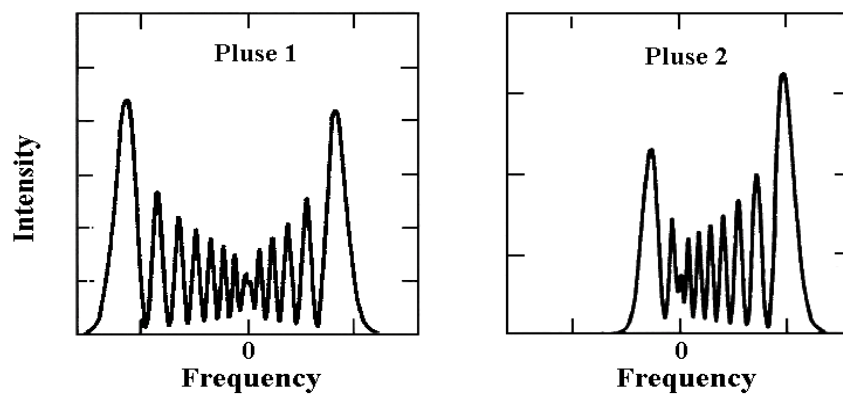
2.3.4.2 Cross-phase modulation (XPM) เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณแสงสองสัญญาณที่มีความถี่คลื่นพาหะที่มีค่าต่างกันคือ ω_1 และ ω_2 ซึ่งเดินทางไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวโดยแต่ละสัญญาณพัลส์ที่ของสัญญาณหนึ่งจะถูกเหี่ยววนำให้เฟสเปลี่ยนไปเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่มีความถี่ที่ต่างออกไปเหี่ยววนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม

โดยทั่วไปเมื่อมีสัญญาณแสงสองสัญญาณที่มีความถี่คลื่นพาหะเป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสงสัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็ปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกันผลของ XPM มีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้ [38]

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.16)$$

โดยที่ $|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1

$|E_1|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2



รูปที่ 2.7 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [37]

รูปที่ 2.7 แสดงถึงผลของ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงที่มีกำลังสัญญาณต่างกันเดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกันโดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่ากำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM ต่างกันที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจาก XPM จะขยายออกมากกว่าและการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรโดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจากกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่าส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่า

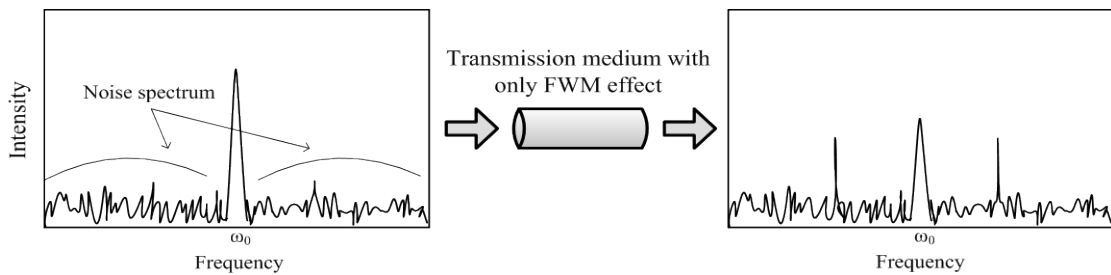
2.3.4.3 Four wave mixing (FWM) เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกันการกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมาเกิดจากสัญญาณพัลส์หลาย ๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กันมาผสมผสานกัน โดยสัญญาณที่เกิดใหม่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition)

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \tag{2.17}$$

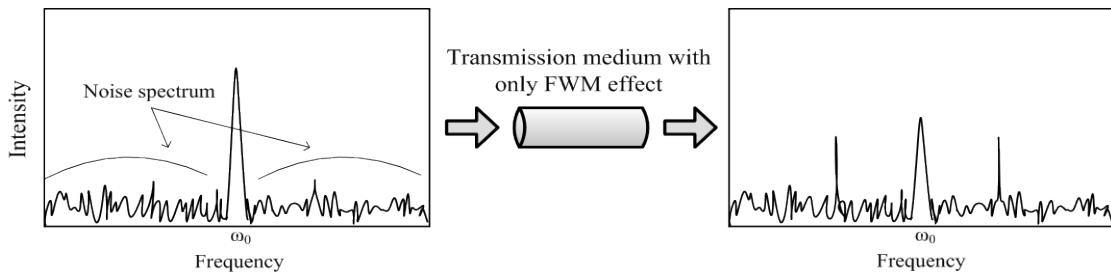
$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \tag{2.18}$$

โดยที่ k_n คือค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n



รูปที่ 2.8 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [37]

ผลของFWM แสดงดังรูปที่



รูปที่ 2.8 ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่าintra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (ghost pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มีอคูเลตสัญญาณเชิงเลขแบบออน-ออฟ (ON-OFF keying: OOK) สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณจะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมาและจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นแต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

การลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละสายเคเบิลใยแก้วให้มียุทธศาสตร์ของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุดเพื่อทำให้การวิ่งตัดกันของสัญญาณเนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้ยากขึ้นพร้อมทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.4 การมอดูเลตสัญญาณ

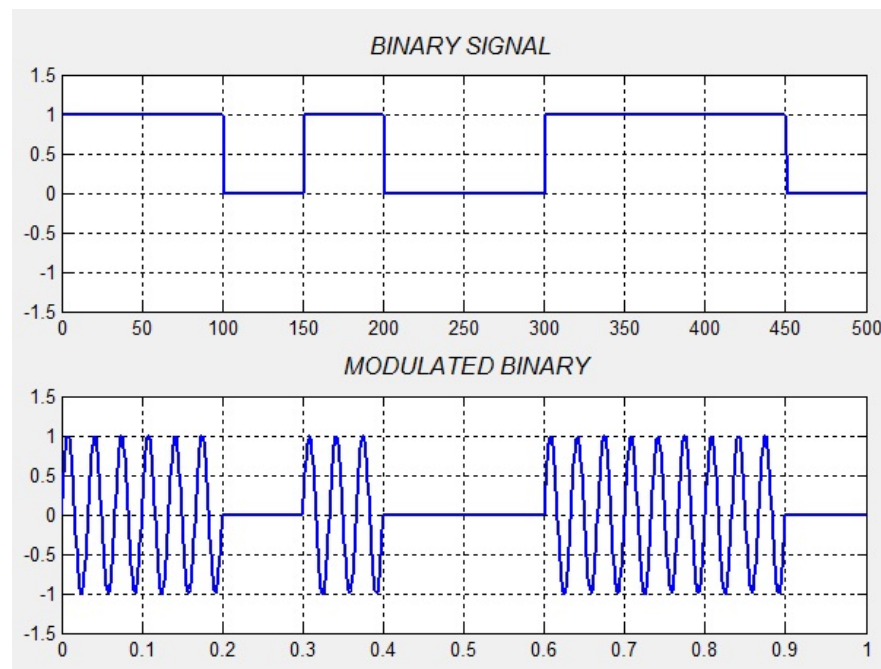
เนื่องจากคลื่นแสง มีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่สองอย่างคือ ความเข้มซึ่งอาจแสดงในรูปของกำลังงาน, แอมพลิจูด, ความถี่หรือความยาวคลื่น และมุมการสั่นของคลื่นหรือเฟส ในการส่งข้อมูลสามารถนำเอาสมบัติด้าน แอมพลิจูด ความถี่ และเฟส มาใช้ได้ การมอดูเลตสัญญาณจึงแบ่งออกเป็นสี่ประเภทหลักๆ คือ

1. การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด (amplitude shift keying: ASK) เป็นเทคนิคการมอดูเลตข้อมูลกับแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห้ ขนาดของแอมพลิจูดจะเปลี่ยนแปลงตามข้อมูลโดยความถี่และเฟสของสัญญาณคงที่
2. การมอดูเลตเชิงความถี่ (frequency shift keying: FSK) จะทำให้ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห้เปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลโดยแอมพลิจูดและเฟสคงที่
3. การมอดูเลตเชิงเฟส (phase shift keying: PSK) จะทำให้เฟสของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลโดยแอมพลิจูดและความถี่คงที่ เช่น กำหนดให้บิต "0" และบิต "1" มีเฟสของสัญญาณต่างกัน 180 องศา
4. การมอดูเลตแบบควอดเรเจอร์แคเรียร์แอมพลิจูด (quadrature amplitude modulation : QAM) เป็นการมอดูเลตสัญญาณอีกแบบหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้นโดยรวมวิธีการของ ASK และ PSK เข้าด้วยกันโดยที่สัญญาณคลื่นพาห้ที่มอดูเลตกับบิตข้อมูลนั้นจะมีการเปลี่ยนทั้งแอมพลิจูดและเฟสส่วนความถี่จะคงที่ [39]

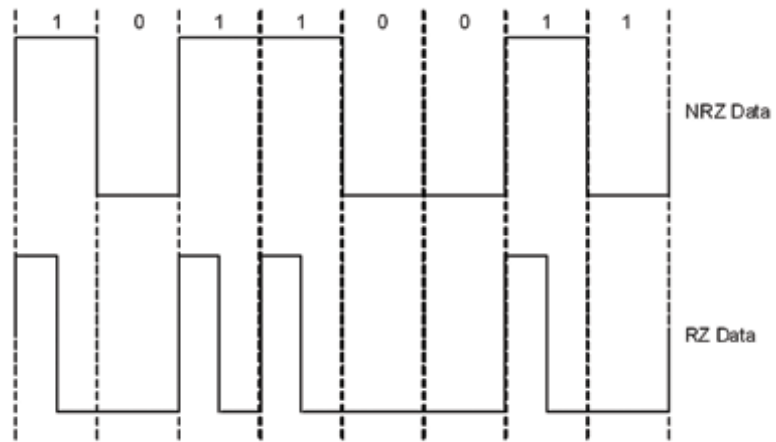
2.4.1 การมอดูเลตความเข้มแสง

การมอดูเลตความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการส่งสัญญาณแสงคือ OOK ซึ่งเป็นการมอดูเลตสัญญาณแบบหนึ่งของ ASK คือ แอมพลิจูดของคลื่นพาห้เปลี่ยนตามข้อมูล แต่ความถี่และเฟสยังคงเดิม โดยกำลังส่งของแสงแบ่งเป็นสองระดับ ตามบิต "1" และบิต "0" ซึ่งจะมีค่าของกำลังส่งของสัญญาณที่ต่างกันตามอัตราส่วนที่เรียกว่า extinction ratio ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 นั้นสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลามีแอมพลิจูดของคลื่นพาห้เปลี่ยนตามข้อมูล นอกจากนี้การส่ง

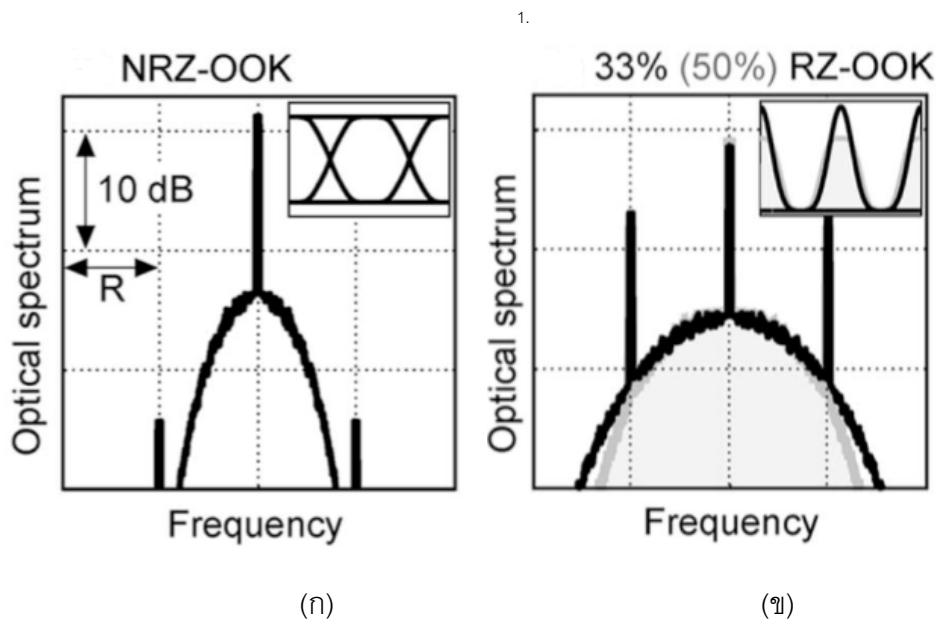
สัญญาณแบบ OOK ยังแบ่งตามรูปแบบการส่งสัญญาณได้เป็นการส่งแบบ NRZ ซึ่งกำลังส่งสัญญาณของบิต "1" จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบิต (bit period) และ RZ ข้อมูลที่เป็นบิต "1" จะกลับลงมาเป็นบิต "0" ในระหว่างคาบสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณแบบ NRZ จำเป็นต้องใช้กำลังงานเฉลี่ยที่สูงกว่า RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ NRZ ต้องส่งกำลังของสัญญาณตลอดทั้งคาบของบิตนั้น แต่การส่งสัญญาณแบบ RZ ส่งกำลังของสัญญาณเพียงส่วนหนึ่งของคาบ แต่สัญญาณแบบ NRZ ใช้แบนด์วิดท์ที่ต่ำกว่าสัญญาณแบบ RZ ซึ่งเห็นได้จากสเปกตรัมของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยรูปที่ 2.11 (ก) เป็นสเปกตรัมของสัญญาณแบบ NRZ และรูปที่ 2.11 (ข) เป็นสเปกตรัมของสัญญาณแบบ NRZ [40]-[42]



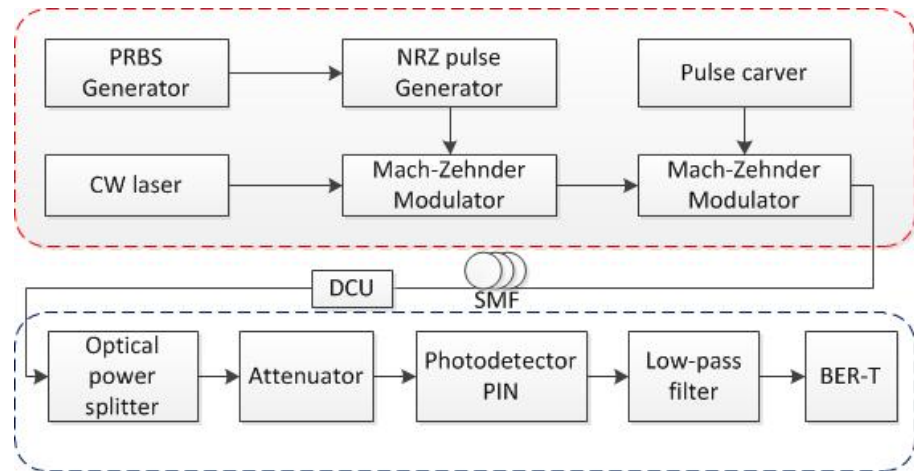
รูปที่ 2.9 ผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.10 สัญญาณแบบ NRZ และ RZ



รูปที่ 2.11 spectrum ของสัญญาณ OOK แบบ (ก) NRZ (ข) RZ

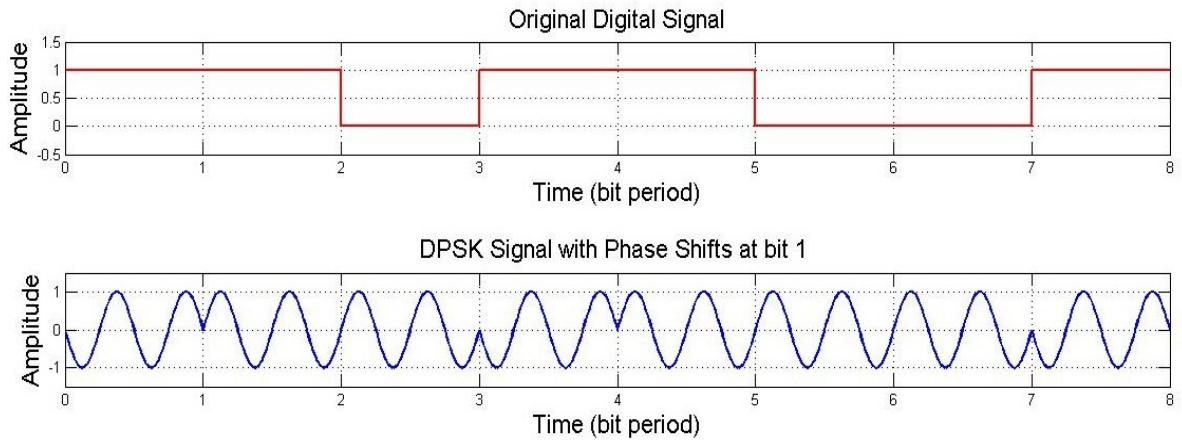


รูปที่ 2.12 โครงสร้างระบบ RZ-OOK

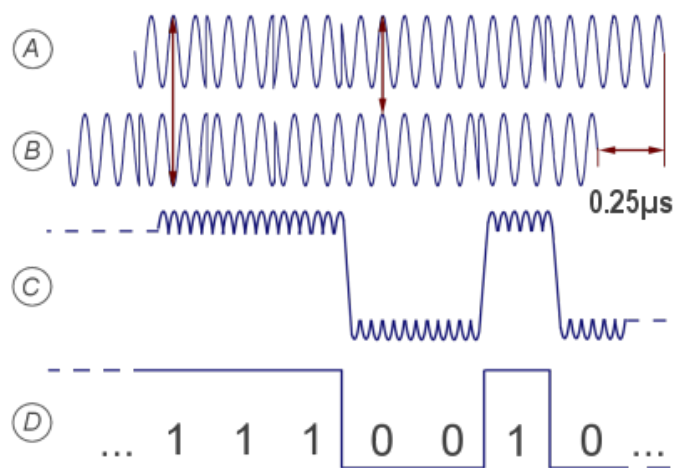
ลักษณะโครงสร้างของระบบ RZ-OOK PON แสดงดังรูปที่ 2.12 กล่าวคือสัญญาณไฟฟ้าแบบไม่กลับสู่ศูนย์จะถูกมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์ชนิด continuous-wave laser (CW laser) จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 20 GHz เพื่อทำ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ ส่วนภาครับประกอบด้วย optical splitter ทำหน้าที่แยกกำลังสัญญาณและตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN

2.4.2 การมอดูเลตเชิงมุม

การมอดูเลตเชิงมุมที่นิยมใช้ในการส่งสัญญาณแสง คือ DPSK และ DQPSK ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่เก็บข้อมูลบิตไว้ที่ความแตกต่างของเฟสของสัญญาณ รูปที่ 2.13 แสดงผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ในโดเมนเวลาจะพบว่าเมื่อต้องการส่งข้อมูลบิต 0 เฟสของสัญญาณจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อต้องการส่งบิต 1 เฟสของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไป π ซึ่งการเก็บข้อมูลที่ความแตกต่างของเฟสของสัญญาณทำให้ในการรับสัญญาณไม่จำเป็นต้องใช้เฟสอ้างอิงเหมือนกับการส่งสัญญาณแบบ BPSK ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลบิตไปที่เฟสของสัญญาณโดยตรง [44]-[46]

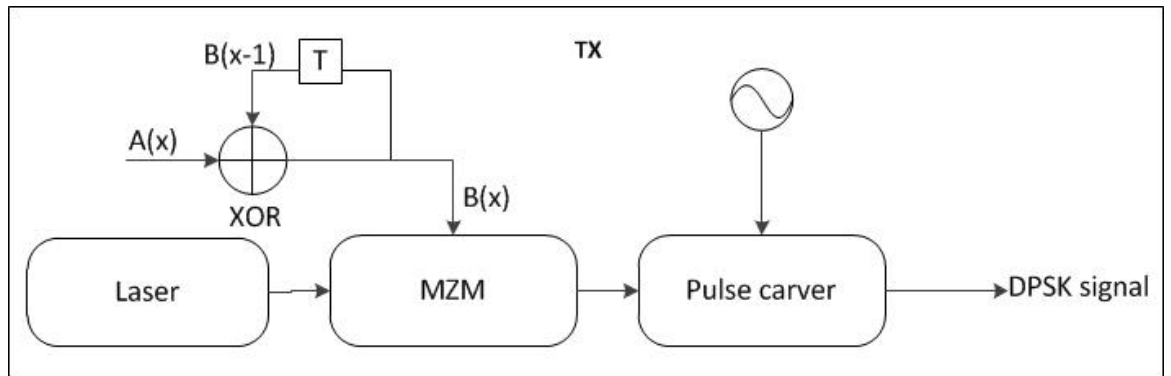


รูปที่ 2.13 แสดงผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK ในโดเมนเวลา



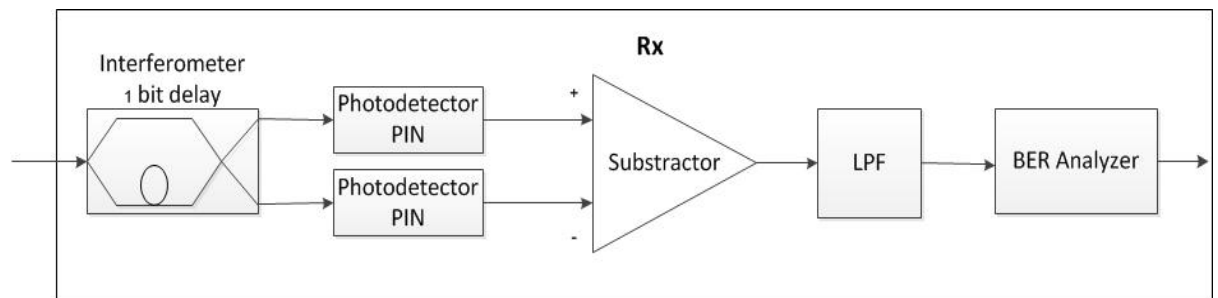
รูปที่ 2.14 การถอดรหัสสัญญาณ DPSK [46]

รูปที่ 2.14 การถอดรหัสสัญญาณ DPSK จะต้องมีการเปรียบเทียบบิตก่อน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ส่งสัญญาณคือ light source ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงที่มีความถี่ที่ต้องการส่งสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2.14 (a) และมี phase modulator ทำหน้าที่เปลี่ยนเฟสของสัญญาณไปตามกำลังของสัญญาณไฟฟ้า ในการเปรียบเทียบบิตต้องมีการดีเลย์บิตไป 1 บิตแสดงดังรูปที่ 2.14 (b) แล้วเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.14 (c) และ รูปที่ 2.14 (d) ถ้าเฟสที่เปรียบเทียบต่างกัน 180 องศา หรือ π ข้อมูลที่ถอดรหัสออกมาจะเป็นบิต "1" แต่ถ้าเฟสที่เปรียบเทียบต่างกัน 0 องศาข้อมูลที่ออกมาจะเป็นบิต "0"



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรรภาคส่งแบบ DPSK

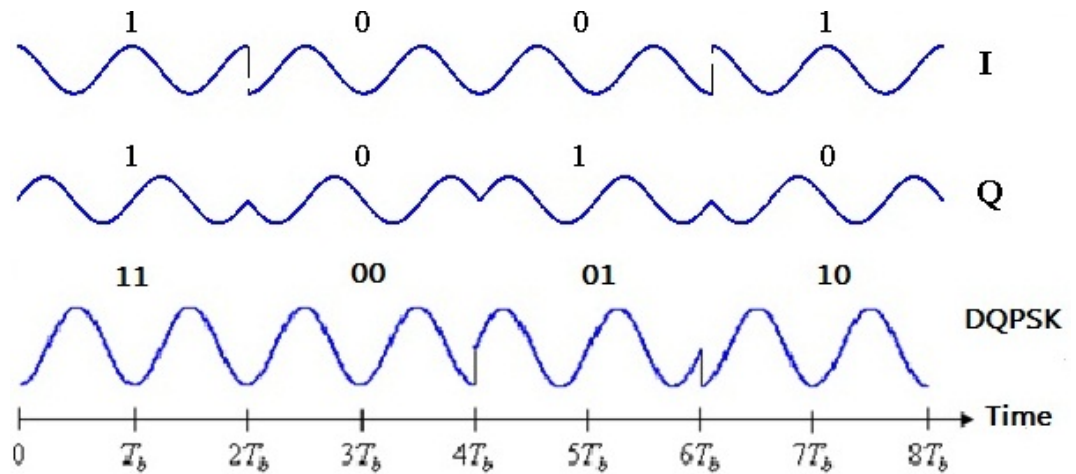
วงจรรภาคส่งของระบบ DPSK แสดงดังรูปที่ 2.15 differential encoder ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแบบ differential ไปมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณจาก CW laser ที่ MZM จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์เพื่อทำ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างวงจรรภาครับแบบ DPSK

วงจรรภาครับแบบของระบบ DPSK แสดงดังรูปที่ 2.16 สัญญาณแสงจะถูกส่งผ่าน interferometer ซึ่งมีหน้าที่แบ่งสัญญาณเป็นสองส่วนและทำให้สัญญาณขาหนึ่งถูก delay ไป 1 บิต หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแยกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN photodetector

รูปที่ 2.17 แสดงผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ในโดเมนเวลาจะพบว่าวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบนี้เก็บข้อมูลที่ความแตกต่างของเฟสของสัญญาณเช่นเดียวกับ DPSK ทำให้ในการรับสัญญาณไม่จำเป็นต้องใช้เฟสอ้างอิง

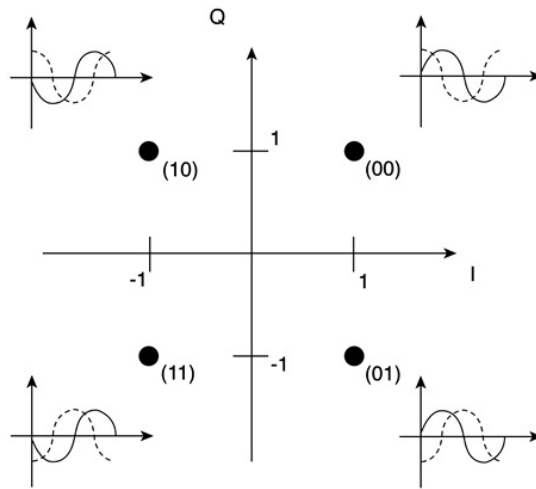


รูปที่ 2.17 แผนภาพทางเวลาของการมอดูเลตแบบ DQPSK [46]

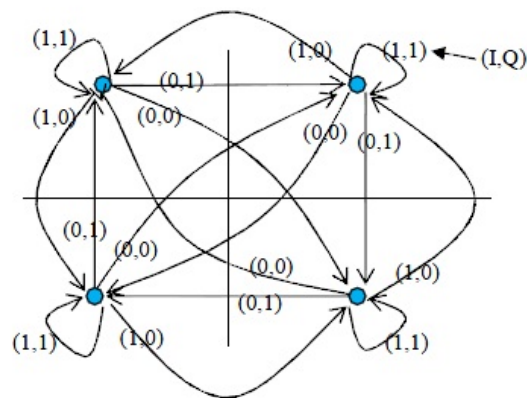
ในการมอดูเลชันแบบ DQPSK เฟสของสัญญาณจะถูก shift ไป 0° , 90° , 180° , -90° เมื่อข้อมูลเป็น '00', '01', '11', '10' ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.19 constellation diagram ของ DQPSK จะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกันกับรูปที่ 2.19 constellation diagram ของ QPSK แต่ต่างที่การ shift เฟสของสัญญาณเท่านั้น วิธีมอดูเลตสัญญาณของ DQPSK ทำเช่นเดียวกับ QPSK คือ การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK บิตข้อมูลของสัญญาณจะถูก encode เข้ากับเฟสของคลื่นพาห์ แอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณจะคงที่ สัญญาณแบบ QPSK แสดงได้ดังสมการที่ (2.19) ซึ่งเมื่อนำสัญญาณที่ถูกมอดูเลตมา map ลงบนระบบแกนพิกัด จะได้ constellation diagram ดังรูปที่ 2.18

$$x(t) = \cos \cos(2\pi f_c t + \theta(k)), kT \leq t < (k+1)T \quad (2.19)$$

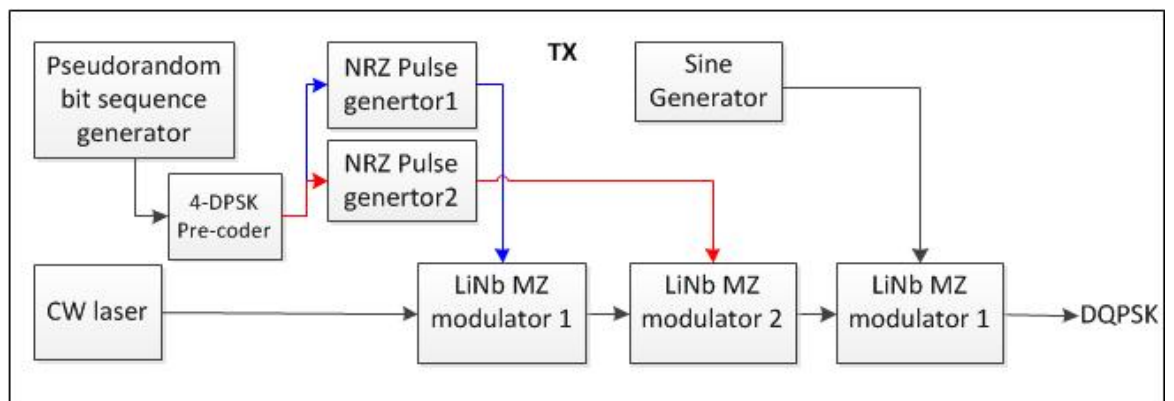
$$\theta(k) = \begin{cases} \frac{\pi}{4} & \text{if } (I(k), Q(k)) = (0,0) \\ \frac{3\pi}{4} & \text{if } (I(k), Q(k)) = (1,0) \\ \frac{5\pi}{4} & \text{if } (I(k), Q(k)) = (1,1) \\ \frac{7\pi}{4} & \text{if } (I(k), Q(k)) = (0,1) \end{cases}$$



รูปที่ 2.18 constellation diagram ของสัญญาณแบบ QPSK [47]

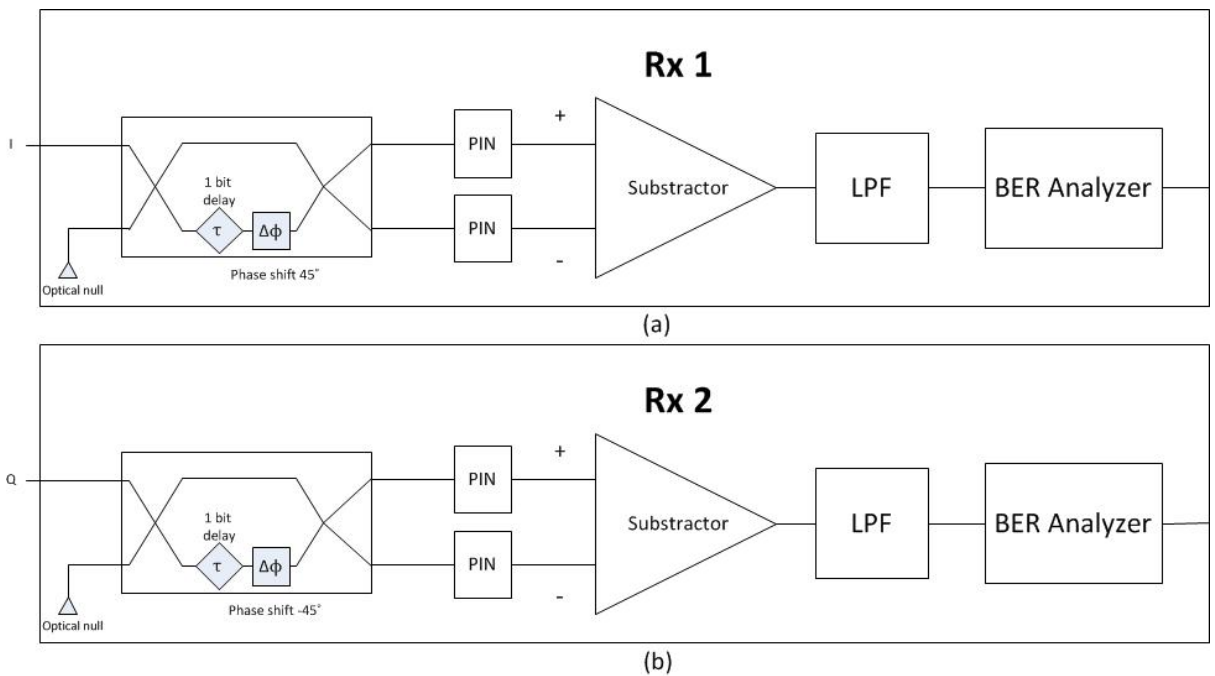


รูปที่ 2.19 แผนผังแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณ DQPSK เมื่อมีสัญญาณขาเข้าแบบต่าง ๆ [48]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างวงจรภาคส่งแบบ DQPSK

โครงสร้างของระบบ RZ-DQPSK PON แสดงดังรูปที่ 2.20 คือสัญญาณแบบ DQPSK จะถูกมอดูเลตแบบ phase modulation เข้ากับ CW laser หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์เพื่อทำ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ ระบบการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ที่ใช้ Mach-Zehnder modulator (MZM) จะถูกขับเคลื่อนด้วยสัญญาณ NRZ โดยสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ in-phase (Ik) และ quadrature phase (Qk) โดย 2 สัญญาณนี้ทำให้เกิดความต่างเฟสซึ่งภาครับจะประกอบด้วย sub-system 1 และ sub-system 2 ซึ่งจะให้สัญญาณออกเป็น I และ Q ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 โครงสร้างวงจรภาครับแบบ DQPSK (a) สัญญาณ In phase (b) สัญญาณ quadrature phase

สัญญาณแบบ in phase และ quadrature phase จะถูกส่งผ่านจากสายสัญญาณมายังวงจรภาครับของระบบ DQPSK แสดงดังรูปที่ 2.21 ประกอบด้วยรูปที่ 2.21 (a) สัญญาณแบบ in phase จะถูกส่งผ่าน coupler ซึ่งสัญญาณจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน โดยจะมีสัญญาณที่ด้านหนึ่งถูกทำให้ delay ไป 1 บิต และถูกเลื่อนเฟสของสัญญาณไป 45 องศา ซึ่งในการ delay สัญญาณไปนั้นทำเพื่อเปรียบเทียบความต่างเฟส หลังจากนั้นสัญญาณแสงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณทาง

ไฟฟ้าโดยใช้ PIN photodiode เพื่อตรวจรับสัญญาณด้วยวิธี balance detection รูปที่ 2.21 (b) สัญญาณแบบ quadrature phase จะถูกส่งผ่าน coupler และแบ่งเป็นสองส่วน โดยจะมีสัญญาณที่ด้านหนึ่งถูกทำให้ delay ไป 1 บิต และถูกเลื่อนเฟสของสัญญาณไป -45 องศา จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN เช่นเดียวกับสัญญาณแบบ in phase ทำให้สามารถถอดรหัสสัญญาณทั้ง in phase และ quadrature phase ของระบบ DQPSK ซึ่งมีจะตำแหน่งบน constellation diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ได้

2.4.3 การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM

QAM คือการผสมสัญญาณการแปลงเฟส (Phase) และขนาด (Amplitude) ของสัญญาณควบคู่กัน ซึ่งถ้าใช้การเปลี่ยนเฟสอย่างเดียว มุมที่เปลี่ยนจะมีค่าน้อยไม่เพียงพอ ทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ถ้าใช้การเปลี่ยนเฟสและขนาดของสัญญาณประกอบด้วย จะทำให้อุปกรณ์ที่ภาครับสามารถแยกความแตกต่างระหว่างสัญญาณของข้อมูลได้ชัดเจน ปกติจะมีการมอดูเลตแบบ QAM หลายรูปแบบเช่น 4-QAM 8-QAM 16-QAM หรือ 32-QAM ทั้งนี้จำนวนบิตข้อมูลที่แสดงสถานะของแต่ละสัญญาณข้อมูลจะมีค่าเท่ากับ n บิต เมื่อรูปแบบของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM สามารถเขียนแทนด้วย 2^n - QAM ตัวอย่างเช่น งานวิจัยนี้เลือกใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ดังนั้นในแต่ละสัญญาณจะมีจำนวนบิตข้อมูลที่แสดงสถานะของแต่ละสัญญาณที่ละ 2 บิต โดยสามารถระบุสัญลักษณ์บิตข้อมูลด้วยเลขเชิงซ้อน (Complex number) และเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM นั้นแสดงใน

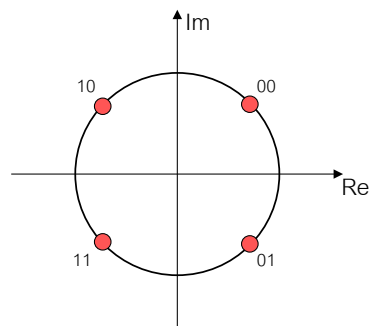
ตาราง 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ

4-QAM และสัญญาณ 4-QAM Constellation ตามลำดับ

ตาราง 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ

4-QAM

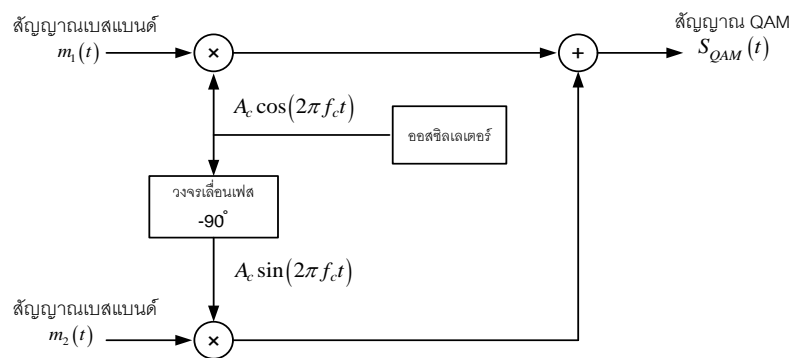
Input data bits	Modulated symbols	Phase(degree)
00	$1+j$	45
10	$-1+j$	135
11	$-1-j$	225
01	$1-j$	315



รูปที่ 2.22 รูป 4-QAM signal Constellation

หากสัญญาณเบสแบนด์สองสัญญาณคือ $m_1(t)$ และ $m_2(t)$ เราสามารถพิจารณาโครงสร้างของวงจรการกำเนิดสัญญาณ QAM ได้ดังแสดงใน รูปที่ 2.22 รูป 4-QAM signal Constellation [49] จากรูปที่ 2.23 แบบจำลองของวงจรรหัสแบบ QAM [49] แสดงสัญญาณเบสแบนด์ทั้งสองถูกป้อนเข้าสู่วงจรคูณกับสัญญาณคลื่นพาห์ 2 คลื่นพาห์ที่มีความถี่เดียวกันแต่มีเฟสต่างกัน -90 องศา จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มารวมกัน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปของสมการ (2.20)

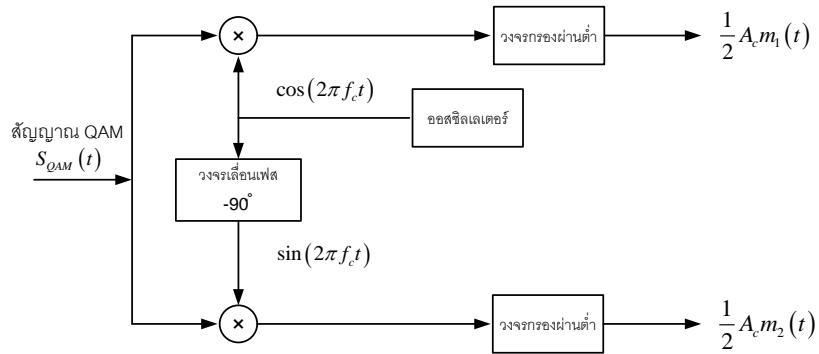
จากสมการสัญญาณ QAM นี้ $A_c m_1(t)$ จะถูกเรียกว่าเป็นองค์ประกอบอินเฟส (In-phase component) และเรียก $A_c m_2(t)$ ว่าเป็นองค์ประกอบควอดเรเจอร์ (Quadrature component)



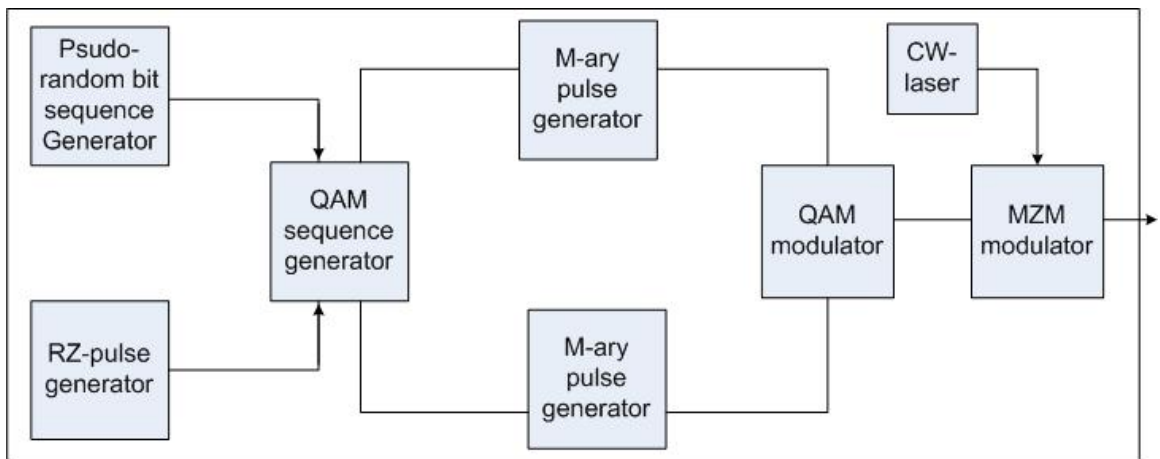
รูปที่ 2.23 แบบจำลองของวงจรรหัสแบบ QAM [49]

$$S_{QAM}(t) = A_c m_1(t) \cos(2\pi f_c t) + A_c m_2(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (2.20)$$

ส่วนวงจรรหัสรับสัญญาณแบบ QAM มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.24 [32] แสดงสัญญาณ QAM ที่ได้ถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกถูกนำไปคูณกับคลื่นสัญญาณ $\cos(2\pi f_c t)$ และนำไปผ่านวงจรกรองผ่านต่ำก็จะได้สัญญาณเบสแบนด์ $\frac{1}{2} A_c m_1(t)$ สำหรับส่วนที่สองนำไปคูณกับคลื่นสัญญาณ $\sin(2\pi f_c t)$ และนำไปผ่านวงจรกรองผ่านต่ำก็จะได้สัญญาณเบสแบนด์ $\frac{1}{2} A_c m_2(t)$ แต่ปัญหาหลักของการดีมอดูเลตสัญญาณ QAM คือการซิงโครไนซ์สัญญาณคลื่นพาห์ที่ทั้งเชิงความถี่และเฟสระหว่างสัญญาณ QAM กับสัญญาณที่กำเนิดจากโคมอลออสซิลเลเตอร์ให้ตรงกันตลอดเวลา มิฉะนั้นจะเกิดการรบกวนกันระหว่างทั้งสองสัญญาณได้

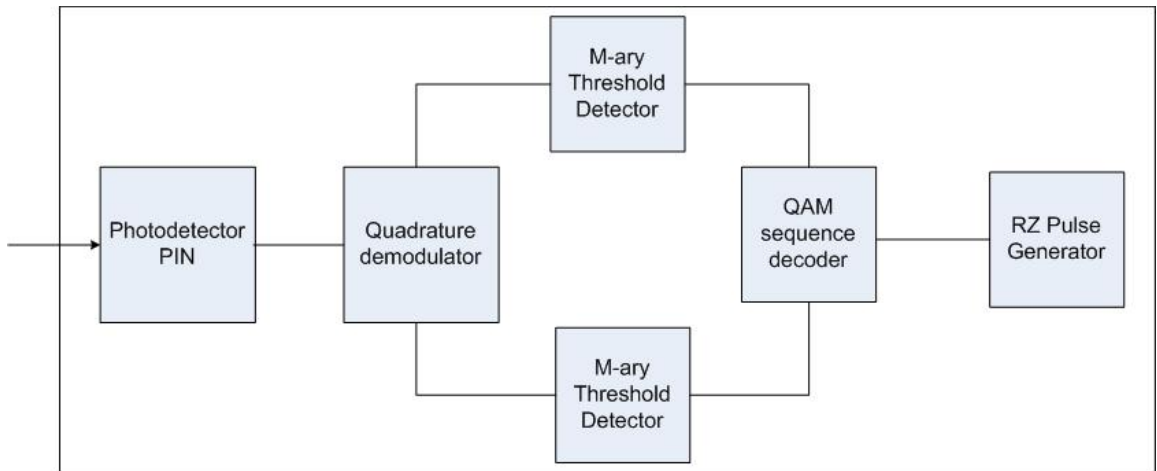


รูปที่ 2.24 แบบจำลองวงจรภาครับแบบ QAM [49]



รูปที่ 2.25 โครงสร้างวงจรภาคส่งแบบ QAM

วงจรภาคส่งของระบบ QAM แสดงดังรูปที่ 2.25 QAM sequence generator ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ I และ Q ไปมอดูเลตสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณแบบ QAM ที่ QAM modulator จากนั้นมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณจาก CW laser ที่ MZM สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว



รูปที่ 2.26 โครงสร้างวงจรภาครับแบบ QAM

วงจรภาครับของระบบ QAM แสดงดังรูปที่ 2.26 สัญญาณแสงจะถูกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN photodetector จากนั้นสัญญาณแสงที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจะถูกส่งผ่าน quadrature demodulator ได้สัญญาณเป็น I และ Q ส่งไปยัง M-ary threshold detector ซึ่งมีหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ (multilevel pulse) ให้เป็นสัญญาณแบบ M-ary สัญญาณสองส่วนจะถูกรวมและเข้าสู่ QAM sequence decoder เพื่อถอดรหัสสัญญาณแบบ M-ary ให้เป็นสัญญาณสองระดับ

2.5 Link Power Budget

ในการหาระยะทางให้บริการไกลสุดของ PON หาได้จากการค่าอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงทั้งหมดระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแสงที่ยอมรับได้หรือเรียกว่า link power budget ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างกำลังต่ำสุดของตัวส่งสัญญาณและค่ากำลังสูงสุดของตัวรับสัญญาณ (ในกรณีนี้ที่แย่ที่สุด) ในการออกแบบระบบ PON นั้นจะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน link power budget ซึ่งสามารถคำนวณ link power budget ได้จากสมการที่ 22

$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum l_c + \sum l_s + \sum l_{other} + G_{margin} \quad (2.21)$$

P_T	คือ ค่า link power budget ทั้งหมด [dBm]
P_{Tx}	คือ ค่ากำลังของสัญญาณที่ตัวส่งสัญญาณแสง [dBm]
P_{Rx}	คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสง [dBm]
α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแสง [dB/km]
L	คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ [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]

โดยมาตรฐานของ PON ได้กำหนดระดับ (class) ของค่า link power budget ไว้เพื่อใช้ในการเลือกออกแบบระบบ PON ได้อย่างเหมาะสมกับงบประมาณในการสร้างโครงข่ายหรือคุณภาพของการให้บริการ โดย class ในการออกแบบ link power budget ของมาตรฐาน GPON [50] แสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ค่า link power budget ของ PON

Class	link power budget(dB)
A	20
B	25
C	30

หมายเหตุ system margin เป็นค่าที่บวกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อ [51]

- ทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเข้าไปในระบบได้

- เพื่อรองรับการ splice เส้นใยแสงเพิ่มกรณีซ่อมบำรุง
 - เพื่อรองรับการขยายหรือเพิ่มเส้นใยแสงในอนาคต
 - เพื่อให้สามารถรองรับการเพิ่มความเร็วในการส่งและรองรับการมอดูเลตขั้นสูงได้
- การบวกค่า system margin ไม่ได้มีกฎที่แน่นอน แต่อย่างน้อยที่สุดค่า system margin ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 dB หรืออาจมีค่าได้มากถึง 8-10 dB ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ [52]

2.6 เทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากปัญหาดิสเพอร์ชันสามารถแก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟที่เรียกว่า หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion-compensating unit : DCU) ซึ่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันภายในประกอบด้วยเส้นใยแสงที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้หักล้างค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SMF เส้นใยแสงที่อยู่ด้านในนั้นถูกเรียกว่า dispersion-compensating fiber (DCF) ที่สามารถปรับค่าดิสเพอร์ชันให้สามารถหักล้างกับค่าดิสเพอร์ชันสะสมของเส้นใยแสงประเภทโหมดเดียวได้ เส้นใยแสงดังกล่าวคือ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. non slope compensated dispersion compensating unit (NS-DCU) เครื่องหมายของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU กับเครื่องหมายของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ SMF มีค่าเป็นบวกเหมือนกัน
2. slope compensated dispersion compensating unit (SC-DCU) เครื่องหมายของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ SC-DCU มีค่าเป็นลบตรงข้ามกับเครื่องหมายของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ SMF ซึ่งมีค่าเป็นบวก

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันสามารถทำได้โดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (23)

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \quad (2.22)$$

โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ

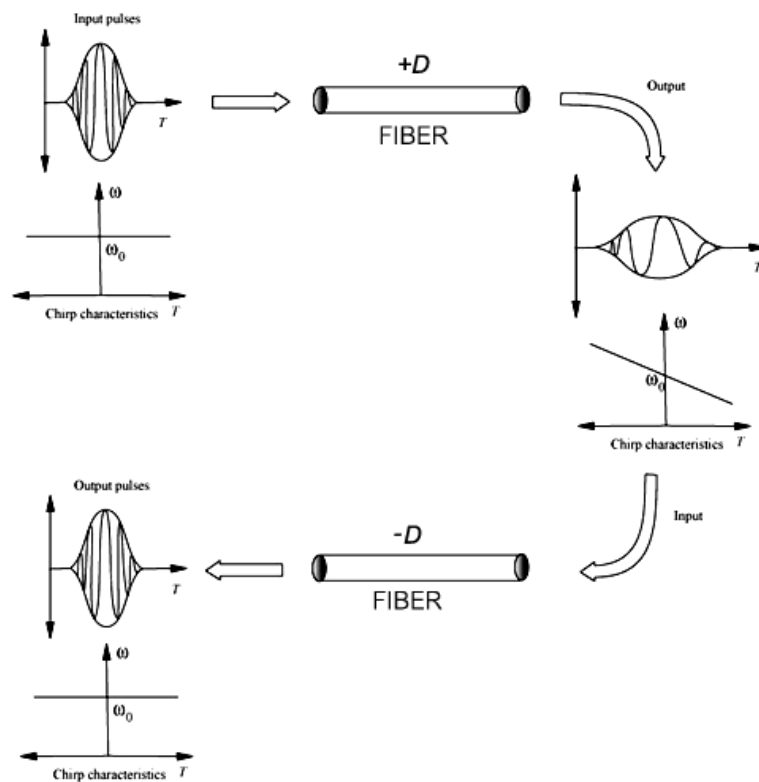
[ps/km/nm]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

[ps/km/nm]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]



รูปที่ 2.27 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [37]

เทคนิคการชดเชยความเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.27 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี D ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า D ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้

การขาดเซย์ดิสเพอร์ชันด้วยวิธีนี้ ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์ที่บางระยะทางแต่ดิสเพอร์ชันมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ทุกจุดตลอดความยาวของเส้นใยแสง

2.7 เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D

เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D ถูกออกแบบให้มีการสูญเสียเนื่องจาก attenuation น้อยที่ความยาวคลื่นของ water absorption (ประมาณ 1382nm) ซึ่งทำให้ช่วงของความยาวคลื่นที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการส่งสัญญาณกว้างขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่ 1310 nm ถึง 1550 nm ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้มี attenuation ต่ำ มีประสิทธิภาพและคุณภาพของสัญญาณมีความเชื่อถือได้สูง คุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.D นั้นคล้ายกันกับคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.B ที่ใช้สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นถึงระดับของ STM-64 เช่น ITU-T Recs G.691 and G.692 หรือ STM-256 สำหรับบางแอปพลิเคชันใน ITU-T Recs G.693 and G.959.1 ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่า Chromatic dispersion ด้วย ทั้งนี้มาตรฐานดังกล่าวสามารถส่งสัญญาณแสงได้เพิ่มขึ้นได้ในช่วงความยาวคลื่น 1360 nm ถึง 1530 nm ซึ่งตาราง 2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.D

ตาราง 2.3 มาตรฐาน G.652.D [53]

Fiber attribute		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 μ m
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu$ m
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μ m
	Tolerance	$\pm 1 \mu$ m
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μ m
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%

Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 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 x km
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm \pm 3 nm	(Note 3)
	Maximum at 1550	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD	0.20 ps/ \sqrt{km}
<p>NOTE 1 – According to 6.2, a maximum PMD_o value on uncabled is specified in order to support the primary requirement on cable PMD_o.</p> <p>NOTE 2 - This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07</p>		

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.

NOTE 3 - The sampled attenuation average at this wavelength shall be less than or equal to the maximum value specified for the range, 1310 nm to 1625 nm, after hydrogen ageing according to IEC 60793-2-50 regarding the B1.3 fiber category.

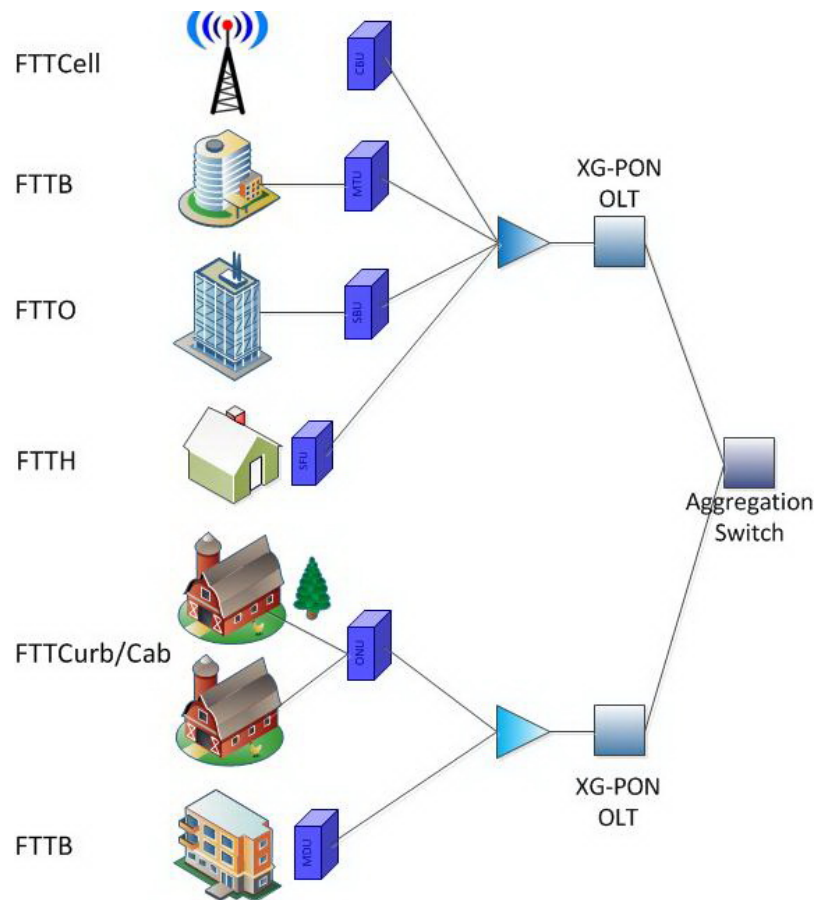
2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx [54]

Fiber-to-the-x (FTTx) เป็นคำที่ใช้เรียกลักษณะโครงสร้างของระบบเครือข่ายความเร็วสูงที่ใช้เส้นใยแสงแทนสายทองแดงทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมดในการเชื่อมระบบเครือข่ายไปยังผู้ใช้บริการ ประกอบด้วย

-fiber-to-the-node (FTTN) และ fiber-to-the-curb (FTTC) เป็นระบบสื่อสัญญาณเชิงแสงที่ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณตลอดโครงข่ายไปสิ้นสุดที่หัวถนนหรือปากทางเข้าหมู่บ้าน จากนั้นจะใช้สายส่งสัญญาณที่เป็นสายทองแดงเพื่อเชื่อมต่อไปยังบ้านผู้ใช้ปลายทางทำให้ระบบมีราคาถูกลง

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

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



รูปที่ 2.28 รูปแบบการส่งสัญญาณระหว่าง central office (CO) ไปยัง Optical Network Unit (ONU) ที่ติดตั้งอยู่ในบ้านผู้ใช้บริการ

รูปแบบการส่งสัญญาณระหว่าง CO ไปยัง ONU ในบ้านผู้ใช้ และการกระจายสัญญาณข้อมูล แสดงดังรูปที่ 2.28 โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องยกเลิกสายโทรศัพท์เดิมเนื่องจากระบบโทรศัพท์เดิมที่ข้อมูลวิ่งอยู่บนเครือข่ายพื้นฐาน Public Switching Telephone Network (PSTN) ยังคงทำงานตามปกติ แม้ว่า CO ของ FTTx จะมีการให้บริการโทรศัพท์ก็ตาม อุปกรณ์ ONU ภายในบ้านประกอบด้วยตัวแยกสัญญาณและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับการต่อเชื่อมเครื่องใช้ไฟฟ้าปลายทาง (เช่น โทรศัพท์ หรือคอมพิวเตอร์ เป็นต้น) เพื่อให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานได้อย่างถูกต้อง โดยปกติการสื่อสารข้อมูลจาก CO ถึงบ้านผู้ใช้หรือการสื่อสารข้อมูลขาลง (downstream) และจากบ้านผู้ใช้ไปยัง CO หรือการสื่อสารข้อมูลขาขึ้น (upstream) จะมีความเร็วแตกต่างกัน [55]

โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx จะมีชุมสายที่เป็นสำนักงานกลาง (CO หรือ Host Digital Terminal: HDT หรือ Head End: HD) ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับสัญญาณการให้บริการไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในเขตควบคุมของ CO รวมทั้งเชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับระบบโครงข่ายสื่อสารเพื่อรับส่งข้อมูลไปยังส่วนต่างๆ ตามความต้องการของผู้ใช้

ภายในชุมสายจะมี Optical line terminal (OLT) เป็นอุปกรณ์รับสายเส้นใยแสงในฝั่งโครงข่ายที่จะติดตั้งในตึกชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้ในชุมสายจะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่สำหรับการประมวลสัญญาณ เช่น ตัดต่อหรือสลับสาย (switching) จัดหาเส้นทางการเดินทางของข้อมูล (routing) และอื่นๆ ตามที่จำเป็น สำหรับช่วงเส้นทางระหว่างชุมสายกับบ้านผู้ใช้บริการ เป็นงานข่ายสายตอนนอก ระหว่างทางจาก OLT ไปสู่ ONU มีอุปกรณ์แยกสัญญาณซึ่งก็คือ passive optical splitter เส้นทางระหว่างชุมสายกับบ้านผู้ใช้บริการ ประกอบด้วยเส้นใยนำแสงเชื่อมโยงไปยังกลุ่มบ้านผู้ใช้บริการในลักษณะของการกระจาย (distribution) ไปยังชุมชนเข้าสู่บ้านผู้ใช้ตามลำดับ ส่วนปลายของเส้นใยนำแสงที่อยู่ภายในบ้านของผู้ใช้ จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ ONU หรือ Optical Network Termination (ONT) ทำหน้าที่กระจายสัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสงและไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ใช้งาน ภายในบ้าน เช่น โทรศัพท์ โทรทัศน์ โทรสารหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้อาจมีได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ขึ้น อยู่กับกับปริมาณข้อมูล (ความเร็ว) ความต้องการใช้บริการ และรูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ (Operator)

2.9 มาตรฐานของระบบ FTTx-PON [56]

โปรโตคอลสื่อสัญญาณผ่าน FTTx มีอยู่ด้วยกันในปัจจุบันสองโปรโตคอลคือ asynchronous transfer mode (ATM) ของ ITU และ Ethernet ของฝ่าย IEEE มาตรฐานจำนวน 4 มาตรฐานที่ถูกประกาศใช้แล้วแสดงดังตาราง 2.4 GPON (ITU-T G.984) ใช้โปรโตคอล GEM ในการส่งสัญญาณอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุด 2.5 Gbps ระยะการให้บริการมากกว่า 20 km , GEAPON (IEEE 802.3ah) ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ อัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุด 1.25 Gbps ระยะการให้บริการมากที่สุด 20 km, 10GEPON: IEEE 802.3av ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ อัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุด 10 Gbps, XG-PON (ITU-T G.987) ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ อัตราข้อมูล downlink 10 Gbps และ uplink 2.5 Gbps ระยะการให้บริการ 20 km ขึ้นไป

ตาราง 2.4 มาตรฐานของPON

	BPON	GPON	EPON	10GEPON	XGPON
Standard	ITU G.983	ITU G.984	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.987
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	2.5Gbps
Downstream wavelength	1480~1500nm	1480~1500nm	1500nm	1575-1580 nm	1575-1580 nm
Upstream wavelength	1260~1360nm	1260-1360nm	1310nm	1260-1280 nm	1260-1280 nm
Layer 2 support	ATM	Ethernet over GEM and/or ATM	Ethernet	Ethernet	Ethernet over GEM
Maximum PON splits	32	64	16	32	64
Distance	<20km	60km (max)	<20km	<20km	20km

บทที่ 3

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของระบบ FTTx PON

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างของระบบ FTTx PON และได้อธิบายถึงวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK DPSK DQPSK และ QAM สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 จะอธิบายถึงการคำนวณหาระยะทางสูงสุดทางทฤษฎีของระบบ FTTx PON และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเชิงทฤษฎีที่ส่งผลต่อค่า BER ของระบบ รวมถึงแนวทางในการออกแบบระบบ PON ให้มีสมรรถนะสูงสุด

ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เส้นใยแสงชนิด SMF ในระบบใช้ค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงที่มีความยาวคลื่น 1552.52 nm ตามมาตรฐาน G652.D โดยใช้สายเส้นเดียวที่ไม่มีการเชื่อมต่อสาย (splice) ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ตามที่มีใช้จริงตามท้องตลาด และการคำนวณพารามิเตอร์พื้นฐานดังนี้

คำนวณค่าดิสเพอร์ชันของระบบที่ความยาวคลื่น 1552.52 nm ตามสมการที่ (3.1) [37]

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (3.1)$$

$D(\lambda)$ คือ ดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น [ps/nm.km]

S_0 คือ zero dispersion slope = 0.087 [ps/nm².km]

λ_0 คือ zero dispersion point = 1310 [nm]

เมื่อแทนค่าในสมการ (3.1) ที่ความยาวคลื่นอ้างอิงเท่ากับ 1552.52 nm จะได้ค่าดิสเพอร์ชันของระบบเท่ากับ 17.224 ps/(km.nm) จากสมการที่ ((3.1) พบว่าค่าดิสเพอร์ชันแปรผันตามกับความยาวคลื่น กล่าวคือ ค่าดิสเพอร์ชันจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวคลื่นมากขึ้น

เนื่องด้วยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาาระบบโครงข่ายเข้าถึง จึงเลือกใช้เส้นใยแสงชนิด G.652.D ซึ่งมีมาตรฐานดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงชนิด G652.D ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ความยาวคลื่น	1310 nm	1552.52 nm
Attenuation (dB/km)	0.325	0.21
Dispersion (ps/nm/km)	0	17.224
Dispersion slope (ps/nm ² /km)	0.087	0.075
Nonlinearity coefficient (m ² /W)	22x10 ⁻²¹	22x10 ⁻²¹
Core effective area (μm ²)	65	65

ในส่วนที่จะกล่าวต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณหาระยะทางสูงสุดที่ให้บริการได้ของระบบ FTTx-PON ที่ถูกจำกัดด้วยผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ได้แก่ ผลของการลดทอนสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

3.1 ผลของการลดทอนสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ

ในกรณีนี้จะศึกษาเพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนสัญญาณ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก link power budget ในสมการที่ (3.2) [57]

$$\Delta P = \alpha L + loss_{splitter} + M \text{ argin} \quad (3.2)$$

โดยที่

ΔP คือ ค่า power budget ของระบบ [dB]

$loss_{splitter}$ คือ ค่ากำลังที่สูญเสียเนื่องจาก power splitter [dB] ดังตาราง 3.2

$M \text{ argin}$ คือ ค่ากำลังที่บวกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อคงระดับประสิทธิภาพการทำงานที่กำหนด [dB]

ตาราง 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแบ่งกำลังต่อค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณ

อัตราการแบ่งกำลังของสัญญาณ	ค่าการลดทอน(dB)
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18
128	21
256	24

เมื่อคำนวณหาค่า L จากสมการที่ (3.2) เมื่อ ΔP เท่ากับ 29 dB ตาม class PR30 ของมาตรฐาน 10G-EPON, α เท่ากับ 0.21 dB/km, $Margin$ เท่ากับ 8 dB และ $loss_{splitter}$ เท่ากับ 6, 9, 12 และ 15 dB เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ ผลการคำนวณจะได้ระยะทางไกลสุดแสดงดังตาราง 3.3

ตาราง 3.3 ระยะการให้บริการสูงสุดของระบบ FTTx-PON ที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ

อัตราการแบ่งกำลังของสัญญาณ	ระยะการให้บริการสูงสุด (km)
4	71.43
8	57.14
16	42.86
32	28.57

3.2 ผลของดิสเพอร์ชัน ที่มีต่อ BER ของระบบ

ในส่วนนี้จะพิจารณาผลของดิสเพอร์ชัน ที่มีต่อการส่งสัญญาณทางแสงแบบ RZ ที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับหนึ่ง เช่น RZ-OOK และ RZ-DPSK บน PON เมื่อสัญญาณแสง

เดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณความกว้างของพัลส์ที่ขยายออกได้จากสมการที่ (3.3) [57]

$$t_{GVD} = DL\sigma_\lambda \quad (3.3)$$

โดยที่

t_{GVD} คือ เวลาของความเร็วในการกระจายตัวของกลุ่ม (group velocity dispersion time)

D คือ ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง [ps/nm/km]

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

σ_λ คือ ความกว้างของสเปกตรัมของเลเซอร์ [nm]

ทั้งนี้ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ RZ ค่าของ t_{GVD} ในสมการที่ (3.3) ควรจะน้อยกว่า 35% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$DL\sigma_\lambda = 0.35 \times T \quad (3.4)$$

โดยที่

T คือ bit period ของสัญญาณแบบ RZ [ps]

กรณีของการส่งสัญญาณแบบ RZ ที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับหนึ่ง ได้แก่การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK และ RZ-DPSK ดังนั้นเมื่อ D เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), σ_λ เท่ากับ 0.1 nm และ T เท่ากับ 25 ps จะสามารถคำนวณหาค่า L ซึ่งเป็นระยะทางไกลสุดของระบบที่ถูกจำกัดด้วยผลของ dispersion จากสมการที่ (3.4) ได้เท่ากับ 5.08 km

กรณีของการส่งสัญญาณทางแสงแบบ RZ ที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับสอง ได้แก่ RZ-DQPSK และ 4-QAM บน PON เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณความกว้างของพัลส์ที่ขยายออกได้จากสมการที่ (3.3) เมื่อแทนค่า D เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), σ_λ เท่ากับ 0.1 nm และ T เท่ากับ 50 ps สามารถคำนวณหาค่า L ซึ่งเป็นระยะทางไกลสุดของระบบที่ถูกจำกัดด้วยผลของ dispersion จากสมการที่ (3.5) ได้เท่ากับ 10.16 km

ทั้งนี้ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ NRZ-OOK ค่าของ t_{GVD} ในสมการที่ (3.3) ควรจะน้อยกว่า 70% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

พิจารณาผลของดิสเพอร์ชัน ที่มีต่อการส่งสัญญาณทางแสงแบบ NRZ เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณความกว้างของพัลส์ที่ขยายออกได้จากสมการที่ (3.3) ทั้งนี้ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ NRZ ค่าของ t_{GVD} ในสมการที่ (3.3) ควรจะน้อยกว่า 70% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$DL\sigma_\lambda = 0.70 \times T \quad (3.5)$$

กรณีของการส่งสัญญาณแบบ NRZ ที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับหนึ่ง ได้แก่ NRZ-OOK, NRZ-DPSK บน PON เมื่อ D เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), σ_λ เท่ากับ 0.1 nm และ T เท่ากับ 25 ps จะสามารถคำนวณหาค่า L ซึ่งเป็นระยะทางไกลสุดของระบบที่ถูกจำกัดด้วยผลของ dispersion จากสมการที่ (3.5) ได้เท่ากับ 10.16 km

กรณีของการส่งสัญญาณทางแสงแบบ NRZ ที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับสอง ได้แก่ NRZ-DQPSK และ 4-QAM บน PON เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะสามารถคำนวณความกว้างของพัลส์ที่ขยายออกได้จากสมการที่ (3.5) เมื่อแทนค่า D เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), σ_λ เท่ากับ 0.1 nm และ T เท่ากับ 50 ps สามารถคำนวณหาค่า L ซึ่งเป็นระยะทางไกลสุดของระบบที่ถูกจำกัดด้วยผลของ dispersion จากสมการที่ (3.5) ได้เท่ากับ 20.32 km

3.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ

นอกจากปัญหา chromatic dispersion ที่ส่งผลให้พัลส์เกิดการขยายตัวแล้ว ปัญหา PMD ก็ทำให้พัลส์สามารถขยายตัวออกได้เช่นกัน ซึ่งระยะไกลสุดถูกจำกัดด้วยผลของ PMD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.6)

$$\tau_{pol} = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (3.6)$$

โดยที่

τ_{pol} คือ การขยายออกของพัลส์เนื่องจาก PMD

D_{PMD} คือ โหมดการกระจายตัวของดิสเพอร์ชัน [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$]

L คือ ความยาวของสายส่ง [km]

ทั้งนี้ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ RZ ค่าของ τ_{pol} ในสมการที่ (3.6) ควรจะน้อยกว่า 35% ของความกว้างของช่วงคาบบิต (bit period) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.7) [58]

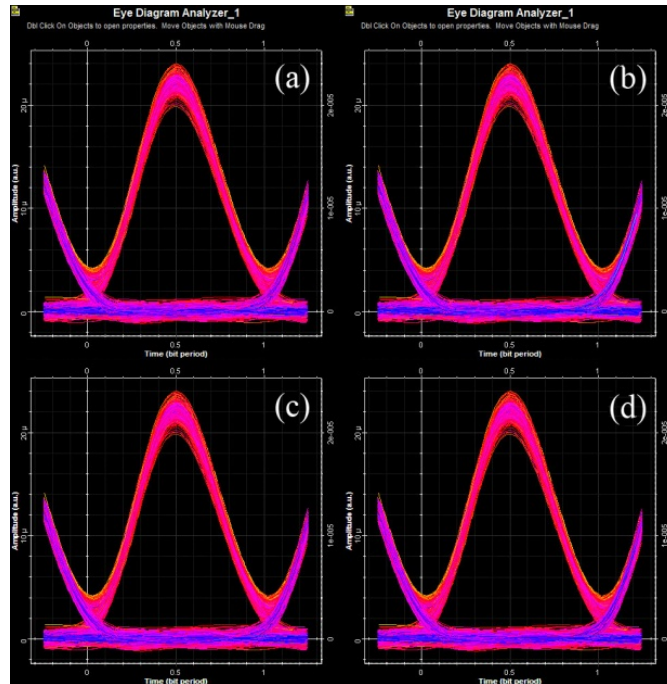
$$0.35 \times T = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (3.7)$$

โดยที่

T คือ bit period ของสัญญาณแบบ RZ [ps]

ดังนั้นเมื่อแทนค่า D_{PMD} เท่ากับ $0.08 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ และ T เท่ากับ 25 ps จะสามารถคำนวณหาค่า L ซึ่งเป็นระยะทางไกลสุดของระบบที่ถูกจำกัดด้วยผลของ PMD ได้เท่ากับ $11,962.89 \text{ km}$ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 6 ที่แสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณ

แสงที่ split ratio เท่ากับ 32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 3.1 (a)-รูปที่ 3.1 (d) แทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น



รูปที่ 3.1 Eye-diagram ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMD

3.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ที่มีต่อ BER ของระบบ

ปัญหาสุดท้ายที่จะพิจารณาคือ ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ทั้งนี้ระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.8) [59]

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (3.8)$$

โดยที่

L_{NL} คือ ความยาวที่ถูกจำกัดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง [km]

P_0 คือ กำลังที่ส่งไปในเส้นใยแสง [W]

γ คือ สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น [W^{-1}/km] ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3.9)[59]

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (3.9)$$

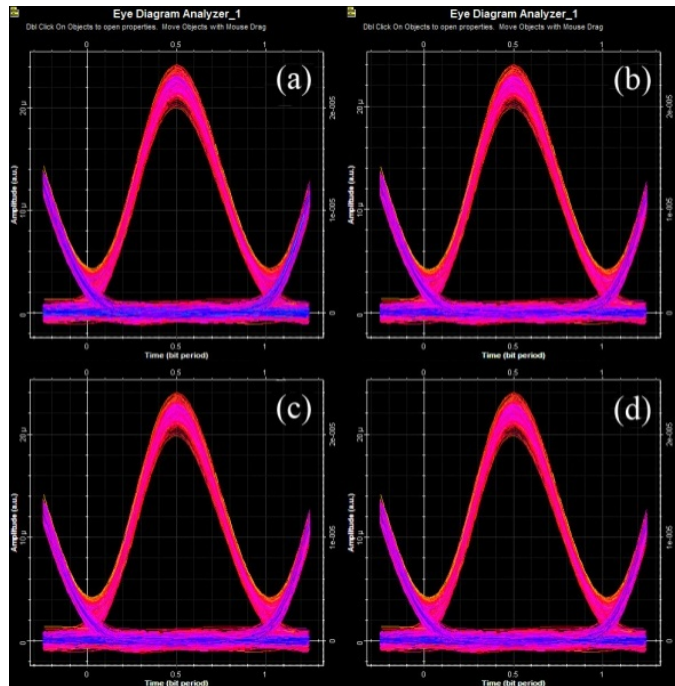
โดยที่

n_2 คือ ดรรชนีหักเหแสงของความไม่เป็นเชิงเส้น [m^2/W]

λ คือ ความยาวคลื่น [nm]

A_{eff} คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ [μm^2]

จากนั้นแทนค่า n_2 เท่ากับ $1.43 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, λ เท่ากับ 1552.52 nm และ A_{eff} เท่ากับ $65 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ ลงในสมการที่ (3.9) จะ ได้ค่าของ γ เท่ากับ $0.8903 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ และนำค่า γ ไปแทนในสมการที่ (3.8) เมื่อ P_0 เท่ากับ 9 dBm หรือ 7.943 mW จะได้ระยะทางไกลสุดถูกจำกัดด้วยผลของ non-linear effect ได้เท่ากับ 141.41 km สอดคล้องกับ รูปที่ 3.2 ซึ่งแสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 3.2(a)-รูปที่ 3.2(d) แทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณใดๆเกิดขึ้น



รูปที่ 3.2 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสง เป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ non-linear effect

3.5 ประสิทธิภาพสเปกตรัมของระบบ

ประสิทธิภาพสเปกตรัมหรือประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ หมายถึงอัตราข้อมูลที่สามารถส่งผ่านแบนด์วิดท์ที่กำหนดในระบบการสื่อสารที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการมอดูเลชัน ที่มีการจำกัดคลื่นความถี่ของสเปกตรัม ถูกนำมาใช้โดยโปรโตคอลชั้นทางกายภาพ และบางครั้งโดยการควบคุมการเข้าถึงสื่อ (โปรโตคอลการเข้าถึงช่องทาง)

การเชื่อมโยงของระบบการสื่อสารดิจิทัล ประสิทธิภาพสเปกตรัมจะถูกวัดในหน่วย บิต / วินาที / เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นบิตสุทธิ (อัตราข้อมูลที่ไม่รวมข้อผิดพลาดรหัสแก้ไข) หรือส่งผ่านข้อมูลสูงสุด (maximum throughput) หาด้วยแบนด์วิดท์ในหน่วยเฮิรตซ์ของช่องทางการสื่อสาร อีกวิธีหนึ่งที่สามารถวัดประสิทธิภาพสเปกตรัม จะวัดได้ในหน่วย บิต / สัญลักษณ์ ซึ่งเทียบเท่ากับบิตที่ใช้ต่อหนึ่งช่องทาง (bits per channel use : bpcu) หมายความว่าอัตราบิตสุทธิหารด้วยอัตราบิตสัญลักษณ์ ซึ่งประสิทธิภาพของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ แสดงดังตาราง 3.4

ตาราง 3.4 ประสิทธิภาพสเปกตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ

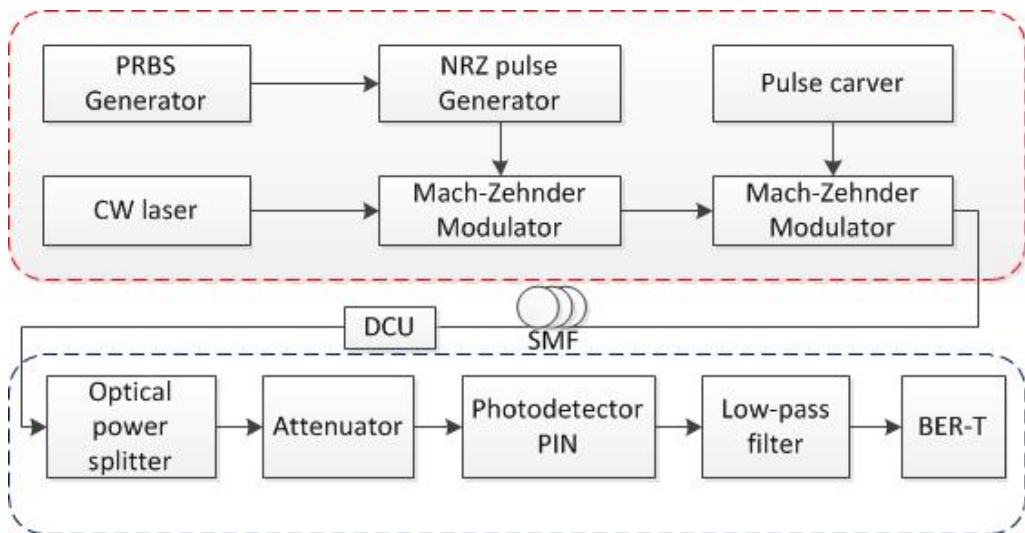
Modulation technique	Spectral efficiency(bit/sec/Hz)
RZ-OOK	0.5
NRZ-OOK	1
RZ-DPSK	0.5
NRZ-DPSK	1
RZ-DQPSK	1
NRZ-DQPSK	2
4-QAM	2
16-QAM	4
64-QAM	6
256-QAM	8

บทที่ 4

โครงสร้างระบบการส่งสัญญาณและการวิเคราะห์ปัจจัยที่จำกัด สมรรถนะของระบบโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทที่ 3 ได้แสดงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ FTTx-PON ในทางทฤษฎี ในแง่ของข้อจำกัดของระบบเนื่องจากผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสง ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ FTTx-PON ด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ รวมไปถึง eye-diagram ของสัญญาณแสง

4.1 โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน PON



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบ RZ-OOK บน PON

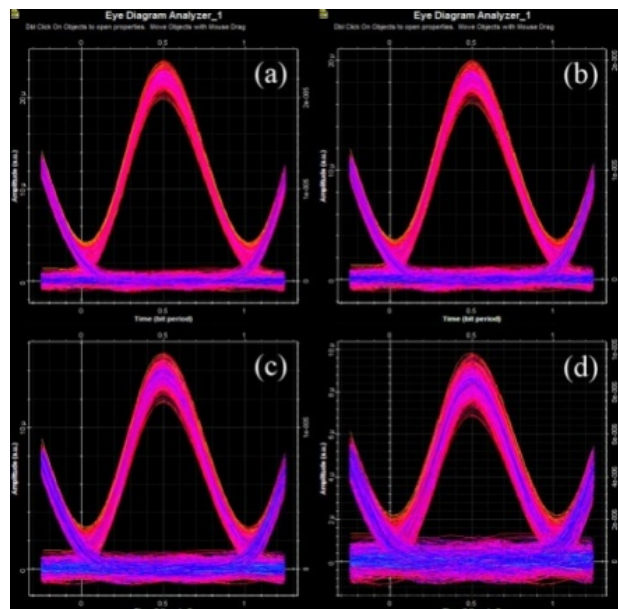
ลักษณะโครงสร้างของระบบ RZ-OOK PON แสดงดังรูปที่ 4.1 กล่าวคือ สัญญาณไฟฟ้าแบบไม่กลับสู่ศูนย์ (non-return to zero: NRZ) ความเร็ว 40 Gbps จะถูกมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์ชนิด continuous-wave laser (CW laser) ที่ความยาวคลื่น 1552.52 nm และมีกำลังส่ง 9 dBm หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้ว จะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 20 GHz เพื่อทำ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ ความเร็ว 40 Gbps [57] จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณ (attenuation coefficient) ที่ความยาวคลื่น 1552.52 nm เท่ากับ 0.21 dB/km, ดิสเพอร์ชัน (dispersion) เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), โหมดการกระจายโพลาไรเซชัน (polarization mode dispersion : PMD) เท่ากับ 0.08 ps/ $\sqrt{\text{km}}$, สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น

(non-linear coefficient) เท่ากับ $0.8903 \text{ w}^{-1}/\text{km}$ ส่วนภาครับประกอบด้วย optical splitter ซึ่งทำหน้าที่แยกกำลังสัญญาณ และ ตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN

4.2 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ RZ-OOK

การทดลองเบื้องต้นจะใช้ CW laser ความยาวคลื่น 1552.52 nm ที่มีกำลังของสัญญาณเท่ากับ 9 dBm และส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเพื่อพิจารณาผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงแต่ละประเภท เพื่อศึกษาว่าพารามิเตอร์ใดเป็นตัวจำกัดสมรรถนะของระบบ ดังนี้

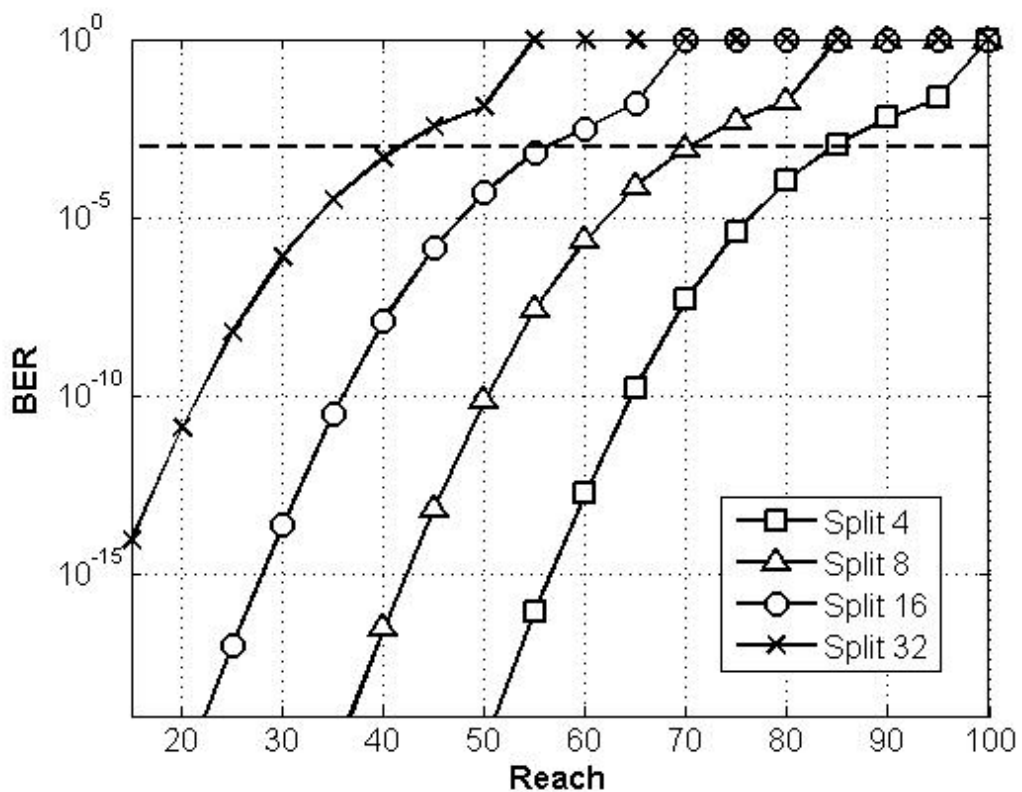
4.2.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ



รูปที่ 4.2 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK

ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 40-Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ปรากฏว่าที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ระบบจะมี BER เท่ากับ 10^{-3} เมื่อส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 45 km โดยมี FEC ทำหน้าที่ตรวจเช็คความผิดพลาดของสัญญาณ ทำให้สามารถตรวจสอบอัตราบิตผิดพลาดได้ดีขึ้น จาก 10^{-3} เป็น 10^{-9}

รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น ที่ระยะทาง 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในช่วง 20 km สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย ผลจากการ simulation เพื่อหาระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยการลดทอนกำลังสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยระยะทางไกลสุดที่พิจารณาที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 85, 70, 55 และ 42 km เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ

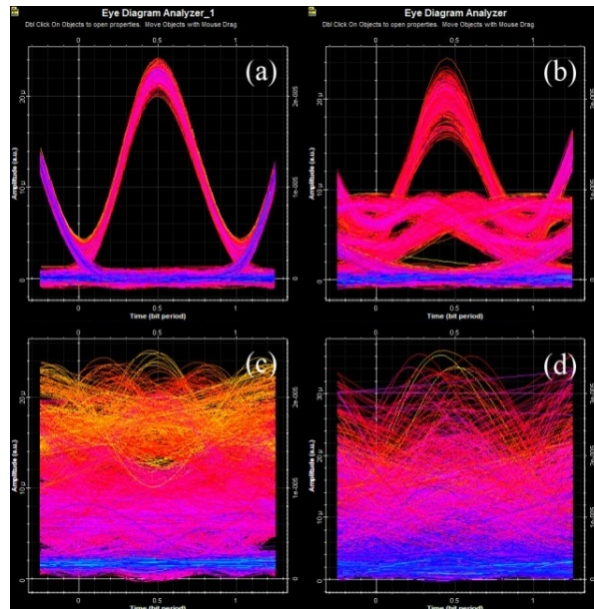


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK

4.2.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ

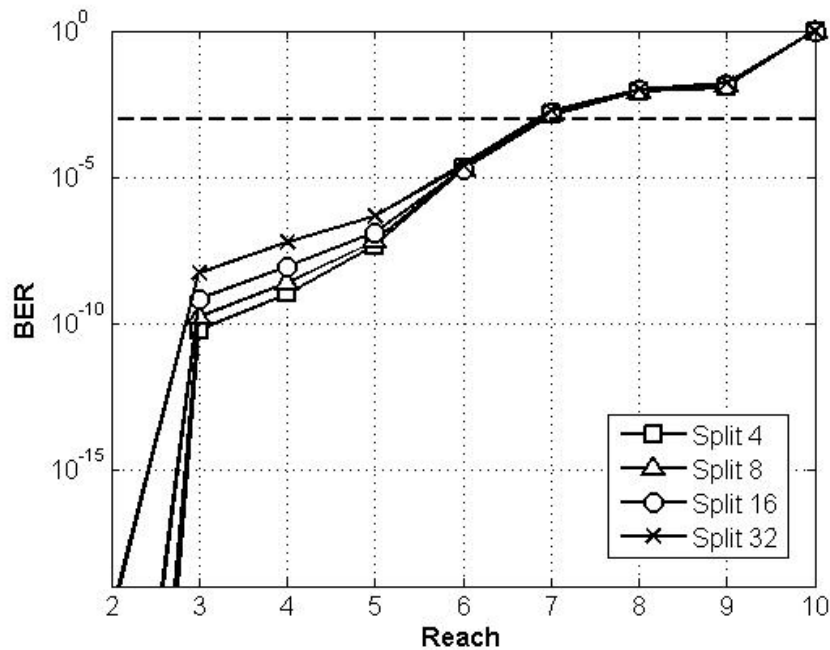
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณ eye-diagram ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาผลของ dispersion เพียงอย่างเดียว เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 4 km พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference : ISI) ดังแสดงในรูปที่ 4.4(b) เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์

dispersion จะทำให้ปัญหา ISI รุนแรงขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.4(c) และ รูปที่ 4.4(d) ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสง เป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK

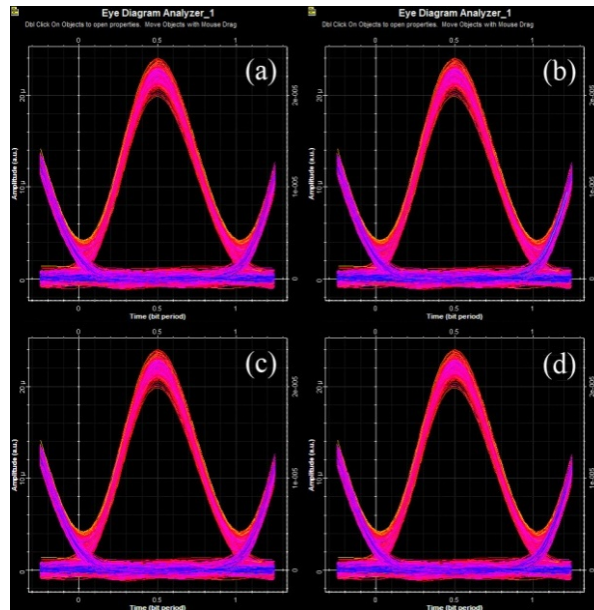
นอกจากนี้ปรากฏการณ์ ISI ทำให้ความกว้างของ eye-diagram ลดลง ส่งผลให้ค่า BER มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 7 km สำหรับทุกค่าของ split ratio โดยผลที่ได้จาก simulation สอดคล้องกับการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงจากสมการที่ ((3.4) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผิดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK

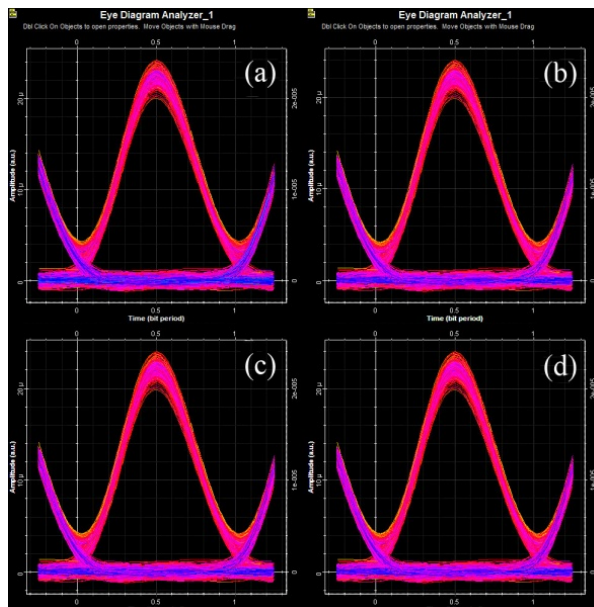
4.2.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ

ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิตเท่ากับ 40 Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ PMD รูปที่ 4.6 ที่แสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 4.6(a)-รูปที่ 4.6(d) แทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า PMD ไม่มีผลต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา



รูปที่ 4.6 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสง เป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMD ของการ มอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK

4.2.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ



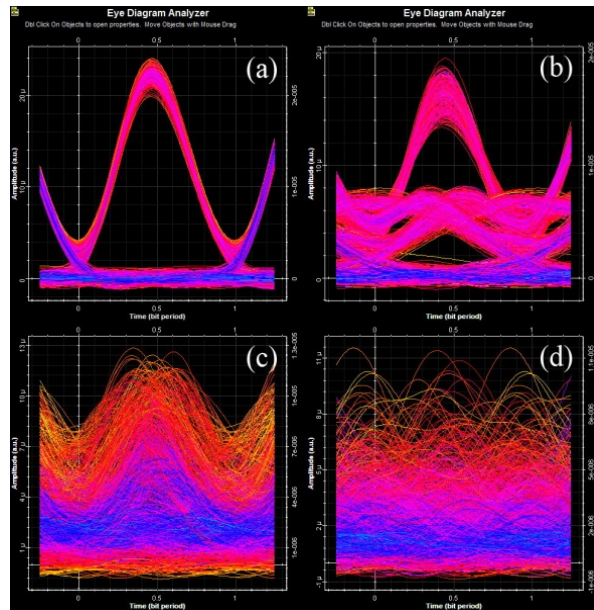
รูปที่ 4.7 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสง เป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้น ของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK

ปัญหาสุดท้ายที่จะพิจารณาคือ ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ทั้งนี้ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 4.7(a)-รูปที่ 4.7(d) แทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณใดๆเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงไม่มีผลต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

4.2.5 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

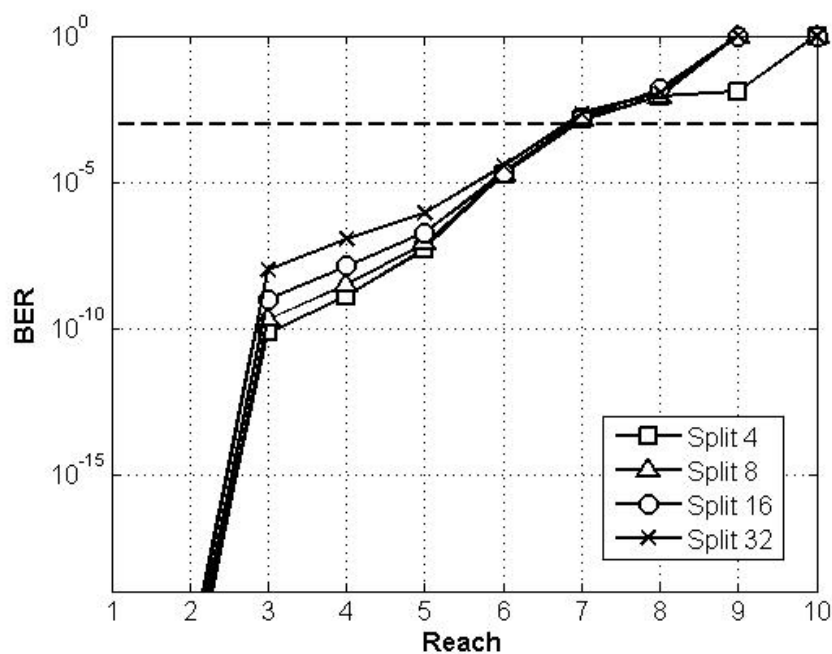
ในส่วนนี้ได้ทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps สำหรับระบบ split ratio เท่ากับ 4, 8, 16 และ 32 เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางต่างกัน เห็นได้ชัดว่าในรูปที่ 4.8 พัลส์จะขยายกว้างออกเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียง นอกจากนี้มีผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณ ที่ทำให้สัญญาณถูกลดทอนและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.8(c) และ รูปที่ 4.8(d) ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ที่ค่า split ratio ต่างๆกับระยะทางส่งสัญญาณที่ได้จากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยค่า BER มากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น ระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} คือ 6.8 km สำหรับทุก split ratio ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยปัญหา dispersion ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่ระยะ 7 km และสอดคล้องกับระยะทางไกลสุด ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.4) เท่ากับ 5.08 km



รูปที่ 4.8 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสง เป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน, PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ

RZ-OOK

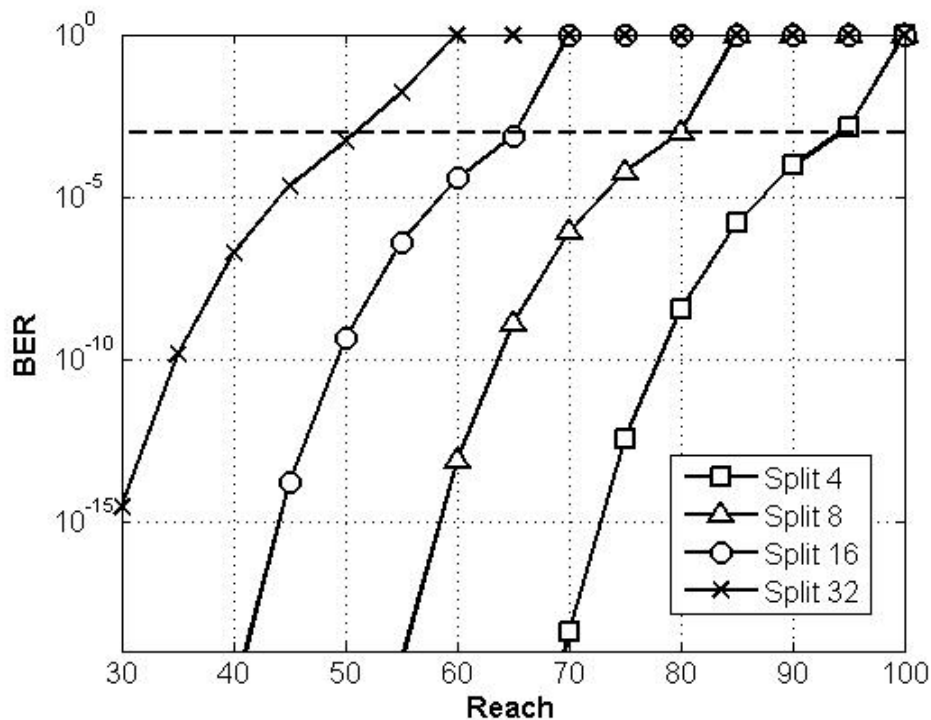


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลของการลดทอน กำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

4.3 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ NRZ-OOK

4.3.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ

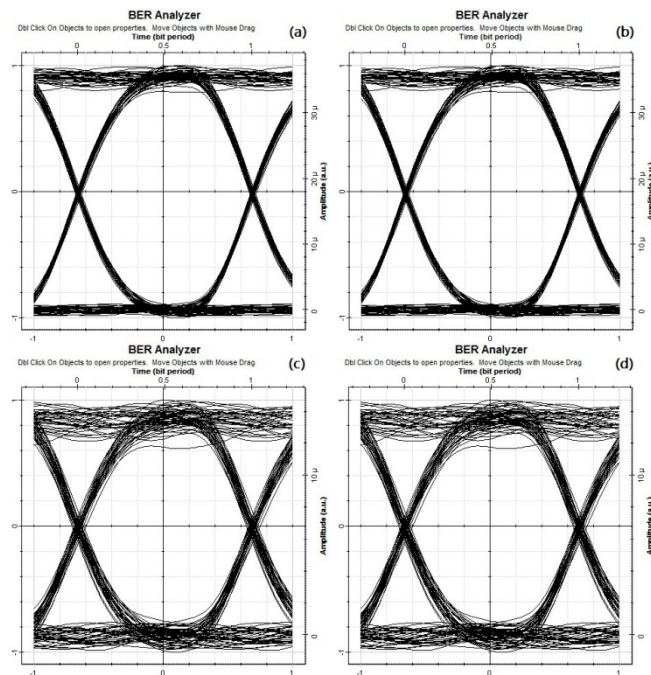
ทำการทดสอบระบบ สำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK ด้วย simulation ที่อัตราข้อมูลเท่ากับ 40-Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ปรากฏว่าที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ระบบจะมี BER เท่ากับ 10^{-3} เมื่อส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 50 km โดยมี FEC ทำหน้าที่ตรวจเช็คความผิดพลาดของสัญญาณ ทำให้สามารถตรวจสอบอัตราบิตผิดพลาดได้ดีขึ้น จาก 10^{-3} เป็น 10^{-9}



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิตผิดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

จากการ simulation เพื่อหาระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยการลดทอนกำลังสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยระยะทางไกลสุดที่พิจารณาที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 95, 80, 65 และ 50 km เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ

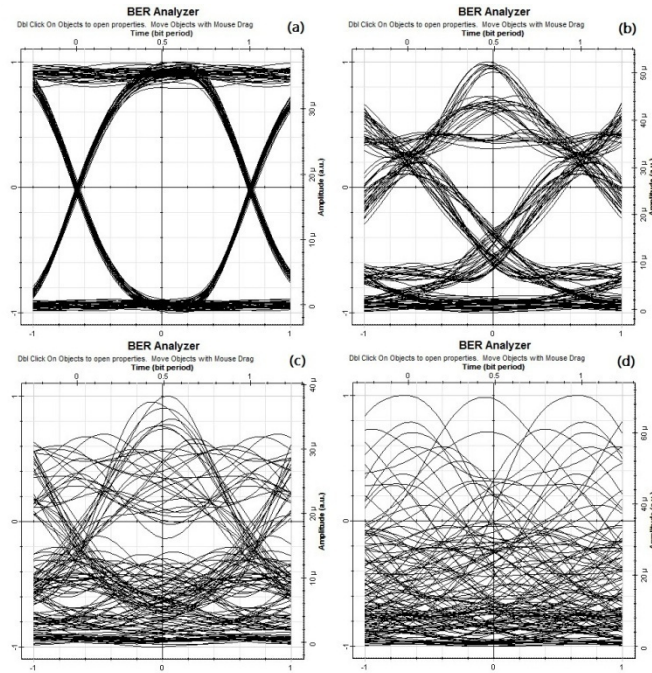
รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น ที่ระยะทาง 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในช่วง 20 km สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย



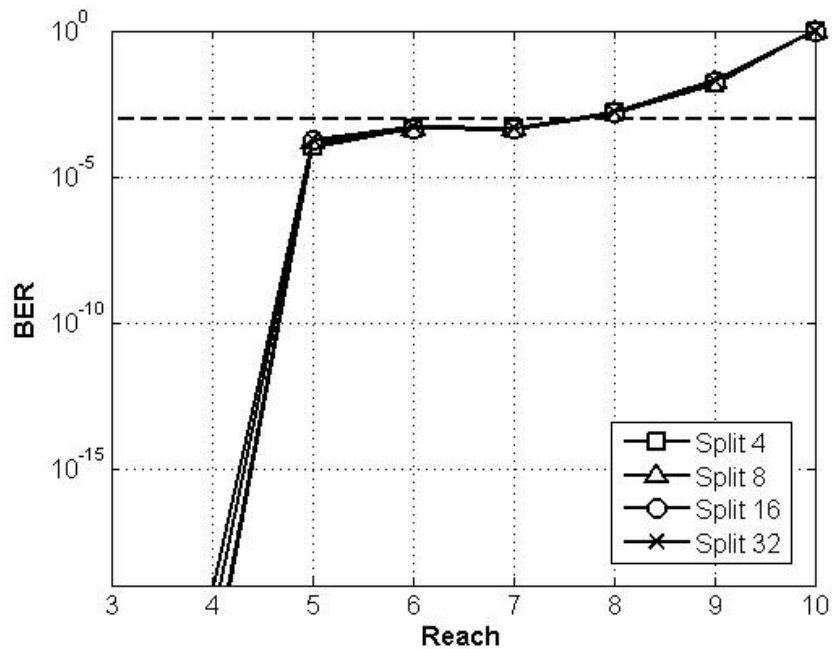
รูปที่ 4.11 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

4.3.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ

รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณ eye-diagram ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาผลของ dispersion เพียงอย่างเดียว เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 7 km พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference : ISI) ดังแสดงในรูปที่ 4.12(b) เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จะทำให้ปัญหา ISI รุนแรงขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.12(c) และ รูปที่ 4.12(d) ตามลำดับ



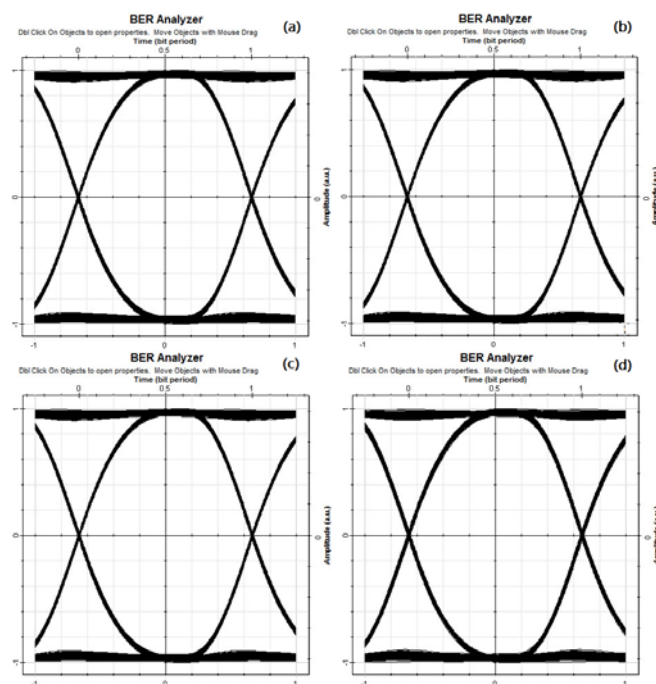
รูปที่ 4.12 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผิดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

ค่า BER มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 6.75 km สำหรับทุกค่าของ split ratio โดยผลที่ได้จาก simulation สอดคล้องกับการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงจากสมการที่ (3.4) ตามลำดับ

4.3.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ



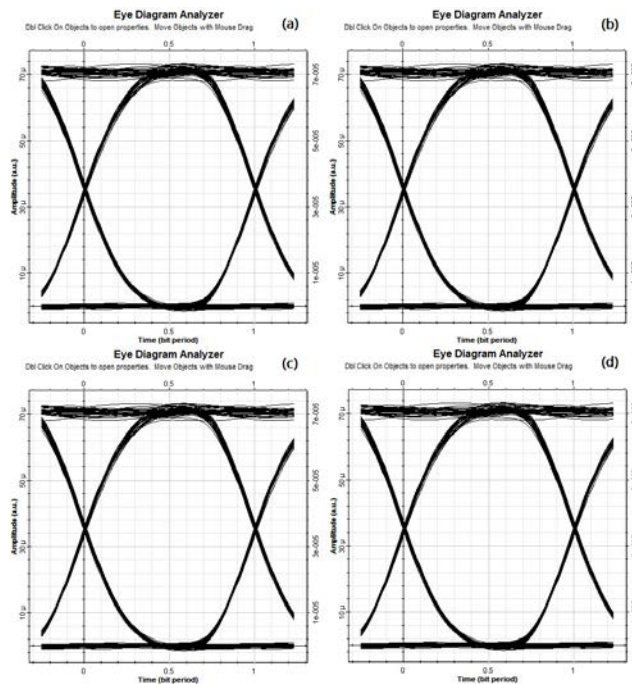
รูปที่ 4.14 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMD ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

PMD เกิดจากการที่องค์ประกอบของแสง 2 โหมดโพลาไรซ์ซึ่งตั้งฉากกัน เดินทางผ่านเส้นใยแสงด้วยความเร็วที่ต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากธรรมชาติของเส้นใยแสง เช่น ความไม่เรียบในบริเวณแกน รวมไปถึงผลกระทบจากภายนอก เช่น การโค้งงอ และการบิดเกลียว ของเส้นใยแสง โดยจะส่งผลกระทบมากในโครงข่ายที่ส่งไปในระยะทางไกล ที่มีอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 10 Gbps จึงได้ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิตเท่ากับ 40 Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางที่ระบบเริ่มถูกจำกัดด้วยผลของ PMD รูปที่ 4.14 ที่แสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า eye-diagram

ในรูปที่ 4.14(a)-รูปที่ 4.14(d) แทบจะไม่มีผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า PMD ไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

4.3.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

นอกเหนือจาก PMD แล้วยังมีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจะเกิดขึ้นเมื่อแสงมี power สูงและมีผลมากในระบบ DWDM ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจะทำให้เกิดการจำกัดการส่งข้อมูลในเส้นใยแสง ความถี่แสงที่ถูกส่งไปด้วยกันจะทำให้เกิดการแทรกสอดกันทำให้เกิดความถี่ขึ้นขึ้นมาซึ่งจะส่งผลให้เกิด cross talk และทำให้คุณภาพสัญญาณแยกลง



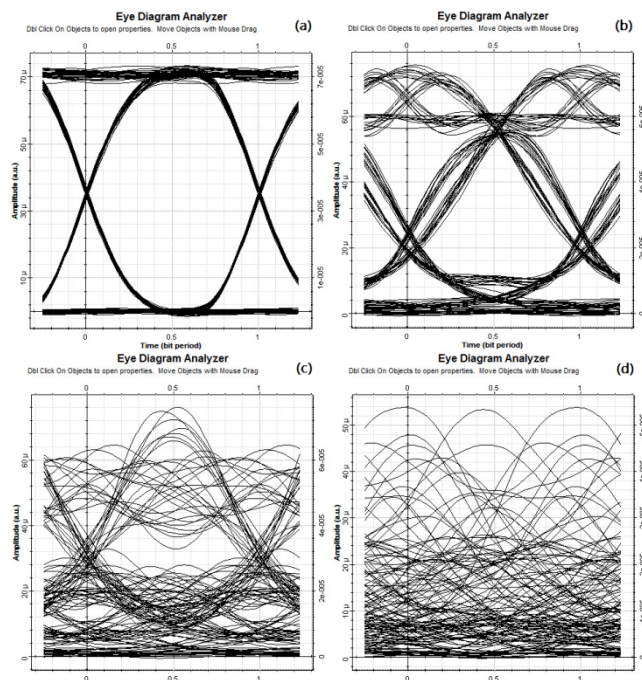
รูปที่ 4.15 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

จากการ simulation ระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วย ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รูปที่ 4.15 ซึ่งแสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูป

ที่ 4.15(a)-รูปที่ 4.15(d) แทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณใดๆเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงไม่มีผลต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

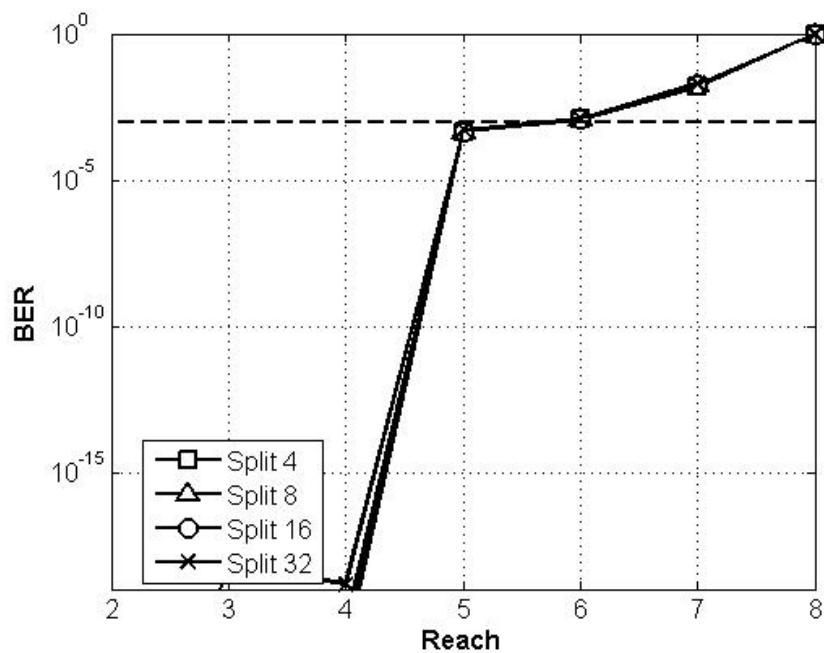
4.3.5 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

ในส่วนนี้ได้ทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps สำหรับระบบ split ratio เท่ากับ 4, 8, 16 และ 32 เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางต่างกัน เห็นได้ชัดว่าในรูปที่ 4.16 (b) พัลส์จะขยายกว้างออกเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียงนอกจากนี้ยังมีผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ที่ทำให้สัญญาณถูกลดทอนและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.16(c) และ รูปที่ 4.16(d) ตามลำดับ



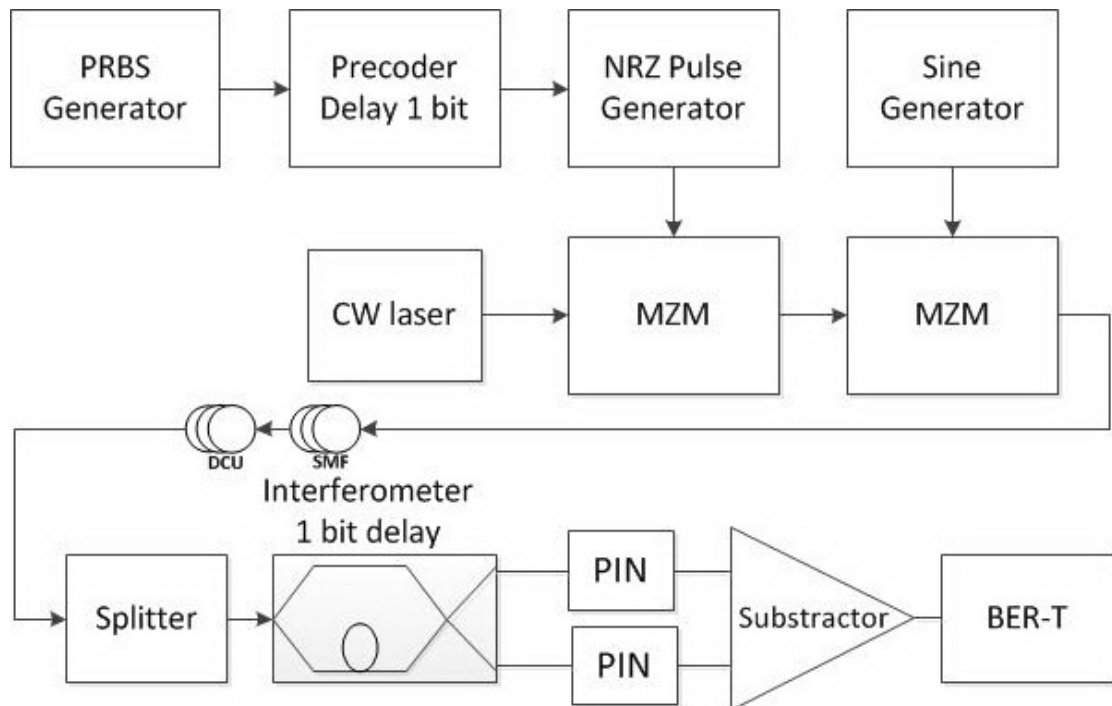
รูปที่ 4.16 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ NRZ-OOK

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ที่ค่า split ratio ต่างๆกับระยะทางส่งสัญญาณที่ได้จากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยค่า BER มากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น และระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} คือ 5.8 km สำหรับทุก split ratio ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางไกลสุดที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.4) เท่ากับ 5.08 km



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

4.4 โครงสร้างของระบบ RZ-DPSK บน PON



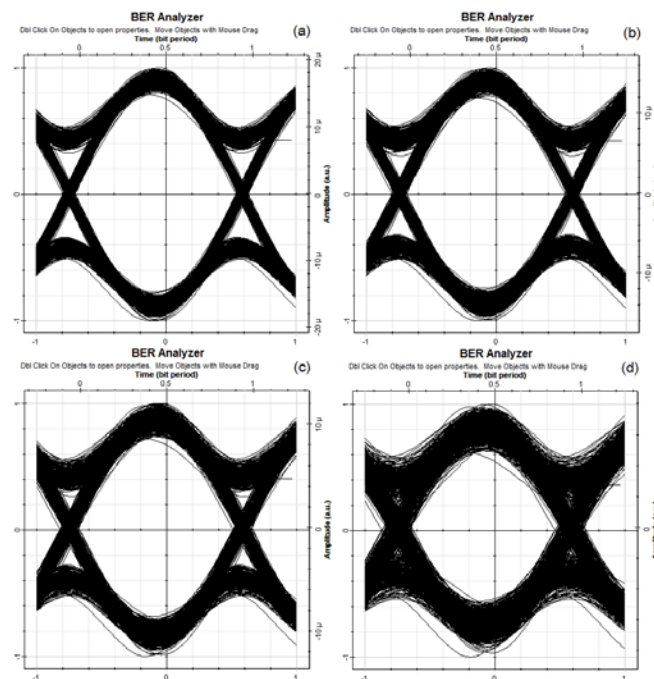
รูปที่ 4.18 โครงสร้างของระบบ DPSK-PON

ลักษณะโครงสร้างของระบบ RZ-DPSK PON แสดงดังรูปที่ 4.18 กล่าวคือ precoder delay 1 bit ซึ่งภายในประกอบด้วย differential encoder ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแบบ differential ความเร็ว 40 Gbps ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ NRZ ไปมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณจากเลเซอร์ชนิด continuous-wave laser (CW laser) ที่ความยาวคลื่น 1552.52 nm และมีกำลังส่ง 9 dBm หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้ว จะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 20 GHz เพื่อทำ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ ความเร็ว 40 Gbps [3] จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation coefficient) ที่ความยาวคลื่น 1552.52 nm เท่ากับ 0.21 dB/km, ดิสเพอร์ชัน (dispersion) เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), โหมดการกระจายโพลาไรเซชัน (polarization mode dispersion : PMD) เท่ากับ 0.08 ps/ $\sqrt{\text{km}}$, สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear coefficient) เท่ากับ 0.8903 w^{-1}/km ส่วนภาครับ สัญญาณแสงจะถูกส่งผ่าน interferometer ซึ่งมีหน้าที่แบ่งสัญญาณเป็นสองส่วนและทำให้สัญญาณขาหนึ่งถูก delay ไป 1 บิต หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแยกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN photodetector

4.5 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ RZ-DPSK

4.5.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ

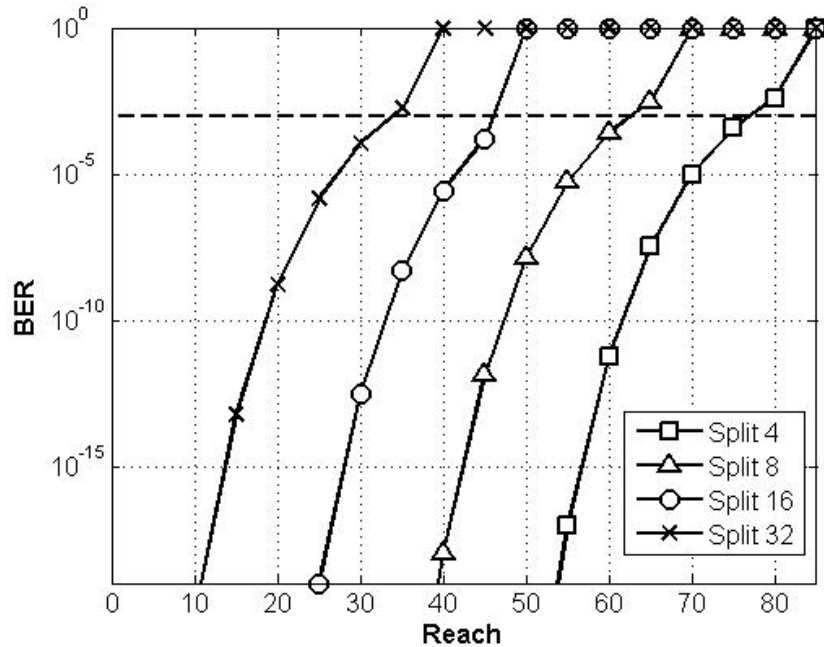
ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิตเท่ากับ 40-Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ปรากฏว่าที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ระบบจะมี BER เท่ากับ 10^{-3} เมื่อส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 35 km โดยมี FEC ทำหน้าที่ที่ตรวจเช็คความผิดพลาดของสัญญาณ ทำให้สามารถตรวจสอบอัตราบิตผิดพลาดได้ดีขึ้น จาก 10^{-3} เป็น 10^{-9}



รูปที่ 4.19 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

รูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น ที่ระยะทาง 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในช่วง 20 km สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย ผลจากการ simulation เพื่อหาระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยการ

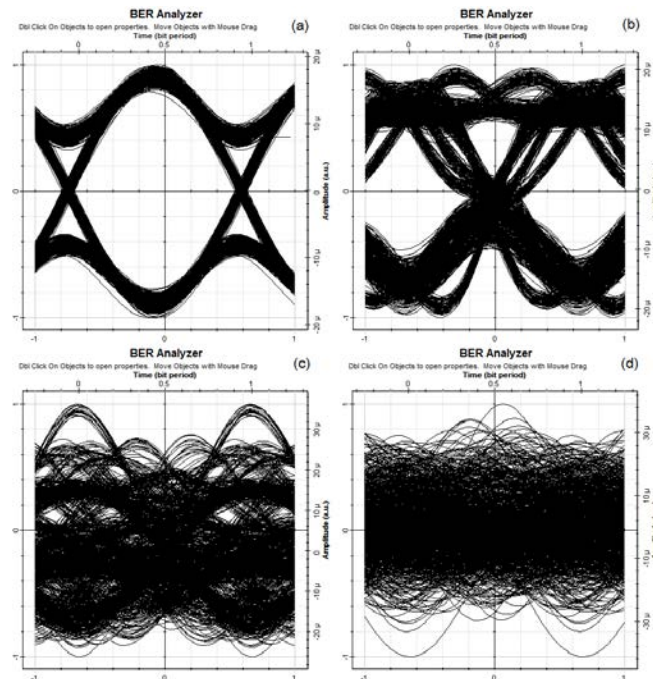
ลดทอนกำลังสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยระยะทางไกลสุดที่พิจารณาที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 77, 63, 46 และ 34 km เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ



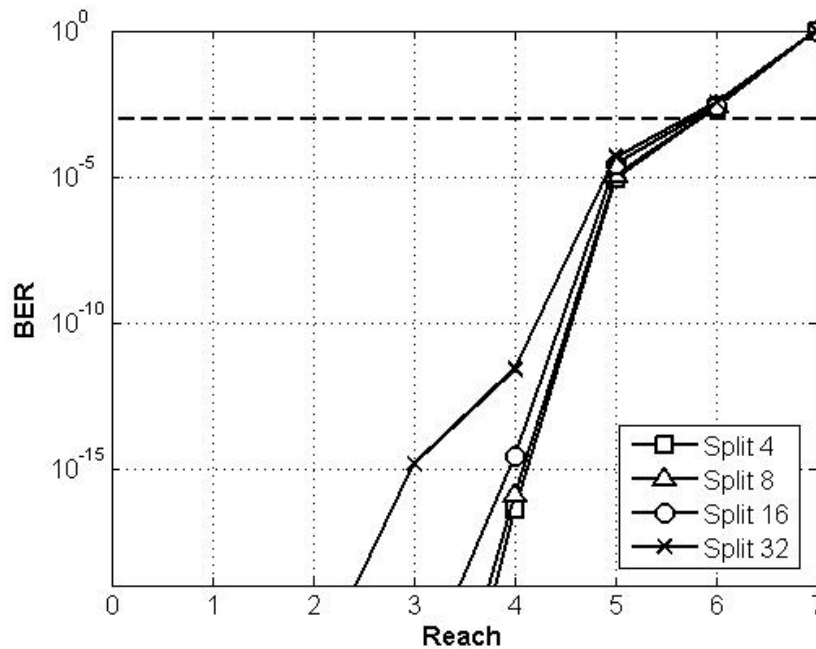
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดผดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

4.5.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ

รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณ eye-diagram ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาผลของ dispersion เพียงอย่างเดียว เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 6 km พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต ดังแสดงในรูปที่ 4.21(c) เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จะทำให้ปัญหา ISI รุนแรงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.21(c) จนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลย แสดงดังรูปที่ 4.21(d)



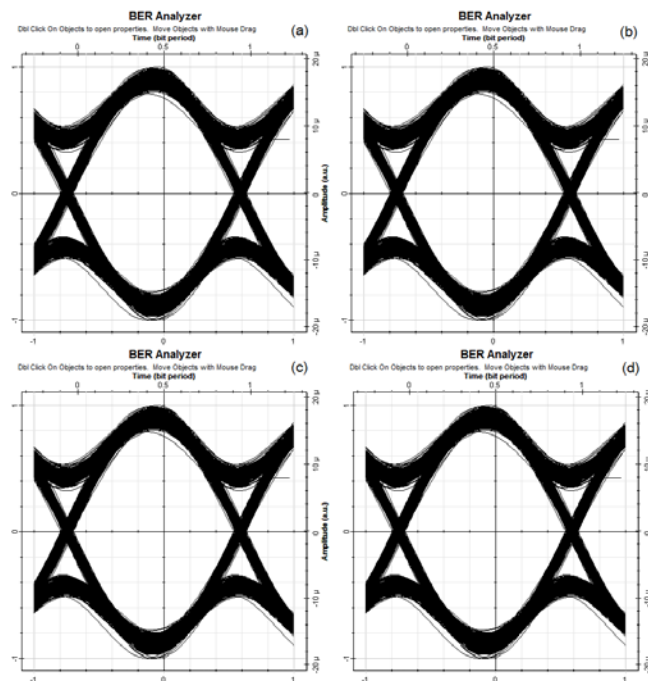
รูปที่ 4.21 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

นอกจากนี้ปรากฏการณ์ ISI ทำให้ความกว้างของ eye-diagram ลดลง ส่งผลให้ค่า BER มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 6 km สำหรับทุกค่าของ split ratio โดยผลที่ได้จาก simulation สอดคล้องกับการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงจากสมการที่ (3.4) ตามลำดับ

4.5.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ

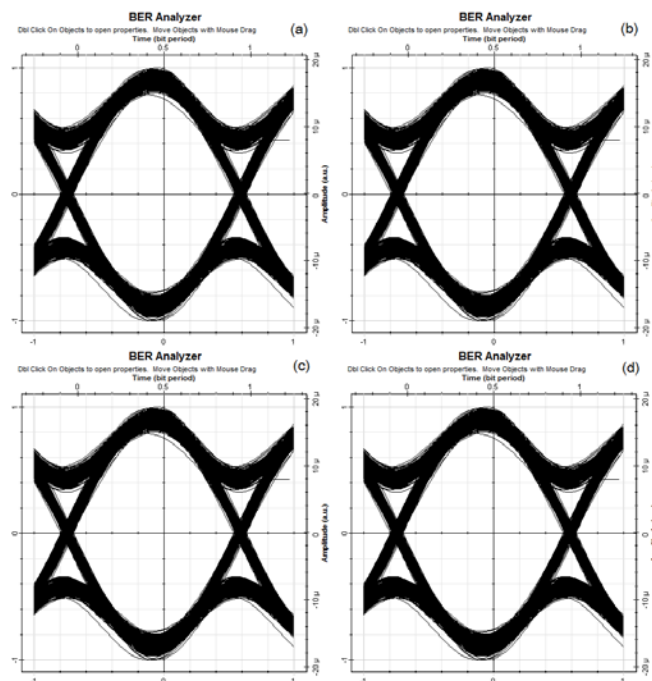


รูปที่ 4.23 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิตเท่ากับ 40 Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ระบบจะถูกจำกัดด้วยผลของ PMD รูปที่ 4.23 แสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า รูปที่ 4.23(a)-รูปที่ 4.23(d) แทบจะไม่มีผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า PMD ไม่มีผลต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

4.5.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 4.24(a)-รูปที่ 4.24(d) แทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณใดๆเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

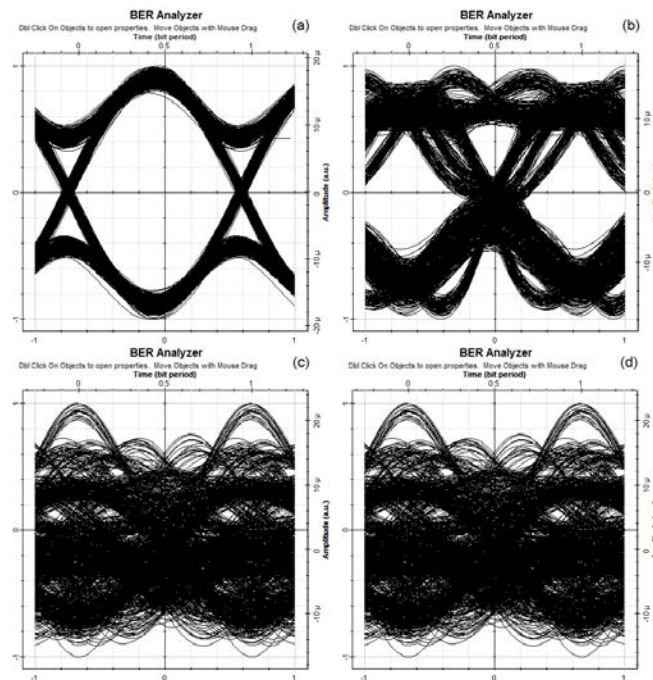


รูปที่ 4.24 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

4.5.5 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

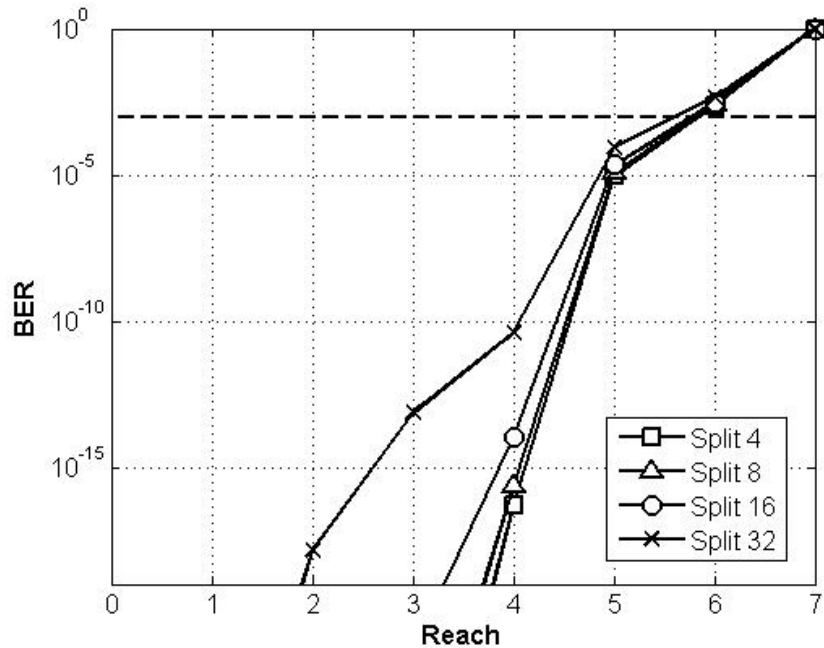
ทดสอบระบบอีกครั้งด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps สำหรับระบบ split ratio เท่ากับ 4, 8, 16 และ 32 เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รูปที่ 4.25 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางต่างกัน

เห็นได้ชัดว่าในรูปที่ 4.25 (b) พัลส์จะขยายกว้างออกเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียงนอกจากนี้มีผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ที่ทำให้สัญญาณถูกลดทอนและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.25(c) และรูปที่ 4.25(d) ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน, PMD และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ที่ค่า split ratio ต่างๆกับระยะทางส่งสัญญาณที่ได้จากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.26 โดยค่า BER มากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น และระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} คือประมาณ 5.5 km สำหรับทุก split ratio ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางไกลสุดที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.4) เท่ากับ 5.08 km

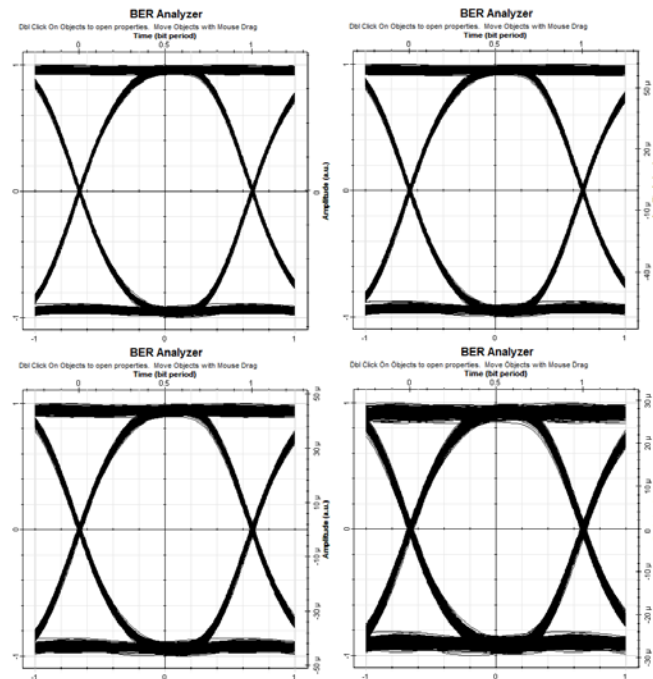


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK

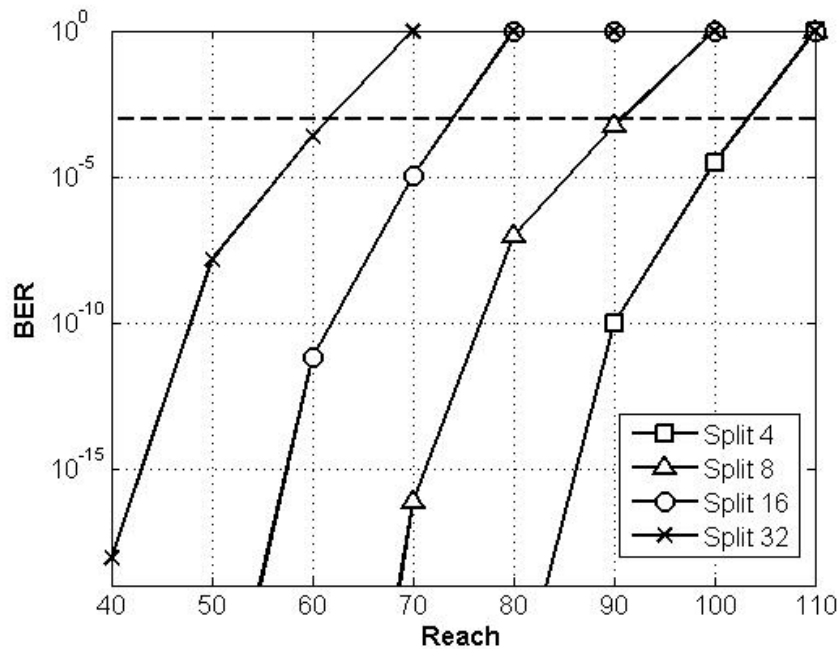
4.6 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ NRZ-DPSK

4.6.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่มีต่อ BER ของระบบ

รูปที่ 4.27 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น ที่ระยะทาง 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในช่วง 20 km สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย ผลจากการ simulation เพื่อหาระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยการลดทอนกำลังสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยระยะทางไกลสุดที่พิจารณาที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 105, 90, 75 และ 62 km เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ

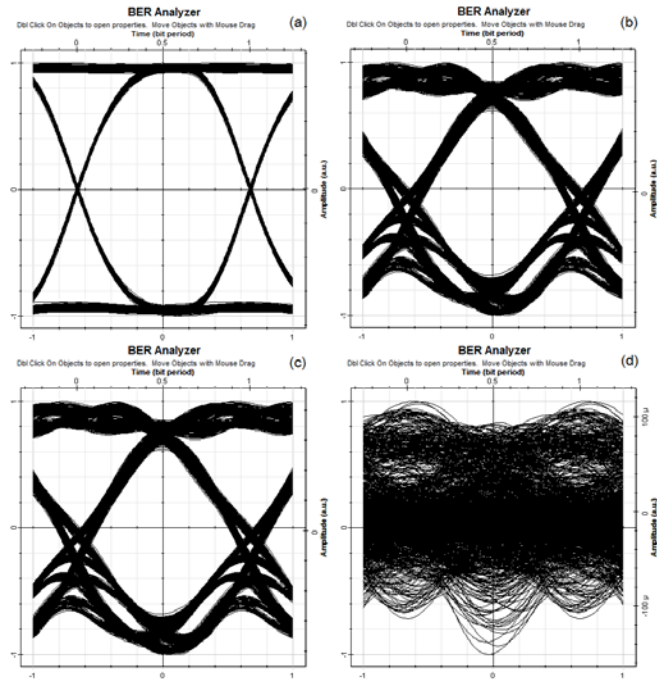


รูปที่ 4.27 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK



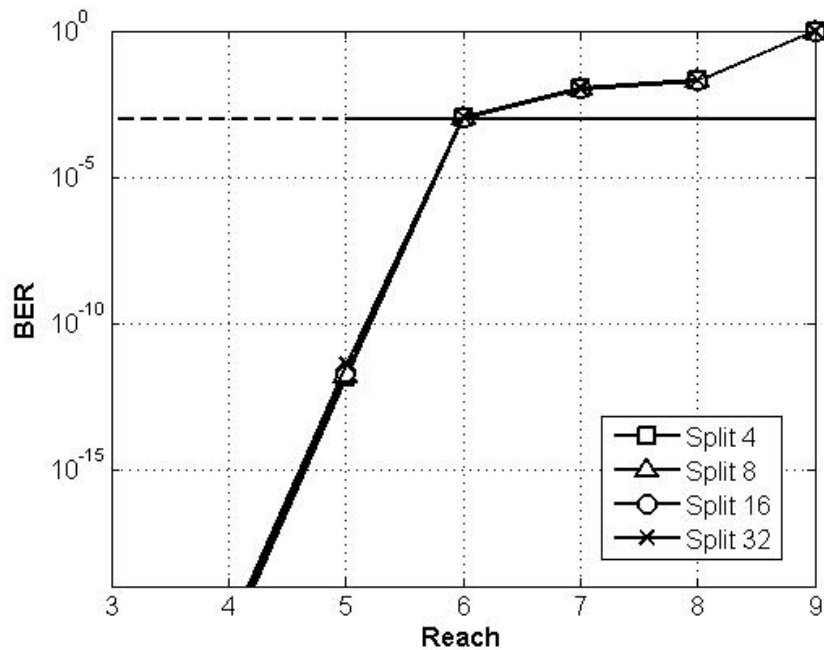
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิตผิดพลาดของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK

4.6.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ



รูปที่ 4.29 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK

รูปที่ 4.29 แสดงสัญญาณ eye-diagram ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาผลของดิสเพอร์ชันเพียงอย่างเดียว เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 6 km พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต ดังแสดงใน รูปที่ 4.29(b) เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จะทำให้ปัญหา ISI รุนแรงขึ้น จนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลย แสดงดังรูปที่ 4.29 (c) และ รูปที่ 4.29(d) ตามลำดับ

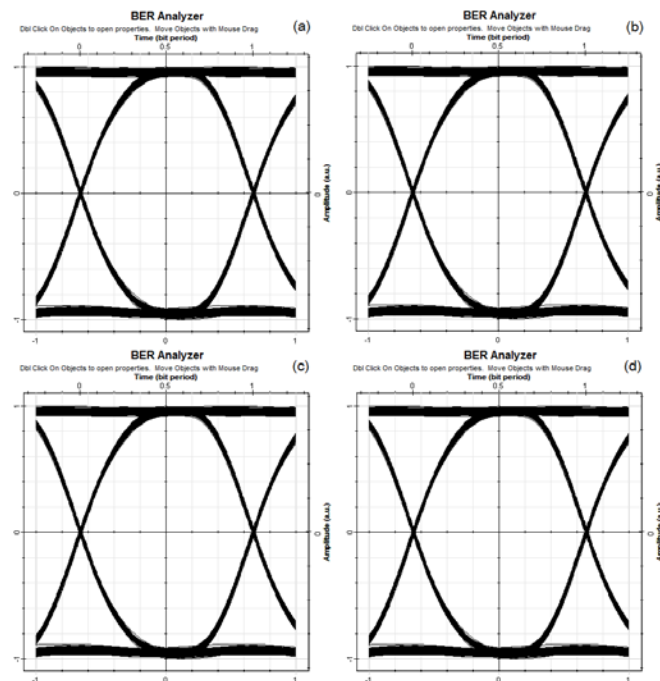


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK

ค่า BER มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.30 โดยระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ BER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 6 km สำหรับทุกค่าของ split ratio โดยผลที่ได้จาก simulation สอดคล้องกับการคำนวณความยาวของเส้นใยแสงจากสมการที่ (3.4) ตามลำดับ

4.6.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ

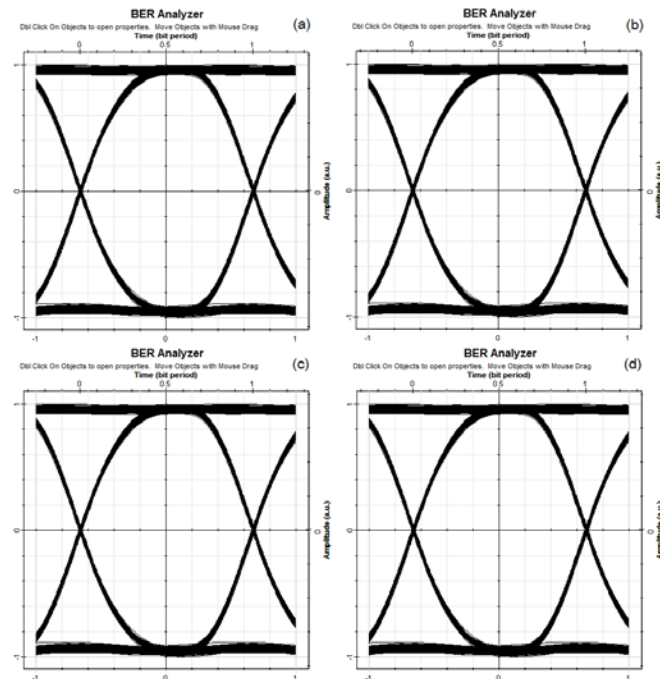
ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิตเท่ากับ 40 Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ PMD รูปที่ 4.31 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMD ที่แสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 4.31(a)-รูปที่ 4.31(d) มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า PMD แทบจะไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา



รูปที่ 4.31 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK

4.6.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

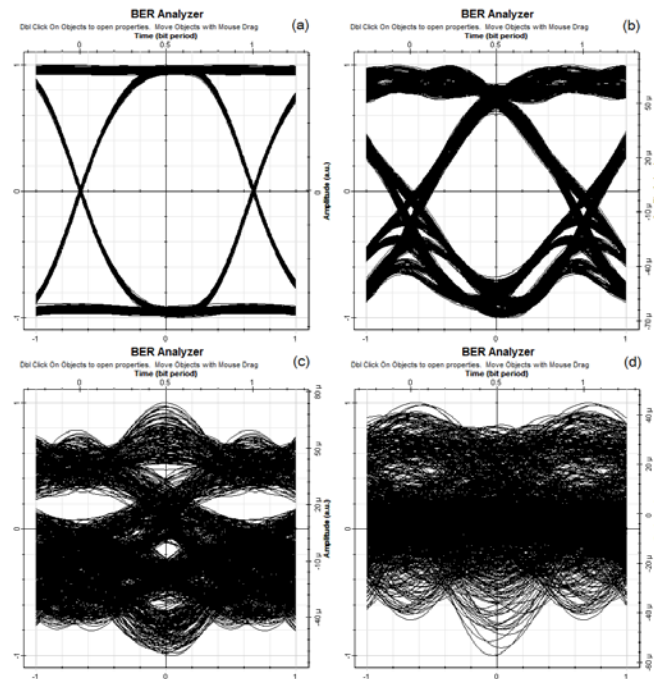
ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหที่ไม่เท่ากันตามขนาดของกำลังงานของสัญญาณ ส่งผลให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ จากการ simulation เพื่อทดสอบผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง แสดงดังรูปที่ 4.32 ซึ่งแสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 4.32(a)-รูปที่ 4.32(d) แทบจะไม่มี ความผิดเพี้ยนของสัญญาณใดๆเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงไม่มีผลต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา



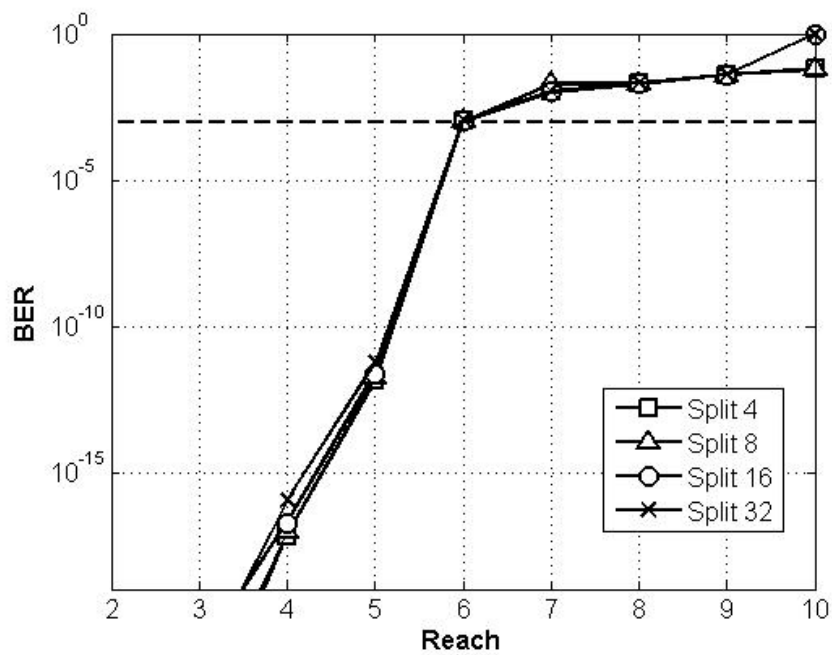
รูปที่ 4.32 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK

4.6.5 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ BER ของระบบ

ทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps สำหรับระบบ split ratio เท่ากับ 4, 8, 16 และ 32 เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รูปที่ 4.33 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางต่างกัน เห็นได้ชัดว่าใน รูปที่ 4.33 (b) พัลส์จะขยายกว้างออกเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียงนอกจากนี้ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ที่ทำให้สัญญาณถูกลดทอนและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.33(c) และรูปที่ 4.33(d) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าระยะทางที่สามารถส่งผ่านสัญญาณไปได้มีความสอดคล้องกับผลของการส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงโดยคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน



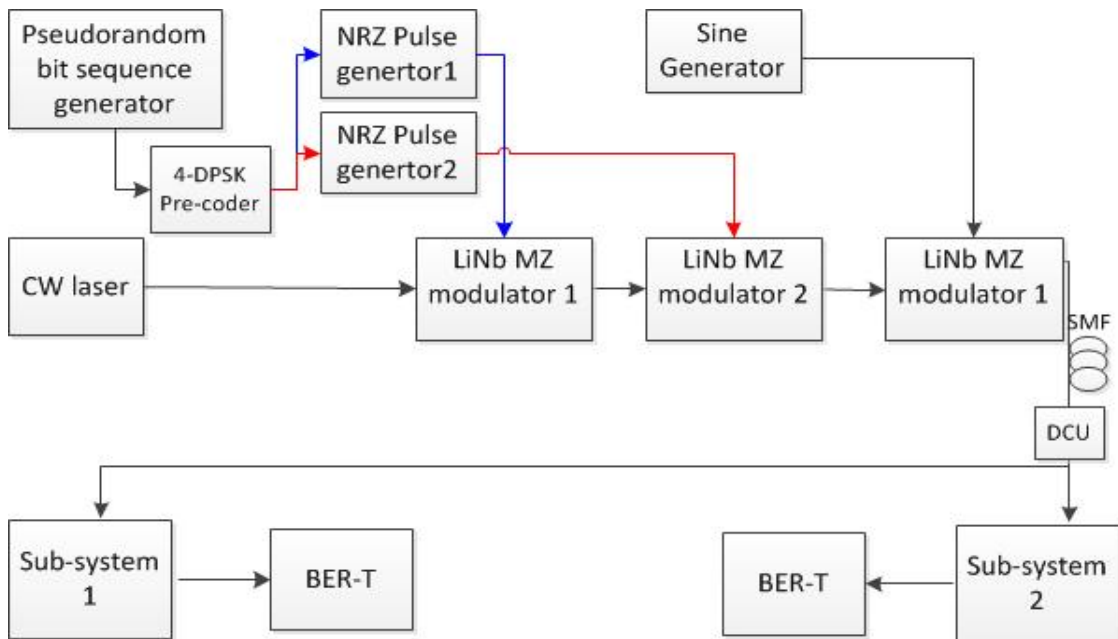
รูปที่ 4.33 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ NRZ-DPSK



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของ attenuation, dispersion, PMD และ non-linear ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ที่ค่า split ratio ต่างๆกับระยะทางส่งสัญญาณที่ได้จากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.34 โดยค่า BER มากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น และระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} คือ 6 km สำหรับทุก split ratio

4.7 โครงสร้างของระบบ RZ-DQPSK บน PON



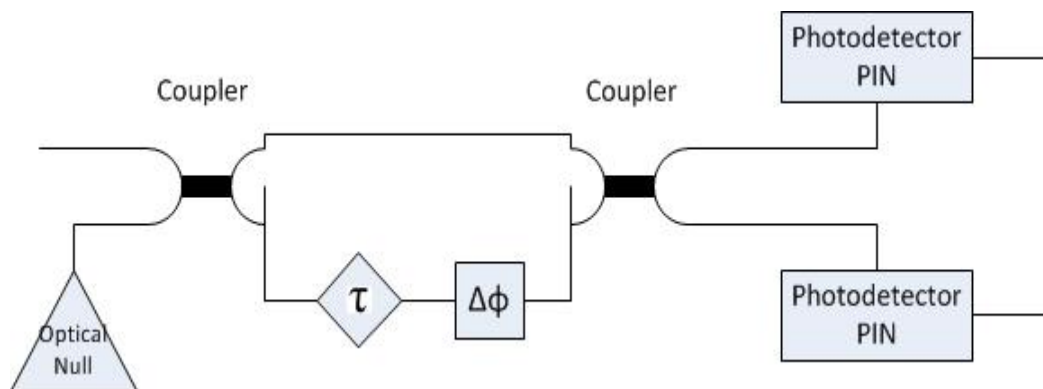
รูปที่ 4.35 โครงสร้างของระบบ RZ-DQPSK บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

ลักษณะโครงสร้างของระบบ RZ-DQPSK PON แสดงดัง

รูปที่ 4.35 กล่าวคือสัญญาณแบบ NRZ ความเร็ว 40-Gbps จะถูกมอดูเลตแบบ intensity modulation เข้ากับ CW laser หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้ว จะถูกมอดูเลตอีกครั้งด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 20 GHz เพื่อทำ pulse carver ให้ได้สัญญาณแบบ RZ ความเร็ว 40-

Gbps [3] จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่า attenuation coefficient เท่ากับ 0.21 dB/km, PMD เท่ากับ $0.08 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, dispersion เท่ากับ 17.224 ps/(km.nm), non-linear coefficient เท่ากับ $0.8903 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ DQPSK ที่ใช้ Mach-Zehnder modulator (MZM) จะถูกขับเคลื่อนด้วยสัญญาณ NRZ โดยสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ in-phase (I_k) และ quadrature phase (Q_k) โดย 2 สัญญาณนี้ทำให้เกิดความต่างเฟส $\frac{\pi}{2}$ ซึ่งภาครับ จะประกอบด้วย sub-system 1 และ sub-system 2 ซึ่งจะให้สัญญาณออกเป็น I และ Q ตามลำดับ

4.8 โครงสร้าง sub-system ของระบบ DQPSK

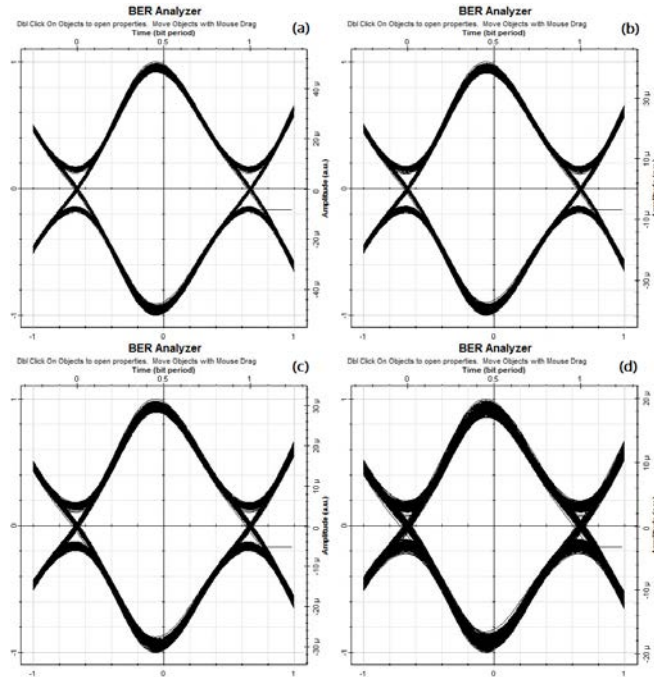


รูปที่ 4.36 โครงสร้าง sub-system ของระบบ DQPSK

sub-system ของระบบ DQPSK แสดงดังรูปที่ 4.36 ประกอบด้วย coupler ทำหน้าที่แยกสัญญาณ โดยที่สัญญาณขาหนึ่งถูกทำให้ delay แล้ว shift ไป 90 องศา หลังจากนั้น coupler ทำหน้าที่รวมสัญญาณ และแยกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN photodetector

4.9 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ RZ-DQPSK

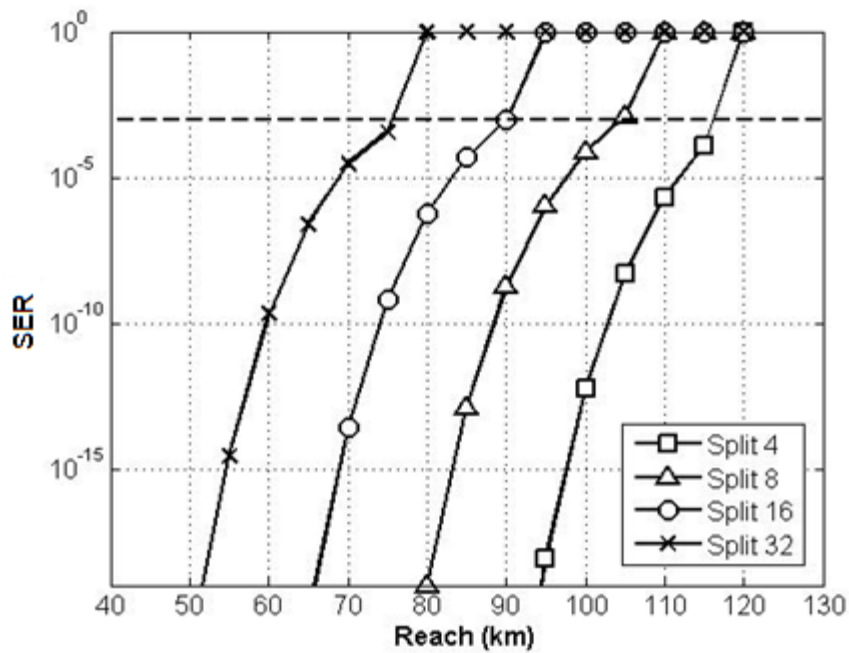
4.9.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่มีต่อ SER ของระบบ



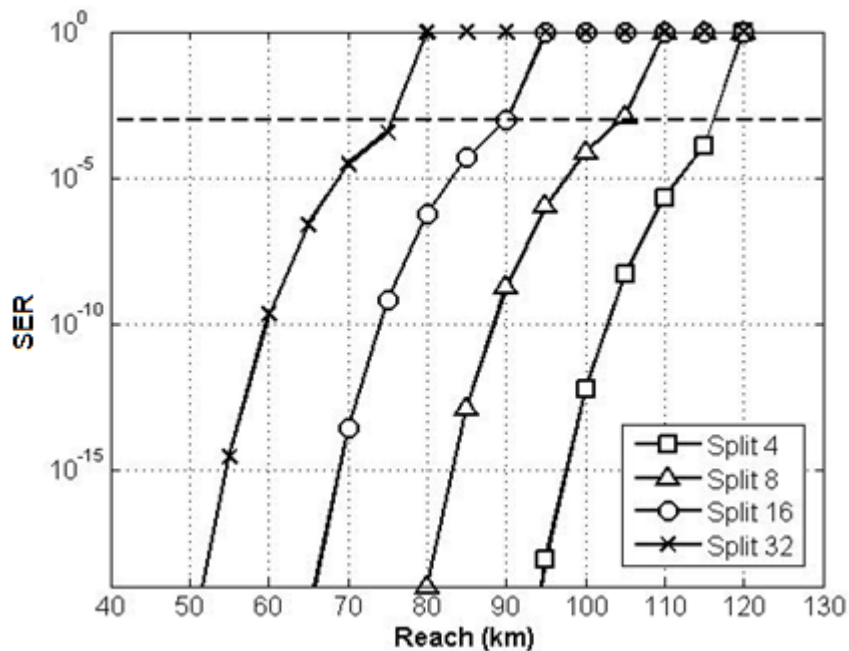
รูปที่ 4.37 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

สัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4.37 ที่ระยะทาง 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในช่วง 20 km สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย ทดสอบระบบด้วย simulation สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ปรากฏว่าที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ระบบจะมีอัตราสัญลักษณ์ผิดพลาดเท่ากับ 10^{-3} เมื่อส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 75 km

รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย ผลจากการ simulation เพื่อหาระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยผลการลดทอนกำลังสัญญาณ แสดงดัง



รูปที่ 4.38 โดยระยะทางไกลสุดที่พิจารณาที่ SER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 115, 105, 90 และ 75 เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ

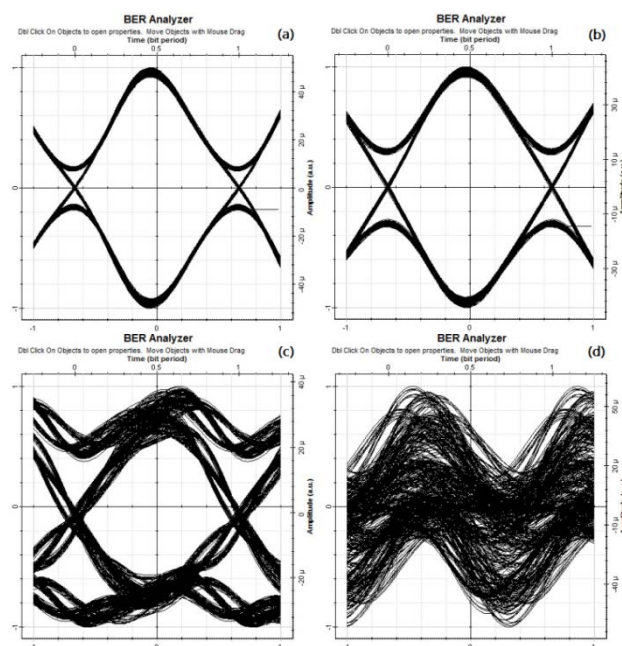


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะ ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

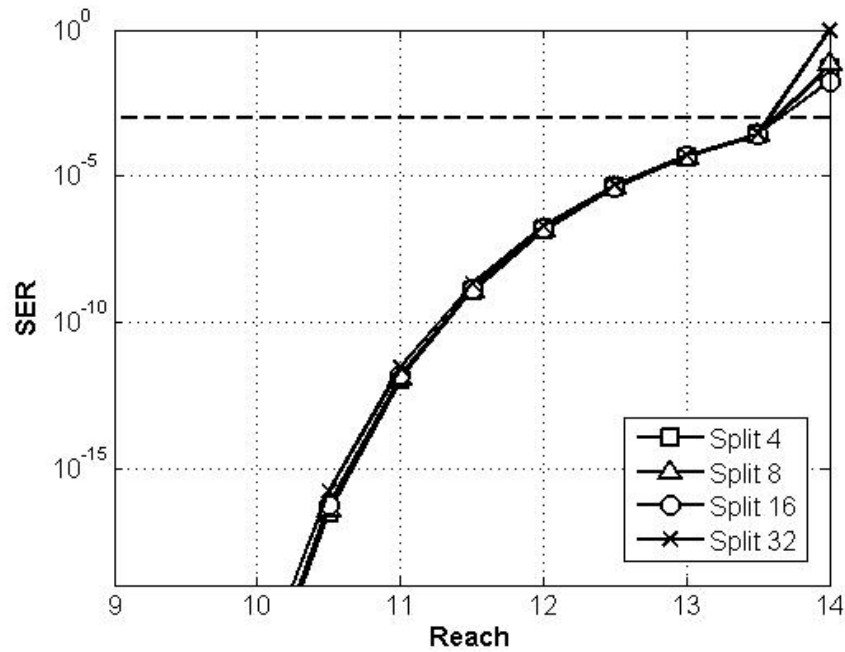
4.9.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ BER ของระบบ

รูปที่ 4.39 แสดงสัญญาณ eye-diagram ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 4 km พัลส์จะขยายกว้างออกเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.39(b) เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 10 km พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (c) เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จะทำให้เกิดปัญหา ISI รุนแรงขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า SER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.39(d)

ทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน พบว่า SER มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.40 โดยระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ SER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 13.5 km สำหรับทุกค่าของ split ratio

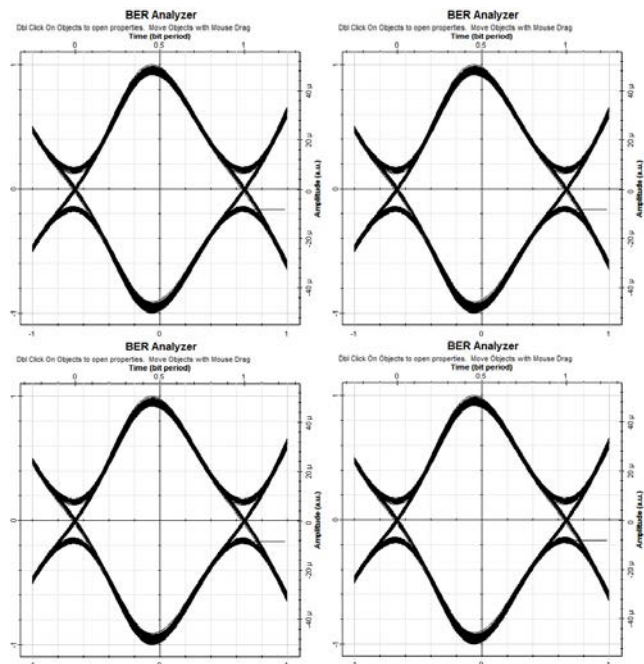


รูปที่ 4.39 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

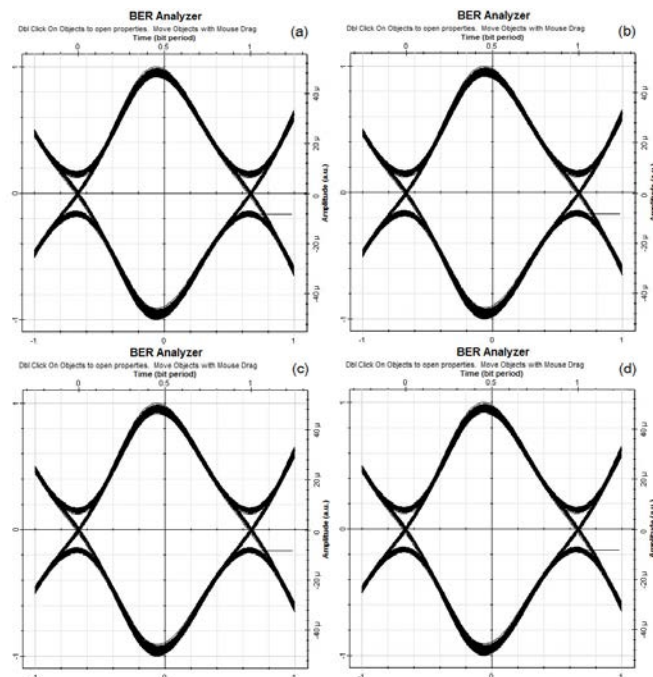
4.9.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ BER ของระบบ



รูปที่ 4.41 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

นอกจากปัญหาดิสเพอร์ชัน ที่ส่งผลให้พัลส์เกิดการขยายตัวแล้ว ปัญหา PMD ก็ทำให้พัลส์สามารถขยายตัวออกได้เช่นกันจากการทดลองพบว่าในระยะที่สนใจแทบจะไม่มีคามผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น

4.9.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ

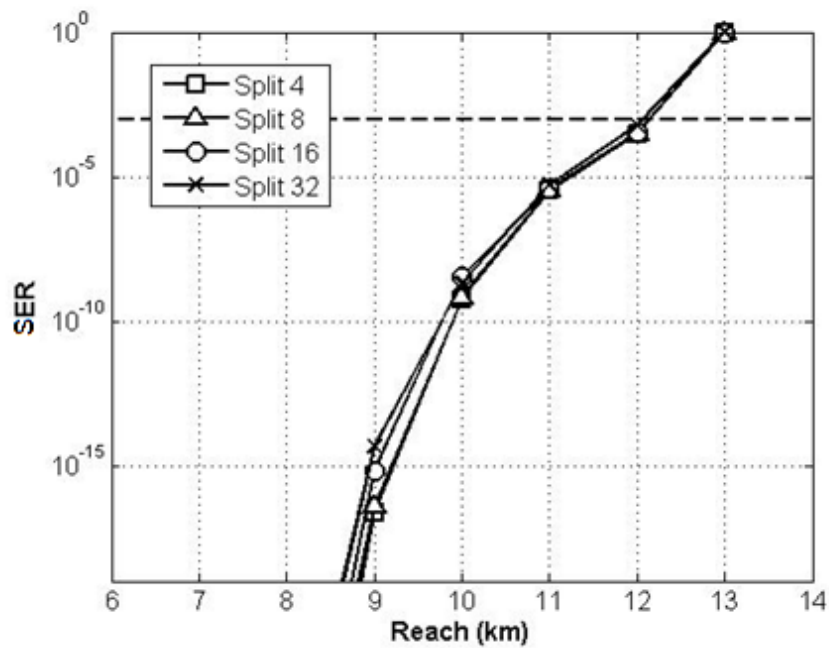


รูปที่ 4.42 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

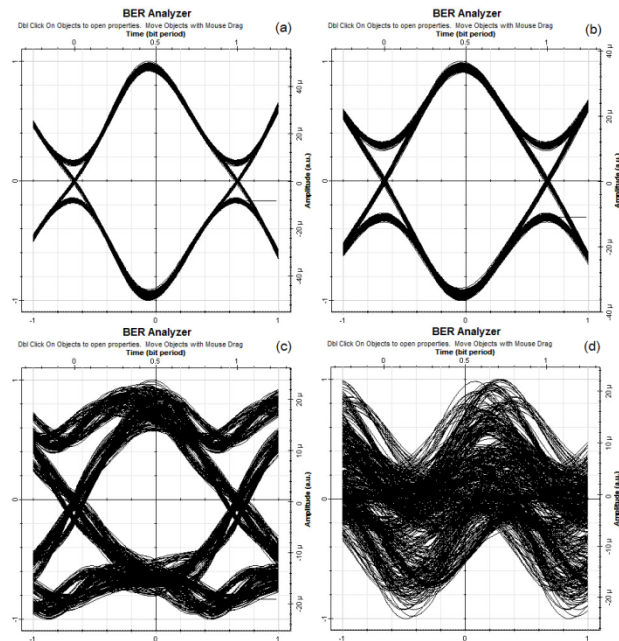
จากผลการ simulation พบว่าการส่งสัญญาณแบบ RZ-DQPSK ในระยะการส่งสัญญาณที่พิจารณาเพียงแค่ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง พบว่าแทบไม่มีผลความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นเลย

4.9.5 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ

ในส่วนนี้ได้ทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิต 40-Gbps สำหรับระบบ split ratio เท่ากับ 4, 8, 16 และ 32 เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่ง สัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

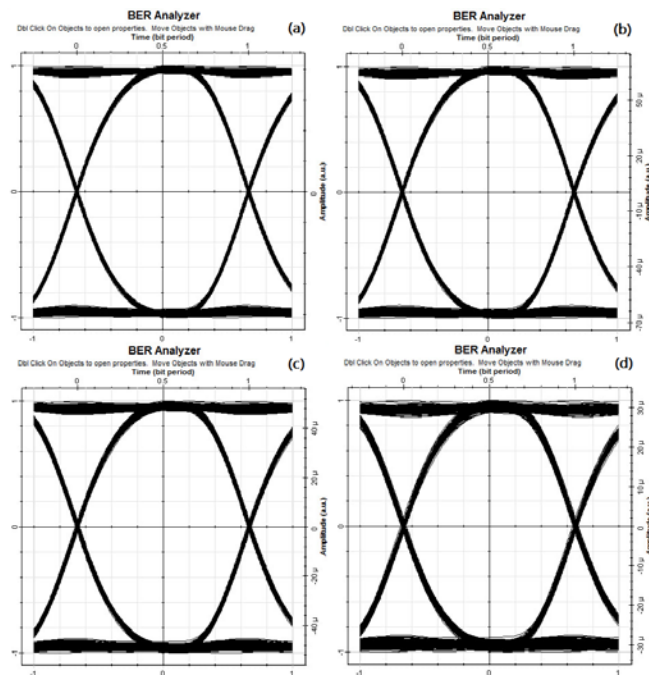


รูปที่ 4.44 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตแบบ RZ-DQPSK

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SER ที่ค่า split ratio ต่างๆกับระยะทางส่งสัญญาณที่ได้จากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.44 โดยค่า SER มากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น ระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ค่า SER เท่ากับ 10^{-3} คือ 12 km ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยปัญหาดิสเพอร์ชัน

4.10 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ NRZ-DQPSK

4.10.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่มีต่อ SER ของระบบ



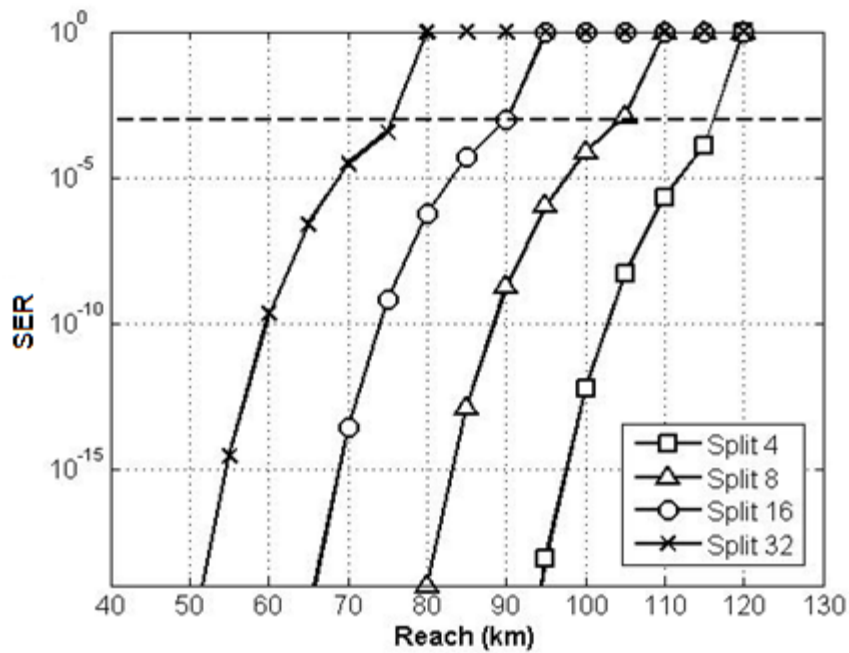
รูปที่ 4.45 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40-Gbps ที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

สัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4.45 ที่ระยะทาง 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในช่วง 20 km สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย

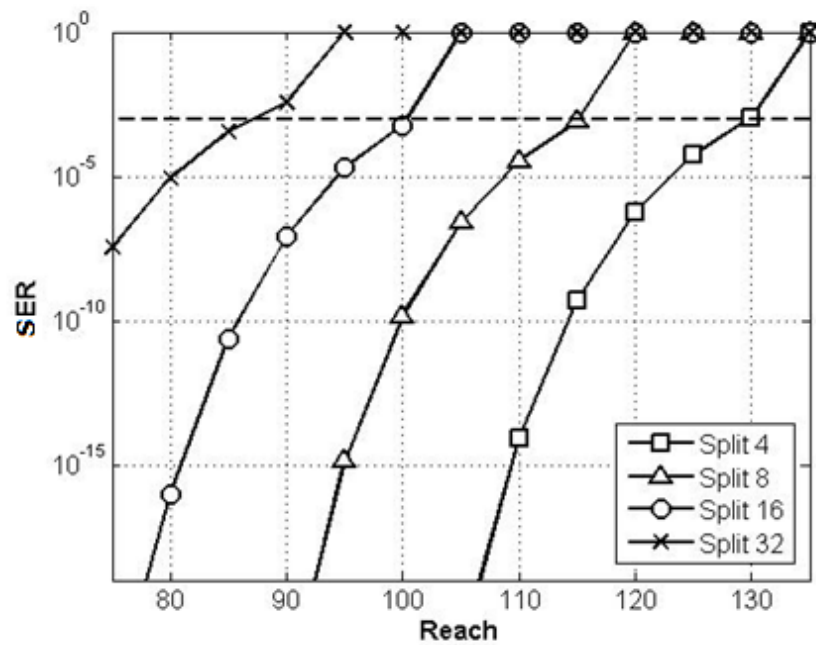
ทดสอบระบบด้วย simulation สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ attenuation ปรากฏว่าที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ระบบจะมีอัตราบิดผิดพลาดเท่ากับ 10^{-3} เมื่อส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 88 km รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่พิจารณาผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงเท่านั้น สัญญาณถูกลดทอนต่ำลงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย ผลจากการ simulation เพื่อหาระยะทางที่ถูกจำกัดด้วย

attenuation แสดงดังรูปที่

4.46

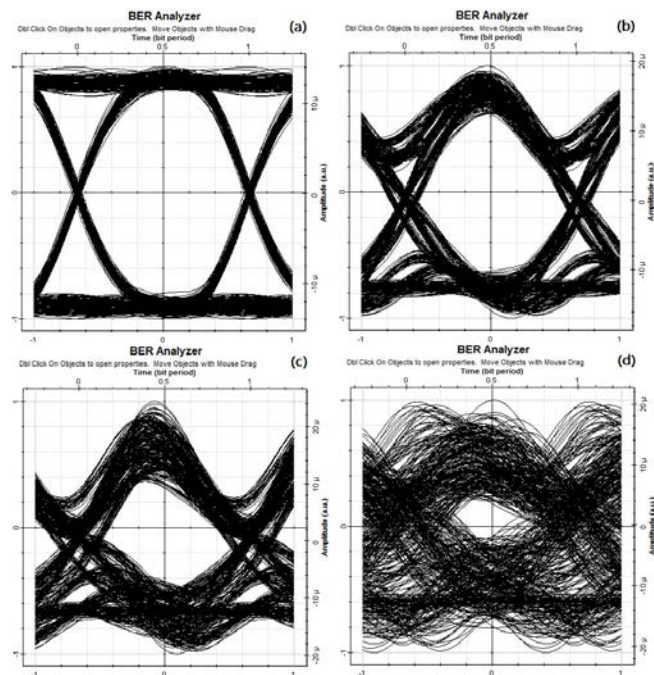


รูปที่ 4.38 โดยระยะทางไกลสุดที่พิจารณาที่ SER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 130, 115, 100 และ 88 เมื่อใช้ split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER ของระบบ กับระยะทางที่ส่งสัญญาณไปได้ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

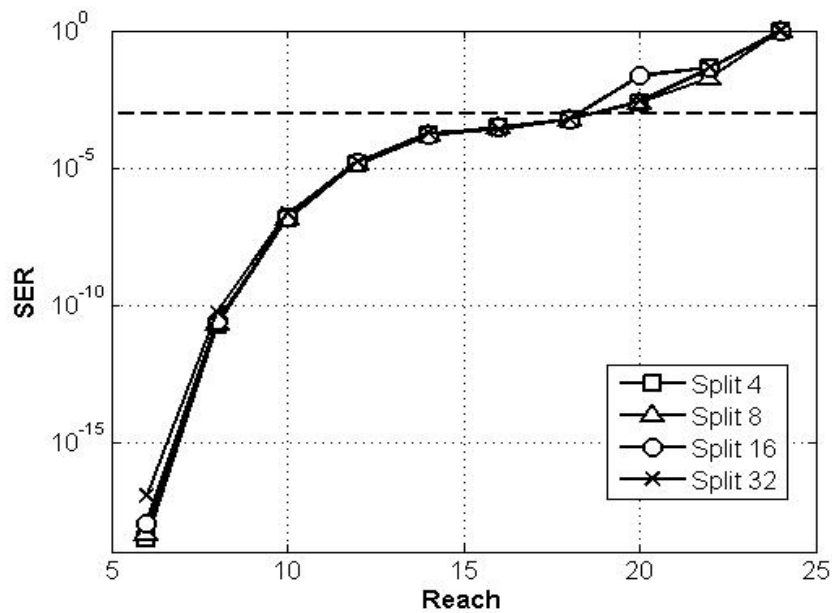
4.10.2 ผลของดิสเพอร์ชันที่มีต่อ SER ของระบบ



รูปที่ 4.47 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

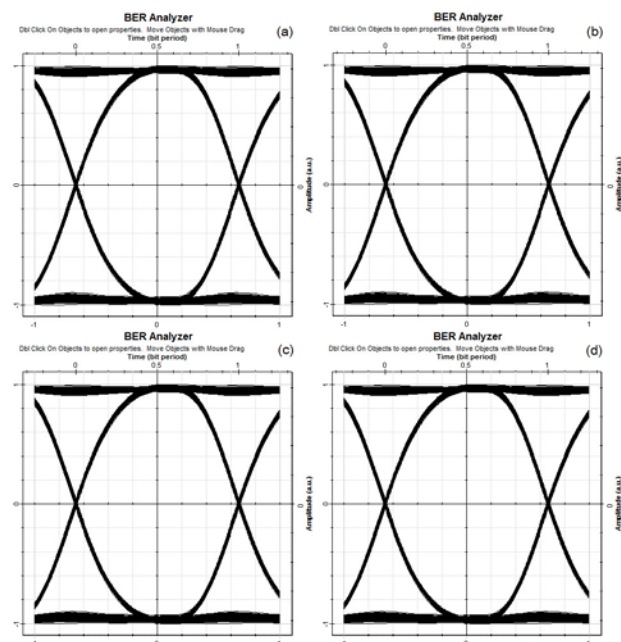
รูปที่ 4.47 แสดงสัญญาณ eye-diagram ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาผลของดิสเพอร์ชันเพียงอย่างเดียว เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะ 6 km พัลส์จะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ข้างเคียงทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต ดังแสดงในรูปที่ 4.47(b) และ รูปที่ 4.47(c) เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จะทำให้ปัญหา ISI รุนแรงขึ้น จนไม่สามารถวัดค่า SER ได้เลย แสดงดังรูปที่ 4.47(d)

ทำการทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps ที่ระยะทางต่างกันเมื่อ split ratio 1:32 และพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน พบว่า SER มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.48 โดยระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ SER เท่ากับ 10^{-3} เท่ากับ 18.5 km สำหรับทุกค่าของ split ratio



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่งสัญญาณ เมื่อคิดผลของดิสเพอร์ชันของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

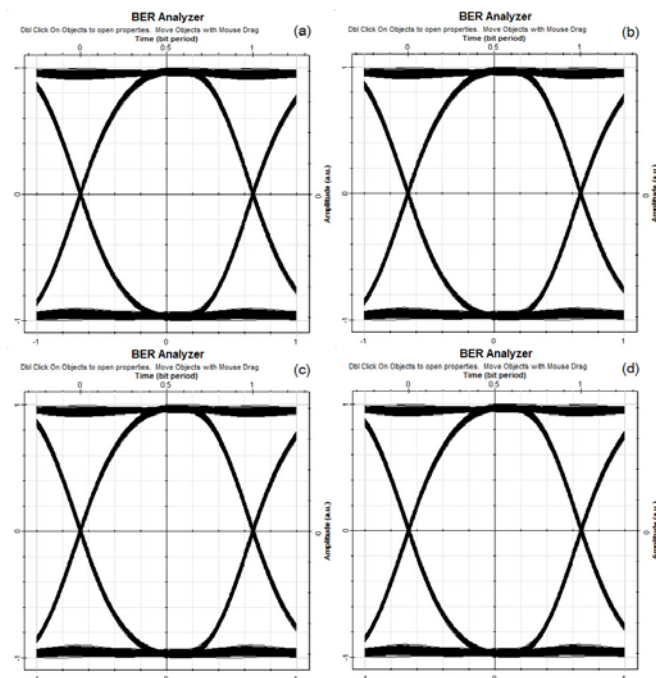
4.10.3 ผลของ PMD ที่มีต่อ SER ของระบบ



รูปที่ 4.49 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของ PMDของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

ทำการทดสอบระบบด้วย simulation ที่อัตราบิตเท่ากับ 40 Gbps สำหรับระบบที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 ตามลำดับ เพื่อหาระยะเวลาทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของ PMD ผลจากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.49 eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 32 ที่ระยะเวลาเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า eye-diagram ในรูปที่ 4.31(a)-รูปที่ 4.31(d) มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า PMD แทบจะไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

4.10.4 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ



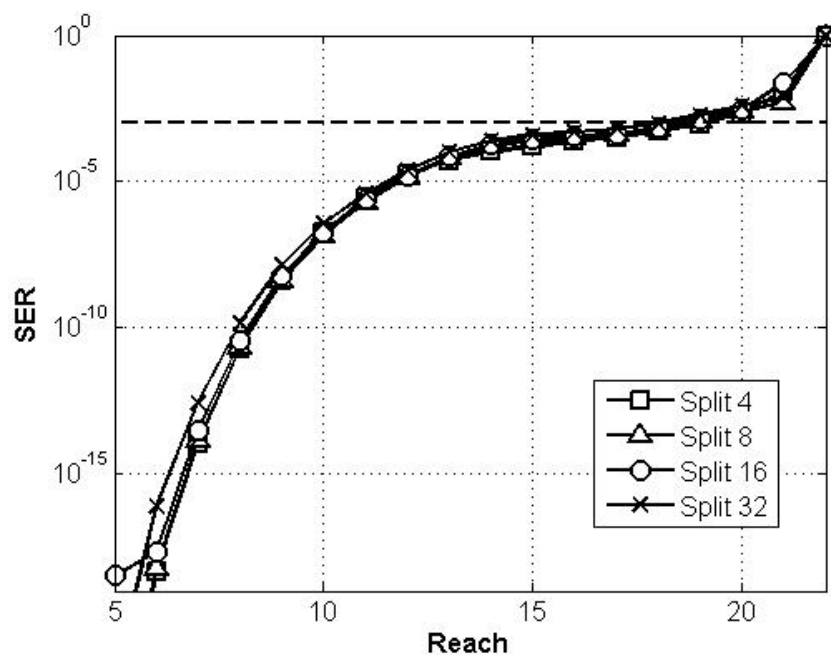
รูปที่ 4.50 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดเฉพาะผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหที่ไม่เท่ากันตามขนาดของกำลังงานของสัญญาณ ส่งผลให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ จากการ simulation เพื่อทดสอบผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง แสดงดังรูปที่ 4.51 ซึ่งแสดง eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่ split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะเวลาเท่ากับ 0, 4, 10 และ 20 km ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า eye-

diagram ในรูปที่ 4.32(a)-รูปที่ 4.32(d) แทบจะไม่มี ความผิดเพี้ยนของสัญญาณใดๆเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงไม่มีผลต่อสมรรถนะของสัญญาณในช่วงที่พิจารณา

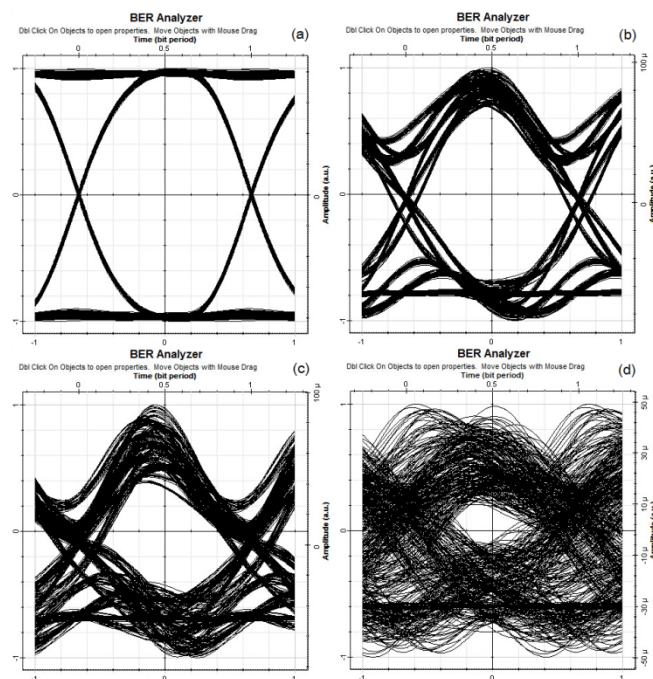
4.10.5 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีต่อ SER ของระบบ

ทดสอบระบบด้วยการ simulation ที่อัตราบิต 40 Gbps สำหรับระบบ split ratio เท่ากับ 4, 8, 16 และ 32 เพื่อหาระยะทางไกลสุดที่ถูกจำกัดด้วยผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SER ที่ค่า split ratio ต่างๆกับระยะทางส่งสัญญาณที่ได้จากการ simulation แสดงดังรูปที่ 4.51 โดยค่า SER มากขึ้นเนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น และระยะทางไกลสุดที่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ค่า SER เท่ากับ 10^{-3} คือ 18 km สำหรับทุก split ratio



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับระยะทางที่ส่ง สัญญาณไปได้ เมื่อคิดผลการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK

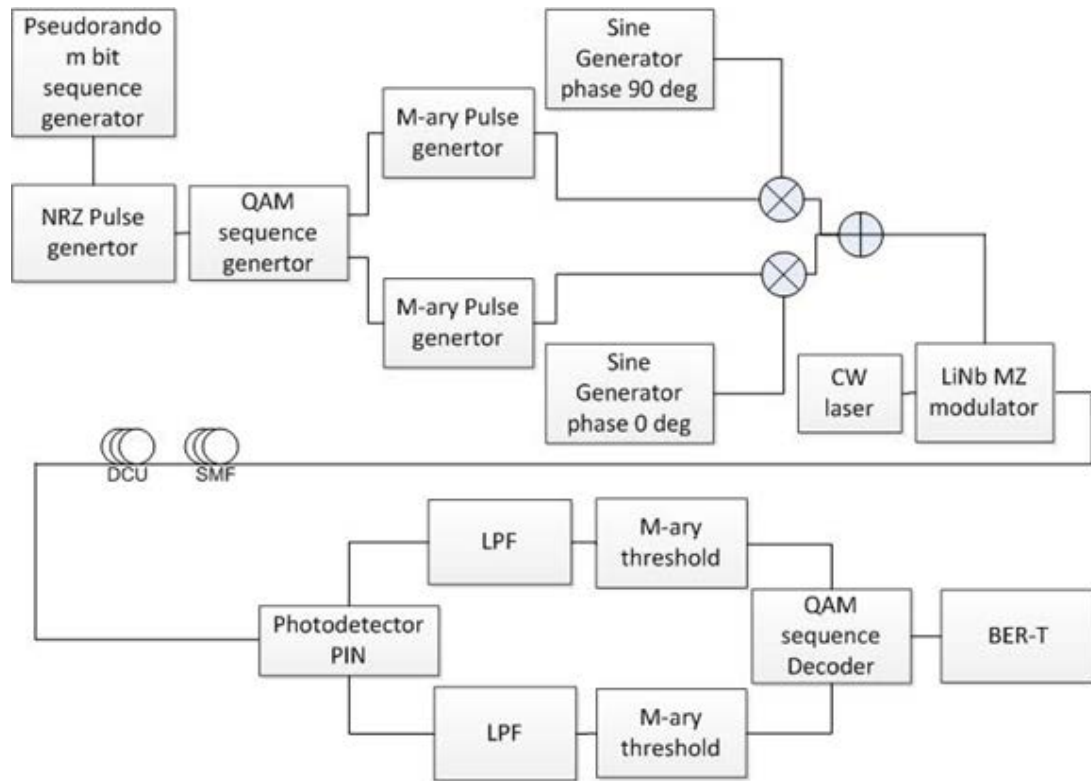
รูปที่ 4.52 แสดงสัญญาณ eye-diagram ของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสงที่มี split ratio เท่ากับ 1:32 ที่ระยะทางต่างกัน เห็นได้ชัดว่าใน รูปที่ 4.52 (b) พัลส์จะขยายกว้างออก เนื่องจากดิสเพอร์ชัน ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียงนอกจากนี้ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ที่ทำให้สัญญาณถูกลดทอนและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความยาวของเส้นใยแสงเพิ่มมากขึ้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากขึ้นจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้เลยดังแสดงในรูปที่ 4.52(c) และ รูปที่ 4.52(d) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าระยะทางที่สามารถส่งผ่านสัญญาณไปได้มีความสอดคล้องกับผลของการส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงโดยคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 4.52 Eye-diagram ของสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ที่มี split ratio 1:32 ที่ส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง a) B-B b) 4 km c) 10 km d) 20 km เมื่อคิดผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงของการมอดูเลตสัญญาณ

แบบ RZ-DQPSK

4.11 โครงสร้างของระบบ QAM บน PON

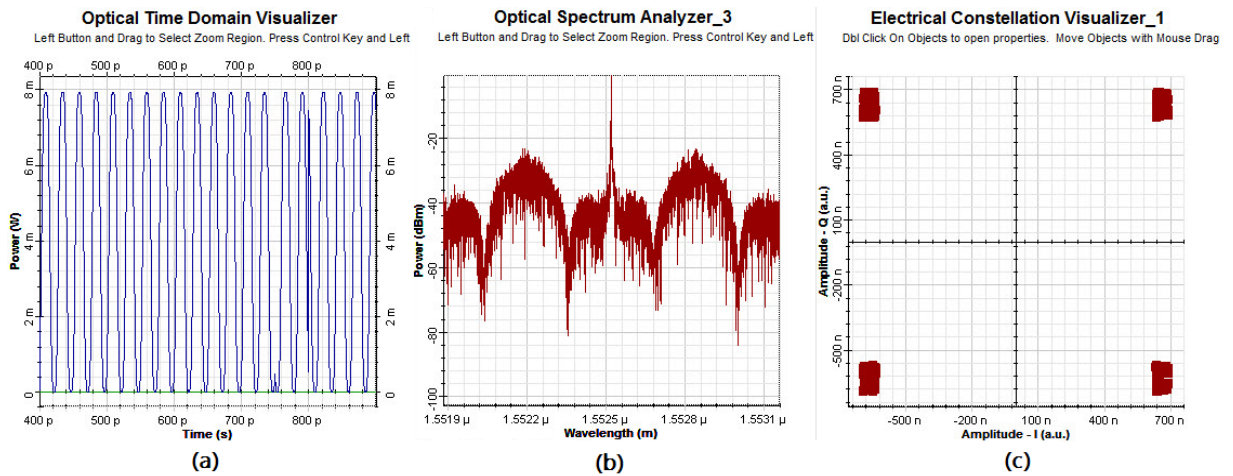


รูปที่ 4.53 โครงสร้างของระบบ QAM-PON

โครงสร้างของระบบ QAM แสดงดังรูปที่ 2.25 QAM sequence generator ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ I และ Q ไปมอดูเลตสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณแบบ QAM โดยที่ขาข้างหนึ่งถูกคูณด้วยสัญญาณ sine และอีกขาหนึ่งถูกคูณด้วยสัญญาณ cosine นำสองสัญญาณนี้มารวมกัน จากนั้นมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณจาก CW laser ที่ MZM ได้สัญญาณทางแสง สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว

วงจรรอรับของระบบ QAM แสดงดังรูปที่ 2.26 สัญญาณแสงจะถูกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN photodetector จากนั้นสัญญาณแสงที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจะถูกส่งผ่าน quadrature demodulator ได้สัญญาณเป็น I และ Q ส่งไปยัง M-ary threshold detector ซึ่งมีหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ (multilevel pulse) ให้เป็นสัญญาณแบบ M-ary สัญญาณสองส่วนจะถูกรวมและเข้าสู่ QAM sequence decoder เพื่อถอดรหัสสัญญาณแบบ M-ary ให้เป็นสัญญาณสองระดับ

4.12 ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อสมรรถนะของระบบ QAM

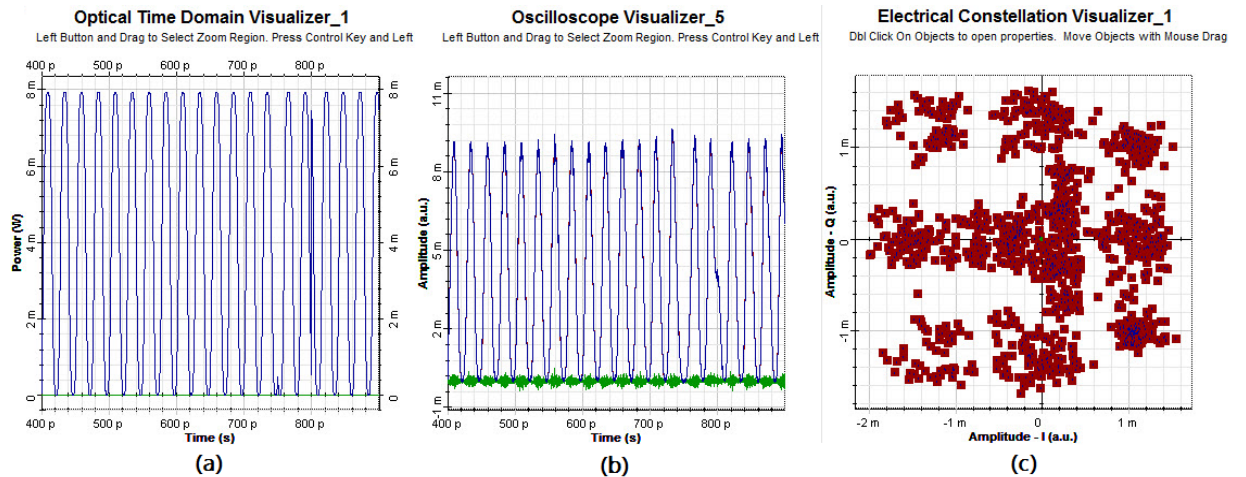


รูปที่ 4.54 (a) ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (b) ลักษณะสเปกตรัมของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (c) ลักษณะ constellation diagram ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ก่อนการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 4.54 (a) จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 750 ps และ 800 ps และสเปกตรัมของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.54 (b) จะเห็นว่าความยาวคลื่นอ้างอิงคือ 1552.52 nm และความถี่ของสัญญาณ sin และ cos ที่มอดูเลต เท่ากับ 40 GHz ซึ่งแสดงให้เห็นในสเปกตรัมสัญญาณถัดจากความยาวคลื่นอ้างอิง และมี constellation diagram แสดงดังรูปที่ 4.54 (c)

ถัดมาเป็นสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง แสดงดังรูปที่ 4.55 (a) จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 750 ps และ 800 ps ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สัญญาณแสงที่ส่งผ่านไปในเส้นใยแสงยังมีเฟสของสัญญาณที่ถูกต้อง แต่เมื่อต้องการถอดรหัสสัญญาณ ต้องมีการแปลงสัญญาณจากสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ผ่านตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN เมื่อวัดสัญญาณทางเวลา แสดงได้ดังรูปที่ 4.55 (b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งเฟสและลักษณะของสัญญาณมีความผิดเพี้ยนไปมาก ทำให้ที่ปลายทางของระบบไม่สามารถถอดรหัสสัญญาณได้ถูกต้องเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ตรวจสอบเฟส

ของสัญญาณโดยตรง (phase correction) มี constellation diagram แสดงดังรูปที่ 4.55 (c) และเมื่อวัด symbol error rate ปรากฏว่า ค่า symbol error rate ที่วัดได้เกินค่าที่ยอมรับได้ของระบบ



รูปที่ 4.55 (a) ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (b) ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการแปลงจากสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (c) ลักษณะ constellation diagram ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM หลังการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

จากการจำลองระบบการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM ผลปรากฏว่าการส่งสัญญาณด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะสมเนื่องจากการตรวจวัดเฟสของสัญญาณโดยตรงทำได้ยาก ผลจากการ simulation พบว่าระยะทางที่สามารถส่งสัญญาณได้โดยที่ค่า symbol error rate ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือ 300 m

บทที่ 5

การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันและผลการจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะการส่งสัญญาณของระบบจากค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณ, ค่าดิสเพอร์ชัน, ค่า PMD และค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง และเห็นได้ว่า ดิสเพอร์ชันเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สมรรถนะของระบบต่ำลง ในบทนี้จึงนำเสนอวิธีการกำจัดผลของดิสเพอร์ชันโดยใช้เทคนิคการติดตั้ง dispersion compensating unit ในระบบ เพื่อกำจัดผลของดิสเพอร์ชัน ทำให้ระบบสามารถส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น

5.1 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันในระบบ FTTx-PON

จากการ simulation และการคำนวณในส่วนที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า dispersion เป็นปัญหาหลักที่จำกัดสมรรถนะการส่งสัญญาณ ดังนั้นจึงได้มีการแก้ไขปัญหา dispersion โดยการนำ dispersion compensating unit (DCU) ที่ภายในประกอบไปด้วย slope-compensate dispersion compensating fiber ซึ่งมีค่า dispersion และ dispersion slope เป็นลบมาติดตั้งในระบบเพื่อชดเชย dispersion ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

$$D_{SMF} L_{SMF} + D_{DCU} L_{DCU} = 0 \quad (5.1)$$

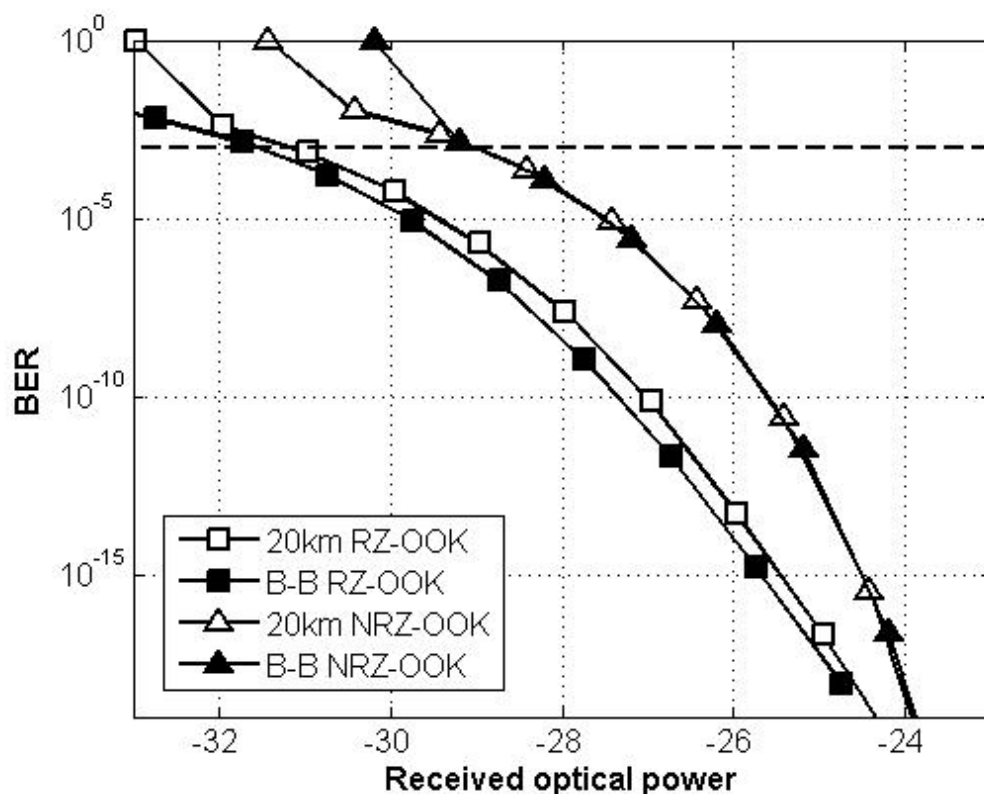
D_{SMF}	คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง [ps/km.nm]
D_{DCU}	คือ ค่าดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชย [ps/km.nm]
L_{SMF}	คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]
L_{DCU}	คือ ความยาวของหน่วยชดเชย [km]

ตาราง 5.1 คุณสมบัติเส้นใยแสงแบบ SMF และDCF

Fiber	Attenuation (dB/km)	Dispersion@1552.52 nm (ps/km/nm)	Dispersion slope (ps/km/nm ²)
SMF	0.21	17.224	0.075
DCF	5.4	-144	-0.58

สัญญาณความเร็ว 40-Gbps กำลังส่ง 9 dBm จะถูกส่งไปในเส้นใยแสงความยาว 20 km จากนั้นติดตั้ง DCU ต่อจากเส้นใยแสง จากการคำนวณตามสมการ (5.1) ต้องใช้ DCU ความยาว 2.39222 km ที่มีค่า attenuation coefficient เท่ากับ 5.4 dB/km, compensating dispersion เท่ากับ -144 ps/km·nm และ dispersion slope เท่ากับ -0.58 ps/km·nm² ตามลำดับ

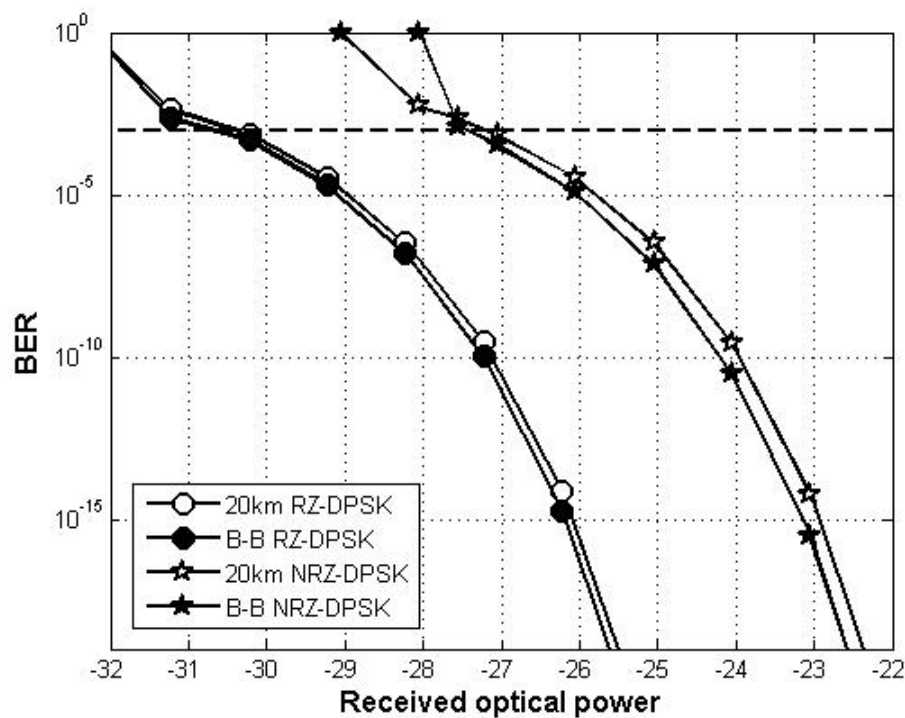
5.2 การแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันในระบบ OOK-PON



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการสื่อสารสัญญาณแบบ RZ-OOK

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการส่งสัญญาณแบบ RZ-OOK และ NRZ-OOK ในกรณีที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 และ B-B จะเห็นได้ว่า ที่ BER เท่ากับ 10^{-3} กำลังของสัญญาณที่วัดได้สำหรับการส่งสัญญาณที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK แบบ B-B และการส่งสัญญาณในเส้นใยแสงยาว 20 km เท่ากับ -31.6 และ -31.1 dBm ตามลำดับจะเห็นได้ว่าค่า power penalty เท่ากับ 0.5 dB ซึ่งเกิดจากความไม่พอดีกันของ dispersion slope ระหว่าง SMF กับ DCU

5.3 การแก้ปัญหาดีสเพอร์ชันในระบบ DPSK-PON



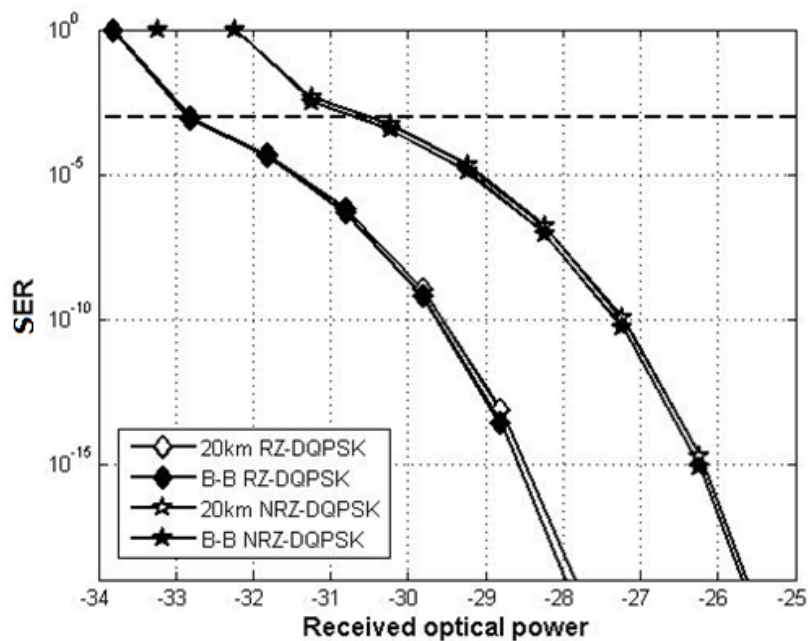
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการส่งสัญญาณแบบ RZ-DPSK และ NRZ-DPSK

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการส่งสัญญาณแบบ RZ-DPSK และ NRZ-DPSK ในกรณีที่มี split ratio เท่ากับ 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 และ B-B จะเห็นได้ว่า ที่ BER เท่ากับ 10^{-3} กำลังของสัญญาณที่วัดได้สำหรับการส่งสัญญาณที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK แบบ B-B และการส่งสัญญาณในเส้นใยแสงยาว 20 km เท่ากับ -27.4 และ -27.1 dBm ตามลำดับจะเห็นได้ว่าค่า power penalty เท่ากับ 0.3 dB และสำหรับการส่งสัญญาณที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK แบบ B-B และการส่ง

สัญญาณในเส้นใยแสงยาว 20 km เท่ากับ -30.6 และ -30.4 dBm ตามลำดับจะเห็นได้ว่าค่า power penalty เท่ากับ 0.2 dB ซึ่ง power penalty เกิดขึ้นจากความไม่พอดีกันของ dispersion slope ระหว่าง SMF กับ DCU

5.4 การแก้ปัญหาดีสเพอร์ชันในระบบ DQPSK-PON

ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU สำหรับการสื่อสารสัญญาณแบบ RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK ในกรณีที่มี split ratio 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 และ B-B จะเห็นได้ว่า ที่ SER เท่ากับ 10^{-3} กำลังของสัญญาณที่วัดได้สำหรับการส่งสัญญาณที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK แบบ B-B และการส่งสัญญาณในเส้นใยแสงยาว 20 km เท่ากับ -30.7 และ -30.5 dBm ตามลำดับ และมีค่า power penalty เท่ากับ 0.2 dB ดังแสดงในรูปที่ 5.3 **ผิดพลาด!** ไม่พบแหล่งอ้างอิง ซึ่งเกิดจากความไม่พอดีกันของ dispersion slope ระหว่าง SMF กับ DCU เช่นกัน



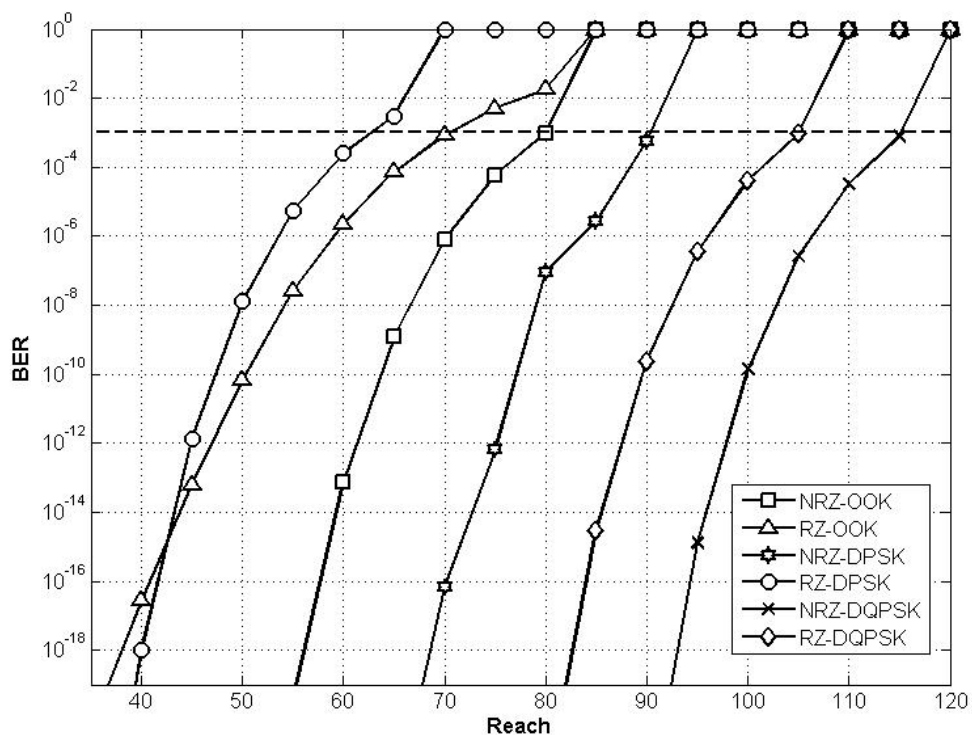
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง SER กับ กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการสื่อสารสัญญาณแบบ RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK

บทที่ 6

วิเคราะห์สมรรถนะของระบบรวมและแนวทางการออกแบบระบบ FTTx-PON

ในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในแง่ของความทนทานของระบบต่อผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ ความทนของระบบต่อผลของดิสเพอร์ชัน และ power penalty ของการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ (กำลังที่ชดเชยในระบบเนื่องจากความไม่พอดีกันของ slope compensation)

6.1 ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณต่อการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ให้บริการได้กับ BER ของระบบ เมื่อคิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณที่ split ratio 1:8

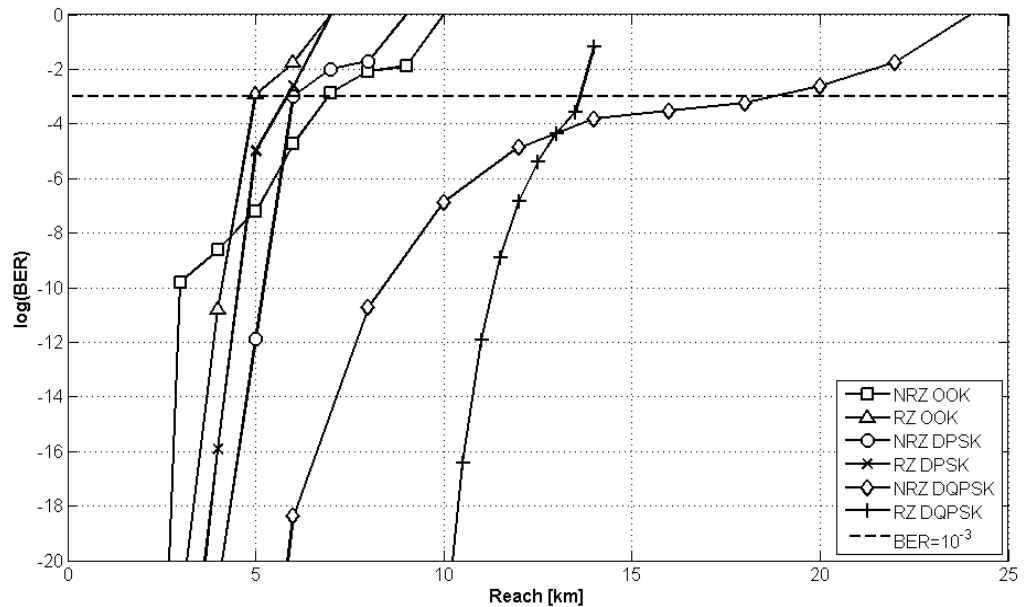
เส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน G.652.D ถูกนำมาใช้ในระบบ PON เนื่องจากในช่วงความยาวคลื่น 1552.52 นาโนเมตร เป็นช่วงที่มีค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณต่ำ จากการ simulation ของระบบ โดยส่งผ่านสัญญาณแสงที่กำลัง 9 dBm ไปในเส้นใยแสงชนิดโหมด

เดียวที่มีค่าการลดทอนกำลังสัญญาณ 0.21 dB/km ที่อัตราการแบ่งกำลังสัญญาณ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 เพื่อหาระยะทางสูงสุดที่ระบบสามารถให้บริการได้เนื่องจากผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณและผลของการสูญเสียกำลังสัญญาณที่ตัวแบ่งกำลังสัญญาณทางแสง รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ให้บริการได้กับ BER ของระบบของการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ ที่อัตราการแบ่งกำลังสัญญาณ 1:8 จะเห็นได้ว่าสำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK สามารถส่งสัญญาณได้เป็นระยะ 80, 70, 65, 90, 115, 105 km ตามลำดับ ซึ่งการส่งผ่านสัญญาณแบบ NRZ จะทนต่อผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ NRZ เป็นการส่งกำลังสัญญาณตลอดช่วงคาบิต ซึ่งต่างจากการส่งสัญญาณแบบ RZ ที่มีการส่งกำลังสัญญาณเพียงครึ่งคาบิต ทำให้สัญญาณที่ได้เปรียบเสมือนพัลส์ ดังนั้นการส่งสัญญาณแบบ NRZ ทำให้กำลังสัญญาณเฉลี่ยของการส่งผ่านสัญญาณมากกว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ RZ ที่ทำให้สามารถส่งผ่านสัญญาณไปในระบบที่มีเฉพาะค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณได้ดีกว่า

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK สามารถส่งสัญญาณไปในระยะทางที่ไกลกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK เนื่องจาก การมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ที่ภาครับ เป็นการรับสัญญาณแบบ direct detection ซึ่งแตกต่างจากการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK และ DQPSK ที่การรับสัญญาณเป็นแบบ balanced detection การรับสัญญาณแบบนี้ต้องการอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณแสงและกำลังของสัญญาณรบกวน (optical signal to noise ratio : OSNR) ที่น้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ประมาณ 3 dB ในการที่จะทำให้ BER ของการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK มีค่าเท่ากับการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ซึ่งทำให้การส่งสัญญาณแบบ DPSK ทนต่อผลของการลดทอนกำลังสัญญาณได้มากกว่า OOK

เมื่อวิเคราะห์สมรรถนะของการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK กับ DQPSK จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK มีการแบ่งองค์ประกอบของสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน คือ inphase (I) และ quadrature phase (Q) เป็นผลให้ line rate ของสัญญาณลดลงจาก 40 Gbps เหลือ 20 Gbps ทำให้การมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK ทนต่อผลของการลดทอนกำลังสัญญาณได้มากกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK

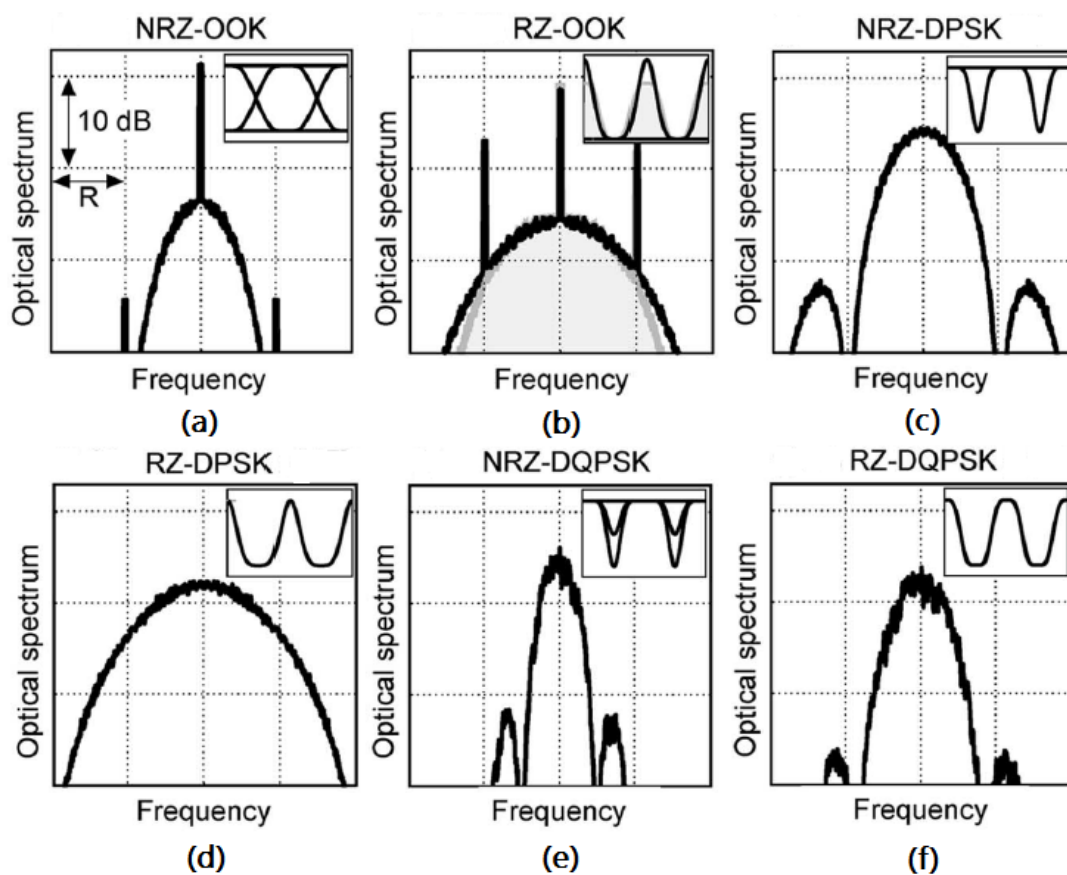
6.2 ผลของดิสเพอร์ชันต่อการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ให้บริการได้กับ BER ของระบบ เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันที่ split ratio 1:8

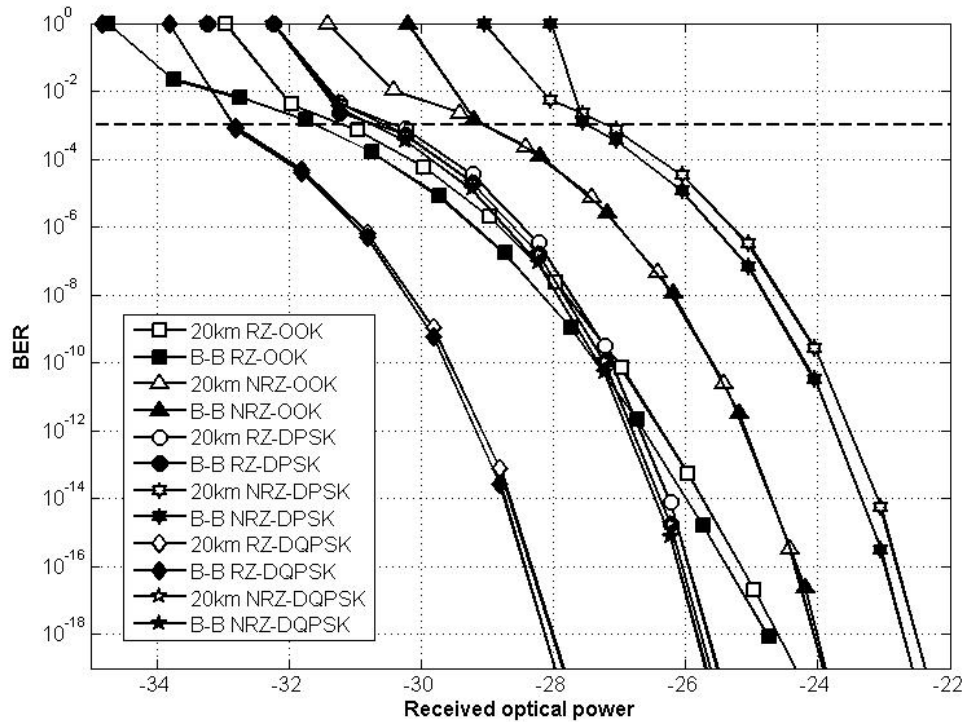
ดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสงเป็นปัญหาหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสง จากการ simulation โดยส่งผ่านสัญญาณแสงที่กำลัง 9 dBm ไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว ที่มีค่าดิสเพอร์ชัน 17.244 ps/km/nm ที่อัตราการแบ่งกำลังสัญญาณ 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 เพื่อหาระยะทางสูงสุดที่ระบบสามารถให้บริการได้เนื่องจากผลของดิสเพอร์ชัน รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ให้บริการได้กับ BER ของระบบ เมื่อคิดเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันที่อัตราการแบ่งกำลังสัญญาณ 1:8 จะเห็นได้ชัดว่าสำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK สามารถส่งสัญญาณได้เป็นระยะ 7, 5, 6, 6, 18.5, 13.5 km ตามลำดับ ซึ่งการส่งผ่านสัญญาณแบบ NRZ จะทนต่อผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ RZ จะมีความกว้างของ pulse ที่ขยายออกมากกว่าการส่งสัญญาณแบบ NRZ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 เป็นผลให้ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ ISI ที่ทำให้พัลส์สัญญาณขยายตัวกว้างออกและเกิดการเหลื่อมซ้อนกันของบิตสัญญาณ ทำให้เกิดการตรวจวัดบิตผิดพลาดส่งผลให้ค่า BER ของระบบแย่ลง

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ NRZ สามารถทนต่อผลของ dispersion ได้ดีกว่าการส่งสัญญาณแบบ RZ และการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK เนื่องจากมี spectral linewidth เท่ากับ 40 Gbps เท่ากัน ส่วนการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK สามารถทนต่อผลกระทบของดิสเพอร์ชันได้มากที่สุด เนื่องจากมีการแบ่งองค์ประกอบสัญญาณออกเป็นสองส่วน คือ I และ Q ทำให้ spectral linewidth เท่ากับ 20 Gbps ซึ่งลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK และ DPSK



รูปที่ 6.3 สเปกตรัมสัญญาณของการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK และ RZ-DQPSK

6.3 Power penalty ของการมอดูเลตสัญญาณประเภทต่างๆ



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ ONU โดยการส่งสัญญาณประเภทต่างๆ

ในส่วนนี้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณกับอัตราผิดพลาดบิตสำหรับการมอดูเลตสัญญาณทุกประเภท หลังจากส่งผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 20 km จากการ simulation โดยใช้พารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาแล้ว ที่ OLT ส่งสัญญาณกำลัง 9 dBm ผ่านเส้นใยแสงยาว 20 km ที่ติดตั้งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในระบบ (DCU) เพื่อกำจัดผลของดิสเพอร์ชันสะสม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณกับอัตราผิดพลาดบิตสำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK แสดงดังรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าที่ $BER = 10^{-3}$ การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK เมื่อส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงยาว 20 km พบว่าค่ากำลังรับของสัญญาณที่ ONU เท่ากับ -31.1, -29, -30.4, -27.1, -32.8 และ -30.5 dBm ตามลำดับ

พิจารณาการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK เปรียบเทียบกับ NRZ-DQPSK เมื่อใช้กำลังสัญญาณเฉลี่ยในการส่งเท่ากันที่ 9 dBm การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK จะมี peak power ของสัญญาณทางแสงที่สูงกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK ทำให้ที่ค่า BER = 10^{-3} การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK ใช้กำลังส่งที่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังรับของสัญญาณที่เท่ากัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ที่ค่ากำลังส่งเฉลี่ยของสัญญาณเท่ากัน การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ จะใช้กำลังรับของสัญญาณที่น้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DQPSK

เช่นเดียวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK และ RZ-OOK เปรียบเทียบกับ NRZ-DPSK และ NRZ-OOK เมื่อใช้กำลังสัญญาณเฉลี่ยในการส่งเท่ากันที่ 9 dBm การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK และ RZ-OOK จะมี peak power ของสัญญาณทางแสงที่สูงกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-DPSK และ NRZ-OOK ทำให้ที่ค่า BER = 10^{-3} การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DPSK และ RZ-OOK ใช้กำลังส่งที่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังรับของสัญญาณที่เท่ากัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ที่ค่ากำลังส่งเฉลี่ยของสัญญาณเท่ากัน การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ จะใช้กำลังรับของสัญญาณที่น้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ

6.4 แนวทางการออกแบบระบบ FTTx-PON

ค่าอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงทั้งหมดระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแสงที่ยอมรับได้หรือเรียกว่า link power budget ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างกำลังต่ำสุดของตัวส่งสัญญาณและค่ากำลังสูงสุดของตัวรับสัญญาณ (ในกรณีที่แย่มากที่สุด) ในการออกแบบระบบ PON นั้นจะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน link power budget ซึ่งสามารถคำนวณ link power budget ได้จากสมการที่ (6.1)

$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum l_c + \sum l_s + \sum l_{other} + G_{margin} \quad (6.1)$$

P_T คือ ค่า link power budget ทั้งหมด [dBm]

P_{Tx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณที่ตัวส่งสัญญาณแสง [dBm]

P_{Rx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสง [dBm]

α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแสง [dB/km]
L	คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ [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 link power budget โดยมีค่ากำลังสูญเสียจากปัจจัยต่างๆแสดงดังตาราง 6.1 จะได้ค่า link power budget ของการส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx-PON ที่มี split ratio 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 เท่ากับ 19.90, 22.90, 25.90 และ 28.90 dB ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการ simulation แสดงดังตาราง 6.2 จะเห็นว่า ค่า link power budget ที่ได้จากการ simulation ในกรณีที่แย่ที่สุดของการมอดูเลตสัญญาณทุกประเภทที่พิจารณา มีค่าไม่เกินค่า link power budget ที่ได้จากการคำนวณ

ตาราง 6.1 ค่ากำลังสูญเสียจากปัจจัยต่างๆ ในการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

Description	Loss (dB)
Loss of splices	0.03x5
Loss of connectors	0.2x2
Loss of splitter(1:4, 1:8, 1:16, 1:32)	6, 9, 12, 15
Loss of attenuation in optical fiber	0.21x20
Loss of attenuation in DCU	0.42x2.39222
System margin	8

ตาราง 6.2 Link power budget ของระบบ FTTx-PON ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-DQPSK, NRZ-DQPSK และ 4-QAM

Modulation	Split ratio	Loss from simulation(dB)	Loss from calculation(dB)
RZ-OOK	Split4	19.241	19.90

RZ-OOK	Split8	22.252	22.90
RZ-OOK	Split16	25.257	25.90
RZ-OOK	Split32	28.272	28.90
NRZ-OOK	Split4	19.246	19.90
NRZ-OOK	Split8	22.256	22.90
NRZ-OOK	Split16	25.266	25.90
NRZ-OOK	Split32	28.276	28.90
RZ-DPSK	Split4	14.021	19.90
RZ-DPSK	Split8	17.031	22.90
RZ-DPSK	Split16	20.041	25.90
RZ-DPSK	Split32	23.051	28.90
NRZ-DPSK	Split4	14.021	19.90
NRZ-DPSK	Split8	17.031	22.90
NRZ-DPSK	Split16	20.041	25.90
NRZ-DPSK	Split32	23.051	28.90
RZ-DQPSK	Split4	17.412	19.90
RZ-DQPSK	Split8	20.423	22.90
RZ-DQPSK	Split16	23.433	25.90
RZ-DQPSK	Split32	26.443	28.90
NRZ-DQPSK	Split4	17.338	19.90
NRZ-DQPSK	Split8	20.398	22.90
NRZ-DQPSK	Split16	23.410	25.90
NRZ-DQPSK	Split32	26.420	28.90
4-QAM	Split4	17.266	19.90
4-QAM	Split8	20.277	22.90
4-QAM	Split16	23.287	25.90
4-QAM	Split32	25.597	28.90

ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในแง่ของการส่งผ่านสัญญาณไปในเส้นใยแสงของระบบ PON มากที่สุดคือ ปัญหาของ chromatic dispersion ดังนั้นในการออกแบบระบบ PON จึงต้องมีการติดตั้ง DCU เพื่อกำจัดผลของ chromatic dispersion ในระบบที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK และ RZ-DQPSK โดยที่ DCU ที่ติดตั้ง มีความยาว 2.39222 km เมื่อต้องการระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณ 20 km และมีพารามิเตอร์ดังตาราง

ตาราง 6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ PON ที่ระยะทางให้บริการ 20 km

Fiber/parameter	Setting value
Wavelength	1552.52 nm
Power input	9 dBm
SMF	
dispersion@1552.52 nm	17.224 ps/(km.nm)
Dispersion slope	0.075 (ps/km/nm ²)
Attenuation coefficient	0.21 dB/km
polarization mode dispersion	0.08 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
non-linear coefficient	0.8903 W ⁻¹ /km
DCF	
Attenuation coefficient	5.4 dB/km
Dispersion	-144 (ps/km/nm)
Dispersion slope	-0.58 (ps/km/nm ²)

จากการออกแบบระบบดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าใช้ความยาวคลื่นอ้างอิงที่ 1552.52 nm หรือที่ความถี่ 193.1 THz ซึ่งเป็นความถี่มาตรฐานเดิมที่มีอยู่ และเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ความยาวคลื่นทับกับการส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 10 Gbps ซึ่งใช้ความยาวคลื่นขาลงที่ 1577 nm และความยาวคลื่นขาขึ้นที่ 1277 nm และการส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 2.5 Gbps ซึ่งใช้ความยาวคลื่นขาลงที่ 1490 nm ความยาวคลื่นขาขึ้นที่ 1310 nm ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอยู่โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ใหม่

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

โครงข่าย FTTH เป็นโครงข่ายเข้าถึงที่มีความเร็วสูงสุด โดยมีความเร็วสูงสุดถึง 10 Gbps ทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้ผู้ใช้ปลายทางสามารถใช้งานอุปกรณ์สื่อสารได้หลายชนิดพร้อมกัน แต่เนื่องด้วยความต้องการแบนด์วิดท์ที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคตอันใกล้ จึงได้มีการแก้ปัญหาการให้บริการแบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอ โดยการนำระบบ CWDM มาใช้กับโครงข่ายส่วนกลาง ซึ่งมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลถึง 40 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ ดังนั้นเทคโนโลยี PON ในอนาคต ควรที่จะได้รับการพัฒนาให้สามารถรองรับการส่งสัญญาณความเร็ว 40 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ

ถึงแม้ว่าโครงข่ายส่วนกลาง จะมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 40 Gbps ขึ้นไป แต่อุปกรณ์ในโครงข่ายมีความซับซ้อนสูงและมีราคาแพง ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในโครงข่ายเข้าถึง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาหาผลกระทบของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อการสื่อสารสัญญาณความเร็ว 40 Gbps บน PON โดยอาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-DQPSK, NRZ-DQPSK และ n-QAM รวมถึงได้ศึกษาวิธีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากผลของดิสเพอร์ชัน ซึ่งการศึกษผลกระทบของความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มีต่อการสื่อสารสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps บน PON ทำโดยการ simulation ด้วยโปรแกรม Optisys และการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหา และหาแนวทางในการออกแบบระบบ FTTH ให้สามารถตอบสนองบริการสื่อสารข้อมูลในยุคหน้าได้อย่างแท้จริงโดยหวังว่าจะได้รับความรู้และแนวทางออกแบบระบบบน PON ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดของระบบที่มีอยู่

จากการศึกษาในเชิงทฤษฎีพบว่า การส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ผ่านเส้นใยแสง ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดจากปัจจัยหลักสี่อย่างคือ ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ, ดิสเพอร์ชัน, PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยจากการคำนวณพบว่า ผลของดิสเพอร์ชันเป็นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะของสัญญาณของระบบ รองลงมาคือผลของดิสเพอร์ชัน ส่วน PMD และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ไม่มีผลต่อระบบในช่วงที่พิจารณา ซึ่งระยะทางสูงสุดที่ระบบสามารถให้บริการได้เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณที่คำนวณได้ ที่ split ratio 1:4, 1:8, 1:16 และ 1:32 เท่ากับ 71.43, 57.14, 42.86 และ 28.57 km ตามลำดับ ระยะทางสูงสุดที่ระบบสามารถให้บริการได้เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันของการส่งผ่าน

สัญญาณที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK และ RZ-DPSK เท่ากับ 5.08 km. การมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK และ NRZ-DPSK เท่ากับ 10.16 km การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK เท่ากับ 10.16 และ 20.32 km ตามลำดับ

จากการ simulation เพื่อตรวจสอบสมมติฐานข้างต้น พบว่าผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สอดคล้องกับผลของการคำนวณ และการแก้ไขปัญหาของความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วยการนำ DCU มาติดตั้งในระบบ PON พบว่าการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะทาง 20 km โดยไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้กำลังงานไฟฟ้านั้นทำได้ ที่ $BER = 10^{-3}$ โดยยังไม่ผ่าน FEC และเมื่อผ่าน FEC แล้ว BER ของระบบจะดีขึ้นเป็น 10^{-9}

การส่งผ่านสัญญาณที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM ที่เสนอในเนื้อหาบทที่ 4 พบว่า การมอดูเลตสัญญาณด้วยวิธีนี้มีความซับซ้อน และทำได้ยากยิ่ง เนื่องจากการถอดรหัสสัญญาณแบบนี้เป็นแบบ coherent ซึ่งจำเป็นต้องรู้เฟสที่แน่นอนของสัญญาณ และเนื่องจากในการ simulation ไม่มี phase corrector ที่ทำหน้าที่ระบุและวัดเฟสของสัญญาณที่แน่นอนจากการมอดูเลตสัญญาณได้ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจวัดอัตราบิดเบือนของระบบได้อย่างถูกต้อง

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลของการลดทอนกำลังสัญญาณจากการ simulation สำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK สามารถส่งสัญญาณได้เป็นระยะ 80, 70, 65, 90, 115, 105 km ตามลำดับ ซึ่งการส่งผ่านสัญญาณแบบ NRZ จะทนต่อผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณได้มากกว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ NRZ เป็นการส่งกำลังสัญญาณตลอดช่วงคาบพิท ซึ่งต่างจากการส่งสัญญาณแบบ RZ ที่มีการส่งกำลังสัญญาณเพียงครึ่งคาบพิท ดังนั้นการส่งสัญญาณแบบ NRZ ทำให้กำลังสัญญาณเฉลี่ยของการส่งผ่านสัญญาณมากกว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ RZ ที่ทำให้สามารถส่งผ่านสัญญาณไปในระบบที่มีเฉพาะค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณได้ดีกว่า

การวิเคราะห์ผลของดิสเพอร์ชันจากการ simulation สำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK สามารถส่งสัญญาณได้เป็นระยะ 7, 5, 6, 6, 18.5, 13.5 km ตามลำดับ ซึ่งการส่งผ่านสัญญาณแบบ NRZ จะทนต่อผลของดิสเพอร์ชันได้มากกว่าการส่งผ่านสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ RZ จะมีความกว้างของ pulse ที่ขยายออกมากกว่าการส่งสัญญาณแบบ NRZ เป็นผลให้ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ ISI ทำให้ค่า BER ของระบบแย่ง การมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ให้

ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK เนื่องจากมี spectral linewidth เท่ากับ 40 Gbps เท่ากัน ส่วนการมอดูเลตสัญญาณแบบ DQPSK สามารถทนต่อผลกระทบของดิสเพอร์ชันได้มากที่สุด เนื่องจากมีการแบ่งองค์ประกอบสัญญาณออกเป็นสองส่วน คือ I และ Q ทำให้ spectral linewidth เท่ากับ 20 Gbps ซึ่งลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK และ DPSK

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณกับอัตราผิดพลาดบิต สำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ-OOK, NRZ-OOK, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-DQPSK และ NRZ-DQPSK พบว่าที่ $BER = 10^{-3}$ ค่ากำลังรับของสัญญาณที่ ONU เท่ากับ -31.1, -29, -30.4, -27.1, -32.8 และ -30.5 dBm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากำลังส่งเฉลี่ยของสัญญาณ เท่ากัน การมอดูเลตสัญญาณแบบ RZ จะใช้กำลังรับของสัญญาณที่น้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการสื่อสารสัญญาณบนโครงข่ายที่ใช้ตัวกลางเป็นเส้นใยแสงแบบหลายโหมด และควรนำไปศึกษาเพิ่มเติมบนระบบ DWDM เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ อย่างหลากหลาย

รายการอ้างอิง

- [1] David Boraks, As movies and gaming grow, MI-Connection adds capacity [online]. Available from :<http://davidsonnews.net/blog/2011/12/20/as-web-movies-gaming-grow-mi-connection-adds-capacity/> [2011, Dec 20]
- [2] Cisco, The ZettabyteEra [online]. Available from: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf [2012, May 30]
- [3] Willem Vereecken, et.all, Power Consumption in Telecommunication Networks : Overview and Reduction Strategies. IEEE communications magazines, vol.49. issue6. pp.1-6.
- [4] Bob Chomycz. Fiber optic installer's field manual. McGraw Hill, 2000.
- [5] ปรีชา ยุพาพิน. เครือข่ายใยแก้วนำแสง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัทดวงกลมสมัย จำกัด, 2541.
- [6] InfoVistaCorperation. Broadband Access Network [online] .Available from :<http://www.infovista.com/needs/broadband-and-triple-play>
- [7] Lena Wosinska and Jiajia Chen, "Reliability Performance Analysis vs. Deployment Cost of Fiber Access Networks", 7th International Conference on Optical Internet , 2008
- [8] F. J. Effenberger and K. W. Lu, "An Overview of FTTH Networks - Past History, Current Status, and Future Designs". SPIE Proceeding, vol. 2917. pp. 293-304
- [9] การประยุกต์ใช้เส้นใยนำแสงในระบบโทรคมนาคม chapter8 [online]. Available from www.udontech.ac.th/web54/media/download/en/en-8.pdf
- [10] พลุ แก้วปลั่ง, Semiconductor Electronics plus. (มกราคม 2554): 121-130
- [11] อธิคม ฤกษ์บุตร, FTTH – Fiber – To – The – Home. วารสารสื่อสารของคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, 2549
- [12] FTTx 2012, white paper FTTx 2012, digiworld by IDATE [online] .Available from www.idate.org

- [13] Idate, FTTH vs LTE, [online]. Available from :http://www.idate.org/en/News/FTTH-vs-LTE_747.html
- [14] Andreas Gladisch, et al., Evolution of terrestrial optical system and core network architecture. IEEE, vol.94.no.5.May 2006
- [15] Adel A.M. Saleh, Jane M. Simmons, Evolution Toward the Next-Generation Core Optical Network, Journal of lightwave technology, vol.24. no.9. Sep 2006.
- [16] Shinada S. et al, Wada N., "Field demonstration of DWDM/NRZ-DQPSK optical packet switching and buffering" OptoElectronics and Communications Conference (OECC), 2011.pp.780-781
- [17] P.J. Urban et al.,High-Bit-rate Dynamically Reconfigurable WDM-TDM, Journal of optical communication network,Vol.1. NO.2. july 2009
- [18] P.J. Urban et al.,High-Bit-rate Dynamically Reconfigurable WDM-TDM, Journal of optical communication network,Vol.1. NO.2. july 2009
- [19] Leonid G. Kazovsky, et al., Next-Generation Optical Access Networks, Journal of lightwave technology, Vol.25. NO.11. Nov 2007
- [20] Glen Kramer, et al.,Evolution of Optical Access Networks: Architectures and Capacity Upgrades, IEEE, Vol.100. No.5. May 2012
- [21] Huawei, Next-Generation PON evolution [online]. Available from : <http://www.huawei.com/us/static/hw-077443.pdf>
- [22] Md.Shamin Ahsan, Migration to the next generation optical access networks using hybrid WDM/TDM-PON, Journal of networks, vol.6.no.1. Jan 2011
- [23] Jun-ichi Kani, "Next-generation PON-part I: Technology roadmap and general requirements" Communications Magazine, IEEE. 2009. vol47. pp43-49
- [24] W. Astar and G.M. Carter, Mitigation of XPM Penalty in 10-Gb/s OOK/DBPSK Mixed Modulation Format 50-GHz-Spaced WDM Transmission by Conversion of OOK to BPSK Using an SOA, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 20. NO. 20. OCTOBER. 2008

- [25] JieGao, Performance of optical DPSK and DQPSK in 40G bit/s transmission systems, SPIE Digital Library, 2008
- [26] R.A. Griffin, et al., 10 Gb/s Optical Differential Quadrature Phase Shift Key(DQPSK) Transmission using GaAdAlGaAs Integration. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, OFC 2002, pp. FD6-1-FD6-3.
- [27] Wree,C. RZ-DQPSK format with high spectral efficiency and high robustness towards fiber fiber nonlinearities. Optical Communication, ECOC 2002. vol.4. pp. 1-2.
- [28] Inoue Takanori, Large-capacity Optical Transmission Technologies Supporting the Optical Submarine Cable System. NEC technical journal, Vol.5 No.1/2010
- [29] J.M.P. Delavaux, G.C. Wilson, C. Hullin, B. Neyret and C. Bethea, QAM-PON and Super PON for Access Distribution Networks, IEEE Conference publication in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001.
- [30] N. Sotiropoulos, A.M.J. Koonen and H. de Waardt, Multi-level modulation formats for optical access Networks, Proceedings Symposium IEEE Photonics Benelux Chapter, 2009
- [31] Ken-ichi Kitayama, OCDMA Over WDM PON-Solution Path to Gigabit-Symmetric FTTH, Journal of lightwave technology, Vol. 24, No. 4. April. 2006.
- [32] Kun Qiu, et al., OFDM-PON Optical Fiber Access Technologies, Proc. of SPIE-OSA-IEEE, Vol. 8309 830921-1.
- [33] Lynn Hutcheson, Ovum, FTTx : Current Status and the Future, IEEE Communications Magazine, July. 2008.
- [34] G. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics, 3rd Ed.," Academic Press, 2001
- [35] GRAHAM FINNIE, "FTTH in Europe :Forecast& Prognosis, 2006-2011," HEAVY READING. [online]. Available: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/Market_Forecast_January_2005.pdf
- [36] Graham Finnie, "European FTTH Forecast, 2010-2015", FTTH Council Conference, Milan

- [37] Keiser, G. Optical fiber communications 3rd edition, McGraw Hill, 2000.
- [38] Agrawal, GP. Nonlinear Fiber Optics 3rd edition, Academic Press, 2001.
- [39] MouloudRahmani. Digital Modulation. [online]. Available from :
<http://mouloudrahmani.com/Electrical/Communication/DigitalModulation.html>
- [40] Sen Zhang, Advanced Optical Modulation formats in High-speed Lightwave System, Msc, Department of Electrical Engineering and Computer Science and the Faculty of the Graduate School of the University of Kansas
- [41] Peter J.Winzer, and René-Jean Essiambre, Advanced Optical Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks. Journal of Lightwave Technology, Vol.24, No.12. December 2006.
- [42] Parente, Fernando, Cross effects in services over PON, Departamento de ElectrónicaTelecomunicações e Informática, 2010
- [43] Bob Schwanke and Keith Nellis. NRZ-to-RZ data conversion using high-speed OR/AND Fast Gbit/s gates provide straightforward solutions. [online]. Available from: http://www2.electronicproducts.com/NRZ_to_RZ_data_conversion_using_high_speed_OR_AND-article-FAJH_Inphi-Design_3_Jan_2008-html.aspx
- [44] Proakis, John G. Digital Communications. Singapore: McGraw Hill.1995
- [45] Couch, Leon W. II. Digital and Analog Communications. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall,1977
- [46] Haykin, Simon. Digital Communications. Toronto, Canada: John Wiley & Sons,1988
- [47] Cisco, Wireless Physical Layer Concepts [online]. Available from :
http://www.iphelp.ru/doc/3/Cisco.Press.802.11.Wireless.LAN.Fundamentals.eBook-LiB/1587050773_ch03lev1sec1.html#ch03fig07
- [48] Lian Zhao, Hari Shankar and Ariel Nachum, 40G QPSK and DQPSK modulation. [online] Available: <http://www.inphi.com/technology-overview/40G-QPSK-and-DQPSK-Modulation.pdf>

- [49] ลัญจนกร วุฒิสิตธิกุลกิจ. หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [50] Jong Won-Kim, "An Optimized ATM-PON Based FTTH Access Network" in Information, Communications and Signal Processing ICICS '99, Singapore, 1997, pp.1800-1804
- [51] Power Budget Calculations for GarrettCom Inc. Fiber Transceivers [online] Available: www.garrettcom.com/techsupport/power_budget.pdf. May 2010
- [52] Telecom Asia. 10G EPON- Unleashing the Bandwidth Potential. [online]. Available: www.telecomasia.net/pdf/ZTE/ZTE_101909.pdf
- [53] ITU-T Rec. G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, June. 2005.
- [54] Ioannis P. Chochliouros, George A Heliotis and Anastasia S. Spiliopoulou , "An Introduction to Optical Access Networks: Technological Overview and Regulatory Issues for Large-Scale Deployment," Optical access networks and advance photonics, New York, Hershey, 2010, pp 1-18
- [55] Christos Vassilopoulos, "The New Generation Access Network," Optical access networks and advance photonics, New York, Hershey, 2010, pp, 258-293
- [56] Rujian Lin, "Next Generation PON in Emerging Networks" Optical Fiber communication/ National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, CA, 2008, pp.1-3
- [57] Peter J. Winzer, Rene'-Jean Essiambre, "Advanced Optical Modulation Formats," IEEE, vol. 95, issue 5, pp. 952 – 985, May. 2006.
- [58] Govind P. Agrawal. "Lightwave Technology Telecommunication Systems". Wiley-Interscience, 2005
- [59] Bostjan BataGelj, Need of Knowing Fiber Non-linear Coefficient in Optical Network [Online]. Available: <http://antenna.fe.uni-1j.si/~lok>

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววราภรณ์ เกตุอุไร เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

บทความวิชาการในงานประชุม The Fifth National conference on Optics and Applications (NCOA-7) จัดขึ้น ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย โดยภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในวันที่ 16 มีนาคม 2555 ในชื่อบทความเรื่อง Influence of Signal Distortion on 40 Gbps RZ-OOK Signal Transmission over Passive Optical Network

บทความวิชาการในงานประชุม 17th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2012) จัดขึ้น ณ BEXCO เมืองปูซาน ประเทศเกาหลีใต้ ในวันที่ 2-6 กรกฎาคม 2555 ในชื่อบทความเรื่อง Feasibility of 40-Gbps RZ-DQPSK Signal Transmission over PON