

การศึกษากาการใช้การเข้าถึงหลายทางแบบซีดีเอ็มเอแสงสำหรับการส่งผ่าน
สัญญาณ 40 กิกะบิตต่อวินาทีบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

นายธีระ ศักดิ์ชัยชาญชล

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.

STUDY ON THE USE OF OPTICAL CODE-DIVISION MULTIPLE ACCESS FOR 40-GBPS
SIGNAL TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK

Mr. Theera Sakchaichan

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

การศึกษาการใช้การเข้าถึงหลายทางแบบซีดีเอ็มเอแอส
สำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 กิกะบิตต่อวินาทีบน
โครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

โดย

นายธีระ ศักดิ์ชัยชาญชล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)

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

ธีระ ศักดิ์ชัยชาญชล : การศึกษาการใช้การเข้าถึงหลายทางแบบซีดีเอ็มเอแสงสำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 กิกะบิตต่อวินาทีบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ.

(STUDY ON THE USE OF OPTICAL CODE-DIVISION MULTIPLE ACCESS FOR 40-GBPS SIGNAL TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 67 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงความเป็นไปได้และวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการนำการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับโครงข่ายPON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เพื่อเพิ่มความสามารถของเทคโนโลยีFTTH ในปัจจุบันที่ใช้การเข้าถึงตัวกลางแบบแบ่งช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (TDM) ที่ต้องมีการชิงโครนัสกันระหว่างอุปกรณ์ในโครงข่าย ในการจัดสรรช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้งานไม่สามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยการนำการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA มาใช้งานบนโครงข่าย PON ทำให้โครงข่ายสามารถสื่อสารสัญญาณได้โดยไม่ต้องมีการชิงโครนัสกันระหว่างอุปกรณ์ (asynchronous transmission) และผู้ใช้งานแต่ละรายสามารถใช้งานแบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

จากการศึกษาพบว่าการใช้งานเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA บนโครงข่าย PON นั้น ประสิทธิภาพของระบบได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ กำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน ความชันดิสเพอร์ชันปรากฏการณ์เคอร์ PCR และชนิดของ LPF ที่ภาครับสัญญาณ เมื่อวิเคราะห์สมรรถนะด้วยการจำลองระบบ OCDMA-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ด้วยระยะทาง 20 km ภายใต้ผลกระทบจากปัจจัยทั้งหมดดังกล่าว โดยใช้ multi-level phase-shifted en/decoders พบว่าจำนวนผู้ใช้สูงสุดที่ค่า BER ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ที่ 10^{-3} คือ 7, 15 และ 19 ราย เมื่อใช้ 8, 16 และ 32 level phase-shift en/decoder ตามลำดับ และเมื่อกำหนดจำนวนผู้ใช้งานในระบบเป็น 8 ราย สามารถหา power penalty ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน MAI ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} ได้เป็น 0.89 และ 0.35 dB สำหรับ 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders โดยในส่วนของระบบที่ใช้ 8-level phase-shifted en/decoders เมื่อใช้งานที่ผู้ใช้งาน 8 รายประสิทธิภาพของระบบไม่เพียงพอต่อการให้บริการได้ เมื่อดำเนิน link power budget ของระบบเพื่อเสนอเป็นแนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA-PON โดยทั่วไปพบว่าระบบ OCDMA-PON ที่ใช้ 8, 16 และ 32 level phase-shift en/decoder โดยมีผู้ใช้งานของแต่ละระบบเป็น 4, 8 และ 16 ราย ตามลำดับ มีค่า link power budget ของระบบที่สามารถนำไปใช้ออกแบบ คือ 23, 26, และ 29.5 dB ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิติติ
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5570243521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL CDMA / PASSIVE OPTICAL NETWORK / ACCESS NETWORK

THEERA SAKCHAICHANCHON: STUDY ON THE USE OF OPTICAL CODE-DIVISION MULTIPLE ACCESS FOR 40-GBPS SIGNAL TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 67 pp.

This thesis studies the feasibility, and analyzes the factors that affect the performance of the optical-code division multiple access (OCDMA) scheme over passive optical network (PON) at data rate of 40 Gbps, aiming to improve the performance of FTTH technology, which is currently using the time-division multiplexing (TDM) scheme that requires the time synchronization among all components in the network in order to allocate a time-slot for media access. The TDM scheme will cause a poor efficiency of bandwidth utilization among subscribers in the network. To improve the efficiency of bandwidth utilization, the use of OCDMA, which can provide the asynchronous media access, on PON is capable for full bandwidth utilization for all subscribers in a PON.

According to the results from our study, the performance of OCDMA signal transmission over PON is shown to be dependent of signal power, chromatic dispersion, dispersion slope, Kerr effect, PCR, and types of low pass filter at receiver. By computer simulation at a data rate of 40 Gbps per subscriber, we demonstrate the 40-Gbps signal transmission of DPSK-OCDMA over PON for 20 km with using a programmable multi-level phase-shifted en/decoder, and found the maximum number of subscribers that supported by an 8, 16 and 32-level phase-shifted en/decoder is 7, 15 and 19, respectively, at the BER lower than 10^{-3} . For the OCDMA-PON with the use of 16 and 32-level phase-shifted en/decoders for 8 subscribers per PON, we found the power penalty due to MAI noise at BER = 10^{-3} are 0.89 and 0.35 dB, respectively. However, for the case of 8-level phase-shifted en/decoder the efficiency, the OCDMA scheme cannot provide the 40-Gbps data transmission service to 8 subscribers simultaneously. Furthermore, we also present the link power budget of the OCDMA-PON that can be utilized to design the network generally. The power budget values for OCDMA-PON using 8, 16 and 32 level phase-shift en/decoders with 4, 8 and 16 subscribers have are found to be 23, 26, and 29.5 dB, respectively.

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้ยังคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมถึงแนวคิดในการทำงานวิจัยซึ่งเปรียบเสมือนแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ Optisys8.0 ในการจำลองการส่งสัญญาณจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (Telecommunication Research and Industrial Development Institute: TRIDI) และสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการทุนศึกษย์ กัญญา ที่ให้เงินสนับสนุนในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลา 1 ปี

กำลังใจและบรรยากาศที่ดีจากเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ และทำที่สุดขอขอบคุณคุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนทั้งร่างกายและแรงใจตลอดมาอย่างหาที่สุดมิได้ ดังนั้นจึงมีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งดีๆ เหล่านี้ได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบคุณตลอดไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	12
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	12
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	13
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	13
2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	14
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	14
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง	15
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ.....	16
2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (Fiber attenuation loss).....	16
2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion).....	18
2.3.2.1 ดิสเพอร์ชัน (second order dispersion).....	18
2.3.2.2 ความชันดิสเพอร์ชัน (dispersion slope).....	22

บทที่	หน้า
2.3.3	ปรากฏการณ์เคอร์ (kerr effect).....23
2.3.3.1	self-phase modulation (SPM).....23
2.3.3.2	cross-phase modulation (XPM)24
2.3.3.3	four-wave mixing (FWM)26
2.4	เทคโนโลยีโครงข่าย FTTx.....27
2.4.1	โครงสร้างของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ27
2.4.2	มาตรฐานของ FTTx27
2.5	Link Power Budget.....29
2.6	เทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน.....30
2.7	ทฤษฎีการมอดูเลตสัญญาณแบบ OCDMA32
2.7.1	โครงสร้างและลักษณะการทำงาน32
2.7.2	การเข้ารหัสและการถอดรหัส (encode/decode)33
2.7.3	PCR38
3	การวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่ายเข้าถึงแบบพาสซีฟ39
3.1	แบบจำลองระบบของการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA แสงบนโครงข่าย PON.....39
3.2	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA41
3.2.1	การลดทอนกำลังของสัญญาณ41
3.2.2	ดิสเพอร์ชัน42
3.2.3	ปรากฏการณ์เคอร์ (kerr effect).....45
3.2.4	power contrast ratio47
3.2.5	ชนิดของ low pass filter.....49
4	สมรรถนะของโครงข่ายเข้าถึงแบบพาสซีฟที่ใช้การเข้าถึงตัวกลางแบบซีดีเอ็มเอแสง54

บทที่	หน้า
4.1 แบบจำลองระบบ OCDMA-PON	54
4.1.1 ตัวส่งสัญญาณ OCDMA.....	54
4.1.2 เส้นใยแสงแบบ SMF	54
4.1.3 power splitter.....	55
4.1.4 ตัวรับสัญญาณ OCDMA	55
4.2 จำนวนผู้ใช้งานสูงสุด	56
4.3 power penalty	57
4.4 link power budget	58
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	67

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 อัตราความจุข้อมูลของเส้นใยแสงบนช่วง C-band	4
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ OCDMA แบบต่างๆ	11
ตารางที่ 2.1 ค่า link power budget ของ PON	29
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งของสัญญาณกับ BER	46
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเส้นใยแสงแบบ SMF ชนิด G.652D ที่ใช้ในการจำลอง	55
ตารางที่ 4.2 กำลังสูญเสียจากการ encode และ decode สัญญาณ	58

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 การประมาณการณของปริมาณข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2016	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างของโครงข่ายการสื่อสารในปัจจุบัน	3
รูปที่ 1.3 ภาพรวมของโครงข่าย access network	6
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของระบบ PON	7
รูปที่ 1.5 การประมาณการณจำนวนผู้ให้บริการ FTTx ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2005 ถึงปี ค.ศ. 2012	7
รูปที่ 1.6 การสื่อสารสัญญาณในภาค uplink ของระบบTDM-PON	8
รูปที่ 1.7 การสื่อสารสัญญาณของระบบ WDM-PON	9
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	14
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกำลัง และความยาวคลื่นที่ผลิตมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1970	17
รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	18
รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น	19
รูปที่ 2.5 การแสดงการเกิด Inter-symbol interference (ISI)	20
รูปที่ 2.6 ผลของดิสเพอร์ชันอันดับสามต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) สัญญาณ พัลส์ขาเข้า (ข) สัญญาณพัลส์ขาออก (ค) สัญญาณสเปกตรัมขาเข้า (ง) สัญญาณ สเปกตรัมขาออก	22
รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) ทางความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ	24
รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	25
รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	27
รูปที่ 2.10 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [37]	31
รูปที่ 2.11 การทำงานของระบบ OCDMA-PON	32
รูปที่ 2.12 การ encode สัญญาณ แบบ multi-level phase shifted	34
รูปที่ 2.13 การ decode สัญญาณ แบบ multi-level phase shifted ในกรณีที่มีรหัสตรงกัน	35
รูปที่ 2.14 correlation ของสัญญาณที่ถูก decode ในกรณีที่มีรหัสตรงกัน	35

รูปที่ 2.15 ลักษณะของ auto-correlation ที่ได้จากการ decode35

รูปที่ 2.16 การ decode สัญญาณ แบบ multi-level phase shifted ในกรณีที่รหัสไม่ตรงกัน ...36

รูปที่ 2.17 correlation ของสัญญาณที่ถูก decode ในกรณีที่รหัสไม่ตรงกัน37

รูปที่ 2.18 ลักษณะของ cross-correlation ที่ได้จากการ decode37

รูปที่ 2.19 cross-correlation (ก) รหัสห่างกันมาก (ข) รหัสห่างกันน้อย37

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบ OCDMA-PON40

รูปที่ 3.2 พัลส์สัญญาณแสง40

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ภาครับของสัญญาณและ BER.....42

รูปที่ 3.4 สัญญาณ OCDMA ที่ถูกเข้ารหัส (ก) ไม่มีผลของดิสเพอร์ชัน (ข) ผลจากดิสเพอร์ชัน...43

รูปที่ 3.5 auto-correlation ของสัญญาณ OCDMA เมื่อได้รับผลของดิสเพอร์ชัน43

รูปที่ 3.6 eye diagram (ก) ไม่มีผลจากดิสเพอร์ชัน (ข) ได้รับผลจากดิสเพอร์ชัน44

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า dispersion กับ BER.....45

รูปที่ 3.8 eye diagram (ก) B-B (ข) ได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นระยะ 20 km47

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง PCR และ code number48

รูปที่ 3.10 PCR ของ code หมายเลข 5.....48

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง PCR กับความยาวของรหัส.....49

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับและ BER เมื่อใช้ LPF ชนิดต่างๆ ..50

รูปที่ 3.13 eye diagram ของสัญญาณที่ผ่าน LPF ที่ค่า BER = 10^{-3} ในกรณีผู้ใช้งาน 1 ราย.....51

รูปที่ 3.14 eye diagram ของสัญญาณที่ผ่าน LPF ที่ค่า BER = 10^{-3} ในกรณีผู้ใช้งาน 8 ราย.....52

รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับและ BER เมื่อใช้ LPF
ชนิดต่างๆ กรณีผู้ใช้งาน 8 ราย ของ code หมายเลข 153

รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับและ BER เมื่อใช้ LPF
ชนิดต่างๆ กรณีผู้ใช้งาน 8 ราย ของ code หมายเลข 13.....53

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับจำนวนผู้ใช้ในระบบ OCDMA-PON56

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับกับค่า BER และ eye
diagram (i) ผู้ใช้งาน 8 ราย (ii) ผู้ใช้งาน 1 ราย57

บทที่ 1

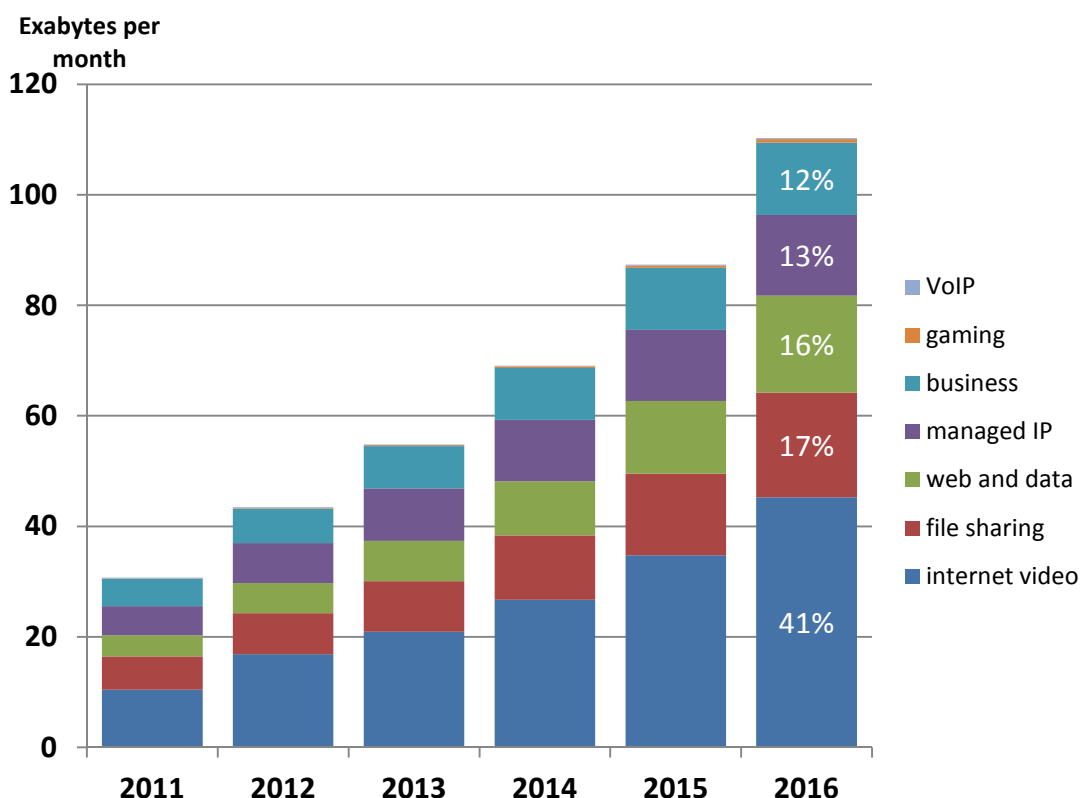
บทนำ

การสื่อสารในยุคนี้ที่ความเร็วในการติดต่อสื่อสารมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทำให้มีความต้องการแบนด์วิดท์และอัตราข้อมูลที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องของผู้ใช้บริการ เพื่อตอบสนองต่อบริการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น การทำธุรกรรมผ่านอินเทอร์เน็ต การประชุมทางไกล หรือดิจิทัลทีวี ความละเอียดสูง ทำให้โครงข่าย FTTx ซึ่งเป็นโครงข่ายเข้าถึงที่มีความสามารถในการรองรับต่อความต้องการของผู้ใช้บริการได้สูงสุดในปัจจุบัน อาจไม่สามารถรองรับความต้องการในอนาคตได้ จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่าย FTTx ที่ใช้โครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network: PON) วิทยานิพนธ์นี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายเข้าถึงเชิงแสงแบบพาสซีฟ โดยทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้รวมทั้งข้อจำกัดของการนำการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA มาใช้สำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

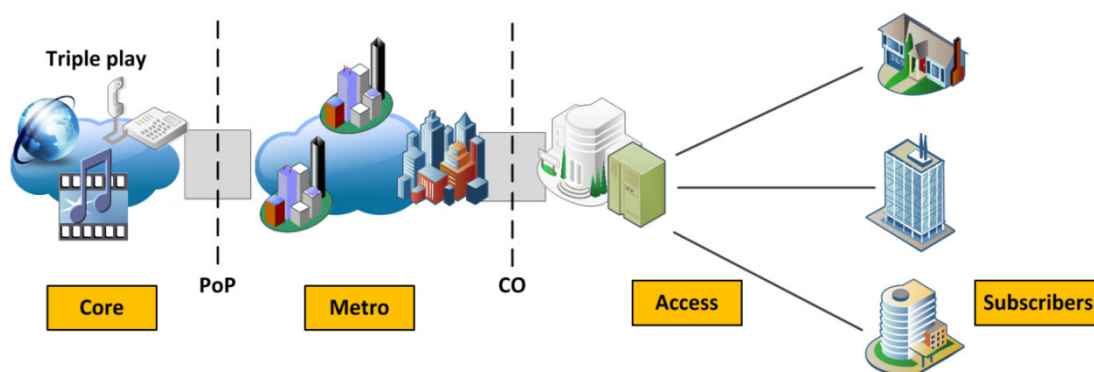
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสารทำให้เกิดการพัฒนาในหลากหลายด้าน ทั้งในด้านเศรษฐกิจ การเมืองการปกครอง การศึกษา สาธารณสุข การพัฒนาสังคมและคุณภาพชีวิตมนุษย์ ดังนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารจึงได้รับความสนใจในการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดจุดเปลี่ยนของเทคโนโลยีการสื่อสารเข้าสู่ยุคของการสื่อสารด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อในปี ค.ศ. 1838 แซมมวล มอร์สได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์โทรเลขโดยการแทรกข้อมูลเข้าไปในคลื่นพาห้ (carrier) [1] ตั้งแต่นั้นมาก็เกิดการพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสารอย่างรวดเร็ว ในปี ค.ศ. 1983 ก็เริ่มมีการใช้งานระบบอินเทอร์เน็ต และเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา

หลังจากอินเทอร์เน็ตเริ่มเป็นที่แพร่หลายอินเทอร์เน็ตก็เริ่มเข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตของมนุษย์มากขึ้น มีการนำบริการต่างๆมาให้บริการผ่านอินเทอร์เน็ตมากขึ้น อาทิเช่น e-commerce e-education หรือแม้กระทั่งธุรกิจการให้บริการบันเทิง entertainment แบบ broadband ต่างๆ เช่น very-high-speed internet บริการ interactive TV และ video on demand หรือ video streaming online game และ music on demand ซึ่งจากบริการทั้งหลายเหล่านี้ทำให้ผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้ต้องการแบนด์วิดท์ในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการประมาณการณ์ IP traffic จะเพิ่มขึ้นปีละ 29% ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2016 ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [2] ซึ่งจากปัจจัยต่างๆเหล่านี้ทำให้มีการพัฒนาโครงข่ายการสื่อสารความเร็วสูงและมีความเชื่อถือได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการในการรับส่งข้อมูลปริมาณมหาศาลที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน



รูปที่ 1.1 การประมาณการณ์ของปริมาณข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ถึงปี ค.ศ. 2016



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของโครงข่ายการสื่อสารในปัจจุบัน

โดยโครงข่ายการสื่อสารในปัจจุบันนั้นสามารถแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ได้แก่ core network ซึ่งเป็น backbone network ของระบบการสื่อสารทำหน้าที่รับส่งข้อมูลในระดับ long-haul ช่วยให้เกิดการติดต่อถึงกันระหว่างโครงข่าย metropolitan area network (MAN) ซึ่งเป็นโครงข่ายการสื่อสารที่รับส่งข้อมูลในระดับเมืองคอยเชื่อมโยงกันเฉพาะในเขตเมืองเดียวกัน หรือหลายเขตเมืองที่อยู่ใกล้กันส่วนสุดท้ายคือโครงข่ายระดับ access network ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อผู้ใช้เข้าสู่ระบบสื่อสาร

เนื่องจากความต้องการโครงข่ายสื่อสารความเร็วสูงและมีความเชื่อถือได้ core network ซึ่งถือว่าเป็นเสมือนเป็นแกนกลางของระบบสื่อสารโทรคมนาคมก็ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปัจจุบันนั้นใช้การส่งข้อมูลผ่านระบบเส้นใยแสง (optical fiber) ที่นำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบ wavelength-division multiplexing (WDM) และมีอัตราข้อมูลของช่องสัญญาณสูงสุดถึง 640 Gbps ดังตัวอย่างแสดงในตาราง 1.1 ที่แสดงถึงอัตราความจุข้อมูลของเส้นใยแสงบนช่วงความยาวคลื่น C-band ซึ่งจะสามารถรองรับปริมาณข้อมูลได้ถึง 100Tbps เมื่อใช้ช่วงความยาวคลื่น C-band และ L-band ร่วมกัน [3] ทำให้โครงข่าย core network ไม่ว่าจะ เป็นโครงข่ายระดับ MAN หรือแม้กระทั่งโครงข่ายระดับ long-haul มีความสามารถเพียงพอที่จะรองรับปริมาณข้อมูลมหาศาลในปัจจุบัน และที่คาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

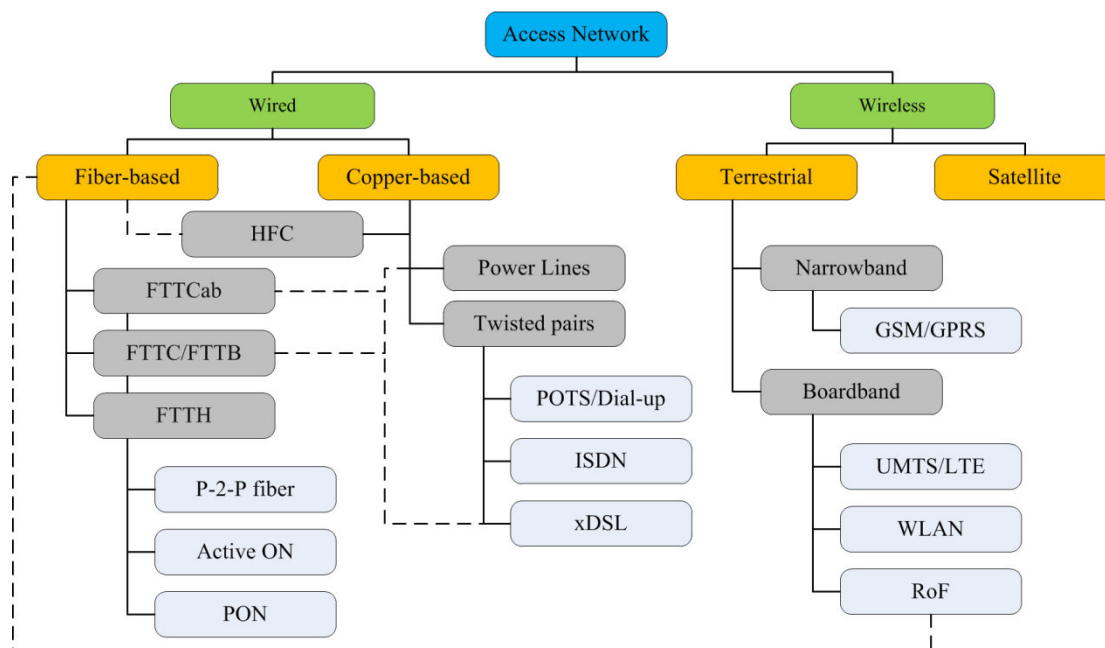
ตาราง 1.1 อัตราความจุข้อมูลของเส้นใยแสงบนช่วง C-band [3]

Capacity (Tb/s)	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8				
Efficiency (b/s/Hz)	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2				
Bit-Rate per λ (Gb/s)	10	10	40	10	40	40	160	40	160
Inter- λ Spacing (GHz)	50	25	100	12.5	50	25	100	12.5	50
No. of λ 's in C-band	80	160	40	320	80	160	40	320	80
Example of Modulation Format	Binary OOK		DPSK or Duobinary		4-Level (DQPSK)		16-Level		

ถึงแม้ว่า core network จะมีความสามารถในการรองรับข้อมูลปริมาณมหาศาลได้ แต่ในทางกลับกัน โครงข่ายเข้าถึงหรือโครงข่ายระดับ access network ซึ่งเป็นโครงข่ายที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงผู้ใช้บริการเข้าสู่โครงข่ายระดับ MAN ไม่ได้มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้ในอัตราที่สูงเท่าเทียมกัน ทำให้เกิดเป็นปัญหาคอขวดจากการใช้งานอินเทอร์เน็ตของผู้ใช้บริการขึ้น [4] โครงข่าย access network จึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับโครงข่าย core network โดย access network นั้นมีโครงสร้างของระบบและการใช้งานที่หลากหลายดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งแบ่งตามลักษณะการส่งสัญญาณออกได้เป็น 2 ประเภท คือ โครงข่ายเข้าถึงแบบใช้สาย (wired access network) และ โครงข่ายเข้าถึงแบบไร้สาย (wireless access network) [5] โดยในส่วนของโครงข่ายเข้าถึงแบบใช้สายนั้น แบ่งออกเป็นตามชนิดของสายสัญญาณที่ใช้ได้เป็น สายทองแดงและเส้นใยแสง ซึ่งในปัจจุบันโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก แต่ทว่าในยุคเริ่มแรกของการพัฒนาโครงข่ายเข้าถึงแบบใช้สายนั้น เพื่อลดต้นทุนในการวางระบบใหม่จึงได้ทำการพัฒนาระบบโทรศัพท์ที่ใช้สายทองแดงแบบตีเกลียวคู่ (copper-twisted-pair) ที่มีอยู่เดิมเพื่อให้สามารถใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าโมเด็ม (modem) โดยในช่วงเริ่มแรกประมาณปี ค.ศ.1988 การสื่อสารผ่านโมเด็มมีอัตราเร็วข้อมูลประมาณ 300 bit/s [6] และได้เพิ่มขึ้นเป็น 56 kbps [7] ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นอัตราเร็วที่น้อยมากเมื่อเทียบกับความต้องการในปัจจุบัน ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี asymmetric digital subscribers line (ADSL) ขึ้น โดยมีอัตราเร็วในการดาวน์โหลดข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ 6 Mbps และเพื่อให้ใช้งานโครงข่ายให้คุ้มค่ามากกว่าเดิมจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี DSL อย่างมากมาย อาทิ

เช่น symmetric DSL (SDSL), rate-adaptive DSL (RADSL), high-bit-rate DSL (HDSL), very-high rate DSL (VDSL), ADSL2+ เป็นต้น [8] อย่างไรก็ตามด้วยเทคโนโลยีทั้งหลายเหล่านี้ก็ยังคงไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการได้อย่างเต็มที่ และเนื่องจากสายทองแดงนั้นมีอัตราการสูญเสียพลังงานที่สูง ส่งข้อมูลได้ไม่ไกลนัก และต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) เป็นจำนวนมาก ทำให้มีต้นทุนของโครงข่ายที่สูงด้วยเหตุนี้เส้นใยแสงซึ่งมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณที่สูงกว่าสายสัญญาณชนิดอื่นๆ จึงได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณแทนสายทองแดงแบบที่เกี่วข้องโดยคุณสมบัติของเส้นใยแสงมีดังนี้

- (1) เส้นใยแสงมีปริมาณแบนด์วิดท์ที่กว้าง เมื่อเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ 10^6 - 10^9 เฮิรตซ์เพราะความถี่ของคลื่นพาห้แสงจะอยู่ในช่วง 10^{13} - 10^{14} เฮิรตซ์
- (2) เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแสงต่ำเนื่องจากการลดทอนน้อยกว่าสายตีเกลียวคู่ (twisted pair) หรือสายไฟฟ้าร่วมแกน (coaxial cable) ทำให้การสื่อสารสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณรวมทั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น
- (3) เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้ง่าย และสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้มากขึ้นจากการใช้พื้นที่เท่าเดิม
- (4) เส้นใยแสงถูกผลิตมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น
- (5) เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีการเฉื่อย และการออกแบบสายเคเบิลของเส้นใยแสงมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้น อีกทั้งยังต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยมาก
- (6) เส้นใยแสงมีความปลอดภัยกว่าระบบสายโลหะเมื่อพิจารณาในแง่ของอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสาย หรือระหว่างสายต่อสาย

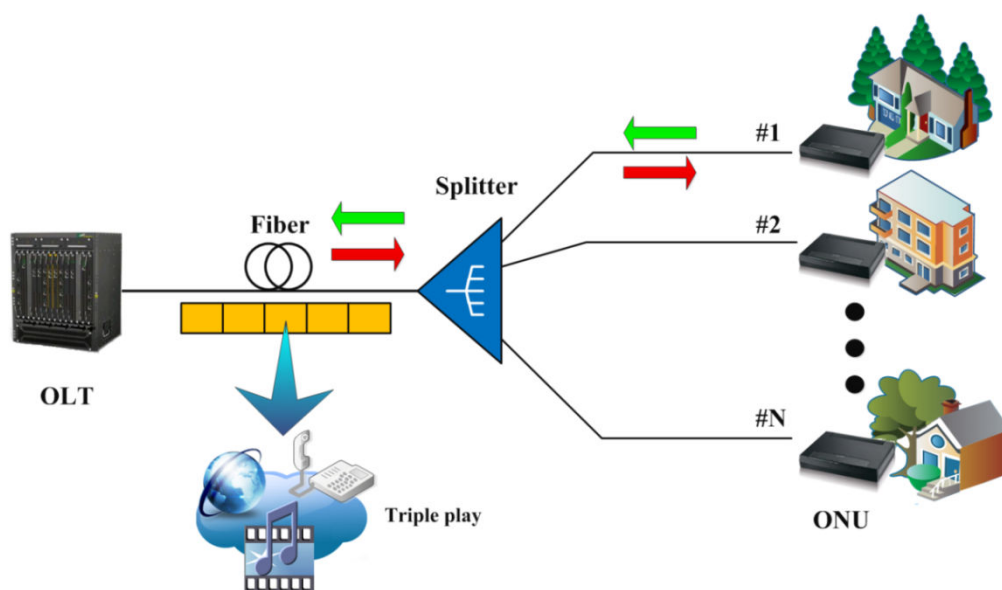


รูปที่ 1.3 ภาพรวมของโครงข่าย access network

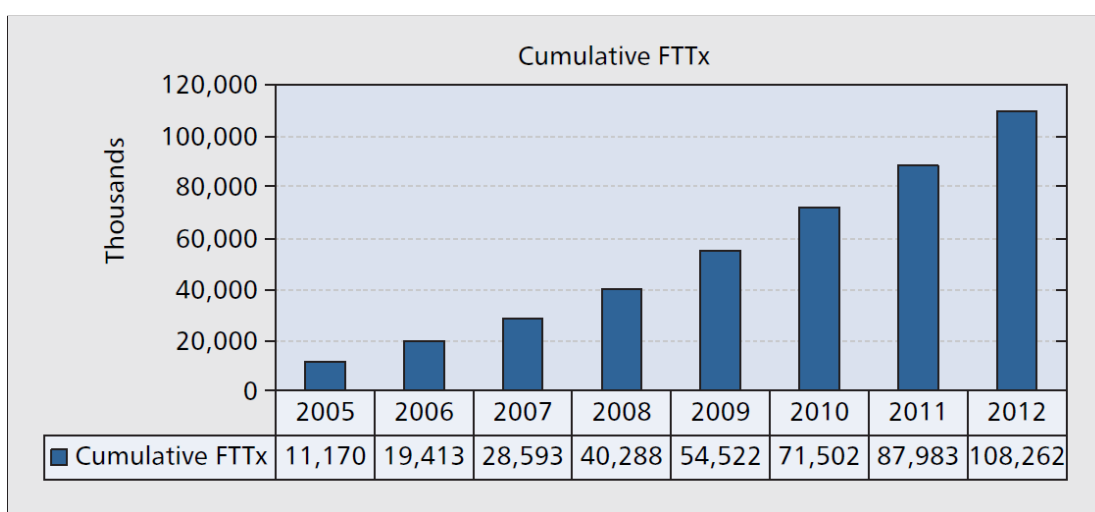
จากข้อดีต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมานี้ เส้นใยแสงจึงเป็นที่สนใจในการนำไปทำหน้าที่เป็นสายส่งสัญญาณในโครงข่ายการสื่อสารหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น hybrid fiber-coaxial (HFC) ซึ่งใช้สายเคเบิลกระจายสัญญาณจากเส้นใยแสงไปยังผู้ใช้บริการด้วยอัตราข้อมูลในการดาวน์โหลดที่ 30-50 Mbps [5] หรือการนำไปประยุกต์กับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ด้วยเทคโนโลยี radio over fiber (RoF) ซึ่งมีความจุข้อมูลสูงสุดถึง 6.72 Gbps [9] ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นใยแสงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีโครงข่ายระดับ access network ในยุคหน้าอย่างแท้จริง

access network ที่ใช้เส้นใยแสงเป็นตัวเลือกในการส่งข้อมูลในปัจจุบันนั้นคือ โครงข่าย fiber-to-the-x (FTTx) ซึ่งใช้เทคโนโลยีโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟทำหน้าที่เป็นโครงข่ายเข้าถึง (access network) ให้ผู้ใช้บริการรายย่อยเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายหลัก (backbone network) ด้วยเส้นใยแสงโดยอุปกรณ์ภายในส่วนสัญญาณของโครงข่ายเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานแบบ passive ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ที่ central office (CO) จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ optical line terminal (OLT) ซึ่งเชื่อมโยงและทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณแสงจากเส้นใยแสง ผ่าน passive splitter เพื่อใช้กระจายสัญญาณไปยัง optical network terminal (ONT) หรือ optical network unit (ONU) ที่ติดตั้งตามที่อยู่อาศัยของผู้ใช้บริการมีหน้าที่ควบคุมกำลังในการรับส่งของสัญญาณ จากการที่ไม่มีอุปกรณ์ซึ่งต้องอาศัยการประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ต้นทุนของระบบค่อนข้างต่ำในขณะที่สามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลที่สูงสุดถึง 10 Gbps ทั้ง uplink และ downlink

ภายใต้มาตรฐาน 10GE-PON (IEEE 802.3av) หรือจะเป็น XG-PON1 ตามมาตรฐาน ITU-T G.987 ซึ่งมีอัตราข้อมูล downlink ที่ 10 Gbps เช่นเดียวกัน แต่มีในภาค uplink มีอัตราข้อมูลเพียง 2.5 Gbps แต่ก็ยังสามารถตอบสนองต่อการใช้บริการ triple play ได้แก่ บริการโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต (voice over IP: VoIP) การรับชมโทรทัศน์หรือวิดีโอในระดับ high definition (HD) และการสื่อสารข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงได้เป็นอย่างดี ดังนั้นโครงข่าย FTTx จึงเป็นเทคโนโลยีที่จะมาแทนที่เทคโนโลยี ADSL ในอนาคตคงจะเห็นได้ดังรูปที่ 1.5 ซึ่งคาดการณ์ว่าภายในปี 2012 ผู้ใช้บริการ FTTx จะเพิ่มขึ้นจนมีผู้ให้บริการถึง 100 ล้านราย [10]

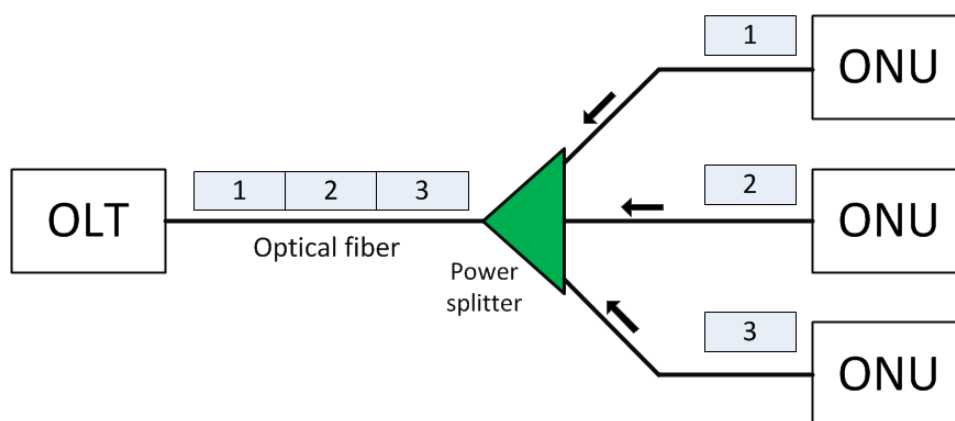


รูปที่ 1.4 โครงสร้างของระบบ PON

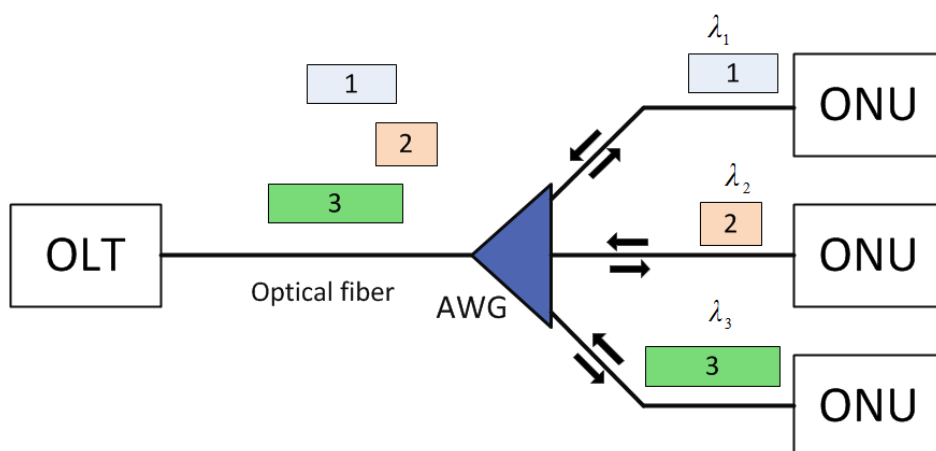


รูปที่ 1.5 การประมาณการณ์จำนวนผู้ให้บริการ FTTx ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2005 ถึงปี ค.ศ. 2012 [10]

โดยแต่ละมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟสำหรับโครงข่าย FTTx ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันการสื่อสารสัญญาณในภาค uplink เป็นการแบ่งช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (time-division multiple access: TDMA) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 โดยแต่ละ ONU จะทำการติดต่อเพื่อขอใช้ time-slot จาก OLT เพื่อป้องกันการชนกันของบิตข้อมูลของแต่ละ ONU โดยอาศัย media access control (MAC) จากนั้น OLT จะทำการจัดสรรช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณสำหรับแต่ละ ONU ตามความต้องการของแต่ละผู้ใช้งานจึงทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถส่งข้อมูลผ่านสัญญาณแสงความยาวคลื่นเดียวกันลงไปบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกันได้โดยไม่เกิดกันชนกันของบิตข้อมูล แต่ทว่าผู้ใช้ต้องแบ่งอัตราข้อมูลร่วมกับผู้ใช้รายอื่น ทำให้ผู้ใช้งานแต่ละรายไม่สามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่แก้ปัญหานี้ได้โดยใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยใช้วิธีแบ่งช่วงความยาวคลื่น (wavelength division multiple access: WDMA) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันตามมาตรฐาน ITU-T G.694-2 ให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายทั้งในภาค uplink และ downlink ทำให้ไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูล จึงทำให้ผู้ใช้แต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่และไม่ต้องอาศัยการชิงโครนัสของระบบ [11] ในทางกลับกันหากบางความยาวคลื่นซึ่งจัดสรรให้ผู้ใช้งานไม่ได้ถูกใช้งานช่องสัญญาณนั้นไม่สามารถนำไปให้ผู้ใช้รายอื่นใช้ได้ [12] และระบบ WDM-PON ยังมีจำนวนของช่องสัญญาณที่จำกัดซึ่งถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 1.6 การสื่อสารสัญญาณในภาค uplink ของระบบTDM-PON



รูปที่ 1.7 การสื่อสารสัญญาณของระบบ WDM-PON

โดยในปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนา WDM-PON ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งได้มีการนำ TDM-PON มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ WDM-PON [13] เรียกว่า hybrid WDM-TDM PON หรือ WDM/TDM PON ซึ่งได้มีการนำเทคนิค dynamic wavelength and bandwidth allocation [14] ที่ทำให้ OLT สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นและแบนด์วิดท์ ซึ่งจัดสรรให้แก่ ONU ได้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้บริการ จึงใช้งานช่องสัญญาณได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบด้วยวิธีการต่างๆ อย่างเช่นในด้านของต้นทุนระบบ ได้มีการใช้เทคนิค spectrum-sliced dense WDM-PON [15] ที่นำเลเซอร์แถบกว้างซึ่งมีราคาต่ำมาทำการแบ่งสเปกตรัมเป็นช่องสัญญาณ ความยาวคลื่นต่างๆ ให้กับผู้ให้บริการ และการนำ reflective semiconductor optical amplifier (RSOA) มาประยุกต์ใช้งาน โดยนำคุณสมบัติ cross-gain modulation ของ RSOA ที่สามารถเพิ่มกำลังของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นอื่นได้ ใช้งานร่วมกับ electro-absorption modulated laser (EML) ทำให้ ONU แต่ละตัวสามารถส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นเดียวกันได้ ซึ่งเรียกว่า colorless ONU [16] หรือจะเป็นความพยายามในการเพิ่มช่องสัญญาณที่มีอยู่จำกัด โดยทำการส่งสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเพียง 12.5 GHz [17] ทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งระบบ WDM-PON ที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยต่างๆ เพื่อนำใช้ร่วมกับเทคโนโลยี FTTH ในปัจจุบัน คือ coarse WDM-PON (CWDM-PON) [18]-[21]

อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดต่างๆ ทั้งของระบบ TDM-PON และ WDM-PON ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานระบบได้อย่างเต็มที่ จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาวิธีมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นในด้านของ อัตราข้อมูล (bit rate) ระยะในการให้บริการ หรือ ต้นทุนของระบบ โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบแบ่งรหัส (optical code division multiple access: OCDMA) เป็นการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบหนึ่งที่ใช้การเข้ารหัสสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายด้วยชุดรหัส (code) ผู้ใช้แต่ละรายจึงสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณ ผนวกความยาวคลื่นเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันได้ ทำให้ผู้ใช้สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันและไม่ต้องแบ่งอัตราข้อมูลร่วมกับผู้ใช้รายอื่นส่งผลให้ความจุของระบบมากขึ้น และมีประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth efficiency) ที่สูงมากขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ สามารถรองรับผู้ใช้บริการพร้อมกันแบบซอฟท์ (soft capacity) และยังมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากการเข้ารหัสสัญญาณในโดเมนแสงเพิ่มมาอีกด้วย

เมื่อนำมาใช้ร่วมกับโครงข่าย PON สัญญาณจะถูกเข้ารหัส (encode) และถอดรหัส (decode) ในโดเมนแสงทั้งหมด จึงไม่ต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการชิงโครนัสระบบระหว่าง OLT กับ ONU และยังสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากที่ความยาวคลื่นเดียวกันสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้หลายราย โดยปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการ encode และ decode สำหรับเทคนิคการมอดูเลตแบบ OCDMA ได้แก่ fiber optical delay line (FODL), spatial light phase modulator (SPLM), micro-electro-mechanical-systems (MEMS), planar light wave circuit (PLC), superstructure-fiber Bragg grating (SSFBG) [23] และ arrayed-waveguide-grating (AWG) ซึ่งนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานโดยแบ่งตามมิติในการประมวลสัญญาณจะแบ่งได้เป็นการเข้ารหัสแบบ 1 มิติทั้งในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ ได้แก่วิธี time-spreading (TS) [24],[25] และ spectral code หรือแบบ 2 มิติในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ไปพร้อมๆกัน [22] ได้แก่วิธี wavelength hopping [28] นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะของสัญญาณแสงที่ใช้ในการเข้ารหัสได้เป็นแบบอินโคฮีเรนต์ (incoherent) ซึ่งเป็นการเข้ารหัสด้วยความเข้มของสัญญาณแสง (intensity-modulated code sequences) และแบบโคฮีเรนต์ (coherent) ซึ่งเป็นการเข้ารหัสด้วยการเลื่อนเฟสของสัญญาณ (phase-shifted optical sequences) โดยจากวิธีใช้งานที่หลากหลายดังแสดงไว้ในตาราง 1.2 จะเห็นได้ว่าเทคนิคการมอดูเลตแบบ OCDMA แบบ coherent time-spreading นั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าแบบอื่นจึงเป็นวิธีการที่ได้รับความสนใจนำไปใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่ [24]-[27]

โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยที่นำเสนอแนวทางการใช้งาน OCDMA บน PON และผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการออกมาอย่างต่อเนื่อง [22]-[30] อาทิเช่น การนำเสนอโมเดลและการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ [29] เพื่อลดสัญญาณในระบบ OCDMA ซึ่งมีจากการรบกวนหลักๆ คือ การรบกวนเนื่องมาจากการเข้าใช้หลายทิศทาง (multiple-access interference: MAI) และการรบกวนเนื่องมาจากการตีกันของสัญญาณ (beat noise) หรือจะเป็นการหาวิธี en/decode แบบต่างๆ โดยได้มีการใช้ SSFBG เข้ารหัส gold code ความยาว 511 chip ร่วมกับการใช้ optical thresholding รับส่งข้อมูลที่ความเร็ว 1.25 Gbps สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้ 10 ราย ที่อัตราบิดผิดพลาด (bit error rate: BER) เท่ากับ 10^{-9} [24] หรือการลดต้นทุนของระบบโดยการใช้ multiport AWG ร่วมกับ SSFBG ในการ en/decode แบบ 16-level phase-shifted ซึ่งที่อัตราข้อมูล 10 Gbps สามารถรองรับผู้ใช้ได้ถึง 8 ราย ด้วยค่า BER เท่ากับ 10^{-9} [27] เป็นต้น

ตาราง 1.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ OCDMA แบบต่างๆ [22]

OCDMA schemes	Incoherent			Coherent	
	TS	Spectral coding	2-D	TS	Spectral coding
Correlation Property	Worst	Medium	Good	Good	Medium
Code number	Small	Medium	Large	Large	Large
MAI noise	High	Medium	Medium	Low	Low
Beat noise	Low	Medium	Medium	High	High
Power efficiency	Low	High	Low	High	Medium
Spectral efficiency	Low	Low	Medium	Medium	Low
Data rate	Low	Low	Medium	High	High

จากที่ได้กล่าวมานั้น วิธีการมอดูเลตแบบ OCDMA เป็นเทคนิคการมอดูเลตที่ได้รับความนิยมสูงเพื่อนำมาใช้ร่วมกับโครงข่าย PON ในอนาคต (Next generation PON: NG-PON) ซึ่งต้องการที่จะเพิ่มอัตราในการรับส่งข้อมูลจาก 10 Gbps ตามมาตรฐานในปัจจุบันไปเป็น 40 Gbps โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยังไม่มีการวิจัยที่ได้ทำการหาประสิทธิภาพและขีดจำกัดในการนำการมอดูเลตทั้งแบบ OCDMA มาใช้ร่วมกับโครงข่าย PON ที่ความเร็ว 40 Gbps ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้การสื่อสารสัญญาณแบบ OCDMA มาใช้กับเทคโนโลยี PON และจะวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ และหาข้อจำกัดของการนำ OCDMA มาใช้ร่วมกับ PON พร้อมทั้งคำนวณ power budget ของระบบ โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม Optisys 8.0 ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบระบบ PON ในยุคหน้าให้มีสมรรถนะสูงสุดอย่างแท้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้รวมทั้งข้อจำกัดของการนำการมอดูเลตสัญญาณแบบซีดีเอ็มเอแอส (optical code-division multipleaccess: OCDMA) มาใช้สำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps บนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network: PON)
2. วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA 40 Gbps บน PON
3. วิเคราะห์สมรรถนะสูงสุดของระบบ OCDMA-PON ในการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps เช่น ระยะทางให้บริการไกลสุด จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุด กำลังของสัญญาณที่ส่ง เป็นต้น
4. เสนอแนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีสมรรถนะสูงสุดสำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สัญญาณมีอัตราข้อมูลเท่ากับ 40 Gbps เท่านั้น
2. ใช้การจำลองระบบด้วยโปรแกรม Optisys 8.0 โดยไม่มีการทดลองจริงบนโครงข่าย
3. อุปกรณ์ภาคส่งและภาครับของแบบจำลองระบบ OCDMA-PON เป็นแบบอุดมคติ โดยไม่คำนึงถึงผลของสัญญาณรบกวนที่อุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ
4. ระบบที่ใช้ในการศึกษาจะใช้เส้นใยแสงโหมดเดี่ยว (single-mode fiber: SMF) ตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D และพิจารณาความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากการลดทอนกำลังสัญญาณดิสเพอร์ชัน และปรากฏการณ์ Kerr เท่านั้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีการส่งผ่านสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสง
2. ศึกษา PON และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ OCDMA
4. ออกแบบสัญญาณ OCDMA ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps
5. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ และออกแบบระบบ PON ที่ใช้ส่งผ่านสัญญาณ OCDMA ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps
6. วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA 40 Gbps ผ่าน PON
7. จำลองระบบ OCDMA-PON ด้วยโปรแกรม Optisys 8.0 แล้วเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ข้างต้น
8. เสนอแนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีสมรรถนะสูงสุดสำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps
9. สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

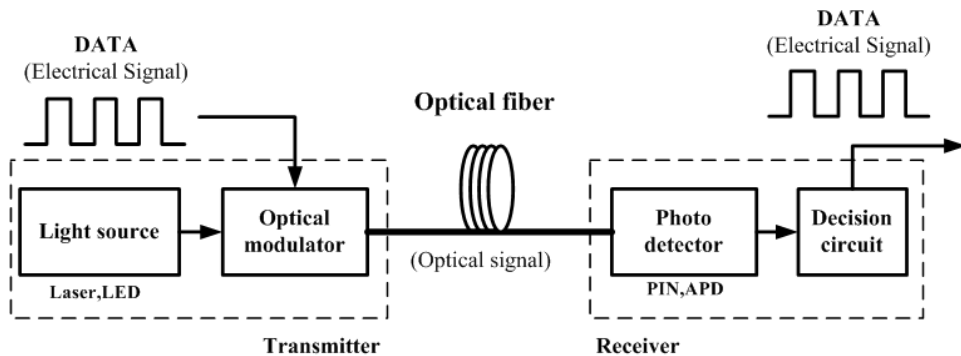
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการมอดูเลตสัญญาณทั้งแบบ OCDMA และการนำมาประยุกต์เข้ากับ PON
2. แนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีสมรรถนะสูงสุดสำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps
3. ผลงานได้รับการตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

จากรูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักคือ ภาดส่ง (transmitter) ตัวกลางหรือเส้นใยแสง (optical fiber) และภาครับ (receiver) โดยทาง ภาดส่งจะส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่าน optical modulator โดยจะทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็น สัญญาณแสง (Optical to Electrical converter: O-E) โดยการมอดูเลตสัญญาณนั้นมี 2 ประเภท คือ การมอดูเลตภายนอก (external modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (modulator) แยกออกจากกัน และการมอดูเลตโดยตรง (direct modulation) ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมเป็นชุดเดียวกัน เมื่อทำการ มอดูเลตแล้ว จะส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสง โดยเส้นใยแสงมีรูปแบบให้เลือกในการใช้งานที่ หลากหลาย ได้แก่ เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single mode fiber :SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่า สัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (attenuation coefficient) เส้นใยแสงแบบหลายโหมด(multi-mode fiber : MMF) ที่มีราคาถูกกว่าแต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบ SMF เส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิส เพอร์ชัน (dispersion-shifted fiber : DSF) มีคุณสมบัติคือ ค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion) ณ ความยาวคลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำสุด (1550 nm) และเส้นใยแสง แบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1550 nm โดยค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ (non-zero dispersion-shifted fiber: NZ-DSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลาย ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น ต่อมาเมื่อภาครับได้รับสัญญาณแสง เครื่องรับสัญญาณแสงซึ่ง ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo detector) จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสง

เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น positive intrinsic negative junctions (PIN) และ avalanche photodiode (APD) จากนั้นวงจรตัดสินใจ (Decision circuit) จะทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' โดยขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนดภายในวงจรตัดสินใจ

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการ ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็กท้ายที่สุดจะได้สมการการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกว่าสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ (nonlinear Schrödinger equation: NLSE)

[31]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma |A|^2 A \quad (2.1)$$

เมื่อ	A	เป็นกรอบคลื่น (Envelope) ของสัญญาณ
	α	เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation constant)
	β_2	เป็นค่า Group-velocity dispersion (GVD)
	γ	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient)
	z	เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง
	T	เป็นกรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g)

ซึ่ง T สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.2) โดย t เป็นเวลาจริง

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

เมื่อพิจารณาพจน์ขวามือของสมการ (2.1) ที่แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A พจน์แรกคือการลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง นั่นคือเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงานของสัญญาณแสงลดต่ำลง แต่เราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สอง คือ GVD

(β_2) เป็นส่วนที่ส่งผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และสำหรับพจน์สุดท้ายคือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (kerr effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง และยังส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกอีกด้วย โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ

2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (Fiber attenuation loss)

อัตราการลดทอนกำลังสัญญาณของแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง เป็นส่วนสำคัญของการกำหนดคุณลักษณะการออกแบบโครงข่ายทางแสง เนื่องจากสามารถกำหนดกำลังงานที่ออกจากเครื่องส่งสัญญาณแสง ให้มีค่าเหมาะสมกับระยะทางในการสื่อสาร ความไวของเส้นใยแสง และปริมาณการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยที่การลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสง เกิดจาก 3 สาเหตุหลัก คือ การดูดซึม (Absorption) ที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุเอง, การกระเจิง (Scattering) ที่เกิดจากทั้งคุณสมบัติของวัสดุและความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่น และการแผ่รังสี (Radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง

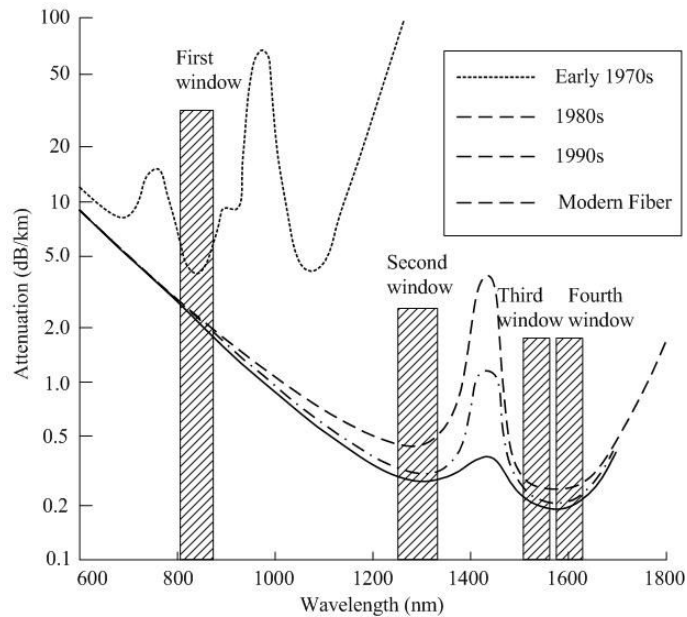
แสงที่เดินทางในเส้นใยแสงจะถูกลดทอนพลังงานแบบเอกซ์โพเนนเชียลไปตามระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณดังนี้

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

โดย $P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล [dB]

$P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L กิโลเมตร [km] จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล [dB]

α คือ ค่าคงตัวของการลดทอนที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล/กิโลเมตร [dB/km]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกำลัง และความยาวคลื่นที่ผลิตมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1970

[1]

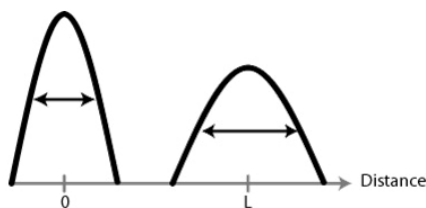
โดยที่ค่าคงตัวการลดทอน α นั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 3 เส้น โดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเป็นเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (First window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกา และจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้น และผลของ Rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราลดทอนสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูป หลังจากนั้นก็มี การพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุคที่ 2 (Second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปลายปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้น้ระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (Third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้นั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้น้ระบบเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (Forth window) ให้เปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm ซึ่งไม่ได้มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่ลดลง แต่อาจจะทำให้ความยุ่งยากในการส่งสัญญาณระยะทางไกลหรือระบบการสื่อสารสัญญาณแบบมีการมัลติเพล็กซ์หลายความยาวคลื่นลดลง

2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

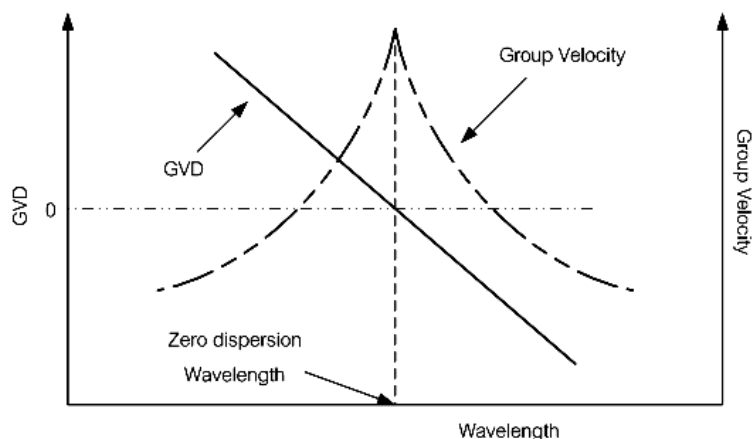
2.3.2.1 ดิสเพอร์ชัน (second order dispersion)

การเกิดดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกัน คือ Inter-modal dispersion สำหรับ MMF และ Intra-modal dispersion หรือ Chromatic dispersion สำหรับ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (SMF) ผลของการกระจายตามความถี่ของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทั้งนี้เราจะเลือกใช้ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงเพราะว่า SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงอัตราการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นดิสเพอร์ชันที่ส่งผลกระทบต่อระบบจะเป็นแบบ Chromatic dispersion

สาเหตุของการเกิด Chromatic dispersion คือคุณสมบัติของความเร็วกลุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วยดังรูปที่ 2.3



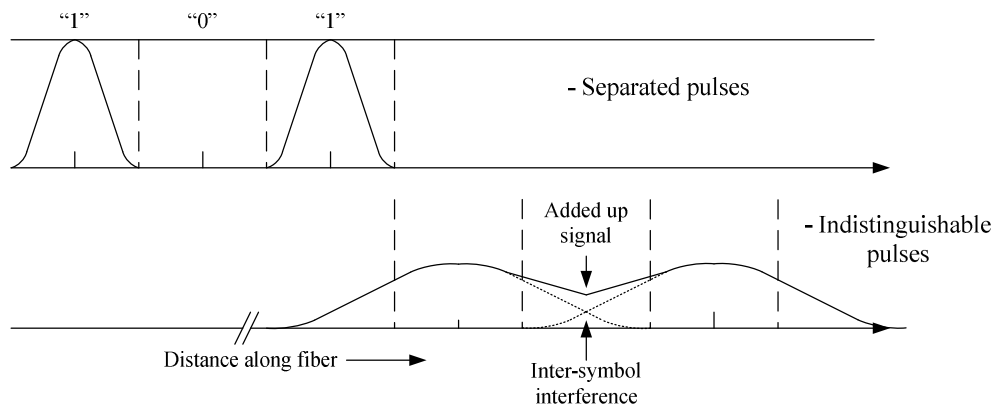
รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง



รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงตัวอย่างการแจกแจงความเร็วกลุ่ม และ GVD เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกัน และจะมีค่าสูงสุดที่ Zero-dispersion wavelength โดยเราสามารถแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชันในรูปที่ 2.4 ออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ดิสเพอร์ชันปกติ (Normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า ดิสเพอร์ชันผิดปกติ (Anomalous dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมี β_2 ความเร็วกลุ่มน้อยกว่าและดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (Zero dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่มีความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

GVD จะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสัญญาณพัลส์อย่างมากในกรณีที่มีการส่งสัญญาณพัลส์เป็นขบวนออกไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางไกล ๆ และสัญญาณพัลส์ที่อยู่ติดกันจะมีโอกาสเลื่อมกันมากขึ้น (Overlap) จนทำให้เกิด Inter-symbol interference (ISI) และอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ (Error decision) ว่าสัญญาณแสงที่วิ่งเข้ามาควรจะเป็น บิต '1' หรือ บิต '0' ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การแสดงการเกิด Inter-symbol interference (ISI)

รูปที่ 2.5 แสดงถึงการเกิด ISI ที่เกิดจากการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ โดยเริ่มแรกส่งสัญญาณแบบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยบิต '1', '0', '1' ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ระหว่างบิตแยกออกจากกันอย่างชัดเจน เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงผลของ GVD ทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออกจนกระทั่งเกิด ISI ผลของ ISI ทำให้กำลังงานของสัญญาณในช่วงเวลา (Time slot) บิต '0' เพิ่มขึ้น และอาจทำให้ตรวจจับสัญญาณผิดพลาดจากบิต '0' กลายเป็นบิต '1' หากว่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมาเลยค่าขอบเขตที่เครื่องตรวจจับสัญญาณกำหนดไว้

เราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก Chromatic dispersion โดยพิจารณาให้ τ แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่ ω [32]

$$\tau = \frac{L}{v_g} \quad (2.4(2.3))$$

โดยที่ L แทนความยาวของเส้นใยแสงหน่วยกิโลเมตร (km)

$$v_g \text{ แทนความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตรงกันที่ความถี่ } \omega \text{ เท่ากับ } v_g = \frac{1}{\beta_1} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$$

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

จากสมการที่ (2.4) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

เมื่อ $\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}$ ถ้าสัญญาณมีความกว้างสเปกตรัมความถี่เท่ากับ $\Delta\omega$ ดังนั้นความแตกต่างการประวิงแพร่กระจายในแต่ละส่วนประกอบของสเปกตรัมสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (2.6)

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

การขยายตัวของสัญญาณพัลส์สามารถเขียนในรูปของสัมประสิทธิ์ D [ns/km/nm] ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial \omega}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{2\pi c}{\lambda} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นหน่วยนาโนเมตร(nm)

c คือ ความเร็วของสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s)

เมื่อนำสมการที่ (2.8) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.9)$$

ดังนั้นเราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ในรูปของ D โดยนำสมการที่ (2.9) ที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.7) ได้ดังนี้

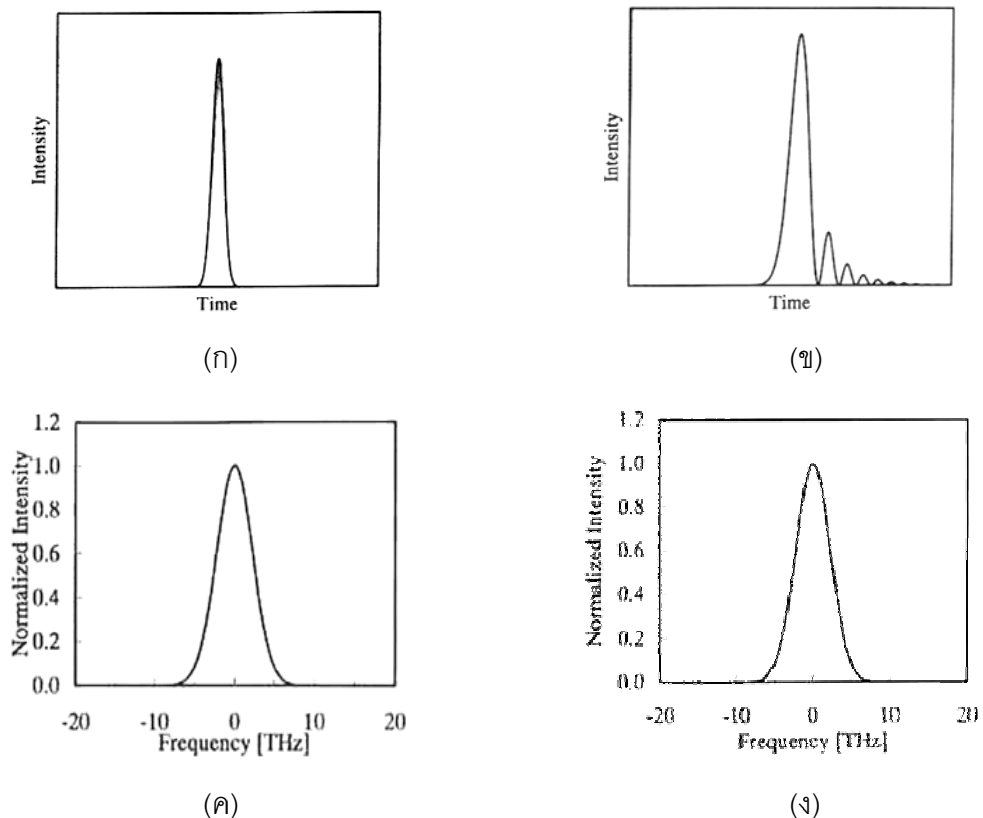
$$\Delta\tau = |D| \Delta\lambda L \quad (2.10)$$

เมื่อ $\Delta\lambda$ แทนความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณแสง

และสำหรับ inter-modal dispersion นั้นเป็นผลของแต่ละโหมดการเดินทางของแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกันของค่าความเร็วกลุ่มที่ความถี่เดียวกัน จึงมีผลในเส้นใยแสงแบบหลายโหมดเท่านั้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยแสงแบบ SMF ในการสื่อสารสัญญาณจึงสามารถละเลยผลของ inter-modal dispersion ได้

2.3.2.2 ความชันดิสเพอร์ชัน (dispersion slope)

การเกิดความชันดิสเพอร์ชันสามารถพิจารณาในรูปของ third order dispersion coefficient (β_3) ในเส้นใยแสงซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสัญญาณพัลส์อย่างมากในกรณีที่มีการส่งสัญญาณพัลส์เป็นขบวนออกไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางไกล ๆ ด้วยอัตราเร็วสูง ผลกระทบของปรากฏการณ์ TOD จะส่งผลให้สัญญาณพัลส์ทางเวลาเกิดความผิดเพี้ยนแบบไม่สมมาตร (asymmetric distortion) โดยจะมีสัญญาณพัลส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของสัญญาณพัลส์ (trailing edge) แต่ปรากฏการณ์ TOD จะไม่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมของสัญญาณตามความถี่ดังรูปที่ 2.6 (ก) แสดงสัญญาณพัลส์ขาเข้า และรูปที่ 2.6 (ข) แสดงสัญญาณพัลส์ขาออกที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ TOD รูปที่ 2.6 (ค) แสดงสัญญาณสเปกตรัมขาเข้า และรูปที่ 2.6 (ง) แสดงสัญญาณสเปกตรัมขาออกที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ TOD เช่นกัน



รูปที่ 2.6 ผลของดิสเพอร์ชันอันดับสามต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) สัญญาณพัลส์ขาเข้า (ข) สัญญาณพัลส์ขาออก (ค) สัญญาณสเปกตรัมขาเข้า (ง) สัญญาณสเปกตรัมขาออก

เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลขึ้นผลของการกระจายสัญญาณเนื่องจากดิสเพอร์ชันจะเด่นชัดมากขึ้น โดยแต่ละความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะมีความเร็วกลุ่มที่ต่างกัน จึงทำให้พัลส์สัญญาณในแต่ละความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ส่งผลให้มีการขยายตัวออก ซึ่งความผิดเพี้ยนทางเฟสของสัญญาณเนื่องจากดิสเพอร์ชันและความชันดิสเพอร์ชัน เมื่อไม่พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณสามารถแสดงได้ดังในสมการ (2.11)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} \quad (2.11)$$

2.3.3 ปราคฏการณ์เคอร์ (kerr effect)

ปราคฏการณ์เคอร์เป็นปราคฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังของสัญญาณ ทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณ เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปราคฏการณ์ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทคือ SPM XPM และ FWM

2.3.3.1 self-phase modulation (SPM)

SPM เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการ (2.12)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \quad (2.12)$$

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

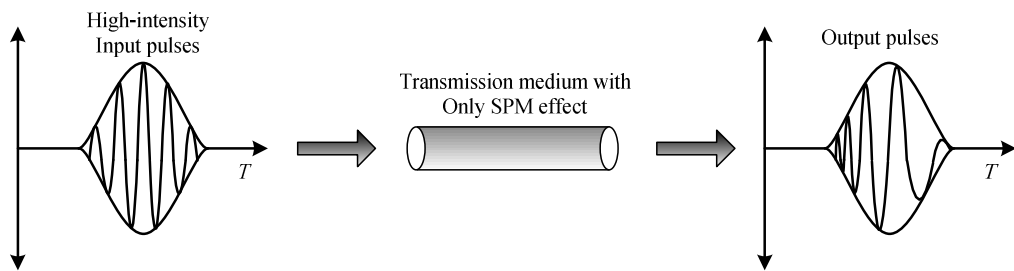
ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

จากสมการ (2.13) ปราคฏการณ์ SPM จะส่งผลให้สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหวี่ยงน้อมมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังสัญญาณสูงสุด

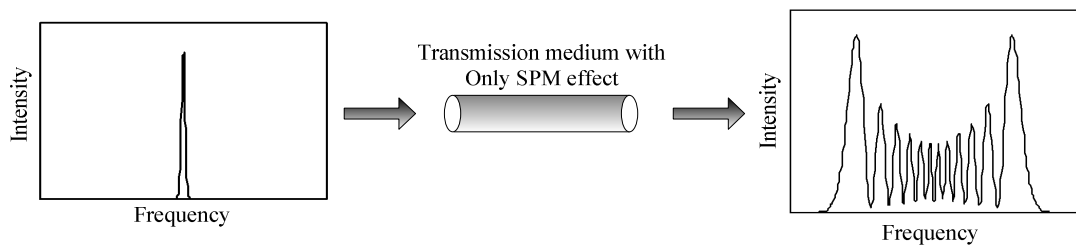
$$\phi_{NL,max} = L_{eff} P_0 \gamma \quad (2.13)$$

โดย P_0 เป็นกำลังงานของสัญญาณพัลส์
 $\phi_{NL,max}$ เป็นเฟสที่เลื่อนออกไปมากที่สุด ณ บริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์
 $L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{\alpha}$ เป็นความยาวประสิทธิผลเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแสง

ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยในรูปที่ 2.7 (ก) แสดงถึงผลของ SPM ต่อความถี่ของสัญญาณจากรูปจะเห็นว่า SPM จะส่งผลให้ส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณมีความเร็วกลุ่มน้อยกว่าส่วนประกอบความถี่ต่ำ และในรูปที่ 2.7 (ข) แสดงถึงผลของ SPM ต่อสเปกตรัมของสัญญาณ จากรูปจะเห็นว่านอกจาก SPM จะทำให้ขนาดของสเปกตรัมสัญญาณแตกออกแล้วยังจะทำให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกทางด้านข้างแบบสมมาตรอีกด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) ทางความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ

2.3.3.2 cross-phase modulation (XPM)

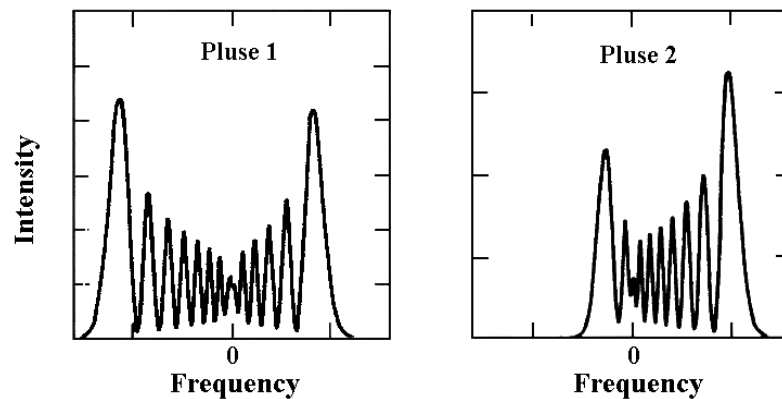
ปรากฏการณ์ XPM นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกันร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ที่ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูก

เหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกำลังงานของ สัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห้ที่มีความถี่ที่ต่างออกไป เหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสง เปลี่ยนไปจากเดิมโดยทั่วไปเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห้เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วม เดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็ว กลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็ปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลของมันจะมีค่า มากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่า โดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดัง สมการ (2.14)

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.14)$$

เมื่อ $|E_0|^2$ คือความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห้ ω_1

$|E_1|^2$ คือความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห้ ω_2



รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

รูปที่ 2.8 แสดงถึงผลของ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงที่มีกำลังสัญญาณ ต่างกันที่เดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่ากำลังสัญญาณ ของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM แต่จะต่างกันตรงที่ สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจาก XPM จะขยายออกมากกว่า เนื่องจากผลของ XPM ต่อ สัญญาณรุนแรงกว่า SPM ถึง 2 เท่า และการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณ พัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจาก

กำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่า ส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่า เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.1) ซึ่งเป็นสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ที่มีเพียงช่องสัญญาณเดียวเท่านั้น สามารถดัดแปลงเป็นสมการ (2.15) ที่ทำการเพิ่มสัญญาณเข้าไปอีกหนึ่งช่องสัญญาณ

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_j + \frac{1}{v_{gr}} \frac{\partial A_j}{\partial t} = i\gamma \left(|A_j|^2 + 2|A_k|^2 \right) A_j \quad (2.15)$$

กำหนดให้ j คือสัญญาณที่เราสนใจ และ k คือสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่ส่งไปพร้อมกัน พจน์แรกทางขวามือของสมการ (2.15) คือผลของ SPM ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และพจน์ที่สองก็คือผลของ XPM นั่นเอง จะเห็นว่าพจน์ของ XPM จะมีค่าคงที่เท่ากับ 2 คูณอยู่ด้วยซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความรุนแรงของ XPM จะเป็น 2 เท่าของ SPM เมื่อสัญญาณทั้งสองมีกำลังที่เท่ากัน

2.3.3.3 four-wave mixing (FWM)

FWM เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ กันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1, f_2, f_3 เป็นไปตามสมการ (2.16)

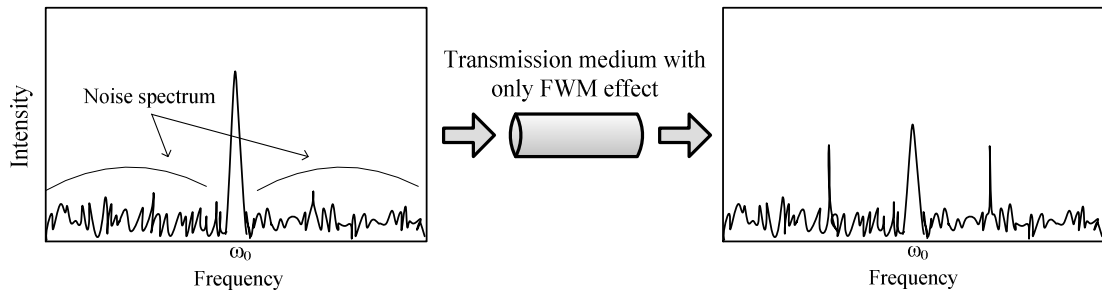
$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.16)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังสมการ (17)

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.17)$$

โดยที่ k_n คือค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่า intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิด ghost pulse ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตทางความเข้มแสงดังรูปที่ 2.9 สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นแต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM



รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

ดังนั้นการลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละสายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุดเพื่อทำให้การวิ่งตัดกันของสัญญาณเนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้อย่างขึ้นพร้อมทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้อย่างขึ้นด้วยเช่นกัน

2.4 เทคโนโลยีโครงข่าย FTTx

2.4.1 โครงสร้างของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

โครงสร้างของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่ใช้ในเทคโนโลยี FTTx เริ่มจากที่ CO จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ OLT ซึ่งเชื่อมโยงและทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณแสงจากเส้นใยแสง ผ่าน passive splitter เพื่อให้กระจายสัญญาณไปยัง ONT หรือ ONU ที่ติดตั้งตามที่อยู่อาศัยของผู้ใช้บริการมีหน้าที่ควบคุมกำลังในการรับส่งของสัญญาณในการเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการ เช่น คอมพิวเตอร์ หรือทีวี

2.4.2 มาตรฐานของ FTTx

โปรโตคอลสื่อสัญญาณผ่าน FTTx ของ data link layer นั้นมีอยู่ด้วยกันในปัจจุบันสองโปรโตคอลคือ asynchronous transfer mode (ATM) ของ ITU และ Ethernet ของฝ่าย IEEE โดยในปัจจุบันมีมาตรฐานที่ได้ประกาศใช้งานแล้ว 5 มาตรฐาน ดังต่อไปนี้

1. Broadband PON (BPON: ITU-T G.983) ใช้โปรโตคอล ATM ในการส่งสัญญาณ มีความเร็วสูงสุดในส่วน downlink คือ 622Mbps และมีความเร็วสูงสุดในส่วน uplink เท่ากับ 155 Mbps ระยะการให้บริการนั้นมากที่สุดถึงประมาณ 20 km เมื่อกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการ 16บ้าน ในทางกลับกันนั้น อัตรา split สูงสุด คือ 1:32 ที่ระยะการให้บริการ 5 km ซึ่งเป็นระยะการให้บริการโดยทั่วไปของ access network

2. Gigabit PON (GPON: ITU-T G.984) เป็นมาตรฐานที่พัฒนาต่อจาก BPON โดยเพิ่มอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุดถึง 2.5Gbps ระยะการให้บริการนั้นทำได้มากกว่า 20 km เมื่อกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการ 32 บ้าน ในทางกลับกันนั้น อัตรา split สูงสุด คือ 1:64 ที่ระยะการให้บริการสั้นกว่า อย่างไรก็ตาม ยังคงใช้โปรโตคอล ATM ในการส่งสัญญาณ
3. Gigabit-Ethernet PON (GEPON: IEEE 802.3ah) เป็นมาตรฐาน FTTx มาตรฐานแรกของ IEEE ซึ่งได้นำเอาเทคโนโลยี Ethernet ที่ใช้ใน LAN ทั่วไปในโลก มาใช้ในการส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx ความเร็วสูงสุดในส่วน downlink และ uplink เท่ากัน คือ 1.25 Gbps ระยะการให้บริการนั้นมากที่สุดประมาณ 10 km เมื่อกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการ 16บ้าน แม้ว่าอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink จะไม่สามารถเปรียบเทียบได้กับ GPON แต่จากการแพร่หลายของอุปกรณ์ Ethernet LAN ในตลาดโทรคมนาคม ทำให้อุปกรณ์ต่างๆซึ่งทำงานภายใต้มาตรฐาน GEPON ไม่ว่าจะเป็น OLT หรือ ONU นั้นราคาต่ำกว่าอุปกรณ์ในระบบ GPON อยู่พอสมควร ทำให้ GEPON แพร่หลายอย่างรวดเร็ว และเป็นมาตรฐานหลักที่มีผู้ใช้งานมากที่สุดในแถบเอเชีย-แปซิฟิก
4. 10 Gigabit-Ethernet PON (10GE-PON: IEEE 802.3av) ใช้โปรโตคอล Ethernet ในการส่งข้อมูล และมีความเร็วสูงสุดทั้ง downlink และ uplink ถึง 10 Gbps โดยมาตรฐานนี้สามารถทำงานร่วมกับ GEPON เดิมได้ โดยระบบร่วมนั้นสามารถให้บริการทั้งความเร็วที่ 1 Gbps และ 10 Gbps ได้พร้อมกันโดยอาศัยการกำหนดความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นมาไม่ทับซ้อนเดิม
5. 10 Gigabit PON (XG-PON: ITU-T G.987) ใช้การรับส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล GPON Encapsulation Method (GEM) โดยตามมาตรฐานที่ออกมา นั่นคือ XG-PON1 มีความเร็ว downlink สูงสุดถึง 10 Gbps และความเร็ว uplink สูงสุดเท่ากับ 2.5 Gbps โดยมาตรฐานสำหรับ XG-PON2 ซึ่งอยู่ในระหว่างการพิจารณาจะมีความเร็วสูงสุดทั้ง downlink และ uplink เท่ากับ 10 Gbps นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานร่วมกับระบบ GPON เดิมได้เช่นเดียวกับ GE-PON และ 10GE-PON

2.5 Link Power Budget

ในการหาระยะทางให้บริการไกลสุดของ PON หาได้จากการค่าอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงทั้งหมดระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแสงที่ยอมรับได้หรือเรียกว่า link power budget ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างกำลังต่ำสุดของตัวส่งสัญญาณและค่ากำลังสูงสุดของตัวรับสัญญาณ (ในกรณีที่ยืดหยุ่นที่สุด) ในการออกแบบระบบ PON นั้นจะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน link power budget ซึ่งสามารถคำนวณ link power budget ได้จากสมการที่ (2.18)

$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum l_c + \sum l_s + \sum l_{other} + G_{margin} \quad (2.18)$$

โดยที่	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 [34] แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ค่า link power budget ของ PON

Class	link power budget [dB]
A	20
B	25
C	30

หมายเหตุ system margin เป็นค่าที่บวกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อ [35]

- ทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเข้าไปในระบบได้
- เพื่อรองรับการ splice เส้นใยแสงเพิ่มกรณีซ่อมบำรุง
- เพื่อรองรับการขยายหรือเพิ่มเส้นใยแสงในอนาคต
- เพื่อให้สามารถรองรับการเพิ่มความเร็วในการส่งและรองรับการมอดูเลชันขึ้นสูงได้

การบวกค่า system margin ไม่ได้มีกฎที่แน่นอน แต่อย่างน้อยที่สุดค่า system margin ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2dB หรืออาจมีค่าได้มากถึง 8-10 dB ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ [36]

2.6 เทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

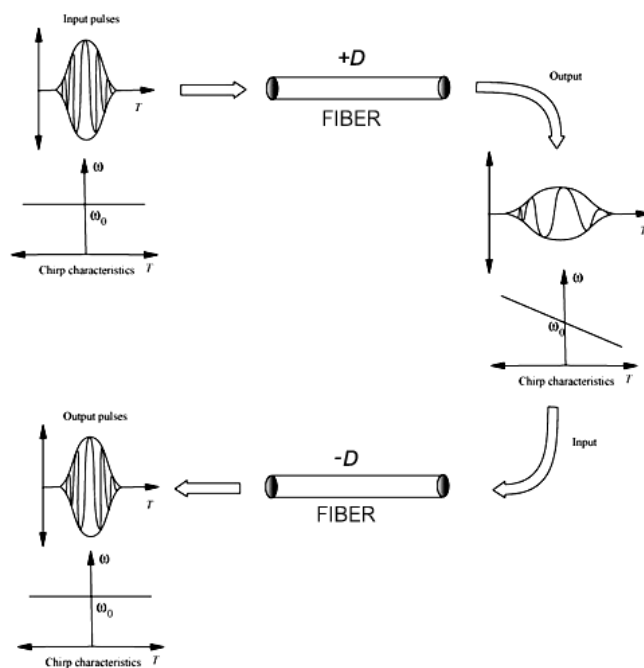
ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากปัญหาดิสเพอร์ชันสามารถแก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟที่เรียกว่า หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion-compensating unit : DCU) ซึ่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันภายในประกอบด้วยเส้นใยแสงที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้หักล้างค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SMF เส้นใยแสงที่อยู่ด้านในนั้นถูกเรียกว่า 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 (2.19)

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \quad (2.19)$$

- 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 2.10 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [37]

เทคนิคการขจัดความเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี D ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า D ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้

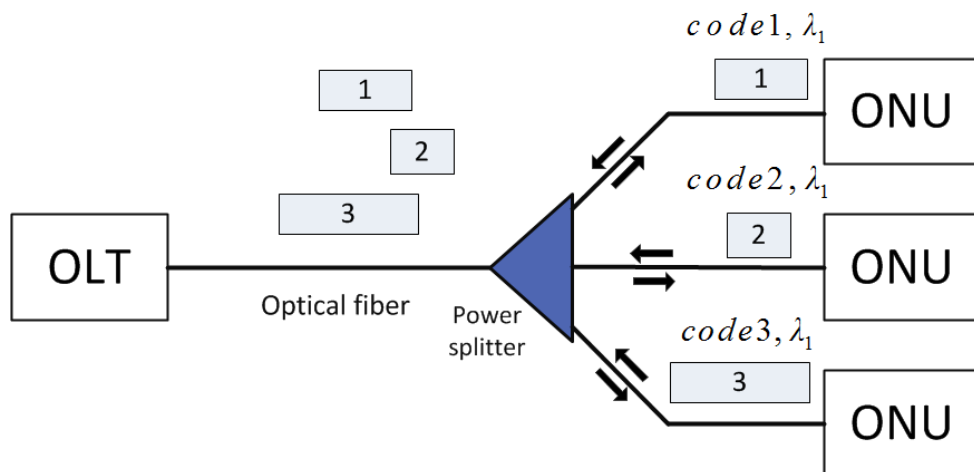
การชดเชยดีสเพอร์ชันด้วยวิธีนี้ ดีสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์ที่บางระยะทางแต่ดีสเพอร์ชันมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ทุกจุดตลอดความยาวของเส้นใยแสง

2.7 ทฤษฎีการมอดูเลตสัญญาณแบบ OCDMA

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA ทั้งโครงสร้างและลักษณะการทำงาน การเข้ารหัส และการถอดรหัสที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.7.1 โครงสร้างและลักษณะการทำงาน

หลักการพื้นฐานของระบบ OCDMA-PON คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณแสงที่ OLT ทำการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าเข้ากับสัญญาณแสง แล้วจึงทำการเข้ารหัส (encode) สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายด้วยชุดรหัส (code) เพื่อส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสงไปทำการถอดรหัส (decode) ที่ remote node [33] หรือจะเป็น ONU ตามบ้านของผู้ใช้บริการก็ได้ และด้วยข้อดีของการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA ผู้ใช้แต่ละรายจึงสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณ ณ ความยาวคลื่นเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันได้ ทำให้ผู้ใช้สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันและไม่ต้องแบ่งอัตราข้อมูลร่วมกับผู้ใช้รายอื่นดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทำงานของระบบ OCDMA-PON

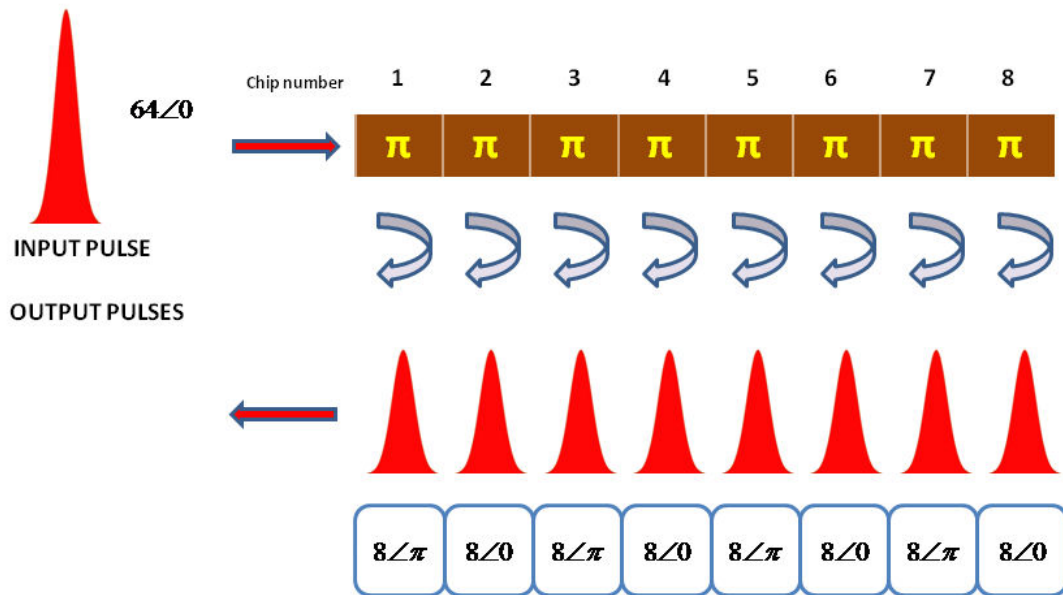
2.7.2 การเข้ารหัสและการถอดรหัส (encode/decode)

การเข้ารหัสและการถอดรหัสสัญญาณ OCDMA มีด้วยกันหลากหลายวิธีโดยสามารถแบ่งตามมิติในการประมวลสัญญาณจะแบ่งได้เป็นการเข้ารหัสแบบ 1 มิติทั้งในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ ได้แก่วิธี time-spreading (TS) [24],[25] และ spectral code หรือแบบ 2 มิติในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ไปพร้อมๆกัน [22] ได้แก่วิธี wavelength hopping [28] นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะของสัญญาณแสงที่ใช้ในการเข้ารหัสได้เป็นแบบอินโคฮีเรนต์ (incoherent) ซึ่งเป็นการเข้ารหัสด้วยความเข้มของสัญญาณแสง (intensity-modulated code sequences) และแบบโคฮีเรนต์ (coherent) ซึ่งเป็นการเข้ารหัสด้วยการเลื่อนเฟสของสัญญาณ (phase-shifted optical sequences)

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค OCDMA แบบ coherent time-spreading ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานร่วมกับการสื่อสารสัญญาณ 40 Gbps บนโครงข่าย PON เนื่องจากโครงข่าย PON เป็น access network ที่มีผู้ใช้งานเป็นจำนวนมาก เมื่อใช้งานร่วมกับการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA จึงมีสัญญาณรบกวน MAI ในระดับที่สูง ซึ่งเทคนิค OCDMA แบบ coherent time-spreading มีระดับของสัญญาณรบกวน MAI ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA แบบอื่นๆ และยังสามารถแก้ไขปัญหาดิสเพอร์ชันซึ่งถือว่าเป็นหนึ่งในปัญหาหลักสำหรับการสื่อสารสัญญาณ 40 Gbps ได้โดยง่าย เพราะ มีทำการสื่อสารสัญญาณที่ความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว โดยเลือกใช้ SSFBG เป็นตัว encoder และ decoder เนื่องจากมีค่า insertion loss ที่ต่ำและมีราคาถูก และนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานได้สะดวก

ซึ่งมีการนำรหัสหลากหลายรูปแบบมาใช้งานร่วมกับการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA โดยในอดีตนิยมใช้ gold code [23],[39] แต่ทว่าในการสื่อสารสัญญาณที่ความเร็ว 40 Gbps คาบของสัญญาณมีขนาดที่แคบมากเพียง 25 ps หากใช้ code ที่มีความยาวของรหัสมาก จะต้องทำการส่งสัญญาณพัลส์แสงที่มีขนาดเล็กมาก ทำให้ต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพสูงส่งผลให้ต้นทุนของระบบเพิ่มมากขึ้น จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับการสื่อสารสัญญาณ 40 Gbps บนโครงข่าย PON ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีและมีความซับซ้อนของระบบน้อยลง จึงได้มีการพัฒนาการเข้ารหัสแบบใหม่ โดยการเข้ารหัสที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ การเข้ารหัสแบบ multi-level phase shifted เนื่องจากมีความยาวของรหัสที่ไม่สูงมากนัก แต่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และสามารถเลือกใช้ SSFBG เป็น en/decoder ได้เช่นเดิม ซึ่งมีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มจากการส่งสัญญาณพัลส์ที่แคบมากๆ เข้าไปสัญญาณจะพัลส์จะถูกเข้ารหัสโดยกระจายเป็นพัลส์ย่อยๆ ที่เรียกว่าชิป (chip) ตามความยาวของรหัสซึ่งกำหนดไว้ และแต่ละชิปจะถูกเลื่อนเฟสไป ซึ่ง

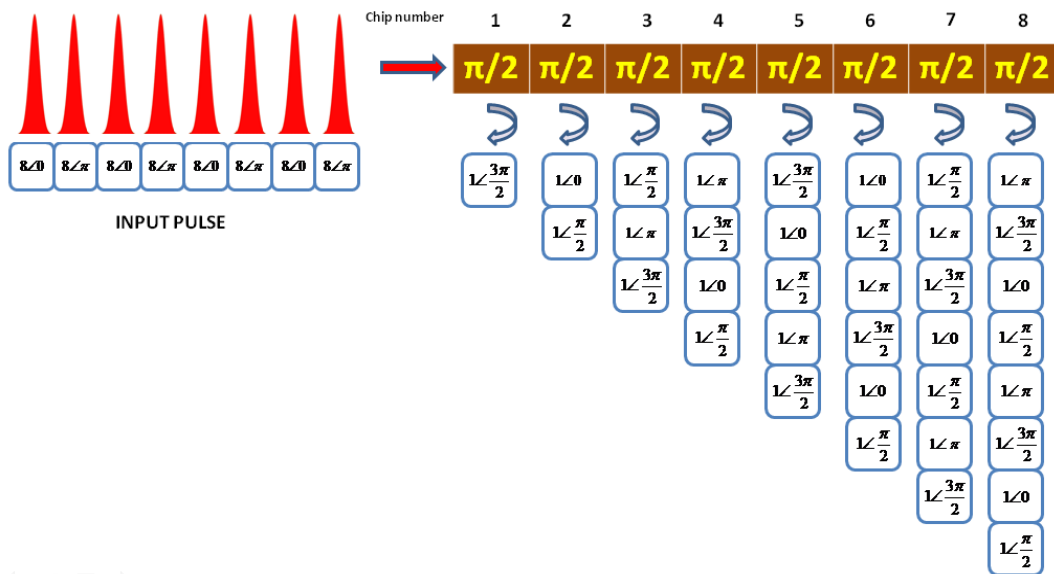
รหัสที่ได้จะมีความต่างของเฟสระหว่างชิปที่ติดกันคงที่ และจะมีค่าเท่ากับ $\frac{2(n-1)\pi}{N}$ เมื่อ n คือหมายเลขของ code และ N คือความยาวของรหัสที่ใช้ โดยจากรูปที่ 2.12 แสดงสัญญาณที่ถูก encode ด้วยรหัสที่มีความยาวของรหัสเท่ากับ 8 chip ซึ่งแต่ละ chip จะถูกเปลี่ยนเฟสออกไปเท่ากับ π



รูปที่ 2.12 การ encode สัญญาณ แบบ multi-level phase shifted

จากนั้นเมื่อทำการถอดรหัสโดยแต่ละชิปจะกระจายและเลื่อนเฟสเช่นเดียวกันกับตอนเข้ารหัส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการถอดรหัสเปรียบเสมือนการหา correlation ของสัญญาณ หากสัญญาณมีชุดรหัสที่ใช้ในการเข้ารหัสและถอดรหัสตรงกันจะทำให้ได้ auto-correlation ซึ่งมีกำลังของสัญญาณที่สูงดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดย chip แต่ละ chip จะถูกเลื่อนเฟสไปเท่ากับ π และด้วยในช่วงเวลาเดียวกันแต่ละ chip ย่อยๆ ที่ถูกกระจายและเลื่อนเฟสออกมา มีค่าเฟสที่ตรงกันทำให้เมื่อสัญญาณเหล่านั้นรวมกัน จึงได้เป็น correlation ที่มีกำลังของสัญญาณที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และมีลักษณะของสัญญาณดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15

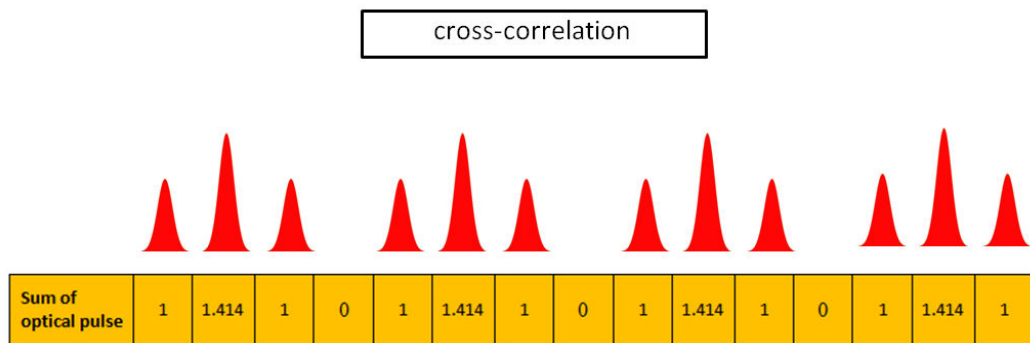
และหากชุดของรหัสไม่ตรงกันจะทำให้ได้ cross-correlation ของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดย decoder ที่ใช้งานมีเฟสในการเลื่อนเป็น $\frac{\pi}{2}$ จึงทำให้สัญญาณที่ถูกกระจายเป็น chip ย่อยๆ ที่ช่วงเวลาเดียวกัน มีเฟสของสัญญาณไม่ตรงกัน เมื่อทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน จึงทำให้เกิดการหักล้างของสัญญาณขึ้น ดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 2.17 และจะมีลักษณะของสัญญาณดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ซึ่งจะมีกำลังของสัญญาณที่ต่ำแต่ด้วยรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสแบบ multi-level phase shift ซึ่งเป็นการเข้ารหัสที่เป็น cyclic code ที่มีได้มีความเป็น orthogonal โดยสมบูรณ์ โดยหากของชุดรหัสที่ใช้ในการเข้ารหัสอยู่ห่างจาก ชุดรหัสของตัวถอดรหัสมาก (หมายเลขของ code ห่างกันมาก) จะมีการสัญญาณรบกวนในระดับที่ต่ำกว่า (cross-correlation ต่ำ) เมื่อเทียบกับกรณีของชุดรหัสที่ใช้ในการเข้ารหัสและชุดรหัสของตัวถอดรหัสอยู่ห่างกันน้อย (หมายเลขของ code ห่างกันน้อย cross-correlation สูง) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยรูปที่ 2.19 (ก) หมายเลขของรหัสต่างกันมาก รูปที่ 2.19 (ข) หมายเลขของรหัสต่างกันน้อย



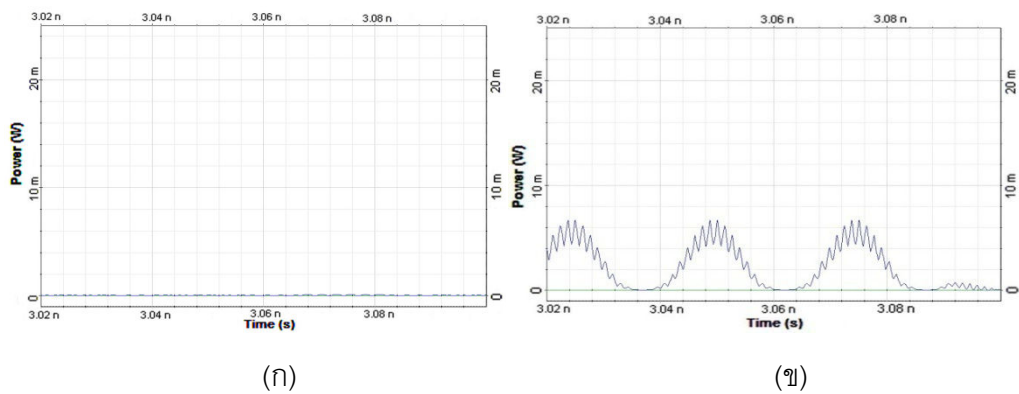
รูปที่ 2.16 การ decode สัญญาณ แบบ multi-level phase shifted ในกรณีที่รหัสไม่ตรงกัน

Input chip 1	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$							
Input chip 2		$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$						
Input chip 3			$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$					
Input chip 4				$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$				
Input chip 5					$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$			
Input chip 6						$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$		
Input chip 7							$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	
Input chip 8								$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$1\angle\pi$	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$1\angle 0$
Sum of optical pulse	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$\sqrt{2}\angle\frac{\pi}{4}$	$1\angle\pi$	0	$1\angle\frac{3\pi}{2}$	$\sqrt{2}\angle\frac{\pi}{4}$	$1\angle\pi$	0	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$\sqrt{2}\angle\frac{5\pi}{4}$	$1\angle 0$	0	$1\angle\frac{\pi}{2}$	$\sqrt{2}\angle\frac{5\pi}{4}$	$1\angle 0$

รูปที่ 2.17 correlation ของสัญญาณที่ถูก decode ในกรณีที่มีรหัสไม่ตรงกัน



รูปที่ 2.18 ลักษณะของ cross-correlation ที่ได้จากการ decode



รูปที่ 2.19 cross-correlation (ก) รหัสห่างกันมาก (ข) รหัสห่างกันน้อย

2.7.3 PCR

power contrast ratio (PCR) คือค่าอัตราส่วนระหว่าง auto-correlation power กับ cross-correlation power ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับสัญญาณรบกวน (crosstalk level) ในระบบ OCDMA-PON ดังสมการที่ (2.20)

$$\zeta = \frac{1}{(N \times PCR)} \quad (2.20)$$

เมื่อ ζ คือ ระดับของสัญญาณรบกวน

N คือ ความยาวของรหัสที่ใช้ในการเข้ารหัส

จากสมการที่ (2.20) จะเห็นว่าระดับของสัญญาณรบกวนในระบบ OCDMA-PON ขึ้นอยู่กับความยาวของรหัสที่ใช้และค่าของ PCR โดยสามารถลดระดับของสัญญาณรบกวนได้โดยเพิ่มความยาวของรหัสที่ใช้ หรือใช้ encoder/decoder ที่มีค่า PCR ที่สูง โดยค่า PCR ของระบบที่ใช้ SSFBG encoder/decoder ด้วยรหัส gold code มีค่า PCR ประมาณ 0 dB จึงต้องมีการใช้รหัสที่มีความยาวมากเพื่อให้ระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าที่ยอมรับได้ที่ระดับต่ำกว่า -27 dB [27] ซึ่งสามารถลดความยาวของรหัสที่ใช้ในการเข้ารหัส โดยใช้ multi-level encoder /decoder ซึ่งมีค่า PCR ที่สูงกว่า

บทที่ 3

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบน

โครงข่ายเข้าถึงแบบพาสซีฟ

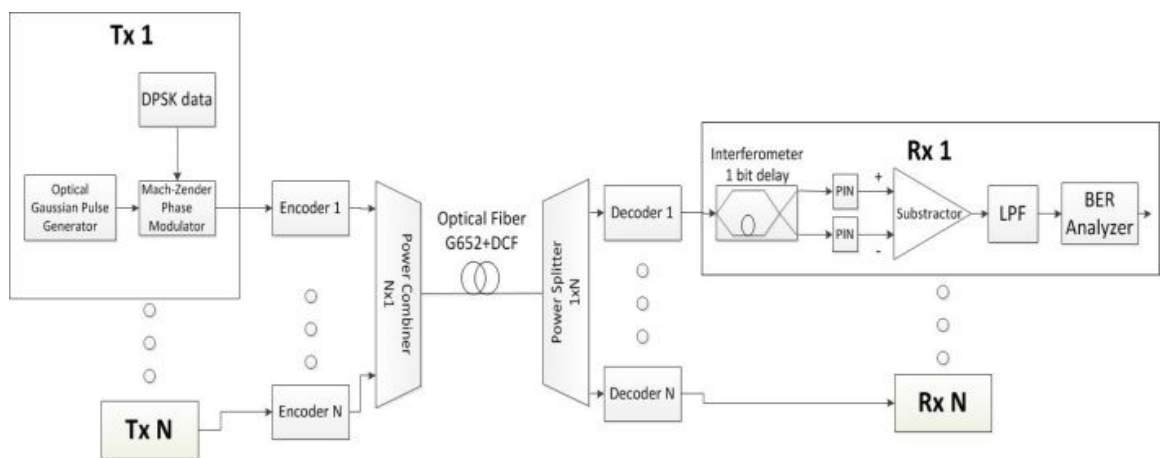
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA การสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง และ โครงข่าย PON เบื้องต้นไปแล้ว และในบทนี้จะเป็น การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเข้าถึงตัวกลางแบบซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่าย PON ซึ่งประกอบไปด้วย การลดทอนกำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชันและความชันของดิสเพอร์ชัน ปราคฏ การณ์เคอร์ โดยการวิเคราะห์ถึงปัจจัยข้างต้นซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ OCDMA และเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบโครงข่าย OCDMA-PON ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดและสอดคล้องกับอุปกรณ์ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ยังตรวจสอบผลของปัจจัยดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นกับการจำลองระบบ OCDMA-PON ด้วยโปรแกรม Optisys 8.0

3.1 แบบจำลองระบบของการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA แสงบนโครงข่าย PON

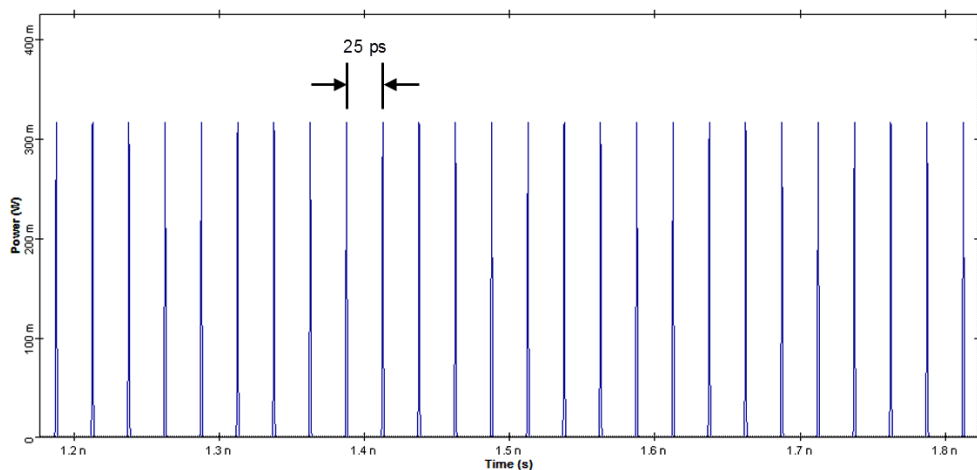
ในมาตรฐาน EPON, GPON, 10G-EPON หรือไม่ว่าจะเป็น XGPON ที่ใช้งานกันทั่วไป ซึ่งจะมีการทำงานในส่วนของภาค downlink และ ภาค uplink ที่แตกต่างกันในส่วนของความยาวคลื่นที่ใช้ จึงได้รับผลกระทบจากการลดทอนสัญญาณที่แตกต่างกัน แต่ทว่าในการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA บนโครงข่ายแบบ PON นั้น มีการเข้ารหัสสัญญาณทำให้สามารถส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณบนความยาวคลื่นเดียวกันได้ ดังนั้นในส่วนของภาค downlink และ ภาค uplink ของโครงข่าย OCDMA-PON จึงสามารถทำงาน ณ ความยาวคลื่นเดียวกันได้ จึงไม่มีความจำเป็นในการแยกพิจารณาในส่วนของภาค downlink และ ภาค uplink

โครงสร้างของโครงข่าย OCDMA-PON มีอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยในส่วนของภาคส่งของผู้ใช้แต่ละรายจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดพัลส์แสง ให้กำเนิดชุดสัญญาณพัลส์ความถี่ 40 GHz สำหรับมอดูเลตสัญญาณเข้ากับข้อมูลที่มีอัตราข้อมูล 40 Gbps ดังในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะมีคาบเวลาระหว่างพัลส์เท่ากับ 25 ps จากนั้นสัญญาณพัลส์จะถูกมอดูเลตเฟสกับสัญญาณทางไฟฟ้าที่ถูกมอดูเลตแบบ DPSK และจะถูกทำการเข้ารหัสด้วย 8, 16 หรือ 32-level phase shifted encoder โดยสัญญาณจากผู้ใช้แต่ละรายจะถูกรวมด้วย power combiner และส่งผ่านตัวกลางคือ เส้นใยแสงชนิด G.652.D ซึ่งใช้งานร่วมกับ dispersion

compensation fiber (DCF) เพื่อชดเชยผลของ dispersion ต่อมา power splitter จะทำการกระจายสัญญาณไปยังผู้รับแต่ละราย โดยที่ภาครับของผู้ใช้แต่ละราย สัญญาณจะถูกทำการ decode ด้วย 8, 16 หรือ 32-level phase shifted decoder และส่งสัญญาณเข้า 1-bit delay interferometer และแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยใช้ PIN photodiode เพื่อตรวจรับสัญญาณด้วยวิธี balance detection จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่าน low pass filter (LPF) และส่งไปยังผู้ใช้ต่อไป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบ OCDMA-PON



รูปที่ 3.2 พัลส์สัญญาณแสง

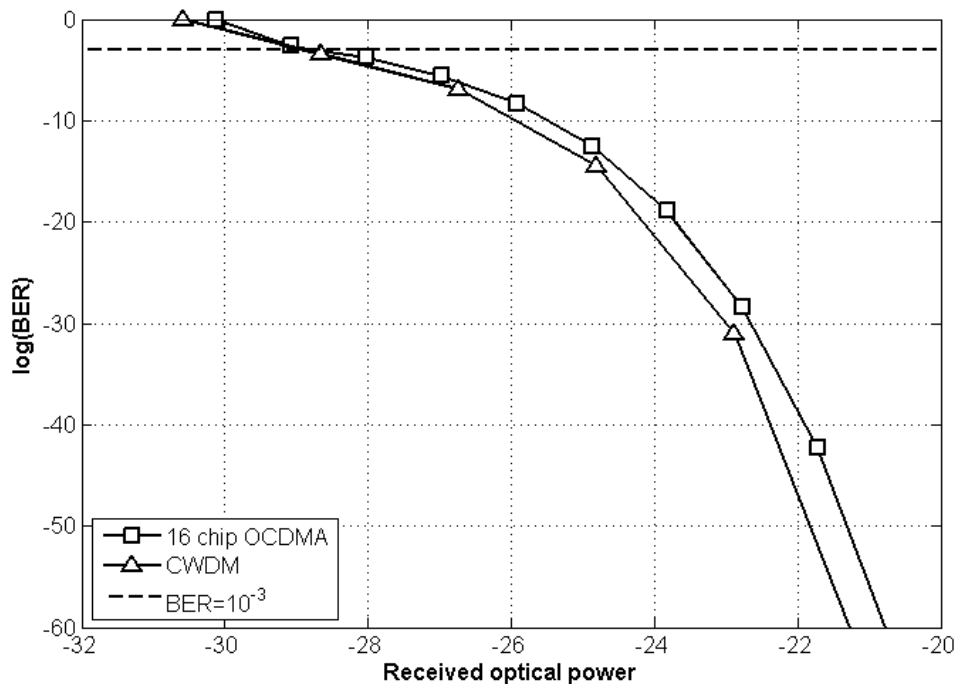
3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA

การเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA มีผลของการลดทอนสัญญาณต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล โดยในส่วนนี้จะพิจารณาถึงผลของการลดทอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.2.1 การลดทอนกำลังของสัญญาณ

กำลังของสัญญาณมีผลต่อรูปสัญญาณโดยตรง คือเมื่อกำลังของสัญญาณที่สูงจะทำให้ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณมีค่าสูงด้วย ทำให้ทนทานต่อสัญญาณรบกวนที่กระทำต่อสัญญาณ ทั้งนี้รวมถึงการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากการส่งผ่านเส้นใยแสง หรือการสูญเสียกำลังจากการถูกแบ่งกำลังสัญญาณโดยอุปกรณ์ optical splitter และเนื่องจากอัตราการลดทอนกำลังในเส้นใยแสงนั้นเปลี่ยนไปตามความยาวคลื่น ดังนั้นเมื่อสื่อสัญญาณความยาวคลื่นที่มีอัตราการลดทอนสูง การส่งระยะทางไกล หรือ มี split ratio ที่สูงย่อมทำให้การตัดสินใจมีความผิดพลาดมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในการเข้าถึงตัวกลางของสัญญาณ OCDMA ที่มีกำลังส่งสูงจะทำให้อัตราบิดผิดพลาดต่ำลง

ทั้งนี้ได้ตรวจสอบสมมติฐานโดยการจำลองระบบ OCDMA-PON ที่อัตราบิต 40 Gb/s โดยจำลองระบบที่มีสัญญาณอินพุตเป็นแบบ pseudo random จำนวน 1024 บิต ทำการมอดูเลตแบบ DPSK แล้วมอดูเลตเข้ากับพัลส์แสงที่มีความยาวคลื่น 1552.52 nm ซึ่งจะทำการ en/decoder ด้วย multi-level phase shifted en/decoder ที่มีความยาว 16 chip โดยส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง G652.D ที่มีอัตราการลดทอนเป็น 0.21 dB/km ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ CWDM-PON ที่แต่ละช่องสัญญาณถูกทำการมอดูเลตแบบ DPSK เช่นกัน โดยในช่วงความยาวคลื่น 1271-1611 nm ความยาวคลื่นที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาเพียงผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณ คือ ที่ความยาวคลื่น 1271 nm ซึ่งมีอัตราการลดทอนเป็น 0.385 dB/km ซึ่งผลการจำลองระบบเป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 เห็นได้ว่าเมื่อกำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำลงทั้งในส่วนในระบบ OCDMA-PON และระบบ CWDM-PON โดยระบบ OCDMA-PON มีอัตราบิดผิดพลาดที่สูงกว่าระบบ CWDM-PON ที่ค่ากำลังของสัญญาณเดียวกัน เป็นผลอันเนื่องมาจากการเข้ารหัสและถอดรหัสของสัญญาณ

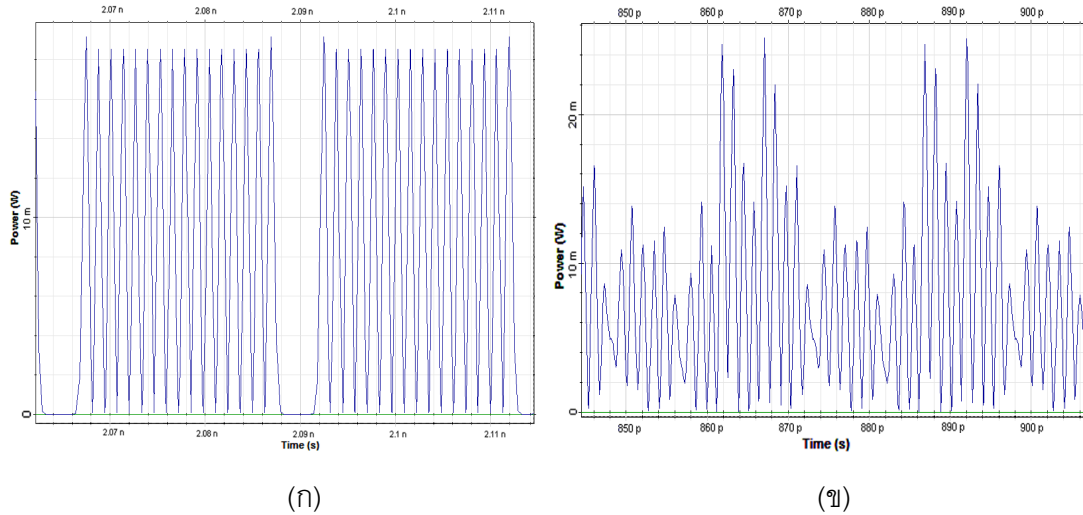


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ภาครับของสัญญาณและ BER

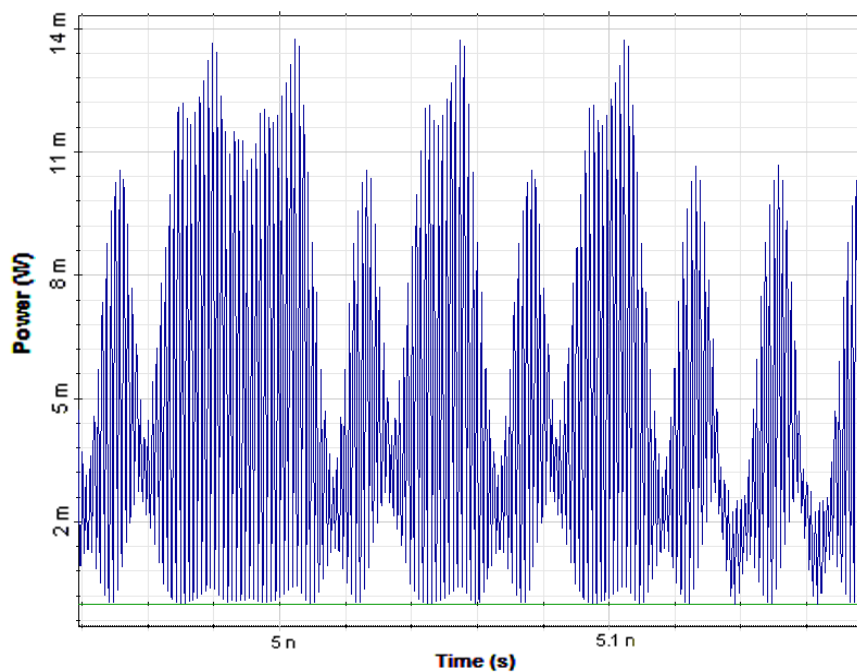
3.2.2 ดิสเพอร์ชัน

ผลของดิสเพอร์ชันของ SMF ในโครงข่าย PON ที่ถือได้ว่ามีผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้มากที่สุด โดยหลักแล้วเป็นผลอันเนื่องมาจาก Chromatic dispersion ด้วยสาเหตุที่ว่าระยะในการสื่อสารสัญญาณไม่สูงมากนัก ทำให้ความชันดิสเพอร์ชันไม่มีผลมากนัก โดยผลจากดิสเพอร์ชันจะทำให้พัลส์สัญญาณขยายกว้างออกไปรอบวงพัลส์ข้างเคียง เกิดเป็นการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference: ISI) และถ้าผลจากปรากฏการณ์ ISI มีความรุนแรงสูงจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นได้ ซึ่งผลของดิสเพอร์ชันนั้นขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้ในการสื่อสารสัญญาณ และระยะทางในการสื่อสารสัญญาณ โดยในระบบ OCDMA-PON มีความสามารถในการทนทานต่อดิสเพอร์ชันค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการเข้ารหัสสัญญาณเป็นพัลส์สัญญาณที่มีความกว้างน้อยมาก (ultra short pulse) ทำให้เมื่อได้รับผลกระทบจากดิสเพอร์ชันเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยรูปที่ 3.4 (ก) แสดงสัญญาณ OCDMA ที่ไม่ได้รับผลของดิสเพอร์ชัน และรูปที่ 3.4 (ข) แสดงสัญญาณ OCDMA ที่ได้รับผลจากดิสเพอร์ชัน เมื่อนำสัญญาณที่ได้รับผลของดิสเพอร์ชันมาถอดรหัส เพื่อให้ได้ auto-correlation ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ก็ยังเห็นได้ว่าดิสเพอร์ชันทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณอย่างรุนแรง จนทำให้การตัดสินใจผิดพลาดเป็นไปได้ยาก ดังเห็นได้จาก eye diagram ในรูปที่

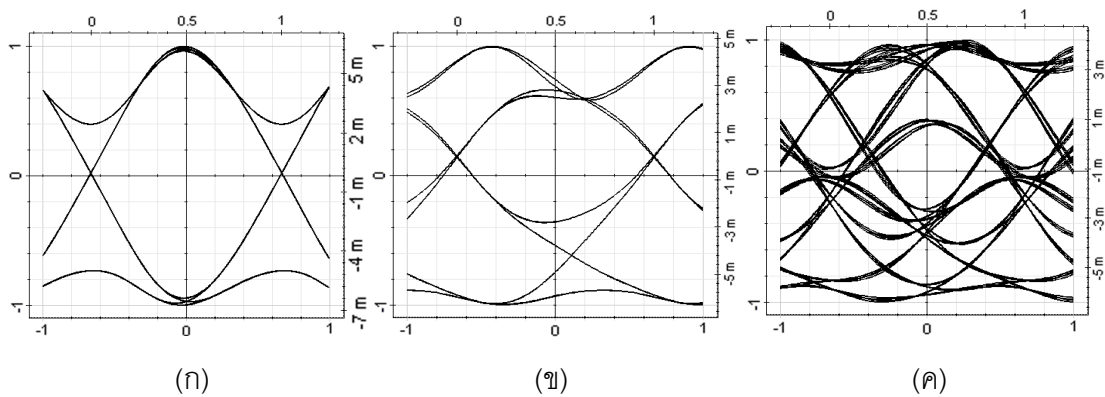
3.6 (ก) รูปที่ 3.6 (ข) และรูปที่ 3.6 (ค) ที่แสดงอย่างเด่นชัดว่าดิสเพอร์ชัน ทำให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนไปอย่างมาก ดังนั้นโดยทั่วไปจะทำการชดเชยดิสเพอร์ชันในการนำมาใช้งานระบบ OCDMA-PON ด้วย



รูปที่ 3.4 สัญญาณ OCDMA ที่ถูกเข้ารหัส (ก) ไม่มีผลของดิสเพอร์ชัน (ข) ผลจากดิสเพอร์ชัน

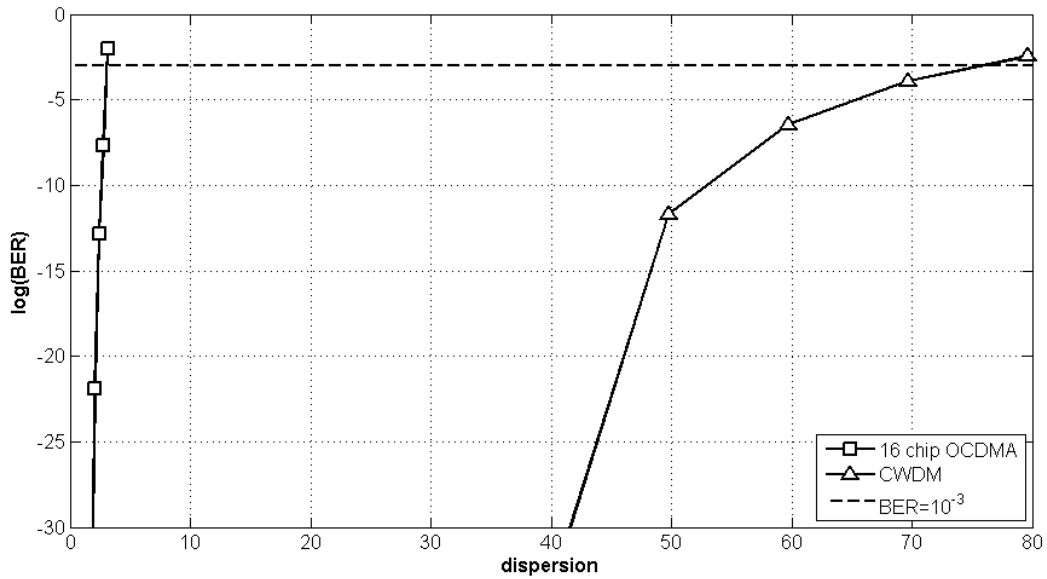


รูปที่ 3.5 auto-correlation ของสัญญาณ OCDMA เมื่อได้รับผลของดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 3.6 eye diagram (ก) ไม่มีผลจากดิสเพอร์ชัน (ข) ได้รับผลจากดิสเพอร์ชัน (ค) ได้รับผลจากดิสเพอร์ชันอย่างรุนแรง

ทั้งนี้ได้จำลองระบบ OCDMA-PON ที่อัตราบิต 40 Gb/s โดยจำลองระบบที่มีสัญญาณอินพุตเป็นแบบ pseudo random จำนวน 1024 บิต ทำการมอดูเลตแบบ DPSK แล้วมอดูเลตเข้ากับพัลส์แสงที่มีความยาวคลื่น 1552.52 nm ซึ่งจะทำกร en/decoder ด้วย multi-level phase shifted en/decoder ที่มีความยาว 16 chip โดยส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง G652.D ที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็น 17.577 ps/nm/km และค่าความชันดิสเพอร์ชันเป็น 0.058 ps/nm²/km เพื่อหาความทนทานต่อดิสเพอร์ชันของระบบ OCDMA-PON และเปรียบเทียบกับระบบ CWDM-PON ที่มีความยาวคลื่น 1611 nm เนื่องจากได้รับผลกระทบจากดิสเพอร์ชันสูงสุด จากช่วงความยาวคลื่น 1271-1611 nm ด้วยค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 19.9 ps/nm/km และมีความชันดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0.087 ps/nm²/km โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดิสเพอร์ชันกับค่า BER เห็นได้ว่าระบบ OCDMA มีความทนทานต่อดิสเพอร์ชันที่น้อยมาก โดยทนได้ประมาณ 3 ps ในขณะที่เมื่อนำมาเทียบกับระบบ CWDM-PON เห็นได้ว่าระบบ CWDM-PON สามารถทนต่อดิสเพอร์ชันได้สูงถึง 75 ps ซึ่งผลจากการจำลองสอดคล้องกับสมมติฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า dispersion กับ BER

3.2.3 ปรากฏการณ์เคอร์ (kerr effect)

เนื่องจากภายในเส้นใยแสง ปรากฏการณ์เคอร์ หรือที่เรียกว่า ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหที่ไม่เท่ากันตามขนาดของกำลังงานของสัญญาณ ส่งผลให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยสมการที่ (3.1) แสดงระยะทางสูงสุดที่สัญญาณยังคงไม่ผิดเพี้ยนเมื่อได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (nonlinear length) [31]

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (3.1)$$

โดย γ คือ สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงคำนวณได้จากสมการ (3.2)

P_0 คือ กำลังของสัญญาณที่ส่งผ่านเส้นใยแสง

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} \quad (3.2)$$

โดยที่ n_2 คือ ดรรชนีหักเหแสงของความไม่เป็นเชิงเส้น [m^2/W]

λ คือ ความยาวคลื่น [nm]

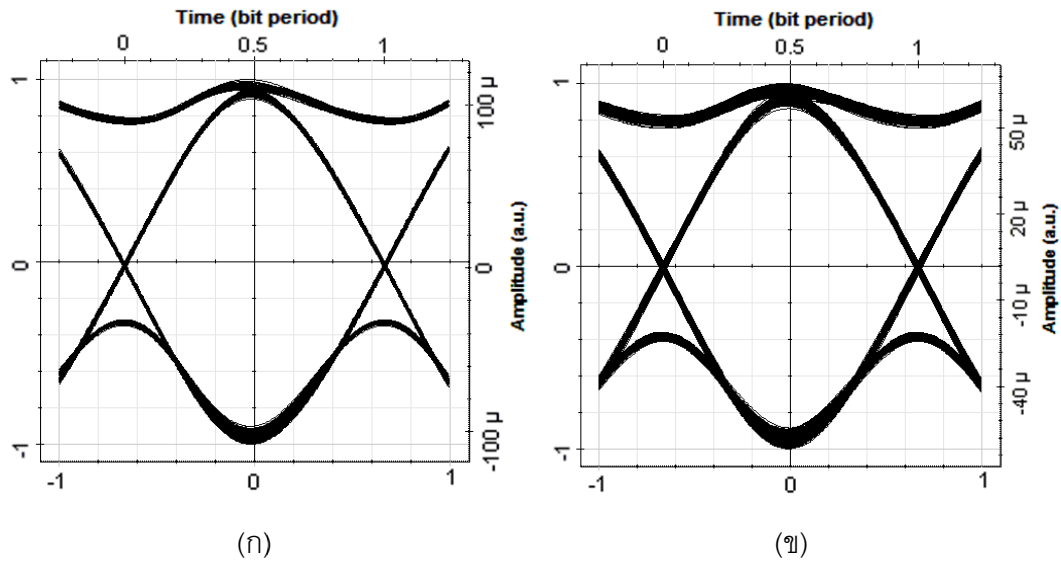
A_{eff} คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ [μm^2]

โดยจะเห็นได้ว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับกำลังส่งของสัญญาณเพียงอย่างเดียว โดยหากกำลังของสัญญาณสูงจะทำให้ได้รับผลของความไม่เป็นเชิงเส้นที่สูงขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงข่าย PON มีระยะการใช้งานในช่วง 20-50 km ซึ่งเป็นระยะการสื่อสารสัญญาณที่สั้น จนความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าต่ำมาก จนสามารถละเลยได้

ทั้งนี้ได้ตรวจสอบสมมติฐานโดยการจำลองระบบ OCDMA-PON ที่อัตราบิต 40 Gb/s โดยจำลองระบบที่มีสัญญาณอินพุตเป็นแบบ pseudo random จำนวน 1024 บิต ทำการมอดูเลตแบบ DPSK แล้วมอดูเลตเข้ากับพัลส์แสงที่มีความยาวคลื่น 1552.52 nm ซึ่งจะทำการ en/decoder ด้วย multi-level phase shifted en/decoder ที่มีความยาว 16 chip โดยส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะ 20 km ที่มีค่า n_2 เท่ากับ $14.3 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{W}$ และค่า A_{eff} เป็น $65 \mu\text{m}^2$ ด้วยกำลังของสัญญาณตั้งแต่ -9 dBm ถึง 8 dBm เมื่อพิจารณาเพียงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงเท่านั้น ผลการจำลองเป็นไปตามตาราง 3.1 เห็นได้ว่าค่า BER มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกับกรณีการสื่อสารสัญญาณแบบ back-to-back และมี eye diagram ของทั้งสองกรณีที่ใกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) และ รูปที่ 3.8 (ข)

ตาราง 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งของสัญญาณกับ BER

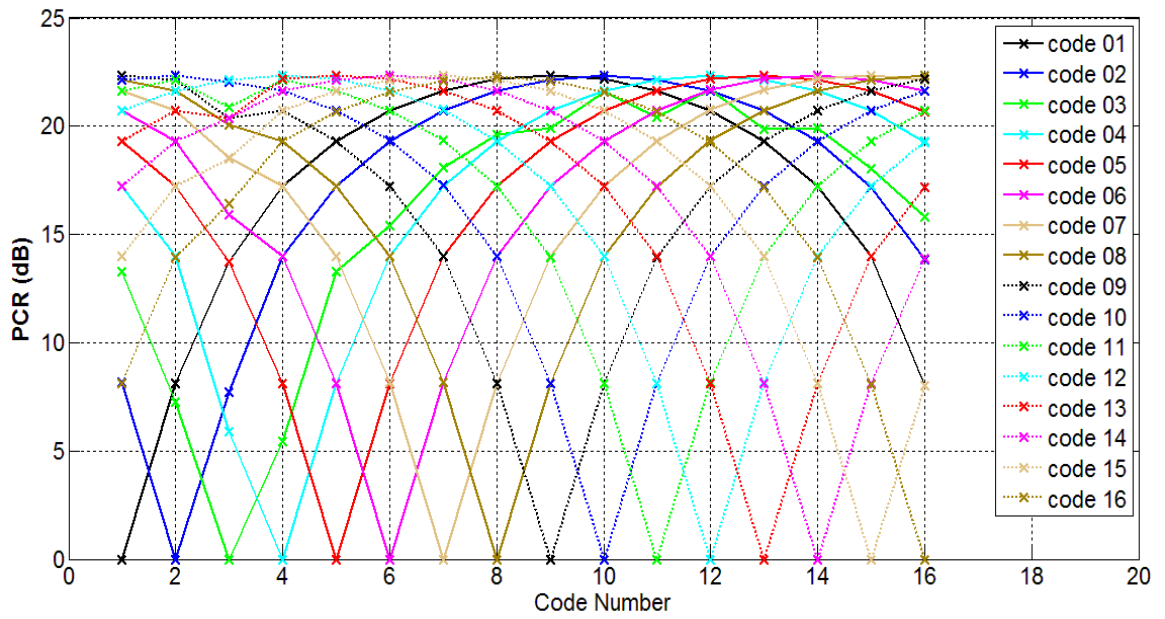
B-B		SMF 20 km	
Tx power (dBm)	BER	Tx power (dBm)	BER
-9.306	0	-9.306	2.66E-256
-7.306	0	-7.306	6.72E-276
-5.306	0	-5.306	3.68E-288
-3.306	0	-3.306	1.15E-295
-1.306	0	-1.306	3.23E-300
0.694	0	0.694	5.81E-303
2.694	0	2.694	1.26E-304
4.694	0	4.694	1.15E-305
6.694	0	6.694	2.06E-306
8.694	0	8.694	3.46E-307



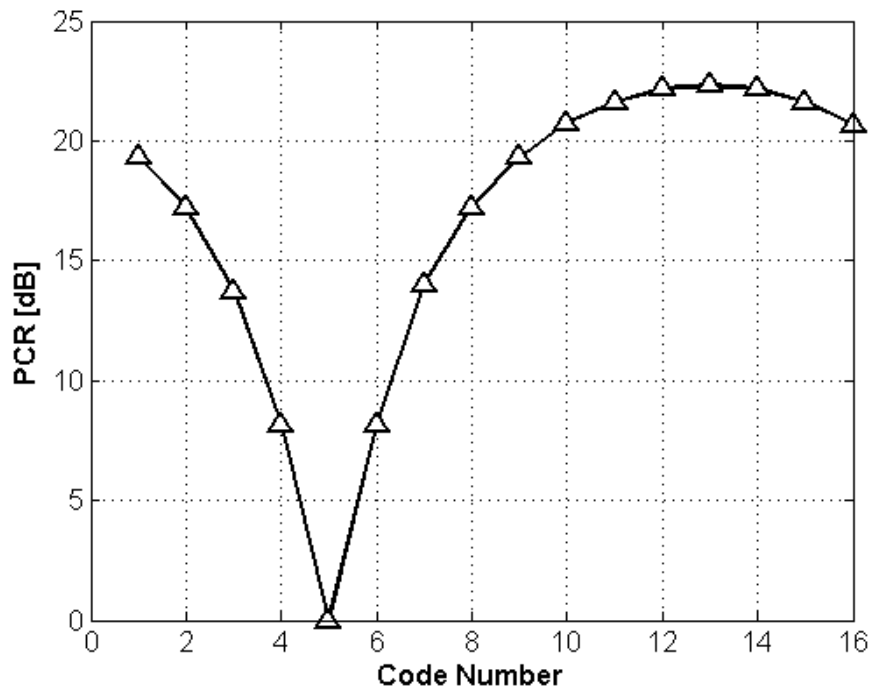
รูปที่ 3.8 eye diagram (ก) B-B (ข) ได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นระยะ 20 km

3.2.4 power contrast ratio

PCR ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ OCDMA-PON ซึ่งจากสมการที่ (2.20) เห็นได้ว่าระดับสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับค่า PCR หากมีความยาวของรหัสที่ใช้คงที่ ดังนั้นเพื่อศึกษาเกี่ยวกับระดับของสัญญาณรบกวนในระบบ OCDMA-PON จึงได้ทำการหาค่า PCR โดยได้ทำการจำลองระบบ OCDMA-PON อัตราข้อมูล 40 Gbps ที่ใช้พัลส์แสงขนาดความกว้าง full width at half maximum (FWHM) เท่ากับ 0.76 ps และใช้การเข้ารหัสด้วย 16-level phase shifted en/decoder ที่มีค่า t_{chip} หรือคาบเวลาระหว่างแต่ละ chip ของรหัส เท่ากับ 1.3 ps ได้ค่า PCR ของ 16-level phase shifted en/decoder ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า PCR ของแต่ละรหัสมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าหาก code ที่ใช้ในการเข้ารหัสอยู่ห่างจากกันมากจะทำให้มีค่า PCR ที่สูง ในทางกลับกันหาก code ที่ใช้ในการเข้ารหัสเป็นห่างกันน้อย หรือเป็น code ที่อยู่ติดกันจะทำให้มีค่า PCR ที่ต่ำมาก ซึ่งหมายถึงจะมีสัญญาณรบกวน MAI ในระดับที่สูง ดังเห็นได้จากรูปที่ 3.10 ที่แสดงค่า PCR ของ code หมายเลข 5 โดยจะมีค่า PCR สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ code หมายเลข 13 ซึ่งก็คือ หากทำการเข้ารหัสด้วย code หมายเลข 5 จะได้รับสัญญาณรบกวน MAI จาก code หมายเลข 13 ในระดับที่ต่ำที่สุดหากมีการใช้งานพร้อมกันของสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสด้วย code ต่างๆ พร้อมกัน ดังนั้นในการใช้งาน multi-level phase shifted en/decoder จะเลือกให้ code ที่ใช้งานอยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เสมอ เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวน MAI ให้มีระดับต่ำที่สุด

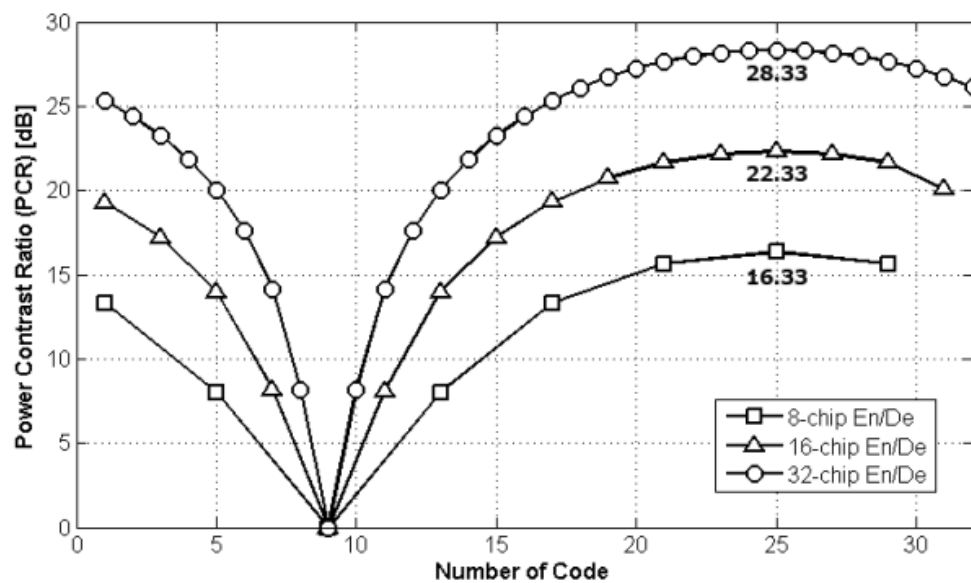


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง PCR และ code number



รูปที่ 3.10 PCR ของ code หมายเลข 5

จากนั้นเพื่อศึกษาลักษณะและผลของความยาวของรหัสกับ PCR จึงได้ทำการหาค่า PCR ของระบบ OCDMA-PON ที่ใช้ 8, 16 และ 32 level phase-shift encoder/decoder โดยมีค่าของ t_{chip} สำหรับ en/decoder เท่ากับ 2.6 1.3 และ 0.76 ps ตามลำดับ ผลที่ได้เป็นไปดังในรูปที่ 3.11 ที่แสดงค่าของ PCR ของ code หมายเลข 9 ที่มีการเลื่อนเฟสของแต่ละ chip ในการเข้ารหัส เท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้ารหัสมีความยาวมาก PCR จะมีค่าสูงตามไปด้วย โดยค่าสูงสุดของ PCR ของระบบ 8, 16 และ 32 level phase-shift encoder/decoder คือ 16.33, 22.33 และ 28.33 dB ตามลำดับ



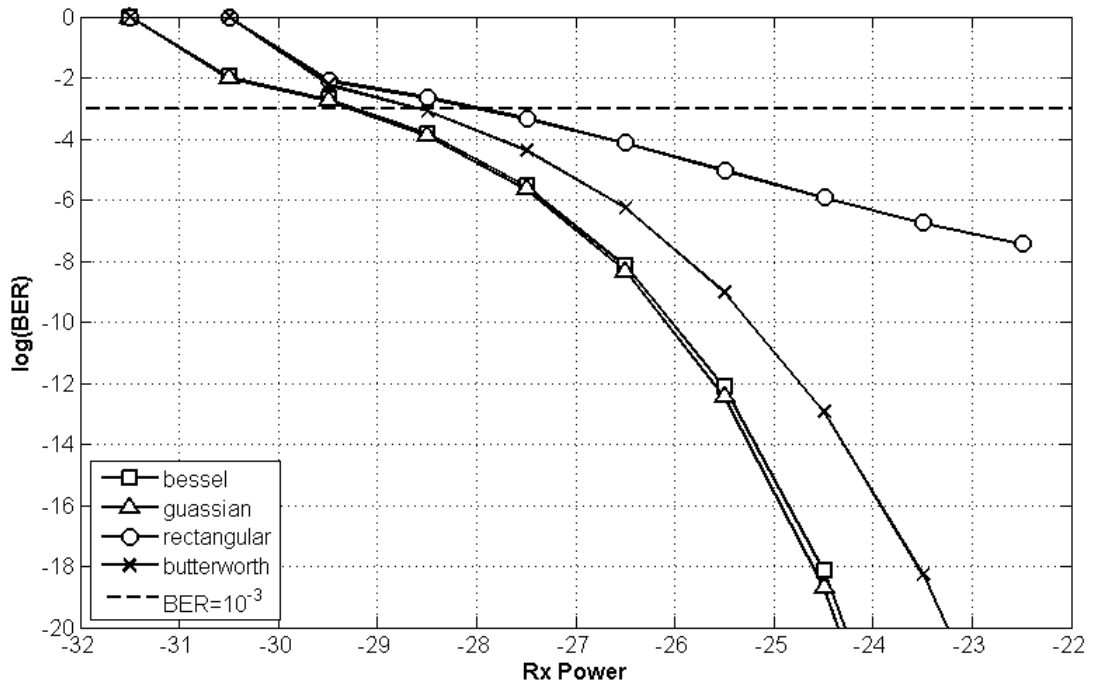
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง PCR กับความยาวของรหัส

3.2.5 ชนิดของ low pass filter

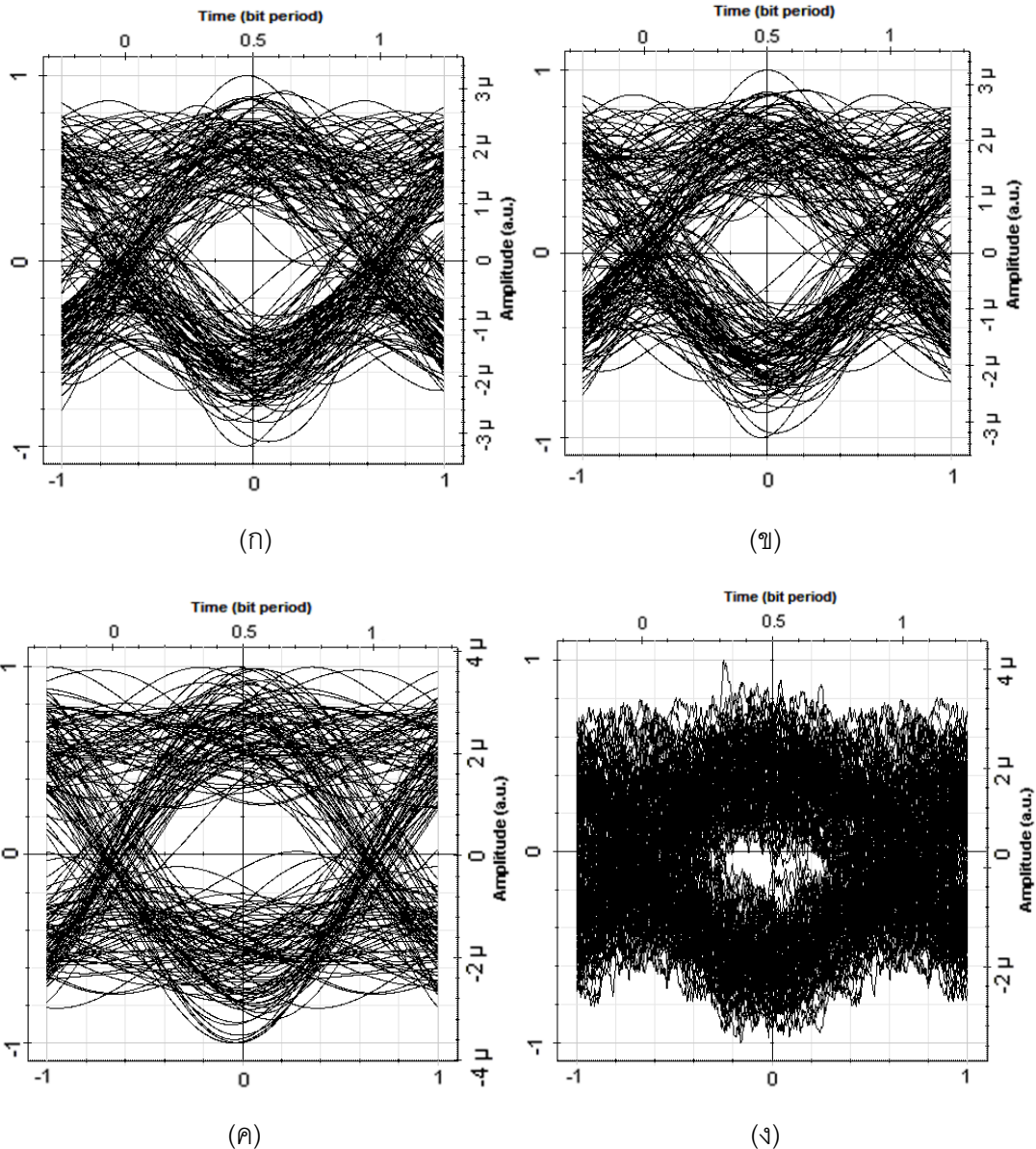
เนื่องจากอุปกรณ์ที่ภาครับของสัญญาณโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติเป็น LPF ซึ่งจะกรองสัญญาณออก ทำให้แบนด์วิดท์ในการทำงานของอุปกรณ์ภาครับมีความกว้างน้อยลง อุปกรณ์ที่ใช้จึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเดิม ซึ่งโดยทั่วไปในทางปฏิบัตินิยมกำหนดให้ช่วงแบนด์วิดท์ที่ใช้งานของ LPF อยู่ในช่วง 75%-80% ของอัตราข้อมูล โดยในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของ LPF ที่ใช้งาน ณ ภาครับ โดยได้ทำการจำลองระบบ OCDMA-PON PON ที่อัตราบิต 40 Gb/s โดยจำลองระบบที่มีสัญญาณอินพุตเป็นแบบ pseudo random จำนวน 1024 บิต ทำการมอดูเลตแบบ DPSK แล้วมอดูเลตเข้ากับพัลส์แสงที่มีความยาวคลื่น 1552.52 nm ซึ่งจะทำการ en/decoder ด้วย multi-level phase shifted en/decoder ที่มีความยาว 16 chip โดยส่งสัญญาณผ่านเส้นใย

แสง G652.D ระยะ 20 km และทำการชดเชยดิสเพอร์ชันด้วย DCF และส่งไปยังภาครับเพื่อทำการ decode สัญญาณ และทำการ balance detection เพื่อส่งผ่าน LPF โดยในการจำลองได้เปลี่ยนชนิดของ LPF เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ bessell LPF guassian LPF rectangular LPF และ butterworth LPF

โดยทำการจำลองระบบในกรณีที่มีผู้ใช้ 1 ราย และกรณีที่มีผู้ใช้งาน 8 ราย ที่ cutoff frequency 30 GHz ได้ผลการจำลองในกรณีของผู้ใช้งาน 1 ราย ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เห็นได้ว่าที่กำลังของสัญญาณที่ภาครับเท่ากัน rectangular LPF มีประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุด และ bessell LPF กับ guassian LPF มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันและดีกว่า LPF ชนิดอื่น สามารถรองรับสัญญาณที่มีกำลังสัญญาณต่ำสุดได้ถึงประมาณ -29 dBm โดยจากการใช้งาน LPF แต่ละชนิดได้ลักษณะของ eye diagram ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} แสดงไว้ดังในรูปที่ 3.13 (ก) รูปที่ 3.13 (ข) รูปที่ 3.13 (ค) และรูปที่ 3.13 (ง) ซึ่งเป็นระบบที่ถูกใช้งานด้วย LPF แบบ bessell guassian rectangular และ butterworth ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับและ BER เมื่อใช้ LPF ชนิดต่างๆ

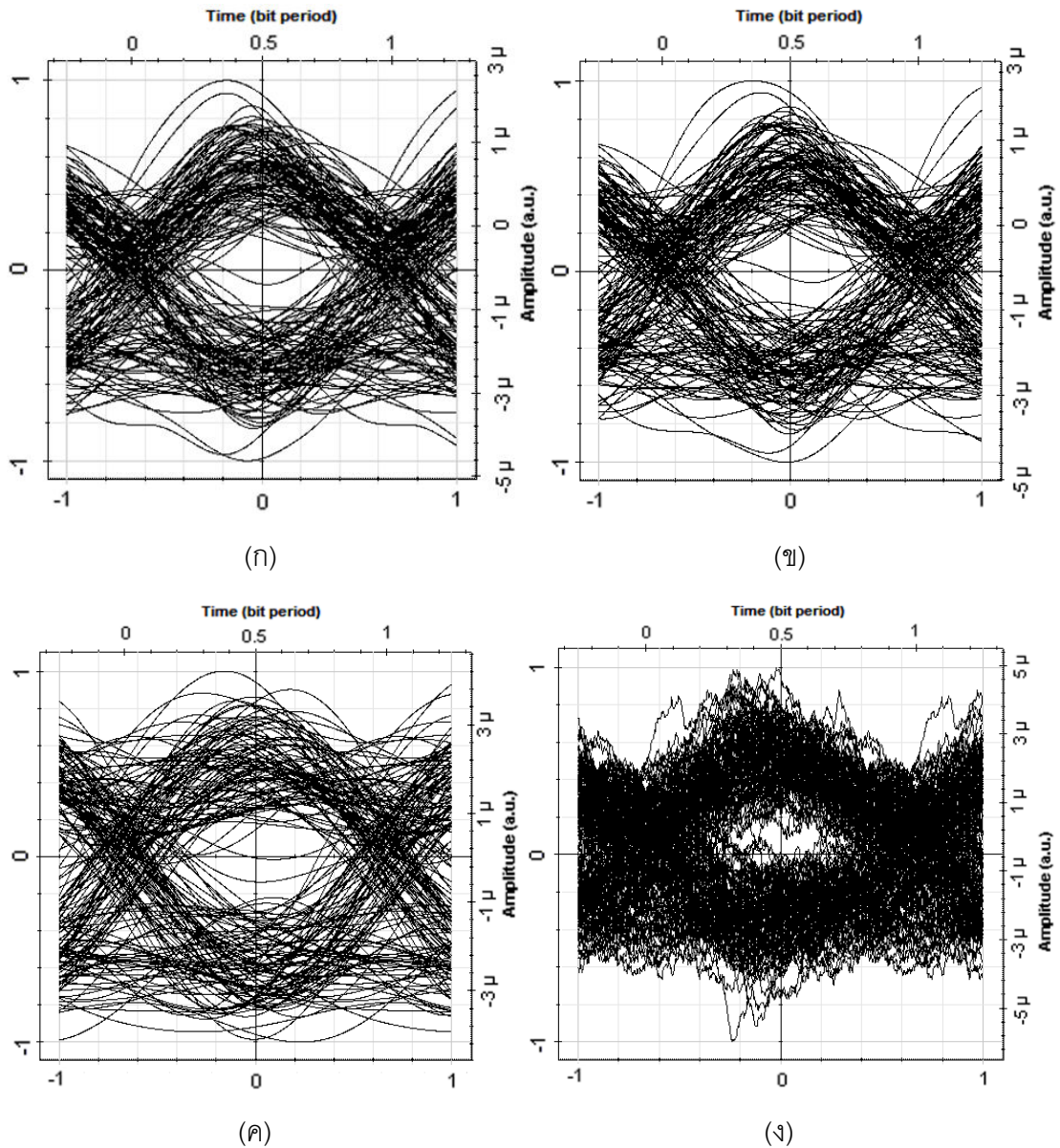


รูปที่ 3.13 eye diagram ของสัญญาณที่ผ่าน LPF ที่ค่า BER = 10^{-3} ในกรณีผู้ใช้งาน 1 ราย

(ก) bessel LPF (ข) gaussian LPF (ค) rectangular LPF (ง) butterworth LPF

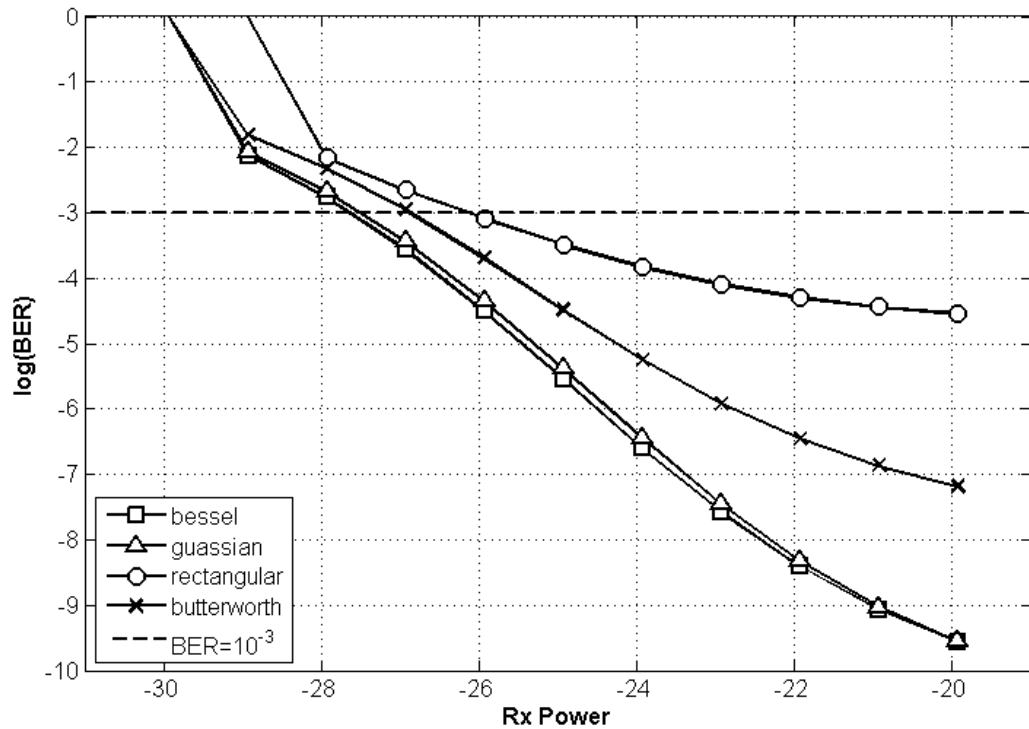
โดยในส่วนของกรณีผู้ใช้งาน 8 ราย มีลักษณะของ eye diagram ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.14 (ก) เป็นสัญญาณที่ผ่าน LPF ชนิด Bessel รูปที่ 3.14 (ข) เป็นสัญญาณที่ผ่าน LPF ชนิด gaussian รูปที่ 3.14 (ค) เป็นสัญญาณที่ผ่าน LPF ชนิด rectangular และ รูปที่ 3.14 (ง) เป็นสัญญาณที่ผ่าน LPF ชนิด butterworth และจากการจำลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ภาครับของสัญญาณกับค่า BER ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 โดยในรูปที่ 3.15 เป็นผลที่ได้จากการจำลองของ code หมายเลข 1 ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับกรณีที่มีผู้ใช้งานเพียง

1 ราย นั้นคือ bessel LPF และ gaussian LPF มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ bessel filter มีประสิทธิภาพดีกว่าเล็กน้อย ส่วนในรูปที่ 3.16 เป็นผลที่ได้จากการจำลองของ code หมายเลข 13 ซึ่งได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน MAI สูงสุด แต่ก็ยังมีผลที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับกรณีอื่น แต่ทว่าในกรณีของสัญญาณที่ใช้ rectangular LPF ประสิทธิภาพของระบบต่ำมากจนไม่สามารถวัดค่า BER ได้



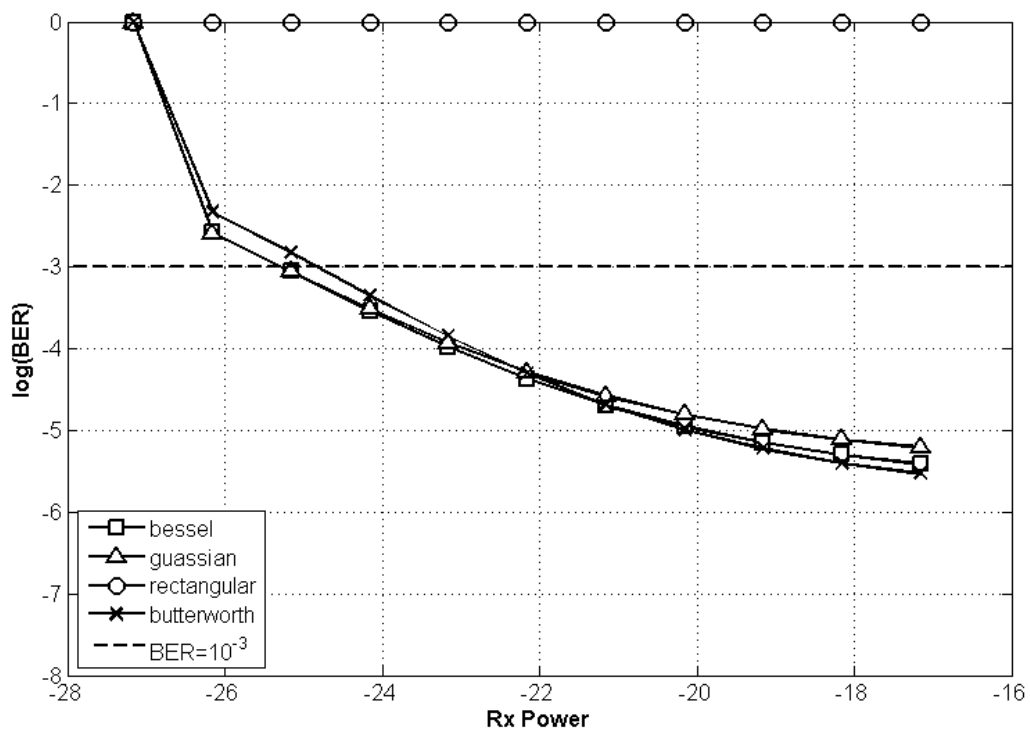
รูปที่ 3.14 eye diagram ของสัญญาณที่ผ่าน LPF ที่ค่า BER = 10^{-3} ในกรณีผู้ใช้งาน 8 ราย

(ก) bessel LPF (ข) gaussian LPF (ค) rectangular LPF (ง) butterworth LPF



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับและ BER เมื่อใช้ LPF ชนิดต่างๆ

กรณีผู้ใช้งาน 8 ราย ของ code หมายเลข 1



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับและ BER เมื่อใช้ LPF ชนิดต่างๆ

กรณีผู้ใช้งาน 8 ราย ของ code หมายเลข 13

บทที่ 4

สมรรถนะของโครงข่ายเข้าถึงแบบพาสซีฟที่ใช้การเข้าถึงตัวกลางแบบ ซีดีเอ็มเอแสง

จากในบทที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการสื่อสารสัญญาณแสงด้วยการเข้าถึงตัวกลางแบบซีดีเอ็มเอแสงผ่านโครงข่ายเข้าถึงแบบพาสซีฟ สำหรับในบทที่ 4 จะเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ OCDMA-PON ความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้งาน และการแนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA-PON เพื่อให้มีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับได้

4.1 แบบจำลองระบบ OCDMA-PON

โครงสร้างของระบบ OCDMA-PON ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบ มีลักษณะโครงสร้างของระบบเช่นเดียวกับโครงสร้างของระบบที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 ทั้งนี้ในการจำลองระบบเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ อาทิเช่น จำนวนผู้ใช้งานสูงสุด penalty ของระบบ หรือในการคำนวณ link power budget รายละเอียดของพารามิเตอร์มีดังต่อไปนี้

4.1.1 ตัวส่งสัญญาณ OCDMA

ตัวส่งของผู้ใช้แต่ละรายในระบบ OCDMA-PON ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดพัลส์แสง ให้กำเนิดชุดสัญญาณพัลส์ความถี่ 40 GHz ที่มีขนาดความกว้าง FWHM เท่ากับ 0.76 ps เพื่อใช้สำหรับมอดูเลตสัญญาณเข้ากับข้อมูลที่มีอัตราข้อมูล 40 Gbps ซึ่งจะมีคาบเวลาระหว่างพัลส์เท่ากับ 25 ps จากนั้นสัญญาณพัลส์จะถูกมอดูเลตเฟสด้วย mach-zender modulator (MZM) เข้ากับสัญญาณทางไฟฟ้าที่ถูกมอดูเลตแบบ DPSK ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps เช่นเดียวกัน และจะถูกทำการเข้ารหัสด้วย 8, 16 หรือ 32-level phase shifted encoder ซึ่งสัญญาณจากผู้ใช้แต่ละรายจะถูกรวมด้วย power combiner เพื่อทำการสื่อสารสัญญาณผ่านโครงข่ายในลำดับต่อไป

4.1.2 เส้นใยแสงแบบ SMF

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ SMF ที่ใช้ในการจำลองระบบ ใช้ค่าพารามิเตอร์ตามเส้นใยแสงมาตรฐาน G.652D โดยใช้สายเส้นเดียวที่ไม่มีการเชื่อมต่อสาย (splice) ซึ่งค่าพารามิเตอร์แสดงดังตาราง 4.1 ดังนี้

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเส้นใยแสงแบบ SMF ชนิด G.652D ที่ใช้ในการจำลอง

ความยาวคลื่น (nm)	1552.52
Attenuation (dB/km)	0.21
Dispersion (ps/nm/km)	17.577
Dispersion slope (ps/nm ² /km)	0.058
Nonlinearity coefficient (m ² /W)	14.3×10 ⁻²¹
Core effective area (μm ²)	65

4.1.3 power splitter

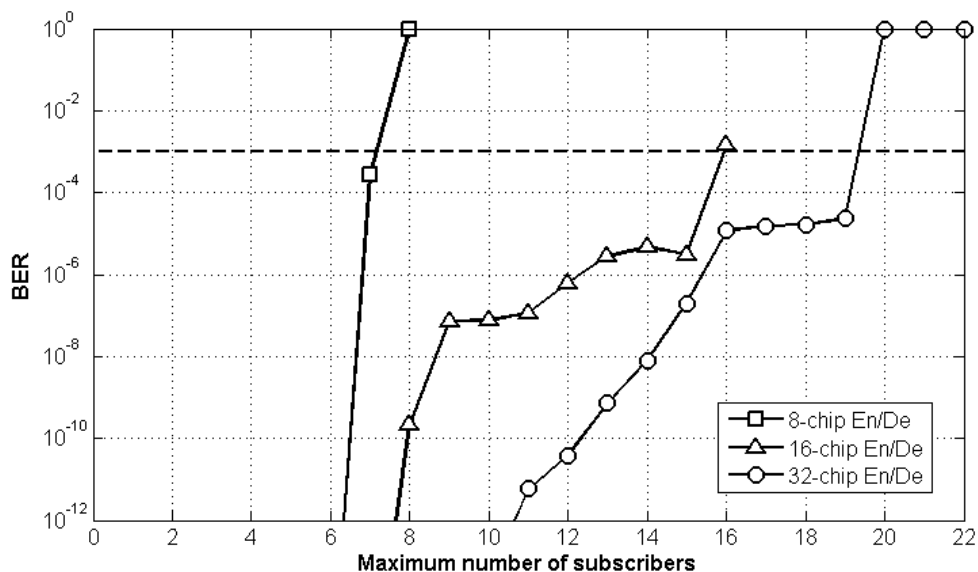
power splitter ทำหน้าที่กระจายสัญญาณจากภาคส่งที่ส่งสัญญาณผ่านโครงข่าย PON ไปยังภาครับหรือผู้ใช้บริการแต่ละราย โดยค่าของ split ratio ที่ใช้ในการจำลองนี้จะแบ่งเป็น 1:8 1:16 หรือ 1:32 ขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้ใช้งานในระบบ โดยมีค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณของแต่ละ split ratio เป็น 9 12 และ 15 dB ตามลำดับ

4.1.4 ตัวรับสัญญาณ OCDMA

ตัวรับสัญญาณของระบบ OCDMA-PON ประกอบด้วย 8, 16 หรือ 32-level phase shifted decoder ที่จะทำการ decode สัญญาณ และส่งผ่านสัญญาณเข้า 1-bit delay interferometer และแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยใช้ PIN photodiode เพื่อตรวจรับสัญญาณด้วยวิธี balance detection โดยมีค่า responsivity 1 A/W ค่ากระแส dark current 10 nA และค่า Thermal noise เท่ากับ 2.3104×10^{-24} W/Hz นอกจากนี้การกระจายตัวของ noise เป็นลักษณะการกระจายแบบ gaussian โดยหลังจากผ่านกระบวนการ balance detection แล้วสัญญาณจะถูกส่งผ่าน low pass filter (LPF) ชนิด bessel ที่มีค่า cutoff frequency เท่ากับ 30 GHz และนำไปวิเคราะห์หาค่าอัตราบิดผิดพลาดในลำดับต่อไป

4.2 จำนวนผู้ใช้งานสูงสุด

จากการจำลองระบบ 40 Gbps DPSK OCDMA-PON ที่ใช้ 8, 16 และ 32-level phase-shifted en/decoder ด้วยโปรแกรม optisys 8.0 ที่ central wavelength 1552.52 nm และทำการสื่อสารสัญญาณแบบ back-to-back ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง bit-error rate (BER) กับจำนวนผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อผู้ใช้งานในระบบมากขึ้นประสิทธิภาพของระบบจะลดลง จากสัญญาณรบกวน MAI และสัญญาณที่ถูกทำการเข้ารหัสด้วย รหัสที่มีความยาวมากกว่า (จำนวน chip มากกว่า) จะสามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากกว่า ซึ่งในการหาจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดที่ ประสิทธิภาพของระบบยังสามารถยอมรับได้ ที่ค่า BER น้อยกว่า 10^{-3} ซึ่งเมื่อเข้ารหัสตรวจสอบเพื่อความถูกต้องของบิตที่ส่งด้วย forward-error-correction (FEC) RS(255,239) จะสามารถทำให้ BER มีค่าน้อยกว่า 10^{-9} [38] ซึ่งประสิทธิภาพของระบบยังสามารถยอมรับได้ ได้จำนวนของผู้ใช้สูงสุดในระบบ DPSK OCDMA-PON เมื่อใช้ 8, 16 และ 32 level phase-shift en/decoder เท่ากับ 7, 15 และ 19 ราย ตามลำดับ

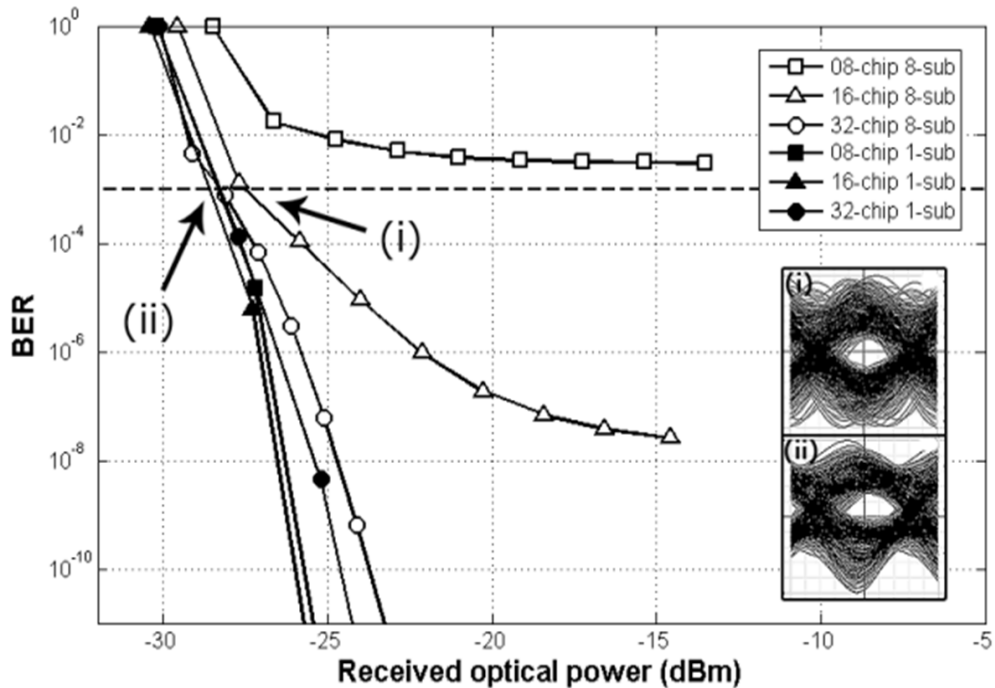


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ OCDMA-PON

โดยจากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่า BER มีลักษณะคล้ายกับขั้นบันได เนื่องจากเมื่อมีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ก็จำเป็นที่จะต้องไปเพิ่มผู้ใช้งานใหม่ระหว่างผู้ใช้งานที่มีอยู่เดิม คือ หากเดิมมีผู้ใช้งานอยู่ 8 ราย แต่ละ code จะมีระยะห่างกัน 2 code เช่น ชุดของ code หมายเลข 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 เมื่อมีผู้ใช้งานรายที่ 9 เข้ามาในระบบ จะต้องไปใช้งาน code ที่อยู่ระหว่าง code ที่ใช้อยู่เดิม ซึ่งเป็น code ที่ติดกัน ทำให้มีสัญญาณรบกวน MAI ในปริมาณที่สูง

มาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโดยปกติจึงนิยมใช้งาน code เพียงครั้งหนึ่งของ code ทั้งหมดที่มีอยู่ เพื่อให้ระดับสัญญาณรบกวนไม่สูงมากจนเกินไป

4.3 power penalty



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับกับค่า BER และ eye diagram (i) ผู้ใช้งาน 8 ราย (ii) ผู้ใช้งาน 1 ราย

ในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์หา power penalty อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน MAI โดยได้ทำการจำลองระบบ OCDMA-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ทำการสื่อสารสัญญาณแบบ asynchronous ผ่านเส้นใยแสงตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2 และซัดเซยดิสเพอร์ชันด้วย DCF ในกรณีที่ใช้ 8 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ที่มีผู้ใช้งานในระบบ 1 ราย และ 8 ราย ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.2 โดยในกรณีที่ผู้ใช้งาน 8 รายนั้น ณ ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} ที่เป็นค่า BER ที่สูงที่สุดที่ประสิทธิภาพของระบบยังสามารถยอมรับได้ ซึ่งระบบที่ใช้ 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders มีกำลังของสัญญาณที่ภาครับเป็น -27.5 dBm และ -28.3 dBm ตามลำดับ ในขณะที่ระบบที่ใช้ 8 level phase-shifted en/decoders ไม่สามารถรองรับการสื่อสารที่มีผู้ใช้งาน 8 รายได้ และเมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองที่มีผู้ใช้งาน 8 รายมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ผู้ใช้งาน 1 ราย ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} ซึ่งมี eye diagram ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 (i)

และรูปที่ 4.2 (ii) จะได้ power penalty ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน MAI เป็น 0.89 และ 0.35 dB สำหรับ 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ตามลำดับ

4.4 link power budget

ในการหา link power budget สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.18) โดยสำหรับระบบ OCDMA-PON ที่ทำการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะ 20 km มีกำลังสูญเสียต่างๆดังนี้

- กำลังสูญเสียเนื่องจากหัวต่อ (connector) เท่ากับ 0.2 dB จำนวน 2 จุด คิดเป็นกำลังสูญเสีย 0.4 dB
- กำลังสูญเสียเนื่องจากการ splice เท่ากับ 0.05 dB จำนวน 6 จุด คิดเป็นกำลังสูญเสีย 0.3 dB
- อัตราลดทอนกำลังของสัญญาณของเส้นใยแสง 0.21 dB/km ระยะ 20 km คิดเป็นกำลังสูญเสีย 4.2 dB
- กำลังสูญเสียเนื่องจาก DCF ประมาณ 1 dB
- กำลังสูญเสียเนื่องจาก splitter ที่มี split ratio 1:4 1:8 และ 1:16 เท่ากับ 6 9 และ 12 dB ตามลำดับ

และจากการจำลองระบบสามารถหาลำดับกำลังสูญเสียจากการ encode และ decode ของระบบที่ใช้ 8 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ได้ค่ากำลังสูญเสียดังแสดงในตาราง 4.2 โดยมีค่ากำลังสูญเสียสูงสุดจากการ encode และ decode เท่ากับ 1.727 1.83 และ 2.468 dB สำหรับ 8 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ตามลำดับ

ตาราง 4.2 กำลังสูญเสียจากการ encode และ decode สัญญาณ

8 chip		16 chip		32 chip			
code	Loss(dB)	code	Loss(dB)	code	Loss(dB)	Code	Loss(dB)
1	1.727	1	1.7	1	1.787	17	1.82
2	1.729	2	1.709	2	1.804	18	1.652
3	1.73	3	1.712	3	1.887	19	1.688
4	1.726	4	1.714	4	1.924	20	1.68
5	1.727	5	1.742	5	2.029	21	1.7

6	1.727	6	1.764	6	2.134	22	1.694
7	1.727	7	1.795	7	2.262	23	1.686
8	1.727	8	1.817	8	2.395	24	1.685
		9	1.829	9	2.468	25	1.69
		10	1.83	10	2.438	26	1.697
		11	1.816	11	2.318	27	1.706
		12	1.798	12	2.199	28	1.718
		13	1.777	13	2.095	29	1.733
		14	1.732	14	2.001	30	1.747
		15	1.73	15	1.876	31	1.766
		16	1.707	16	1.846	32	1.791

โดยเมื่อคิดผลการลดทอนจากสัญญาณรบกวนแบบ MAI คิดเป็นประมาณ 3 dB และ power margin ของระบบ 6 dB นำค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่ได้มาคำนวณตามสมการ (2.18) ได้ link power budget เป็น 23, 26 และ 29.5 dB สำหรับระบบที่ใช้ 8 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ที่มีผู้ใช้งานในแต่ละระบบเป็น 4 8 และ 16 ราย ตามลำดับ

ซึ่งเมื่อทำการจำลองระบบ OCDMA-PON ที่มีลักษณะโครงสร้างของระบบและรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 สำหรับระบบที่ใช้ 8 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ที่มีผู้ใช้งานในแต่ละระบบเป็น 4, 8 และ 16 ราย พบว่ากำลังสูญเสียสูงสุดของแต่ละกรณีเป็น 19.883, 25.841 และ 29.455 dB ตามลำดับ ซึ่งระบบยังคงมีค่า BER ต่ำกว่า 10^{-3} โดยจะเห็นได้ว่าผลจากการจำลองมีค่าที่ต่ำกว่า link power budget ที่กำหนดไว้

และหากคำนวณหา link power budget ของระบบ CWDM-PON โดยคิดกำลังสูญเสียในระบบดังนี้

- ค่า insertion loss ของ AWG เป็น 5 dB ซึ่งใช้ทำหน้าที่ multiplex และ demultiplex สัญญาณ คิดเป็นกำลังสูญเสีย 10 dB
- อัตราลดทอนกำลังของสัญญาณของเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น 1271 nm เท่ากับ 0.385 dB/km ระยะ 20 km คิดเป็นกำลังสูญเสีย 7.7 dB
- กำลังสูญเสียเนื่องจากหัวต่อ (connector) เท่ากับ 0.2 dB จำนวน 2 จุด คิดเป็นกำลังสูญเสีย 0.4 dB
- กำลังสูญเสียเนื่องจากการ splice เท่ากับ 0.05 dB จำนวน 4 จุด คิดเป็นกำลังสูญเสีย 0.2 dB
- กำลังสูญเสียเนื่องจาก DCF ประมาณ 1 dB
- power margin 6 dB

โดยระบบ CWDM-PON ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นให้กับแต่ละ ONU จำนวนของผู้ใช้งานจึงขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่มีอยู่ และไม่มีการใช้งานของ power splitter ในระบบส่งผลให้กำลังของสัญญาณถูกลดทอนน้อยกว่าระบบ OCDMA-PON จึงอาจสามารถเพิ่มระยะในการให้บริการได้ โดยเมื่อทำการคำนวณ link power budget ของระบบ CWDM-PON ได้ค่าเป็น 25.5 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าที่ต่ำกว่าระบบ OCDMA-PON ในกรณีที่ใช้ 16-level phase-shifted en/decoders ซึ่งมีผู้ใช้งานในแต่ละระบบเป็น 8 ที่ค่า link power budget เท่ากับ 26 dB เพียงเล็กน้อย แต่ด้วยคุณสมบัติของระบบ OCDMA-PON ที่ในกรณีที่มีผู้ใช้งาน 8 ราย จะมีแบนด์วิดท์ในการใช้งานได้ถึง 320 Gbps ซึ่งมากกว่าระบบ CWDM-PON อย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้การสื่อสารสัญญาณแบบ OCDMA มาใช้กับเทคโนโลยี PON และจะวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ และหาข้อจำกัดของการนำ OCDMA มาใช้ร่วมกับ PON พร้อมทั้งคำนวณ power budget ของระบบ เพื่อให้ได้แนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีสมรรถนะสูงสุดสำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps

จากการศึกษาและจำลองระบบ OCDMA-PON ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps ด้วย multi-level phase-shifted en/decoders โดยสามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อประสิทธิภาพของระบบได้เป็น 5 ปัจจัย ดังนี้ การลดทอนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสง โดยพบว่าหากระยะในการสื่อสารสัญญาณไกล หรือเส้นใยแสงมีอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณในอัตราที่สูง จะทำให้สัญญาณมีความผิดพลาดสูงขึ้น โดยทั้งระบบ OCDMA-PON และ CWDM-PON มีผลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีกำลังของสัญญาณต่ำสุดที่ประสิทธิภาพของระบบยังสามารถยอมรับได้ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} คือ -29 dBm ปัจจัยต่อมา คือ ดิสเพอร์ชัน และ ความชันดิสเพอร์ชัน โดยปัจจัยนี้ถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญสำหรับระบบ OCDMA-PON ซึ่งจากการจำลองพบว่า code ที่มีประสิทธิภาพต่ำสุด สามารถทนต่อผลดิสเพอร์ชันได้เพียง 3 ps ที่ถือว่าน้อยมาก โดยเป็นผลมาจากการเข้ารหัสสัญญาณแบบ OCDMA ต้องมีการเข้ารหัสสัญญาณพัลส์แสงเป็นพัลส์ chip ของรหัสที่แคบมาก จึงมีความทนทานต่อดิสเพอร์ชันที่ต่ำ ในการใช้งานจึงทำการชดเชยดิสเพอร์ชันด้วย ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ปรากฏการณ์เคอร์ หรือความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง พบว่าปรากฏการณ์เคอร์ไม่ส่งผลต่อการสื่อสารสัญญาณในระยะการใช้งานของโครงข่าย PON ที่ระยะ 20 km อีกปัจจัยหนึ่งคือ ค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณระหว่าง auto-correlation และ cross-correlation ที่เรียกว่าค่า PCR ซึ่งจะแสดงถึงระดับสัญญาณรบกวน MAI ในระบบ โดยจากการจำลองพบว่าหากความยาวของรหัสที่ใช้จะมีผลกับค่า PCR โดยระบบที่ใช้ 8 16 และ 32 level phase-shift encoder/decoder มีค่า PCR สูงสุดเท่ากับ 16.33, 22.33 และ 28.33 dB ตามลำดับ และปัจจัยสุดท้ายที่ภาครับ คือชนิดของ LPF ที่ใช้งานในระบบ ซึ่งพบว่าที่ cutoff frequency ค่าเดียวกันที่

30 GHz LPF ชนิด besel ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีที่สุด และมีค่า BER ใกล้เคียงกันกับ LPF ชนิด gaussian

โดยเมื่อวิเคราะห์ถึงสมรรถนะในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด power penalty เนื่องจากสัญญาณรบกวน MAI และการคำนวณหา link power budget เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ ได้ว่าจำนวนผู้ใช้สูงสุดที่ค่า BER ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ที่ 10^{-3} คือ 7, 15 และ 19 ราย เมื่อใช้ 8, 16 และ 32 level phase-shift en/decoder ตามลำดับ โดยเพื่อให้ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนมีขนาดใกล้เคียงกันในแต่ละชุด code จึงควรใช้งาน code เพียงแค่ครึ่งหนึ่งของ code ทั้งหมดที่มีอยู่ คือใช้งานที่ผู้ใช้งาน 4, 8 และ 16 ราย สำหรับ 8, 16 และ 32 level phase-shift en/decoder ตามลำดับ โดยเมื่อกำหนดจำนวนผู้ใช้งานในระบบเป็น 8 ราย สามารถหา power penalty ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน MAI ที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-3} ได้เป็น 0.89 และ 0.35 dB สำหรับ 16 และ 32-level phase-shifted en/decoders ตามลำดับ โดยในส่วนของระบบที่ใช้ 8-level phase-shifted en/decoders เมื่อใช้งานที่ผู้ใช้งาน 8 รายประสิทธิภาพของระบบไม่เพียงพอต่อการให้บริการได้ และเมื่อมาทำการคำนวณ link power budget ของระบบเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ ซึ่งได้ว่าระบบ OCDMA-PON ที่ใช้ 8, 16 และ 32 level phase-shift en/decoder โดยมีผู้ใช้งานของแต่ละระบบเป็น 4, 8 และ 16 ราย ตามลำดับ มีค่า link power budget ของระบบเป็น 23, 26 และ 29.5 dB ตามลำดับ

ซึ่งรายงานวิทยานิพนธ์ที่ได้นำเสนอจะนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบที่ได้มีการเข้าถึงตัวกลางแบบ OCDMA มาใช้งานร่วมกันกับโครงข่าย PON ให้มีสมรรถนะสูงสุดสำหรับการส่งผ่านสัญญาณ 40 Gbps

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ศึกษาเทคนิคการ encode/decode สัญญาณรวมไปถึงวิธีการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนแบบ MAI เพื่อเพิ่มจำนวนจำนวนของผู้ใช้บริการให้มากขึ้นกว่าเดิม หรือการนำไปใช้งานร่วมกับระบบ CWDM-PON เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานต่อช่องสัญญาณให้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การลดต้นทุนของระบบโดยเฉพาะที่ ONU เพื่อเป็นแรงจูงใจให้ผู้ให้บริการพิจารณาเลือกใช้บริการระบบ OCDMA-PON ก็เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับประสิทธิภาพของระบบและคุณภาพของอุปกรณ์ในโครงข่าย

รายการอ้างอิง

- [1] Keiser, G. Optical Fiber Communications. 3rd ed. McGraw-Hill, 2000.
- [2] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2011–2016. white paper. Cisco, May. 2012.
- [3] Adel A. M. Saleh and Jane M. Simmons. Evolution Toward the Next-Generation Core Optical Network. J. Lightw. Technol., vol.24. no.9. pp. 3303-3321. Sep. 2006.
- [4] Zhijia Chen, Yang Zhao, Chuang Lin and Qingbo Wang. Accelerating Large-scale Data Distribution in Booming Internet: Effectiveness, Bottlenecks and Practices. IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 55. no. 2. pp. 518–526. May 2009.
- [5] Véronique Moeyaert and Guido Maier. Network Technologies for Broadband Access. in ICTON 2011. pp.1-5. June 2011.
- [6] ITU-T Rec. V.21. 300 bits per second duplex modem standardized for use in the general switched telephone network, Nov. 1988.
- [7] ITU-T Rec. V.92. Enhancements to Recommendation V.90, Nov. 2000.
- [8] Humphrey, M., Freeman, J. and Paradyne Corp. How xDSL Supports Broadband Services to the Home. in IEEE Netw., vol. 11. issue 1. pp. 14–23. Jan./Feb. 1997.
- [9] R. Llorente, S. Walker, I. Tafur Monroy, M. Beltrán, M. Morant, T. Quinlan and J.B. Jensen. Triple-Play and 60-GHz Radio-over-Fiber Techniques for Next-Generation Optical Access Networks. in NOC 2011, pp.16-19. July 2011.
- [10] Lynn Hutcheson. FTTx: Current Status and the Future. IEEE Commun. Mag., vol. 46. Issue 7. pp. 90-95. July 2008.
- [11] Zhihua Zheng, Zongjue Qian, Guochu Shou and Yihong Hu. Next-Generation Passive Optical Network Based on OFDM Transmission. Proc. Int. Conf. on Information Engineering, vol.1. pp. 329-332. July 2009.

- [12] Chang-Hee Lee, Wayne V. Sorin and Byoung Yoon Kim. Fiber to the Home Using a PON Infrastructure. J. Lightw. Technol., vol.24. no.12. pp. 4568-4583. Dec. 2006.
- [13] J. Kani. Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 16. No. 5. pp.1290-1297. September/October 2010.
- [14] Z. Luying, et al. Hybrid WDM-TDM PON architectures and DWBA algorithms. in 5th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM) 2010, pp. 1-6.
- [15] V. Bobrovs, et al. Performance Improvement of High Speed Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System. in 2012 IX International Symposium on Telecommunications (BIHTEL), pp. 1-6. Oct. 2012.
- [16] Zaineb Al-Qazwini, Madhan Thollabandi and Hoon Kim. Colorless Optical Transmitter for Upstream WDM PON Based on Wavelength Conversion. J. Lightw. Technol., vol. 31. no. 6. pp. 896-902. Mar. 2013.
- [17] Ze Dong, Xinying Li, Jianjun Yu, Zizheng Cao and Nan Chi. 8x9.95-Gb/s Ultra-Dense WDM-PON on a 12.5-GHz Grid With Digital Pre-Equalization. IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 25. no. 2. pp. 194-197. Jan. 2013.
- [18] Mohd Shahril Salleh, et al. The challenge for active and passive components design in CWDM PON system co-exist in GEPON and 10 GEPON architecture. 2011 IEEE 2nd International Conference on Photonics (ICP), pp. 1-5. Oct. 2011.
- [19] K. C. Reichmann, et al. A Symmetric-Rate, Extended-Reach 40 Gb/s CWDM-TDMA PON With Downstream and Upstream SOA-Raman Amplification. J. Lightw. Technol., vol. 30. no. 4. pp. 479 – 485. Feb. 2012.
- [20] Jongdeog Kim, Hakjeon Bang and Chang-Soo Park. Design and Performance Analysis of Passively Extended XG-PON With CWDM Upstream. J. Lightw. Technol., vol. 30. no. 11. pp. 1677 – 1684. Jun. 2012.

- [21] Min-Ching Lin, Tien-Tsorng Shih, Pei-Hao Tseng, Kuei-Ming Chu, Chieh Hu and Wood-Hi Cheng. High-Performance and Low-Cost 40-Gb/s CWDM Optical Modules. IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 32. no. 3. pp. 644 – 649. Aug. 2009.
- [22] X. Wang. Keys towards practical OCDMA networks (Invited paper). in 7th IEEE Int. Conf. on Optoelectronics, Fiber Optics and Photonics (Photonics 2004), Dec. 2004.
- [23] X. Wang, K. Matsushima, A. Nishiki, N. Wada, and K. Kitayama. High reflectivity superstructured FBG for coherent optical code generation and recognition. Opt. Express, vol. 12. no. 22. pp. 5457–5468. Nov. 1. 2004.
- [24] Taro Hamanaka, Xu Wang, Naoya Wada, Akihiko Nishiki and Ken-ichi Kitayama. Ten-User Truly Asynchronous Gigabit OCDMA Transmission Experiment With a 511-ChipSSFBG En/Decoder. J. Lightw. Technol., vol.24. no.1. pp. 95-102. Jan. 2006.
- [25] X. Wang. Recent progresses in OCDMA (Invited). in 10th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2008), vol.1. pp. 39-42. June 2008.
- [26] X. Wang, N. Wada, G. Cincotti, T. Miyazaki and K. Kitayama. Demonstration of Over 128-Gb/s-Capacity (12-User 10.71-Gb/s/User) Asynchronous OCDMA Using FEC and AWG-Based Multiport Optical Encoder/Decoders. IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18. no. 15. pp. 1603-1605. Aug. 2006.
- [27] N. Kataoka, N. Wada, X. Wang, G. Cincotti, A. Sakamoto, Y. Terada, T. Miyazaki and K. Kitayama. Field Trial of Duplex, 10 Gbps 8-User DPSK-OCDMA System Using a Single 16x16 Multi-Port Encoder/Decoder and 16-Level Phase-Shifted SSFBG Encoder/Decoders. J. Lightw. Technol., vol. 27. no.3. pp. 299-305. Jan. 2009.
- [28] Zhensen Gao, Bo Dai, Xu Wang, Nobuyuki Kataoka and Naoya Wada. 2D Time Domain Spectral Phase Encoding/Wavelength Hopping Coherent DPSK-OCDMA System Using Fiber Bragg Gratings and Phase Modulator. in Asia Communications and Photonics Conf. (ACP 2010), pp.439-440. Dec. 2010.

- [29] Xu Wang and Ken-ichi Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA. J. Lightw. Technol., vol.22. no.10. pp. 2226–2235. Oct. 2004.
- [30] Kerim Fouli and Martin Maier. OCDMA and Optical Coding: Principles, Applications, and Challenges. IEEE Commun. Mag., vol.45. no.8. pp. 27-34. Aug. 2007.
- [31] G. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. 3rd ed., Academic Press, 2001.
- [32] Kazovsky, L., et al., Optical Fiber Communication Systems. Artech House, 1996.
- [33] Nobuyuki Kataoka, Naoya Wada, Gabriella Cincotti and Ken-ichi Kitayama. Dispersion-Compensation-Free, Long-Reach OCDMA-PON System with Passive Remote Node at Arbitrary Position using Single Multi-port Encoder/Decoder. in CLEO/QELS 2010, pp. 1-2. May 2010.
- [34] Jong Won-Kim. An Optimized ATM-PON Based FTTH Access Network. in Information, Communications and Signal Processing ICICS '9, Singapore, 1997. pp.1800-1804.
- [35] Power Budget Calculations for GarrettCom Inc. Fiber Transceivers. May 2010
[online] Available from: www.garrettcom.com/techsupport/power_budget.pdf
- [36] 10GEPON- Unleashing the Bandwidth Potential, Telecom Asia [online] Available from: http://www.telecomasia.net/pdf/ZTE/ZTE_101909.pdf
- [37] Mukherjee, B. Optical Communication Networks. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.
- [38] Peter J. Winzer and Rene'-Jean Essiambre. Advanced Optical Modulation Formats. in proceedings of the IEEE, vol. 95. no. 5. pp. 952 – 985. May 2006.
- [39] Kitayama, K. Wang, X. and Wada, N. OCDMA over WDM PON – a solution path to gigabit-symmetric FTTH. J. Lightwave. Technology 24 (April 2006): 1654-1662.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีระ ศักดิ์ชัยชาญชล เกิดวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ ทั้งหมด 2 ฉบับ

- บทความวิชาการในงานประชุม 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2012) จัดขึ้น ณ Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju island ประเทศเกาหลีใต้ ในวันที่ 15-17 ตุลาคม 2555 ในชื่อบทความเรื่อง 40-Gbps DPSK-OCDMA transmission over PON using 8, 16 and 32-level phase-shifted en/decoders
- บทความวิชาการในงานประชุม 35th Electrical Engineering Conference (EECON-35) จัดขึ้น ณ รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา นครนายก ประเทศไทย ในวันที่ 12-14 ธันวาคม 2555 ในชื่อบทความเรื่อง การส่งสัญญาณซีดีเอ็มเอแสง 40 Gbps บนโครงข่าย เชิงแสงแบบพาสซีฟ