

โครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงแบบยืดหยุ่นที่ใช้สัญญาณซูเปอร์ชานแนลโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์



นางสาวภัสสรา วิจารณ์สถิตย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A FLEXIBLE FIBER ACCESS NETWORK USING SUPERCHANNEL COHERENT
OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING SIGNAL

Miss Passara Vijarnstit



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงแบบยืดหยุ่นที่ใช้สัญญาณซูเปอร์
	ชาแนลโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์
โดย	นางสาวภัสสร วิจารณ์สถิตย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

ภัสสรวิภา วิจารณ์สถิตย์ : โครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงแบบยืดหยุ่นที่ใช้สัญญาณซูเปอร์ชาแนลโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ (A FLEXIBLE FIBER ACCESS NETWORK USING SUPERCHANNEL COHERENT OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING SIGNAL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง, หน้า.

เทคโนโลยีการสื่อสารในปัจจุบันมีความต้องการใช้แบนด์วิดท์จากผู้ให้บริการมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อรองรับการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น การตรวจรักษาโรคผ่านทางไกล (telemedicine) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งในการติดต่อสื่อสารที่จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในเร็ววันนี้อย่างแน่นอน การส่งข้อมูลในปริมาณมากแต่มีแบนด์วิดท์จำกัด จึงต้องออกแบบให้แต่ละช่องสัญญาณมีความห่างกันน้อยที่สุด เพื่อตอบสนองความต้องการอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการส่งผ่านสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น WSS สามารถจัดสรรความยาวคลื่นไปยังผู้ใช้บริการแต่ละรายที่มีความต้องการอัตราข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งมีการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะความสามารถของการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บน fiber access network

จากผลการศึกษาของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS บนช่วงความยาวคลื่น c band ซึ่ง WSS แต่ละประเภทมีผลของ switching characteristic ต่างกัน จึงเลือกศึกษาทั้งหมด 4 ประเภท พบว่าระบบสามารถส่งผ่านสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps มีระยะทางในการส่งสัญญาณได้ไกล 50.1 กิโลเมตร ซึ่งมีสมรรถนะสูงกว่ามาตรฐาน NG-PON2 (ITU-T G.989.1) เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน การส่งสัญญาณผ่าน SMF จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณและการลดทอนสัญญาณ ทำให้ได้รับสัญญาณผิดพลาด จึงนำเทคโนโลยี DSP มาใช้เพื่อที่จะแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ CO-OFDM บนช่วงความยาวคลื่น c band คือ การลดทอนกำลังของสัญญาณ นอกจากนี้ตัวแปรสำคัญส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ CO-OFDM ของระบบนี้ คือ จำนวน symbol จำนวนบิตที่ส่ง และจำนวนคลื่นพาห่อย่อย เมื่อเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยให้มากขึ้น จะส่งผลให้จำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณได้น้อยลง ซึ่งการเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยให้มากขึ้น ส่งผลให้ความยาวของสัญลักษณ์ CO-OFDM เพิ่มมากขึ้น สามารถสรุปเป็นแนวทางในการออกแบบจำนวน symbol และการเลือกส่งสัญญาณบนความยาวคลื่นที่มีอัตราการลดทอนกำลังสัญญาณต่ำ ทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงในการส่งสัญญาณ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570556021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: OPTICAL FIBER TRANSMISSION, COHERENT OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (CO-OFDM), FLEXIBLE NETWORK, SUPERCHANNEL, OPTICAL COHERENT DETECTION, POLARIZATION DIVISION MULTIPLEXING (PDM), DIGITAL SIGNAL PROCESSING (DSP), FIBER ACCESS NETWORK

PASSARA VIJARNSTIT: A FLEXIBLE FIBER ACCESS NETWORK USING SUPERCHANNEL COHERENT OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING SIGNAL.

ADVISOR: ASST. PROF.PASU KAEWPLUNG, Ph.D., pp.

At present, communication technology has more bandwidth demand and the advance of technology for higher efficiency to support any application. For example, the telemedicine, it is another one of communication technology. The data for with high quality and limited of bandwidth, so, we have to design signal to have very close channel for increasing the data rate. In this thesis, we studied a CO-OFDM signal transmission using the self-coherent detection cooperated with the WSS. WSS is able to allocate the wavelength to each subscriber with difference of data rate. This thesis analyzes about the important factor which affects to the CO-OFDM signal on fiber access network.

In the research, we studied 4 types of WSS which have the difference of switching characteristics. We found that the system can transfer the signal which is 1 Tbps. The maximum data rate for the farthest distance is 50.1 km. The performance is higher than the standard of NG-PON2 (ITU-T G.989.1) which is used in nowadays. The transmission of the signal which transfers through the SMF caused the dispersion and attenuation occurs. So, we will be received error data. On the other hand, we can get rid of the dispersion by using DSP. As the result, the main factor that affect to the performance of CO-OFDM over c band is attenuation. Moreover, the important parameters which affect to the performance of the transmittal signal are the number of symbol, sequence length, and the number of subcarriers. If the number of subcarriers is increased, the number of symbols will decrease and make the length of CO-OFDM symbol increase. Thus, we can summarize to be a guide to create the number of symbol and how to select the transmittal signal on the wavelength which has low attenuation. Therefore, the performance of signal is high efficiency.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำเกี่ยวกับหลักการแนวคิดต่างๆ และช่วยเหลือในทุกด้านอย่างเต็มที่ตลอดการศึกษาทำงานวิจัยนี้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสิริพิทักษ์กิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของ งานวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย รวมทั้งซอฟต์แวร์ OptiSystem 10.0 ในการจำลองการส่ง สัญญาณและการรับสัญญาณของระบบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณนายรชฏ มณีชาติ นิสิตชั้นปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำ วิทยานิพนธ์อย่างเต็มที่ ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้อง ในห้องปฏิบัติการวิจัยชั้น 13 ทุกคนที่คอยให้ กำลังใจและช่วยเหลือกันตลอดมารวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การ สนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	9
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	9
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงพื้นฐาน.....	12
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx.....	12
2.2 การมอดูเลตสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ (CO-OFDM).....	13
2.3 กระบวนการสร้างสัญญาณ CO-OFDM.....	14
2.4 เทคโนโลยี optical coherent detection.....	16
2.5 ระบบ CO-OFDM.....	16
2.6 ระบบไซคลิก (cyclic prefix: CP).....	17
2.7 Superchannel.....	18
2.8 Wavelength selective switching (WSS).....	19
2.9 Self-coherent detection.....	20

2.10 Digital signal processing (DSP).....	20
บทที่ 3 การวิเคราะห์ที่ปัจจัยของระบบการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บนโครงข่ายเข้าถึงเส้นใย แสงทำงานร่วมกับ self-coherent detection และสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น.....	25
3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection ทั้งภาคส่งและภาครับ	25
3.2 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS.....	26
3.3 วิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบ CO-OFDM บน fiber access network.....	27
บทที่ 4 สมรรถนะโครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงแบบยืดหยุ่นของระบบ CO-OFDM	41
4.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ส่งด้วยอัตราข้อมูล 1 Tbps จัดสรร 10 ความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย...	41
4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ชนิดต่างๆ ส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps โดยจัดสรร 10 ความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย.....	43
4.3 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ในเชิงระยะทาง	49
4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ชนิดต่างๆ.....	50
4.5 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ที่ได้รับผลกระทบจาก time constant	57
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	59
.....	61
รายการอ้างอิง	61
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	73

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 การคาดการณ์ปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ตของแต่ละภูมิภาค ปี ค.ศ. 2013 ถึง ค.ศ. 2018 [1]	2
รูปที่ 1.2 ระบบ TDM-PON	4
รูปที่ 1.3 ระบบ WDM-PON	5
รูปที่ 1.4 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบ DWDM CWDM และ WWDM [14]	6
รูปที่ 1.5 (ก) สัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาของ CO-OFDM [20, 21] (ข) สัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาของ N-WDM [22]	8
รูปที่ 2.1 FTTx ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ PON	12
รูปที่ 2.2 ประเภทของระบบ fiber to the x (FTTx)	13
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมสัญญาณ (ก) สัญญาณ FDM ที่คลื่นพาห่อย่อยไม่มีการซ้อนทับกัน และ (ข) สัญญาณ OFDM ที่คลื่นพาห่อย่อยมีการซ้อนทับกันแบบตั้งฉากซึ่งกันและกัน	14
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของสัญญาณ CO-OFDM	14
รูปที่ 2.5 การมอดูเลตสัญญาณ OFDM	15
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอุปกรณ์ optical 90 hybrid [16, 28]	16
รูปที่ 2.7 ภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM	17
รูปที่ 2.8 ภาครับของสัญญาณ CO-OFDM	17
รูปที่ 2.9 การเติม guard interval รูปแบบใช้ symbol เท่ากับ 0	18
รูปที่ 2.10 การเติม guard interval รูปแบบ cyclic prefix extension	18
รูปที่ 2.11 การส่งสัญญาณของ superchannel CO-OFDM บน fiber access network [16, 28]	19
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์ wavelength selective switching (WSS)	20
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ self-coherent detection [35]	20

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป	22
รูปที่ 2.15 วงจร DSP [25].....	23
รูปที่ 2.16 อัลกอริทึมสำหรับปรับเฟสของสัญญาณในวงจร DSP [36]	24
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM.....	25
รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของสัญญาณ CO-OFDM	26
รูปที่ 3.3 โครงสร้างระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS.....	27
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ..	29
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y	31
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW.....	32
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA.....	34
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic	35
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณ มี 16 symbol ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y	38
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณ สำหรับความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y	39
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี 10 ความยาวคลื่น.....	42
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity ก. back-to-back และ ข. fiber	44
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW.....	45
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA.....	46
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic.....	48

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity ก. จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol และ ข. จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol... 51

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด MQW..... 52

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด SOA..... 54

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด electro-optic..... 55

รูปที่ 4.10 WSS ที่มีค่า time constant แตกต่างกัน ก. time constant เท่ากับ 15 ps. และ ข. time constant เท่ากับ 5 ns. 58



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ WSS.....	26
ตาราง 3.2 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1525 nm.....	28
ตาราง 3.3 จำนวนสัญลักษณ์ จำนวนบิต และจำนวนคลื่นพาห่อย่อยสำหรับระบบ CO-OFDM ที่ใช้ QPSK.....	30
ตาราง 3.4 กำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ของแกนโพลาริเซชัน x	36
ตาราง 3.5 กำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ของแกนโพลาริเซชัน y	37
ตาราง 3.6 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1525 nm.....	38
ตาราง 3.7 ระยะทางที่ส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท	40
ตาราง 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณบนช่วงความยาวคลื่น c band.....	42
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร	43
ตาราง 4.3 กำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท.....	48
ตาราง 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณบนช่วงความยาวคลื่น c band.....	49
ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร	50
ตาราง 4.6 ระยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรบนช่วง c band	56

บทที่ 1

บทนำ

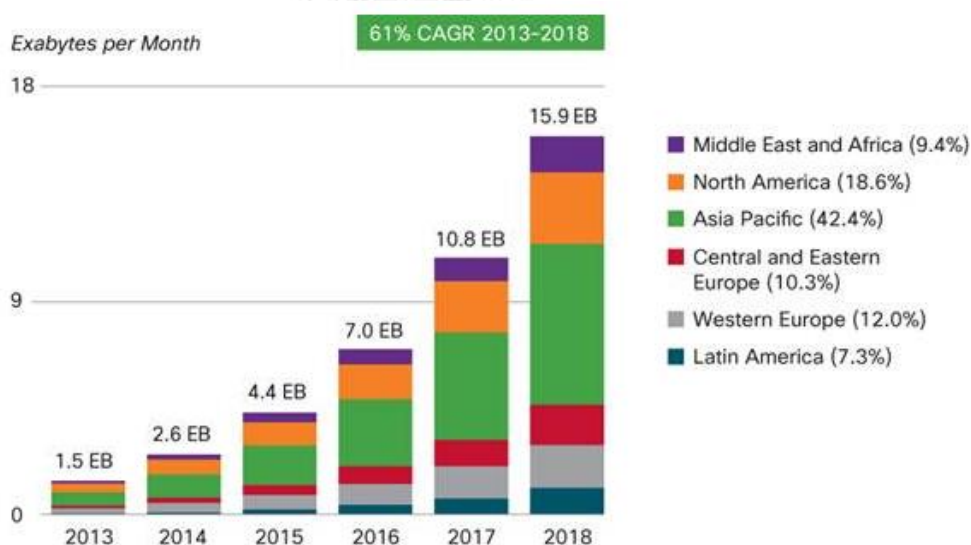
การติดต่อสื่อสารทั้งทางด้านการเงินการค้า เชิงพาณิชย์ หรือหน่วยงานราชการ ปัจจุบันมีปริมาณการรับส่งอัตราข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น เช่น การตรวจวินิจฉัยรักษาโรคหรือการผ่าตัดระยะทางไกล โดยส่งสัญญาณภาพที่มีความละเอียดของภาพสูงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง เป็นต้น ทำให้ระบบสื่อสารเข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก เพื่อตอบสนองความต้องการส่งอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลนี้ จึงได้นำการสื่อสารสัญญาณทางแสงมาประยุกต์ร่วมกับการส่งข่าวสารในยุคเทคโนโลยีปัจจุบัน ซึ่งสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่าเทราบิตต่อวินาที ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาและออกแบบระบบของการสื่อสารสัญญาณให้สามารถตอบสนองความต้องการใช้แบนด์วิดท์ที่เพิ่มสูงอย่างมากจากผู้ให้บริการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เพื่อที่จะพัฒนาการทำงานของระบบที่ใช้การสื่อสารสัญญาณทางแสงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความ เป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ได้ศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปริมาณการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารปัจจุบันมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผู้ให้บริการมีความต้องการใช้บริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นอย่างมาก อีกทั้งเครื่องมือสื่อสารได้เข้ามามีบทบาทกับผู้ใช้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง รูปที่ 1.1 [1] แสดงถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้อมูลผ่านเครื่องมือสื่อสาร ซึ่งคาดการณ์ได้ว่าภายในปี ค.ศ. 2018 จะพุ่งขึ้นสูงถึง 15.9 เอกซาไบต์ต่อเดือน หรือประมาณ 11 เท่าของปี ค.ศ. 2013 แต่ละภูมิภาคถูกคาดการณ์ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้งานที่ต่างกัน เช่น ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกคาดว่าจะเป็กลุ่มที่มีความต้องการใช้งานมากที่สุดประมาณ 42.4 เพอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีจำนวนประชากรมากที่สุด ภูมิภาคอเมริกาเหนือมีความต้องการใช้งานประมาณ 18.6 เพอร์เซ็นต์ ภูมิภาคตะวันออกกลางและแอฟริกา มีอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงสุดและความต้องการใช้งานประมาณ 9.4 เพอร์เซ็นต์ เป็นต้น ดังนั้นผู้ให้บริการจำเป็นต้องพัฒนาการสมรรถนะของระบบสื่อสารอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองความต้องการใช้แบนด์วิดท์ที่มากขึ้นของผู้ให้บริการ

ประเทศไทยได้เริ่มเข้าสู่ยุคของโทรทัศน์ดิจิทัล มีการออกอากาศแพร่สัญญาณภาพเมื่อวันที่ 1 เมษายน พ.ศ.2557 วงการโทรทัศน์ทั่วโลกให้ความสนใจเกี่ยวกับมาตรฐานใหม่และเทคโนโลยีการส่งสัญญาณภาพแสดงผลบนหน้าจอภาพด้วยความคมชัดที่มีการพัฒนาให้มีความละเอียดสูงขึ้นอย่างมาก จาก high definition (HD) ที่มีการส่งสัญญาณทางจอภาพที่มีความละเอียด 1920 × 1080p หรือขนาด 2 ล้านพิกเซล ถูกพัฒนาให้มีการส่งสัญญาณด้วยความคมชัดของจอภาพสูงขึ้นเรียกว่า ultra high definition (4K) เป็นมาตรฐานที่มีความละเอียด 3840 × 2160p หรือขนาด 8 ล้านพิกเซล [2] ซึ่งประเทศเกาหลีใต้ได้เริ่มออกอากาศโทรทัศน์ด้วยความคมชัดของจอภาพสูงมากระดับ 4K เป็นประเทศแรกของโลก ผ่านทางเคเบิลทีวี ultra high definition (UHD) [3] และในอนาคตมีอีกมาตรฐานที่พัฒนาให้สามารถส่งสัญญาณด้วยความละเอียดของจอภาพสูงขึ้นถึง 7680 × 4320p หรือขนาด 32 ล้านพิกเซล เรียกว่า super hi-vision (SHV) หรือ 8K ซึ่งประเทศญี่ปุ่นกำลังวางแผนส่งสัญญาณออกอากาศทางโทรทัศน์ด้วยความคมชัดระดับ 8K ภายในปี ค.ศ. 2020 [4] นอกจากนี้ เทคโนโลยีที่มีบทบาททั้งภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือนในอนาคต และถูกคาดการณ์ว่าจะมีความต้องการอัตราข้อมูลจากผู้ให้บริการเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ได้แก่ การเรียนการสอนผ่านทางไกล และการตรวจรักษาโรคผ่านทางไกล (telemedicine) เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การคาดการณ์ปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ตของแต่ละภูมิภาค ปี ค.ศ. 2013 ถึง ค.ศ. 2018 [1]

ระบบ fiber to the x (FTTx) เป็นโครงข่ายเข้าถึง (access network) ประเภทหนึ่งที่น่าเส้นใยแสงมาใช้แทนสายทองแดง สามารถรองรับอัตราข้อมูลสูงสุด 40 Gbps และสามารถส่งได้เป็น

ระยะทางถึง 60 กิโลเมตร และอัตราข้อมูลในการส่งข้อมูลไม่ลดลงตามระยะทางอีกด้วย ทำให้การรับส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพสูงมาก สามารถตอบสนองความต้องการใช้งานต่างๆที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นองค์กรขนาดใหญ่ที่ต้องการปริมาณแบนด์วิธที่สูงมากจึงได้นำ FTTx มาใช้ในองค์กร นอกจากนี้ในปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้บริการ FTTx เกิน 100 ล้านรายแล้ว [5, 6] ปัจจุบันการสื่อสารผ่านระบบ FTTx มีมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ดังต่อไปนี้ [7]

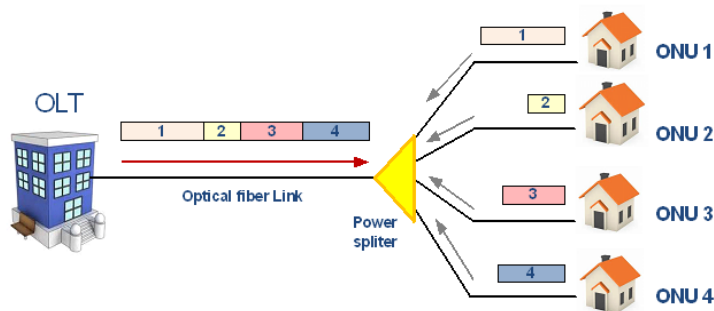
1. Broadband PON (BPON: ITU-T G.983) พัฒนาโดย international telecommunication union (ITU) ใช้โปรโตคอล ATM ในการส่งสัญญาณ มีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดในส่วนของภาค downlink เท่ากับ 622 Mbps และภาค uplink เท่ากับ 155 Mbps มีระยะทางให้บริการถึง 20 km และอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter คือ 1:16 และมากที่สุดถึง 1:32 ที่ระยะทางให้บริการ 5 km ซึ่งเป็นระยะการให้บริการโดยทั่วไปของโครงข่ายระดับ access network
2. Gigabit PON (GPON: ITU-T G.984) พัฒนาโดย institute of electrical and electronics engineers (IEEE) เป็นมาตรฐานที่พัฒนาต่อจาก BPON โดยจะมีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดในส่วนภาค downlink และภาค uplink สูงสุดถึง 2.5 Gbps มีระยะทางให้บริการถึง 20 km และอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการได้สูงสุดเท่ากับ 1:64 ที่ระยะการให้บริการสั้นกว่า 20 km GPON ยังคงใช้โปรโตคอล ATM ในการส่งสัญญาณ
3. Gigabit-Ethernet PON (GEPON: IEEE 802.3ah) หรือเรียกอีกอย่างว่า EPON เป็นมาตรฐาน FTTx อันแรกที่เป็นของ IEEE มีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดในส่วนภาค downlink และภาค uplink เท่ากันคือ 1.25 Gbps และอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการเท่ากับ 1:16 แม้ว่าอัตราข้อมูลในการรับส่งสัญญาณน้อยกว่า GPON แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ภายใต้มาตรฐาน GEPON มีราคาถูกจึงใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน
4. 10 Gigabit-Ethernet PON (10GE-PON: IEEE 802.3av) มีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดทั้งภาค downlink และภาค uplink ถึง 10 Gbps และยังคงใช้โปรโตคอล Ethernet ในการส่งข้อมูล โดยมาตรฐานนี้สามารถทำงานร่วมกับ GEPON เดิมได้ โดยมีระยะทางให้บริการมากที่สุดถึง 20 km และมีอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter สูงสุดถึง 1:64
5. 10 Gigabit PON (XG-PON: ITU -T G.987) หรือเรียกอีกอย่างว่า 10G-PON โดยใช้โปรโตคอล GPON encapsulation method (GEM) ในการรับส่งข้อมูล ตามมาตรฐานที่

ออกมา คือ XG-PON1 มีอัตราข้อมูลสูงสุดในส่วนภาค downlink เท่ากับ 10 Gbps และภาค uplink เท่ากับ 2.5 Gbps และมาตรฐานนี้สามารถทำงานร่วมกับ GPON เดิมได้

6. Next Generation PON2 (NG-PON2: ITU-T G.989.1) มีอัตราข้อมูลสูงสุดในส่วนภาค downlink เท่ากับ 40 Gbps และภาค uplink เท่ากับ 10 Gbps มีระยะทางให้บริการมากที่สุดถึง 40 km และมีอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter สูงสุดถึง 1:64 [8]

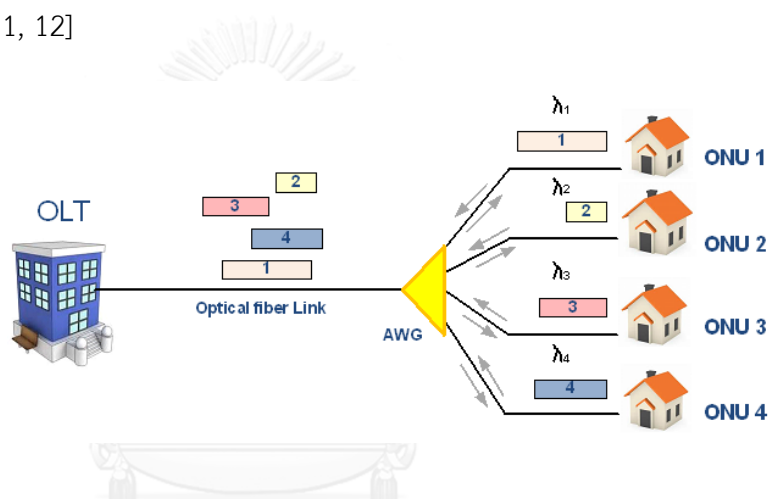
เทคโนโลยีโครงข่ายการสื่อสารที่ได้ถูกนำมาใช้ในโครงข่าย fiber access network คือ เทคโนโลยีโครงข่ายสื่อสารแบบพาสซีฟ (passive optical network : PON) เป็นโครงข่ายที่ประกอบด้วยของอุปกรณ์การทำงานแบบพาสซีฟ (passive) PON คือ โครงข่ายที่อุปกรณ์ในส่วน optical distribution node (ODN) เป็นอุปกรณ์พาสซีฟที่ไม่ต้องอาศัยไฟฟ้าในการทำงาน การทำงานแบบพาสซีฟทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น ฝนตก พายุร้อน พายุหนาว เป็นต้น อุปกรณ์ง่ายเพราะไม่ขึ้นกับอัตราข้อมูล และการลดอุปกรณ์แบบแอกทีฟ (active) ช่วยให้มีต้นทุนการดำเนินงานของระบบลดลงด้วย โดยผู้ให้บริการจะส่งสัญญาณข้อมูลออกจากอุปกรณ์ optical line terminal (OLT) ผ่านสายส่งเส้นใยแสง และถูกกระจายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ passive optical splitter เข้าสู่อุปกรณ์ optical network unit (ONU) ซึ่งถูกติดตั้งในบริเวณที่พักของผู้ใช้บริการ ทำหน้าที่จัดสรรสัญญาณไปให้อุปกรณ์ต่างๆภายในที่พัก เช่น โทรศัพท์ เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องถ่ายเอกสาร และโทรทัศน์ เป็นต้น

ระบบ FTTx บน PON ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณโดยการแบ่งช่วงเวลา (time division multiple access: TDMA) เรียกว่าระบบ TDM-PON แสดงดังรูปที่ 1.2 ในส่วนของภาค downlink OLT จะส่งข้อมูลให้กับผู้ให้บริการแต่ละราย โดยการแบ่งใช้สัญญาณคนละช่วงเวลา แล้วกระจายสัญญาณไปยัง ONU ทุกตัวที่ power splitter ด้วยกำลังเท่ากัน ส่วนของภาค uplink ONU ของผู้ให้บริการจะร้องขอใช้ช่องสัญญาณจาก OLT หลังจากนั้น OLT จะจัดสรรช่วงเวลาให้แต่ละ ONU ตามความต้องการของผู้ใช้บริการแต่ละรายเพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูล [9-11]



รูปที่ 1.2 ระบบ TDM-PON

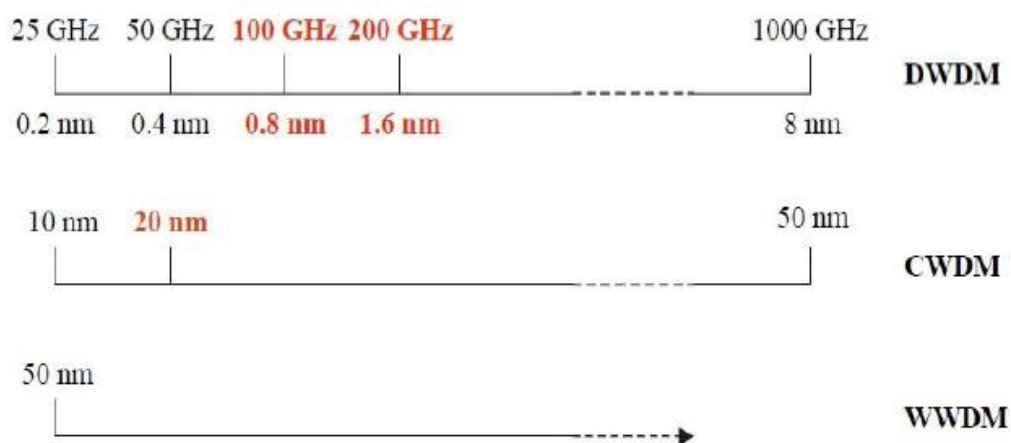
ระบบ TDM-PON มีการแชร์อัตราข้อมูลกับผู้ใช้บริการทั้งหมดทางเวลา ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายไม่สามารถใช้อัตราข้อมูลสูงสุดของระบบได้เต็มที่ เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดความสามารถการได้รับอัตราข้อมูลจาก OLT จึงมีการนำช่องสัญญาณที่ต่างกันส่งไปยังผู้ใช้บริการโดยใช้วิธีการแบ่งช่วงความยาวคลื่น (wavelength-division multiplexing: WDM) แสดงดังรูปที่ 1.3 มาใช้ร่วมกับ PON เรียกว่า ระบบ WDM-PON โดยจะใช้วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นที่ต่างกันให้กับผู้ใช้บริการต่างรายกัน ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องแบ่งอัตราข้อมูลทางเวลา และไม่ต้องแบ่งกำลังสัญญาณที่ ONU แต่ละตัวได้รับ ระบบ WDM-PON จะจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันส่งไปยังผู้ใช้บริการแต่ละรายด้วยอุปกรณ์ array waveguide grating (AWG) ข้อจำกัดของระบบนี้คือ หากบางช่องสัญญาณที่ได้จัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการไม่ได้ถูกใช้งานจะไม่สามารถนำช่องสัญญาณที่ว่างนั้นไปให้ผู้ใช้บริการรายอื่นได้ [11, 12]



รูปที่ 1.3 ระบบ WDM-PON

จากมาตรฐาน ITU-T G.671 ระบบ WDM ได้แบ่งตามความห่างของแต่ละช่องสัญญาณ (channel spacing) เป็น 3 ประเภท แสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้ [13]

1. ระบบ dense wavelength division multiplexing (DWDM) มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1,000 GHz
2. ระบบ coarse wavelength division multiplexing (CWDM) มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณน้อยกว่า 50 นาโนเมตร ประมาณ 8 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร และ 5.7 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร ตามลำดับ
3. ระบบ wide wavelength division multiplexing (WWDM) การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบกว้าง ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมากกว่าหรือเท่ากับ 50 นาโนเมตร

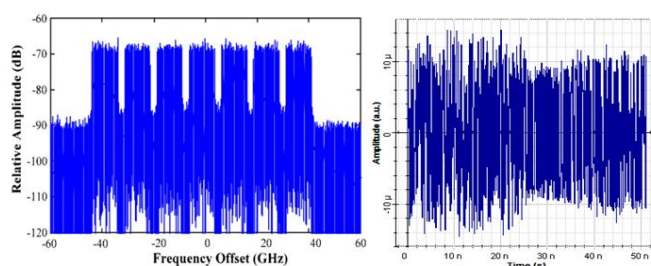


รูปที่ 1.4 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบ DWDM CWDM และ WWDM [14]

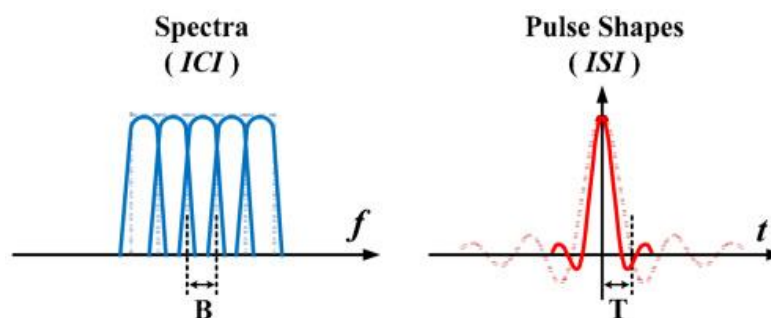
เนื่องจากผู้ใช้บริการมีความต้องการใช้อัตราข้อมูลเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีความต้องการใช้แบนด์วิดท์มากขึ้น จึงมีความต้องการที่จะพัฒนารูปแบบการส่งสัญญาณให้มีค่าประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth efficiency) มากขึ้น ในยุคแรกจึงมีการใช้ DWDM เพื่อลดช่องว่างแต่ละช่องสัญญาณลงและทำให้มีช่องสัญญาณที่ใช้งานได้มากขึ้น ซึ่งระบบ DWDM ที่มีใช้งานในปัจจุบันประกอบไปด้วยช่องสัญญาณความเร็ว 10 Gbps มอดูเลตสัญญาณด้วย OOK และมีความห่างของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 25 GHz นอกจากนั้นยังได้เริ่มใช้ วิธีการมอดูเลตสัญญาณขั้นสูง (advance modulation formate) เพื่อเพิ่ม bandwidth efficiency เช่น การส่งสัญญาณความเร็ว 40 Gbps โดยใช้การมอดูเลตแบบ differential quadrature phase shift keying (DQPSK) และการส่งสัญญาณความเร็ว 100 Gbps ที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณแบบ quadrature phase shift keying (QPSK) ร่วมกับระบบ coherent detection เป็นต้น

ต่อมามีการนำเอาเทคนิค OFDM มาใช้อย่างแพร่หลายในการสื่อสารไร้สายใช้ร่วมกับการสื่อสารทางแสง เรียกว่า เทคโนโลยี non-coherent orthogonal frequency division multiplexing (non-coherent OFDM) [10] เป็นการส่งสัญญาณโดยที่ภาคส่งใช้คลื่นพาห์ทางไฟฟ้า มอดูเลตกับสัญญาณข้อมูล แต่ละช่องสัญญาณมีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ (symbol) มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต เช่น binary phase shift keying (BPSK) QPSK และ DQPSK เป็นต้น จากนั้นมีการพัฒนาเป็นเทคโนโลยี coherent detection [10] เป็นการทำ synchronous detection นำ local oscillator (LO) มาใช้ ทำให้สามารถมอดูเลตสัญญาณแบบเอ็น-ควอดเรเจอร์แอมพลิจูดมอดูเลชัน (n-quadrature amplitude modulation : n-QAM) หรือ เอ็ม-เฟสชิฟต์คีย์อิง (m-phase shift keying : m-PSK) ได้ ดังนั้น coherent detection ทำให้จำนวนบิตต่อ

ช่องสัญญาณมากขึ้น เป็นผลให้ bandwidth efficiency มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยี digital signal processing (DSP) มาใช้ ซึ่งสามารถลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจากปัญหา chromatic dispersion (CD) และ polarization mode dispersion (PMD) ได้ [15, 16] จากนั้นมีการนำ coherent detection มาประยุกต์ร่วมกับเทคโนโลยี polarization division multiplexing (PDM) [17] เป็นการส่งข้อมูลไปยังแกน polarization 2 แกนที่ตั้งฉากกัน ทำให้สามารถเพิ่ม bandwidth efficiency ได้เป็น 2 เท่าของการส่งสัญญาณโดยใช้แกน polarization เพียงแกนเดียว ด้วยขีดข้อจำกัดของระบบ non-coherent OFDM ไม่สามารถใช้คลื่นพาห้ทางไฟฟ้าที่มีความถี่สูงๆมามอดูเลตสัญญาณได้ จึงมีการพัฒนา coherent optical-orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) [10] เป็นการส่งสัญญาณโดยที่ภาคส่งใช้คลื่นพาห้ทางแสงมอดูเลตกับสัญญาณข้อมูล ทำให้สามารถส่งสัญญาณที่มีปริมาณข้อมูลมากได้ นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราข้อมูลทำได้โดย การรับสัญญาณมากกว่า 1 ช่องสัญญาณขึ้นไปพร้อมกัน เรียกแนวคิดดังกล่าวว่า superchannel [11] โดยจะใช้ร่วมกับเทคนิค nyquist-wavelength division multiplexing (N-WDM) [18] ที่มีความห่างของช่องสัญญาณเท่ากับ nyquist frequency ซึ่ง CO-OFDM และ N-WDM ทั้งสองวิธี มีลักษณะสัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาแตกต่างกัน โดยจากรูปที่ 1.5 ก. แสดงสัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาของ OFDM โดยสัญญาณ OFDM ทางด้านความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณประกอบด้วยหลายคลื่นพาห้ย่อยที่เป็น sinc function ซ้อนทับกัน ส่วนสัญญาณทางเวลา มีลักษณะคล้ายสัญญาณแบบสุ่ม และรูป 1.5 ข. แสดงสัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาของ N-WDM โดยสเปกตรัมของ N-WDM แต่ละช่องสัญญาณมีลักษณะเป็น rectangular function ซึ่งแต่ละคลื่นพาห้วางเรียงชิดติดกัน ส่วนสัญญาณทางเวลามีลักษณะ sinc function [10, 11] จากบทความ [18] มีการศึกษาการส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธี Nyquist-WDM สามารถส่งสัญญาณได้ด้วยอัตราข้อมูล 128 Gb/s ซึ่งมีจำนวน 6 ช่องสัญญาณพร้อมกัน และสามารถส่งผ่านเส้นใยแสงได้ไกลถึง 1,200 กิโลเมตร และจากบทความอ้างอิง [19] ได้เปรียบเทียบ bandwidth efficiency ของสัญญาณ CO-OFDM กับ N-WDM พบว่าในปัจจุบัน CO-OFDM มี bandwidth efficiency สูงกว่า N-WDM



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.5 (ก) สัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาของ CO-OFDM [20, 21] (ข) สัญญาณทางความถี่และสัญญาณทางเวลาของ N-WDM [22]

โครงข่าย (network) นั้นควรมีความยืดหยุ่น เพื่อที่จะสามารถตอบสนองผู้ใช้บริการแต่ละรายที่มีความต้องการใช้อัตราข้อมูลที่ไม่เท่ากันได้ เช่น ผู้ใช้บริการรายแรกต้องการติดต่อสื่อสารผ่าน video conference ส่วนผู้ให้บริการรายที่สองต้องการดาวน์โหลดเพลง เป็นต้น จึงเป็นที่มาของแนวคิด flexible network [11] ซึ่งสามารถจัดสรรแบนด์วิดท์เพื่อตอบสนองการบริการที่หลากหลายให้กับ เมื่อนำระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ superchannel พบว่าการเข้ารหัสแบบ low density parity check (LDPC) จะสามารถส่งอัตราข้อมูลได้ 1 Tbps ผ่านเส้นใยแสงได้ระยะทางไกลถึง 8,000 กิโลเมตร [23] นอกจากนี้ การใช้วิธี no-guard-interval (NGI) ร่วมกับ 4WDM×2PDM×CO-OFDM สามารถส่งข้อมูลได้มากถึง 7.5 Tbps เป็นระยะทาง 1,280 กิโลเมตร โดยใช้วิธีการมอดูเลตแบบ QPSK [24]

นอกจากนี้มีการนำ self-coherent detection มาใช้แทน LO ที่ภาครับสัญญาณ CO-OFDM ซึ่งแต่ละคลื่นพาห์ถูกมอดูเลตแบบ QPSK สามารถส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 10 Gbps [25] และจากบทความที่ [26] แต่ละคลื่นพาห์ถูกมอดูเลตแบบ 4-QAM สามารถส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 240 Gbps ได้ระยะทาง 48 กิโลเมตร เป็นต้น ซึ่งข้อดีของ self-coherent ทำให้ ONU มีต้นทุนในการผลิตต่ำด้วย ระบบ superchannel CO-OFDM สามารถจัดสรรแบนด์วิดท์เพื่อตอบสนองความต้องการที่หลากหลายของผู้ใช้บริการแต่ละรายได้นั้น ทำได้โดยนำ WSS มาใช้เพื่อจัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และจัดสรรให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ ยกตัวอย่างเช่น จากบทความที่ [27] ระบบ superchannel CO-OFDM มีการทำงานร่วมกับ flexigrad WSS ส่งอัตราข้อมูลได้ 450 Gbps มีจำนวน 3 ช่องสัญญาณ สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลถึง 3,842 กิโลเมตร เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอและศึกษาการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM ซึ่งทำงานร่วมกับ superchannel บนโครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสง (fiber access network) ซึ่งใช้ self-coherent detection ในส่วนของเครื่องรับสัญญาณ และใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น (WSS) เพื่อจัดสรรความยาวคลื่นให้ตรงกับความต้องการที่หลากหลายของผู้ใช้บริการแต่ละราย นอกจากนี้วิเคราะห์ผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น dispersion และ attenuation ส่งผลต่อสมรรถนะความสามารถของการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บน fiber access network ที่ใช้ WSS และวิเคราะห์ขีดจำกัดของระบบในเชิงของอัตราข้อมูลสูงสุดในการให้บริการ ระยะทางไกลสุดในการให้บริการกับผู้ให้บริการแต่ละราย และสามารถใช้งานได้จริงในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 นำเสนอ และศึกษาการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บนโครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสง (fiber access network) ซึ่งใช้ self-coherent detection ในส่วนของเครื่องรับสัญญาณ (ONU) ทำงานร่วมกับสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น (WSS)
- 1.2.2 วิเคราะห์ผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น dispersion attenuation และ loss ส่งผลต่อสมรรถนะความสามารถของการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บน fiber access network ที่ใช้ WSS และขีดจำกัดของระบบในเชิงของอัตราข้อมูลสูงสุดในการให้บริการ ระยะทางไกลสุดในการให้บริการกับผู้ให้บริการแต่ละราย
- 1.2.3 นำเสนอแนวทางการออกแบบระบบให้มีสมรรถนะสูงสุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษา และทดสอบการส่งผ่านสัญญาณ superchannel CO-OFDM ร่วมกับสวิตช์ความยาวคลื่น (WSS) และ self-coherent detection บน PON (หรือ fiber access network) โดยการจำลองบนโปรแกรม OptiSystem software โดยไม่มีการทดลองจริง
- 1.3.2 การส่งผ่านสัญญาณของระบบที่นำเสนอจะใช้เส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652.D เท่านั้น
- 1.3.3 ระบบใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK ลงบน subcarrier ของสัญญาณ CO-OFDM

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง โดยใช้ SMF ITU-T G.652.D
- 1.4.2 ศึกษาการสร้าง อุปกรณ์ภาคส่ง และภาครับผ่านสัญญาณ CO-OFDM ในเส้นใยแสง
- 1.4.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อกับการส่งสัญญาณ CO-OFDM เช่น ดิสเพอร์ชัน และการลดทอนกำลังของสัญญาณ
- 1.4.4 ศึกษา superchannel PDM CO-OFDM ที่ใช้ WSS และ self-coherent detection

- 1.4.5 ศึกษาหาข้อมูลของ DSP เพื่อนำมาแก้ไขความผิดเพี้ยนสัญญาณของระบบที่นำเสนอ
- 1.4.6 วิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ เช่น จำนวนคลื่นพาห้อย่อย อัตราข้อมูลต่อคลื่นพาห้อย่อย กำลังของสัญญาณ ที่มีผลกระทบต่อการจำกัดสมรรถนะของระบบ
- 1.4.7 ออกแบบ DSP WSS และ self-coherent detection ให้เหมาะสมกับระบบที่นำเสนอ
- 1.4.8 จำลองระบบการส่งสัญญาณ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS self-coherent detection และ DSP ในช่วงความยาวคลื่น C band โดยใช้โปรแกรม Optisystem
- 1.4.9 วิเคราะห์ขีดจำกัดของระบบในเชิงของอัตราข้อมูลสูงที่สุดในการให้บริการ และระยะทางไกลสุดในการให้บริการกับผู้ให้บริการแต่ละราย ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บน fiber access network ที่ใช้ self-coherent detection และ WSS
- 1.4.10 สรุปผลการวิเคราะห์จากการจำลองการส่งสัญญาณของระบบที่นำเสนอ
- 1.4.11 เรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณ CO-OFDM บน access network ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 1.5.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับการส่งสัญญาณ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS และ self-coherent detection
- 1.5.3 มีความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อกับการส่งสัญญาณของระบบ เช่น การลดทอนกำลังของสัญญาณ และดิสเพอร์ชัน
- 1.5.4 สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งผ่านสัญญาณระบบการส่งสัญญาณ CO-OFDM ร่วมกับ WSS และ self-coherent detection ได้
- 1.5.5 สามารถนำเสนอแนวทางในการพัฒนาระบบการส่งสัญญาณทางแสงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานในอนาคตได้
- 1.5.6 มีผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์และนำเสนอในงานประชุมวิชาการนานาชาติ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ในบทที่ 2 แบ่งออกเป็น 10 ส่วน ในส่วนแรกกล่าวถึง โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx ส่วนที่ 2 เป็นการแนะนำเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ (CO-OFDM) ส่วนที่ 3 จะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการสร้างสัญญาณ CO-OFDM ส่วนที่ 4 จะกล่าวถึงหลักการของเทคนิคการส่งสัญญาณโดยใช้เทคโนโลยี optical coherent detection ส่วนที่ 5 เป็นการแนะนำอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับของระบบ CO-OFDM อย่างคร่าวๆ ส่วนที่ 6 กล่าวถึงวิธีการสร้างสัญญาณ CO-OFDM

ร่วมกับเทคนิคไซคลิก ส่วนที่ 7 จะกล่าวถึงการส่งสัญญาณของ superchannel CO-OFDM บน fiber access network ส่วนที่ 8 เป็นการแนะนำให้รู้จักอุปกรณ์ WSS ที่มีความจำเป็นในการจัดสรรจำนวนความยาวคลื่นให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บริการ ส่วนที่ 9 เป็นการแนะนำให้รู้จักเทคนิค self-coherent detection ที่ได้นำมาใช้ร่วมกับระบบ CO-OFDM และส่วนสุดท้ายกล่าวถึงวิธีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย DSP

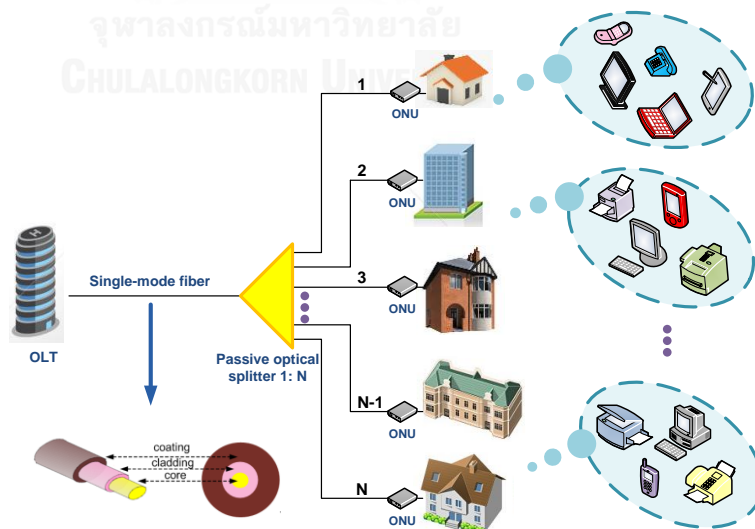


บทที่ 2

ทฤษฎีการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงพื้นฐาน

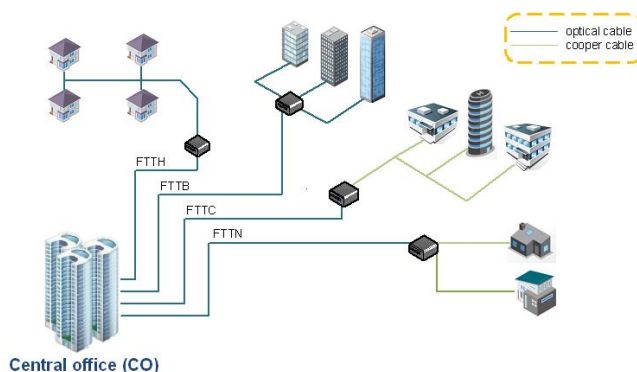
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของ FTTx

FTTx ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ PON ประกอบไปด้วย OLT, passive optical splitter, เส้นใยแสง และ ONU แสดงดังรูปที่ 2.1 สัญญาณจะถูกส่งมาจาก OLT ผ่านเส้นใยแสง โดยมีอุปกรณ์ passive optical splitter ทำหน้าที่กระจายสัญญาณไปสู่ผู้ใช้บริการแต่ละรายที่ ONU ดังนั้นผู้ใช้บริการแต่ละรายจะได้รับสัญญาณที่เหมือนกัน แต่กำลังของสัญญาณจะลดลงเป็นจำนวนเท่าตามอัตราส่วนขาออกของ splitter เช่น 4, 8, 16, 32 หรือ 64 เท่า ตามลำดับ ซึ่ง FTTx นั้น ถูกแบ่งเป็น 4 ประเภทตามลักษณะการลากเส้นใยแสงไปยังส่วนของผู้ใช้บริการ ได้แก่ fiber to the home (FTTH) หรือ fiber to the premise (FTTP) เป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อสัญญาณด้วยเส้นใยแสงไปยังพื้นที่พักอาศัยของผู้ใช้บริการโดยตรง ซึ่งมีอายุการใช้งานนาน ใช้พลังงานต่ำ แต่มีต้นทุนที่สูงมากในเชิงพาณิชย์จึงไม่ค่อยนิยม ส่วน fiber to the building (FTTB) เป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อสัญญาณด้วยเส้นใยแสงไปยังพื้นที่อาคารของผู้ใช้บริการ ส่วน fiber to the curb (FTTC) และ fiber to the node (FTTN) เป็นโครงข่ายที่ใช้สายส่งสัญญาณแบบผสม โดยการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยเส้นใยแสง (optical fiber) ไปยังจุดเชื่อมต่อบริเวณใกล้เคียงของผู้ใช้บริการ หลังจากนั้นใช้สายโคแอกเซียล (coaxial cable) เชื่อมต่อไปยังพื้นที่ของผู้ใช้บริการอีกที ทำให้มีต้นทุนการติดตั้งต่ำกว่า FTTH



รูปที่ 2.1 FTTx ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ PON

แต่ความสามารถของการส่งอัตราข้อมูลน้อยกว่า FTTB และ FTTH ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 ตามลำดับ ในอนาคตโครงข่ายที่เชื่อมต่อสัญญาณด้วยเส้นใยแสงจะสามารถเชื่อมต่อเส้นใยแสงโดยตรงไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (laptop) โดยไม่ต้องผ่านสายส่งทองแดงหรือโมเด็ม เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า fiber to the desk (FTTD) [7]



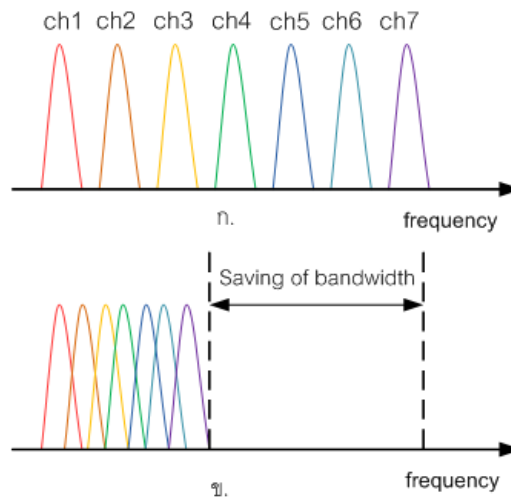
รูปที่ 2.2 ประเภทของระบบ fiber to the x (FTTx)

2.2 การมอดูเลตสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ (CO-OFDM)

การส่งอัตราข้อมูลมีความต้องการมากขึ้น จึงมีการพัฒนาวิธีการมอดูเลตเพื่อสามารถรองรับการส่งอัตราข้อมูลทั้งการสื่อสารแบบไร้สายและการสื่อสารแบบมีสาย ซึ่งก็คือการมอดูเลตแบบ OFDM ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากช่วยลดปัญหาการเกิด multipath fading ได้ สัญญาณ OFDM ทางด้านความถี่ แต่ละช่องสัญญาณประกอบด้วยหลายคลื่นพาย่อยซ้อนทับกัน (overlapping) โดยมีคุณสมบัติการตั้งฉาก (orthogonality) ซึ่งกันและกัน ทำให้สัญญาณแต่ละคลื่นพาย่อยไม่รบกวนซึ่งกันและกัน แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยากมากที่จะแยกส่งสัญญาณให้ไม่มีแถบความถี่ซ้อนทับกันเลย จึงมีการนำสัญญาณในรูปแบบฟังก์ชัน sinc มาสร้างสัญญาณ OFDM ตามสมการที่ 2.1

$$p(f) = \frac{1}{\Delta f} \operatorname{sinc} \left(\pi \frac{f}{\Delta f} \right) \quad (2.1)$$

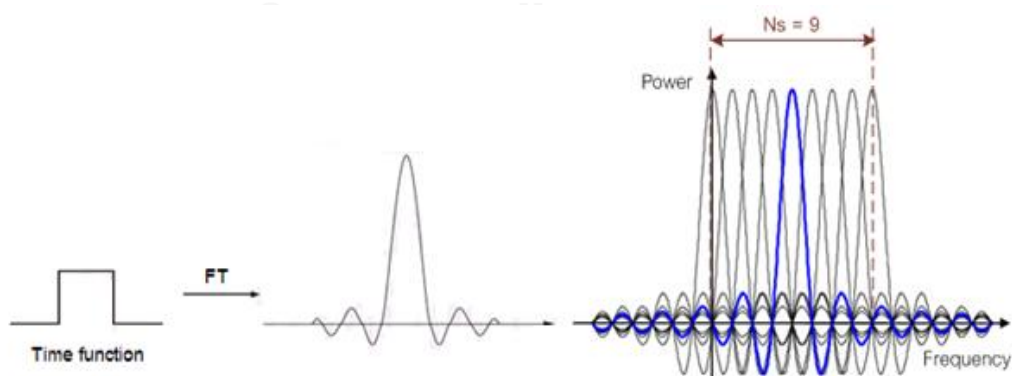
จากคุณสมบัติ orthogonality ซึ่งกันและกัน ทำให้แถบความถี่ของแต่ละคลื่นพาย่อยที่ซ้อนทับกันไม่เกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดของสัญญาณ (inter-carrier interference: ICI) และสามารถลดขนาดของแบนด์วิดท์ได้ประมาณ 2 เท่าอีกด้วย เมื่อเทียบสัญญาณ FDM ของคลื่นพาย่อยที่ช่องสัญญาณไม่มีการซ้อนทับกัน แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมสัญญาณ (ก) สัญญาณ FDM ที่คลื่นพาย้อย่อยไม่มีการซ้อนทับกัน และ (ข) สัญญาณ OFDM ที่คลื่นพาย้อย่อยมีการซ้อนทับกันแบบตั้งฉากซึ่งกันและกัน

2.3 กระบวนการสร้างสัญญาณ CO-OFDM

ลักษณะของสัญญาณ CO-OFDM ง่ายแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยประกอบด้วยคลื่นพาย้อย่อย จำนวน N_s คลื่น คลื่นพาย้อย่อยแต่ละคลื่นพาย่อยจะถูกมอดูเลตในรูปสัญลักษณ์เชิงซ้อน d_i แบบ m-phase shift keying (m-PSK) หรือ n-quadrature amplitude modulation (n-QAM) เมื่อ i เป็นดัชนีคลื่นพาย้อย่อย T_s เป็นคาบของสัญลักษณ์ CO-OFDM และ f_c เป็นความถี่คลื่นพาย่อยหลัก ตามลำดับ โดยให้สัญลักษณ์ CO-OFDM เริ่มที่ $t = t_s$ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.2 [26]



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของสัญญาณ CO-OFDM

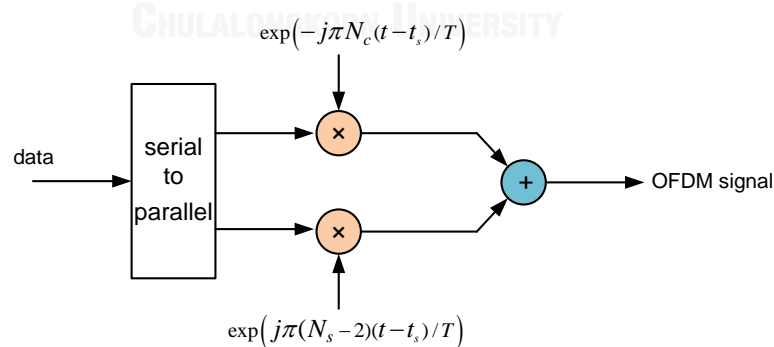
$$s(t) = \begin{cases} \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T_s} \right) (t-t_s) \right) \right\}, & t_s \leq t \leq t_s + T_s \\ 0, & t < t_s \wedge t > t_s + T_s \end{cases} \quad (2.2)$$

โดยระบุสัญลักษณ์ของข้อมูลด้วยเลขเชิงซ้อนคือ $d_i = a_i^{(i)} + jb_i^{(i)}, i=0,1,2,\dots,N_s-1$ และ $a_i^{(i)}, b_i^{(i)}$ คือองค์ประกอบของสัญลักษณ์ข้อมูล d_i ในส่วนจริง และส่วนจินตภาพ ซึ่งแทนส่วนของอินเฟส (in phase) และควอเตรเจอร์เฟส (quadrature phase) ของสัญญาณ CO-OFDM ตามลำดับ จากนั้นนำ $d_i, i=0,1,2,\dots,N_s-1$ ไปคูณกับฟังก์ชัน cosine และ sine ของความถี่คลื่นพาห้หลักเพื่อสร้างสัญญาณ CO-OFDM ซึ่งโครงสร้างการมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 เมื่อพิจารณาสัญญาณเชิงซ้อนแบนด์ CO-OFDM ตามสมการที่ 2.2 จะเห็นว่าเป็นการแปลงฟูเรียร์กลับ (inverse fourier transform: IFT) ของสัญญาณอินพุต จำนวน N_s คลื่นพาห้ย่อย ในกรณีที่ เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องจะใช้การแปลงฟูเรียร์วิยุตกลับ (inverse discrete fourier transform: IDFT) แสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left(j2\pi \frac{in}{N_s}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อแทนเวลา t ด้วยจำนวนการสุ่ม n และแทน N_s ด้วยจำนวนการคำนวณใน IDFT หลักการมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ที่ภาครับมีกระบวนการที่ตรงข้ามกับการมอดูเลตสัญญาณที่ภาคส่ง การแปลงสัญญาณที่ภาครับนี้สัญญาณจะถูกส่งผ่านเข้าไปยังการแปลงฟูเรียร์เร็ว (fast fourier transform: FFT) โดยสัญญาณ d_i ที่ถูกสร้างขึ้นจากการแปลง FFT และ $r(n)$ แทนสัญญาณ IFFT ที่ได้รับ (IFFT receive symbol) สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 2.4

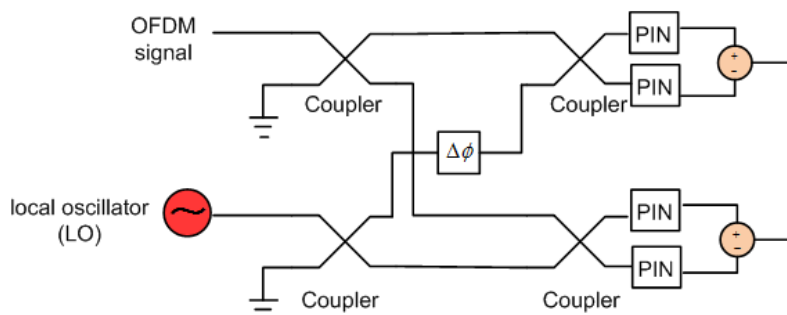
$$d_i' = \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sum_{n=0}^{N_s-1} r(n) \exp\left(-j2\pi \frac{in}{N_s}\right) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.5 การมอดูเลตสัญญาณ OFDM

2.4 เทคโนโลยี optical coherent detection

เทคโนโลยี optical coherent detection แสดงดังรูปที่ 2.6 เป็นการนำสัญญาณ OFDM จากภาคส่งมาผ่านวงจร hybrid 90 optical ในส่วนของเครื่องรับสัญญาณมีการนำ LO มาคูณกับสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นภายในส่วนของวงจรภาครับ โดยสัญญาณที่นำมาคูณกันนั้นต้องมีเฟสและความถี่ตรงกันด้วย จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาทำ balance detection จะได้สัญญาณไฟฟ้า I และ Q ของแกนโพลาริเซชันทั้งสองแกน การใช้เทคโนโลยี optical coherent detection มีข้อดีคือ ทำให้จำนวนอัตราข้อมูลต่อช่องสัญญาณมากขึ้นและประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์สูงกว่าการมอดูเลตแบบพื้นฐานที่ใช้ direct detection



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอุปกรณ์ optical 90 hybrid [16, 28]

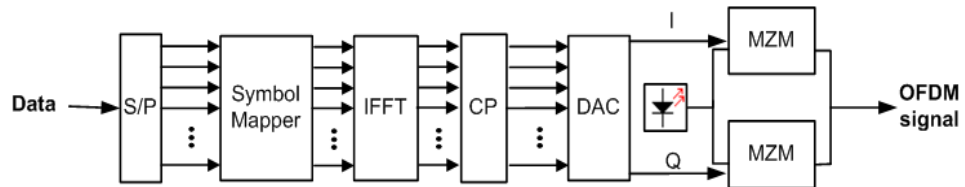
2.5 ระบบ CO-OFDM

ระบบ CO-OFDM มีกระบวนการต่างๆในส่วนของภาคส่งและภาครับสัญญาณ แสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบให้สามารถ DSP เพื่อแก้ปัญหาคความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในลำดับถัดไป

2.5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ภาคส่งของระบบ CO-OFDM

โครงสร้างอย่างง่ายของอุปกรณ์ภาคส่งของระบบ CO-OFDM แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยข้อมูลที่ถูส่งเข้ามาจะแปลงข้อมูลอนุกรมให้เป็นข้อมูลแบบขนาน ต่อมานำสัญญาณมาเข้ารหัสสัญญาณที่ symbol mapping ซึ่งจำนวนบิตต่อ symbol ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลตของแต่ละคลื่นพหุย่อย หลังจากนั้นส่งข้อมูลเข้าสู่กระบวนการ IFFT เพื่อกำเนิดสัญญาณคลื่นพหุย่อยที่ตั้งฉากกัน และนำสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ได้เติม cyclic prefix จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาผ่าน digital to analog convertor (DAC) จะได้ข้อมูลที่เป็นสัญญาณอนาล็อก ต่อมานำสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตทางแสงที่ mach zehnder modulator (MZM) 2 ตัว มอดูเลตสัญญาณ I Q แยกจากกัน แสดงดังรูปที่ 2.7 จะได้

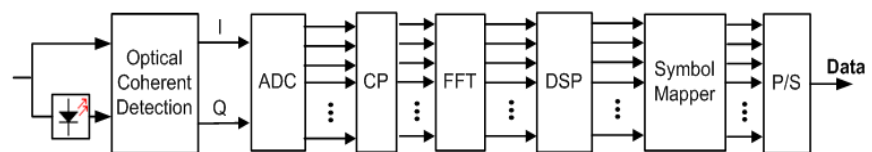
สัญญาณ CO-OFDM ที่มีค่าสัญญาณทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งสามารถตรวจจับสัญญาณได้ด้วยเทคโนโลยีโคฮีเรนต์ ต่างกับ noncoherent จะมอดูเลตโดยใช้ MZM เพียงตัวเดียวแล้วทำการ bias สัญญาณ จะได้สัญญาณ noncoherent OFDM ที่มีค่าสัญญาณค่าบวก



รูปที่ 2.7 ภาควงของสัญญาณ CO-OFDM

2.5.2 โครงสร้างของอุปกรณ์ภาครับของระบบ CO-OFDM

รูปที่ 2.8 แสดงภาครับของสัญญาณ CO-OFDM โดยนำสัญญาณ CO-OFDM ที่ได้ส่งไปที่ optical hybrid จะได้สัญญาณ CO-OFDM ทั้งอินเฟสและควอดเตอเรียเฟส (I/Q) ซึ่งการแปลงสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (photo detector) ต่อมานำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ส่งผ่าน analog to digital convertor (ADC) เพื่อ sampling สัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณโอเอพดีเอ็มที่ได้ไปตัดส่วนที่ทำ cyclic prefix ออก แล้วส่งข้อมูลเข้า FFT เพื่อตีมอดูเลตคลื่นพาห้อย่อยทั้งหมด และส่งสัญญาณไปที่ส่วน DSP เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ต่อมานำสัญญาณมาถอดรหัสสัญญาณที่ symbol mapping โดยการแปลงจากสัญญาณ symbol เป็นสัญญาณดิจิทัล สุดท้ายแปลงสัญญาณกลับเป็นแบบอนุกรมจะได้ข้อมูลออกมา

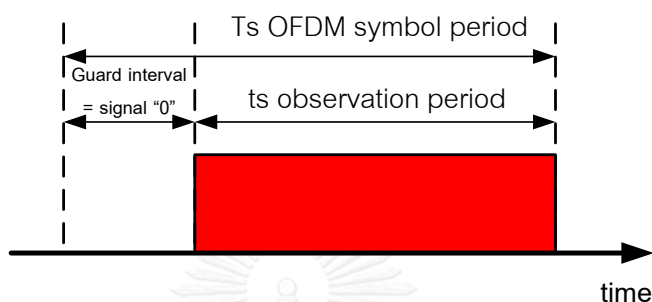


รูปที่ 2.8 ภาครับของสัญญาณ CO-OFDM

2.6 ระบบไซคลิก (cyclic prefix: CP)

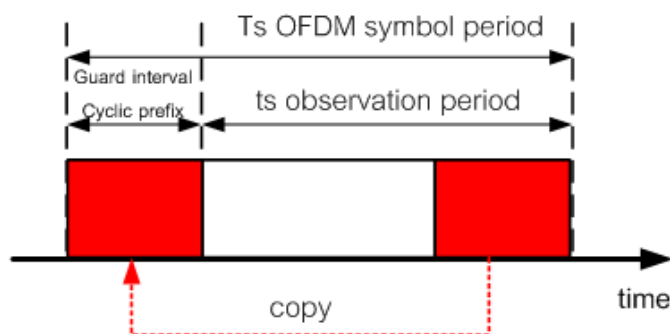
การเติม guard interval เข้ากับ symbol ของ CO-OFDM เพื่อกำจัดผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) เพื่อไม่ให้สัญญาณของ symbol หนึ่งไปรบกวน symbol ถัดไป รูปแบบของ guard interval มีได้หลายรูปแบบ เช่น การเติมค่า 0 อย่างต่อเนื่องเพิ่มเข้าไปใน symbol OFDM ในรูปที่ 2.9 แสดงการเพิ่ม guard interval โดยการเติม 0 อย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนต้นของสัญญาณ

OFDM ไม่ประกอบด้วย symbol ใดๆ ทำให้สิ้นเปลืองช่วงเวลาของการส่งสัญญาณไป ก่อให้เกิดผลของการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณ (inter carrier interference: ICI) เนื่องจากสูญเสียการตั้งฉากระหว่างคลื่นพหุย่อยแต่ละตัว [15, 29, 30] เนื่องจากลักษณะของสัญญาณในโดเมนทางเวลาเปลี่ยนไปทำให้สัญญาณทางความถี่ของสัญญาณ OFDM เปลี่ยนแปลงและสูญเสียการตั้งฉากระหว่างคลื่นพหุย่อยแต่ละตัว



รูปที่ 2.9 การเติม guard interval รูปแบบใช้ symbol เท่ากับ 0

การเกิดปัญหา ICI ทำให้มีการนำวิธีการเติม guard interval รูปแบบ cyclic prefix extension มาใช้โดยการคัดลอกส่วนท้ายสุดของสัญลักษณ์ OFDM ไปวางที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์ OFDM ทำหน้าที่เป็น guard interval ซึ่งเป็นรูปแบบที่ช่วยแก้ปัญหาการเกิด ICI ได้ ดังรูปที่ 2.10 [15, 29, 31] เนื่องจากลักษณะสัญญาณในโดเมนทางเวลาไม่เปลี่ยน ดังนั้นสัญญาณทางความถี่ของสัญญาณ OFDM จึงไม่สูญเสียการตั้งฉากระหว่างคลื่นพหุย่อยแต่ละตัว และสามารถช่วยลดผลของ ISI ที่มาจากดิสเพอร์ชันได้

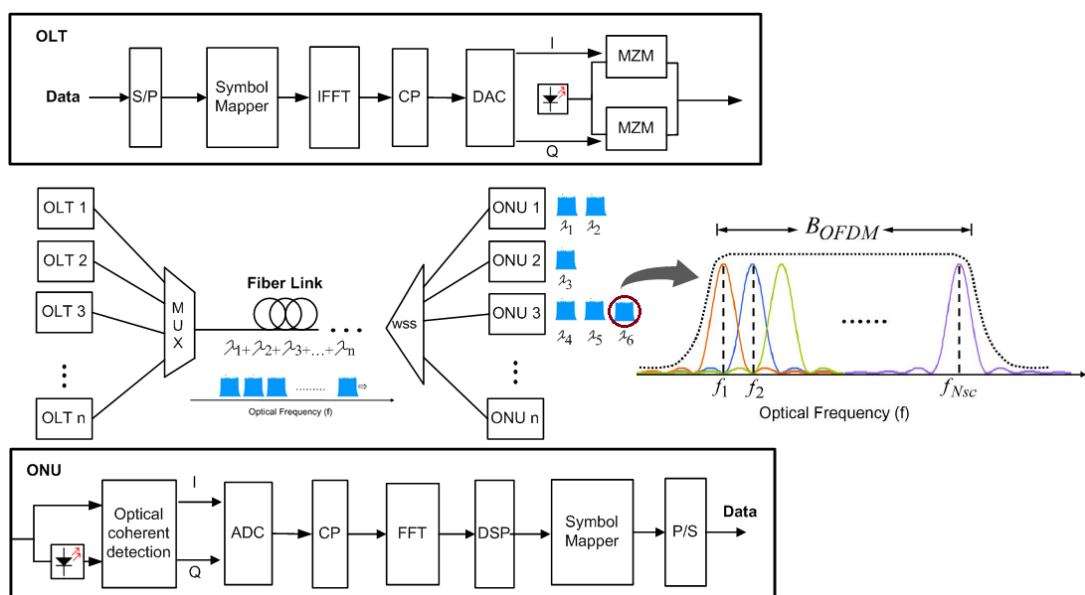


รูปที่ 2.10 การเติม guard interval รูปแบบ cyclic prefix extension

2.7 Superchannel

การส่งข้อมูลหรือการมอดูเลตข้อมูลของระบบโครงข่าย ควรมีความยืดหยุ่น สามารถตอบสนองผู้ใช้บริการแต่ละรายที่มีความต้องการใช้อัตราข้อมูลที่ไม่เท่ากันได้ เช่น ผู้ใช้บริการรายแรก

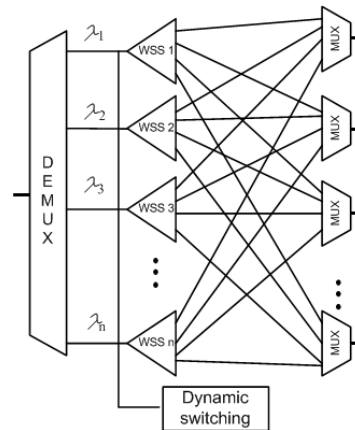
ต้องการดูรายการโทรทัศน์ออนไลน์ ส่วนผู้ใช้บริการรายที่สองต้องการดาวน์โหลดเพลง เป็นต้น โดยสามารถจัดสรรแบนด์วิดท์เพื่อตอบสนองการบริการที่หลากหลายให้กับผู้ใช้บริการ เป็นการส่งข้อมูลที่มีหลายความยาวคลื่นส่งไปพร้อมกัน เรียกว่า superchannel แสดงดังรูปที่ 2.11 ระบบการส่งสัญญาณ CO-OFDM บน fiber access network จำนวนช่องสัญญาณมากมายจากภาคส่งและภาครับไม่จำเป็นต้องมีจำนวน n เท่ากัน ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณใช้ความยาวคลื่นในการสื่อสารสัญญาณที่ต่างกันส่งผ่านเส้นใยแสง โดยทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณและดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing และ WSS ตามลำดับ ซึ่งสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างคุ้มค่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth efficiency) [28]



รูปที่ 2.11 การส่งสัญญาณของ superchannel CO-OFDM บน fiber access network [16, 28]

2.8 Wavelength selective switching (WSS)

โครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ WSS จะจัดสรรจำนวนความยาวคลื่นให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บริการ โดยอุปกรณ์ WSS มีการทำงานโดยการควบคุมของ dynamic switching ทำหน้าที่จัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และจัดสรรให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอให้เหมาะสมกับผู้ใช้บริการแต่ละราย แสดงดังรูปที่ 2.12 [32]

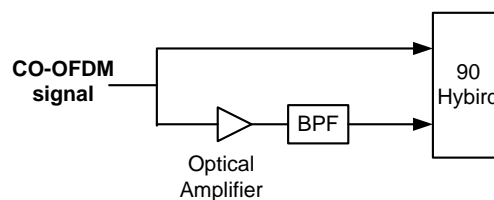


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์ wavelength selective switching (WSS)

โดยทั่วไป WSS มีหลายประเภท วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS 4 ประเภทที่มีค่า time constant แตกต่างกันได้แก่ GaAs photonic crystal cavity มี time constant 15 ps, GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) มี time constant 100 ps, semiconductor optical amplifier (SOA) มี time constant 1 ns, electro-optic มี time constant 5 ns [32-34]

2.9 Self-coherent detection

เพื่อให้ ONU มีต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงนำวิธี self-coherent detection แทนการใช้ LO มาประยุกต์ใช้กับระบบ CO-OFDM โดยนำสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามา ผ่านตัวกรองสัญญาณ (band pass filter: BPF) จะได้คลื่นพาห้ของสัญญาณ ซึ่งนำคลื่นพาห้ของสัญญาณที่ได้มาใช้แทน LO แสดงดังรูปที่ 2.13 ข้อดีของ self-coherent อีกประการคือมีเฟสของสัญญาณคลื่นพาห้ที่ได้ตรงกับเฟสของสัญญาณที่มาจากภาคส่ง [35] โดยตัวกรองสัญญาณควรเลือกให้มีความคมมากเพียงพอเพื่อกรองคลื่นพาห้ให้ได้ linewidth แคบที่สุด



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ self-coherent detection [35]

2.10 Digital signal processing (DSP)

ปัจจุบันนี้ DSP เป็นวิธีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณ มีหน้าที่สำคัญ 3 หน้าที่ ดังนี้ [25]

2.10.1 การชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensation)

การเปลี่ยนเฟสของสัญญาณเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้เกิดการกระจายของสัญญาณในทางเวลา ทำให้ตรวจจับสัญญาณที่ภาครับเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เราสามารถวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางเฟสของสัญญาณเนื่องจากดิสเพอร์ชันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$A(z, T) = \sum_{m=1}^{N_s} A_m(z, T) \exp(j\omega_m T) \quad (2.5)$$

กำหนดให้ $A(z, T)$ เป็นสัญญาณโอเอฟดีเอ็มที่ภาคส่ง เมื่อ $A_m(z, T)$ เป็น modulated symbol ของแต่ละคลื่นพาย่อยลำดับที่ m ที่มีความถี่ของคลื่นพาย่อยเป็น ω_m และจำนวนคลื่นพาย่อยของสัญญาณ OFDM เป็น N_s ซึ่งเราพิจารณาผลกระทบเนื่องจากดิสเพอร์ชันเพียงอย่างเดียว สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.6

$$\frac{\partial A_m(z, T)}{\partial z} + \frac{j\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_m(z, T)}{\partial T^2} = 0 \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.6 เมื่อแปลง Fourier transform จะได้สมการในรูปของ spectrum ทางความถี่ของคลื่นพาย่อยดังสมการ 2.7

$$\frac{\partial A_m(z, \omega_m)}{\partial z} - \frac{j\beta_2 \omega_m^2}{2} A_m(z, \omega_m) = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อหาผลเฉลยของสมการ 2.7 เขียนได้ดังสมการ 2.8

$$A_m(z, \omega_m) = A_m(0, \omega_m) \exp\left(\frac{j\beta_2 \omega_m^2}{2} z\right) \quad (2.8)$$

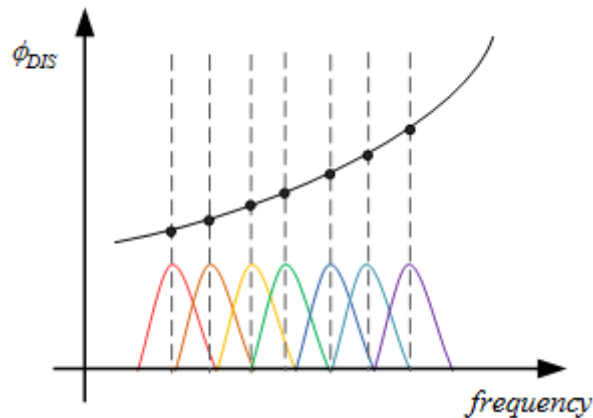
โดยที่พจน์ของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของสมการ 2.8 เป็นความผิดเพี้ยนทางเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ดังนั้นความผิดเพี้ยนทางเฟสเนื่องจากดิสเพอร์ชัน (ϕ_m^{DIS}) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.9

$$\phi_m^{DIS} = \left[\frac{1}{2} \beta_2 (2\pi f_m)^2 \right] z \quad (2.9)$$

ความผิดเพี้ยนทางเฟสเนื่องจากดิสเพอร์ชันทำให้แต่ละ subcarrier มีการหมุนของเฟสไม่เท่ากัน subcarrier ที่มีความถี่น้อย เฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงจากผลกระทบของดิสเพอร์ชันน้อย หาก subcarrier ที่มีความถี่มาก เฟสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากผลกระทบของดิสเพอร์ชันมาก ดังนั้นหากมีจำนวน subcarrier ที่มากขึ้น และส่งสัญญาณเป็นระยะทางที่ไกลขึ้น เฟสจะมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นด้วย ดังแสดงใน

รูปที่ 2.14 ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการนำ DSP มาใช้เพื่อชดเชยดีสเพอร์ชัน โดย DSP จะตรวจจับสัญญาณที่เปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้ว DSP จะทำหน้าที่ปรับให้สัญญาณแบบเดิมกลับมา โดยการคำนวณจากสมการ 2.10

$$A_m(z, \omega_m) = A_m(0, \omega_m) \exp\left(\frac{j\beta_2 \omega_m^2}{2} z\right) \exp(-j\phi_m^{DIS}) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

2.10.2 Polarization division multiplexing (PDM)

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีโคฮีเรนต์และ DSP มาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถแยกสัญญาณข้อมูลทั้งสองแกนออกจากกัน แม้ว่าแกน polarization ทั้งคู่ของสัญญาณจะหมุนเปลี่ยนทิศทางและทำให้แกน polarization ทั้งคู่ของสัญญาณไม่คงความตั้งฉาก เนื่องจากเส้นใยแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันตลอด ซึ่งการส่งสัญญาณแบบ PDM ผ่านเส้นใยแสงสามารถแยกสัญญาณข้อมูลออกจากกันได้ด้วย DSP ทำให้สามารถตรวจจับและแก้ไขสัญญาณได้ถูกต้อง โดยทางคณิตศาสตร์นำทฤษฎีของโจนส์เมทริกซ์ (Jones matrix) มาคำนวณ ดังสมการที่ 2.11

$$H = \begin{bmatrix} H_{XX} & H_{XY} \\ H_{YX} & H_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} e^{i\delta} & -\sqrt{1-\alpha} \\ \sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} e^{-i\delta} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

เมื่อ H คือโจนส์เมทริกซ์

α คือแบ่งกำลังของสัญญาณ

δ คือความแตกต่างของเฟสระหว่างโพลาริเซชันแกนสองแกน

เราสามารถหาสัญญาณเอาต์พุตจากสมการเมทริกซ์ 2.12

$$\begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดยที่ R_X คือสัญญาณเอาต์พุตของโพลาริเซชันแกน x

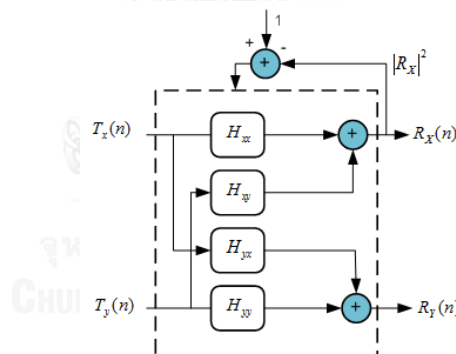
R_Y คือสัญญาณเอาต์พุตของโพลาริเซชันแกน y

T_X คือสัญญาณอินพุตของโพลาริเซชันแกน x

T_Y คือสัญญาณอินพุตของโพลาริเซชันแกน y

ดังนั้น เราสามารถนำอินเวอร์สเมทริกซ์ H มาเพื่อแยกสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณแบบ PDM ได้ จากสมการเมทริกซ์ 2.13 และมีวงจร DSP ดังรูปที่ 2.15

$$\begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{XX} & H_{XY} \\ H_{YX} & H_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \end{bmatrix} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.15 วงจร DSP [25]

2.10.3 carrier phase estimation

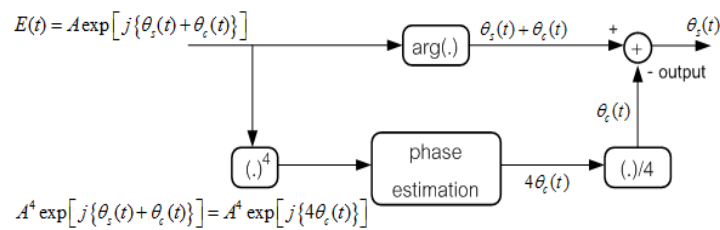
การส่งสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ดีเทกชันทางแสง จะต้องมี LO เพื่อสร้างสัญญาณ ดังรูปที่ 2.6 ในอดีตไม่สามารถสร้างสัญญาณจาก LO ให้มีเฟสตรงกันกับสัญญาณที่เข้ามาจากอินพุตได้เนื่องจากเฟสของแสงเปลี่ยนเร็วมาก ต่อมาจึงนำ DSP มาแก้ปัญหาความไม่ตรงกันของเฟสได้ โดยสร้างอัลกอริทึมในวงจร DSP ดังรูปที่ 2.16 โดยสัญญาณที่เข้ามาแสดงดังสมการที่ 2.14

$$E(t) = A \exp\{j[\theta_s(t) + \theta_c(t)]\} \quad (2.14)$$

โดยที่ $E(t)$ คือ สัญญาณทางไฟฟ้า

- A คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ
- θ_s คือ $0, \frac{\pi}{2}, \pi$ สัญญาณเฟสของข้อมูล
- θ_c คือ สัญญาณเฟสจาก LO

จากนั้นนำสัญญาณ $E(t)$ มายกกำลัง 4 แล้วนำสัญญาณดังกล่าวมาผ่านวงจรเลื่อนเฟสลง 4 เท่า ทำให้ได้เฟสของสัญญาณมีค่าเท่ากับเฟสของสัญญาณอินพุต และนำสัญญาณที่ได้มาใช้เป็น LO ได้ ซึ่งวิธีนี้ใช้กับการมอดูเลชันแบบ QPSK เท่านั้น เนื่องจากใช้ไม่ได้สำหรับการมอดูเลชันแบบ QAM โดยทั่วไป



รูปที่ 2.16 อัลกอริธึมสำหรับปรับเฟสของสัญญาณในวงจร DSP [36]

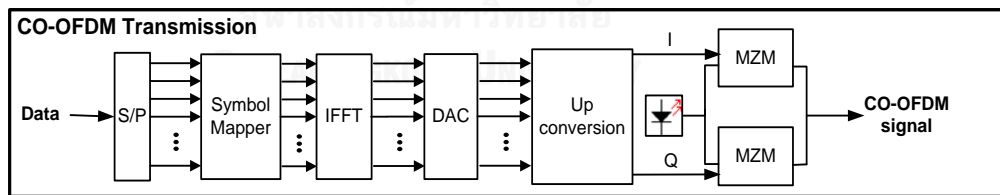
บทที่ 3

การวิเคราะห์ปัจจัยของระบบการส่งผ่านสัญญาณ CO-OFDM บนโครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงทำงานร่วมกับ self-coherent detection และสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงข่ายการทำงานของระบบการสร้างสัญญาณ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ switching characteristic ของ WSS แต่ละประเภทที่มี time constant แตกต่างกัน และ CO-OFDM symbol เพื่อที่จะออกแบบการส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM ให้สามารถส่งสัญญาณได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection ทั้งภาคส่งและภาครับ

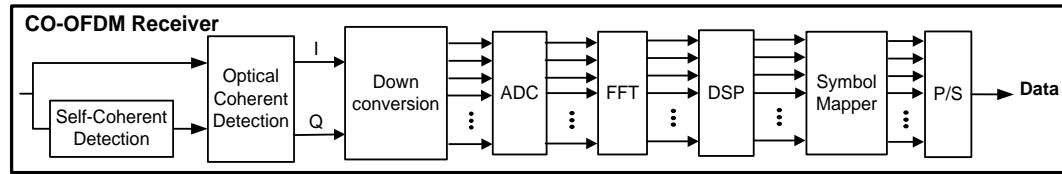
โครงสร้างของภาคส่งสัญญาณ CO-OFDM เริ่มจากนำอัตราข้อมูล 100 Gbps ที่ถูกส่งเข้าระบบมาเข้ารหัสแบบ QPSK ที่ symbol mapper มีจำนวนบิตต่อ symbol เท่ากับ 2 จากนั้นส่งข้อมูลเข้าสู่กระบวนการ IFFT เพื่อกำเนิดสัญญาณพาหะที่มีลักษณะตั้งฉากกัน แล้วแปลงข้อมูลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกที่ DAC จากนั้นนำสัญญาณมาเข้าสู่กระบวนการ up conversion เพื่อมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 GHz ต่อมานำสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตทางแสงที่ MZM จะได้สัญญาณ CO-OFDM ซึ่งโครงสร้างดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM

โครงสร้างภาครับจะนำสัญญาณ CO-OFDM ที่ได้ส่งไปที่ optical coherent detection โดยตีมอดูเลตทางแสงด้วย self-coherent detection เพื่อนำสัญญาณคลื่นพาหะที่ได้มาใช้แทน CW laser แล้วแปลงสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยการตรวจจับสัญญาณแสงด้วย photo detector ซึ่ง thermal noise เท่ากับ $12.83 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ และ dark current เท่ากับ 10 nA จากนั้นนำสัญญาณมาเข้าสู่กระบวนการ down conversion เพื่อตีมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 GHz แล้ว sampling สัญญาณที่ ADC แล้วส่งข้อมูลเข้า FFT เพื่อตีมอดูเลตคลื่นพาหะย่อยทั้งหมด

และส่งสัญญาณไปที่ DSP เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ สุดท้ายนำสัญญาณ CO-OFDM ไปถอดรหัสและแปลงสัญญาณกลับเป็นแบบอนุกรมจะได้ข้อมูลออกมา แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของสัญญาณ CO-OFDM

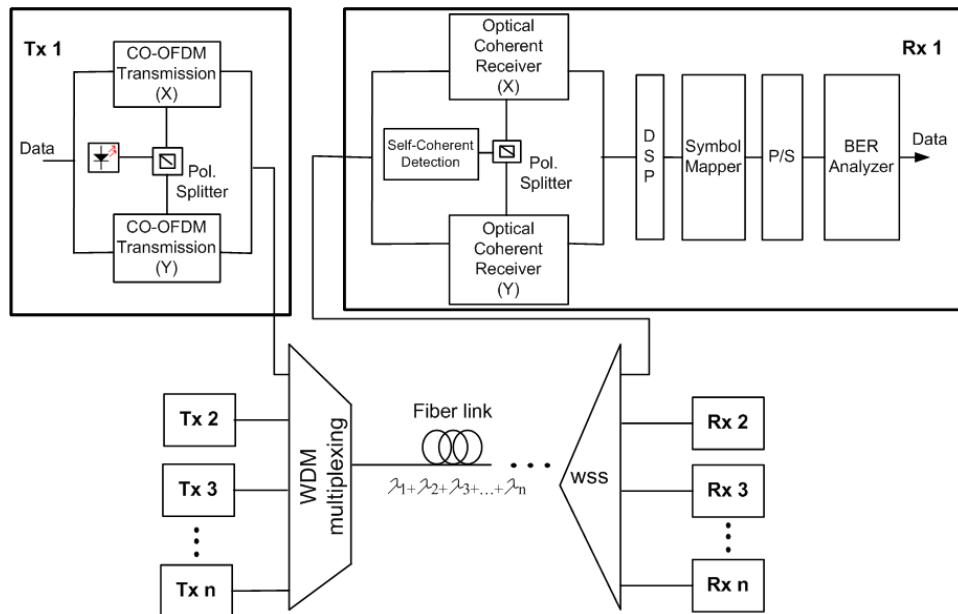
3.2 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS

โครงสร้างภาคส่งสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM จะส่งสัญญาณเข้าสู่กระบวนการ CO-OFDM transmission ของทั้งสองแกน สัญญาณถูกมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ซึ่งใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ตามมาตรฐาน ITU grid [37] โดยใช้อุปกรณ์กระจายสัญญาณ polarization splitter แบ่งสัญญาณไปยังทั้งสองแกน จากนั้นทำการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณโดย WDM multiplexing และ WSS ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้แบนด์วิดท์เท่ากับ 100 GHz จะส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ผ่านเส้นใยแสงตามมาตรฐาน ITU.T G.652.D ผ่านไปยัง WSS ซึ่งเป็นสวิตช์ที่สามารถเลือกรับหรือส่งความยาวคลื่นของช่วงความยาวคลื่น C band ได้ตามความต้องการที่ผู้ใช้บริการร้องขอ โดยการจัดสรรความยาวคลื่นให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บริการ มีการทำงานโดยการควบคุมของ dynamic switching ทำหน้าที่จัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และจัดสรรให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ ซึ่งไม่มีโอกาสเกิดการชนกันของข้อมูล โดยใช้ WSS ทั้งหมด 4 ประเภท ที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ WSS

Type of WSS	Time constant	Insertion loss	Noise figure
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	16 dB	-
GaNAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	16.5 dB	-
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	-	8 dB
Electro-optic switch	5 ns	2 dB	-

ต่อมาเมื่อสัญญาณส่งมาที่ภาครับจะถูกตรวจจับสัญญาณได้ด้วย optical coherent receiver โดยการตีמודูเลตทางแสงด้วยเทคนิค self-coherent detection โดยใช้ band pass filter กรองสัญญาณคลื่นพาห้หลัก จากนั้นส่งสัญญาณต่อไปที่ DSP เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ต่อมานำสัญญาณที่ถูกแก้ไขความผิดเพี้ยนแล้วมาถอดรหัสสัญญาณที่ symbol mapping สุดท้ายแปลงสัญญาณกลับเป็นแบบอนุกรมจะได้ข้อมูลออกมา แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS

3.3 วิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบ CO-OFDM บน fiber access network

โครงสร้างของระบบ CO-OFDM ที่ใช้ WSS ร่วมกับ self-coherent detection สำหรับภาค downlink สมมติระบบส่งสัญญาณบนช่วง C-band ด้วยอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อความยาวคลื่น โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK ที่มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm ซึ่งการส่งสัญญาณ CO-OFDM ควรถูกเปลี่ยนช่วงสัญญาณพอดีกับขอบของสัญญาณลักษณะ CO-OFDM ทำให้ได้รับสัญญาณที่ถูกต้องและไม่เกิดการสูญหายของข้อมูล ซึ่งระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS สามารถเลือกรับหรือส่งความยาวคลื่นได้ตามความต้องการที่ผู้ใช้บริการร้องขอ เช่น บ้านแรกต้องการความยาวคลื่นขนาดใหญ่ WSS ก็จะจัดสรรความยาวคลื่นให้ 16 symbol ส่วนอีกบ้านต้องการความยาวคลื่นขนาดเล็กที่มีความต้องการอัตราข้อมูลน้อยกว่าบ้านแรก WSS จะจัดสรรความยาวคลื่นให้ 4 symbol ซึ่งการจัดสรรจำนวน symbol ให้แต่ละบ้านโดยใช้ WSS จะได้รับความยาวคลื่นและจำนวน symbol แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้อัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการ

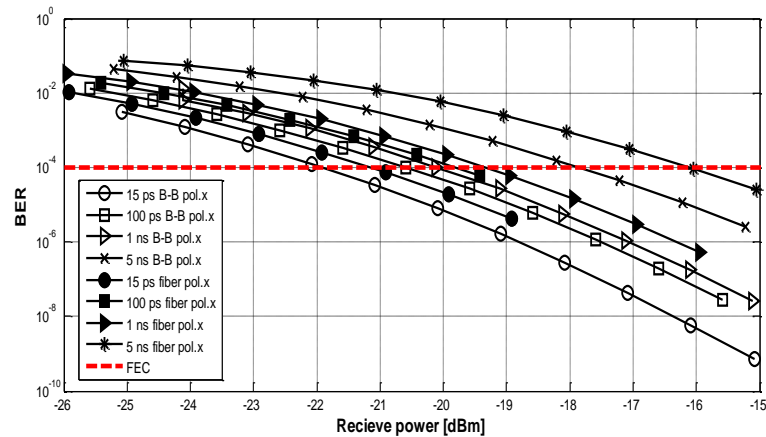
วิทยานิพนธ์บทที่ 3 นี้ ศึกษาความยาวคลื่นที่ 1525 นาโนเมตร ส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ด้วยระยะทาง 20 กิโลเมตร ระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีจำนวนคลื่นพาทย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาห์ ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1525 nm

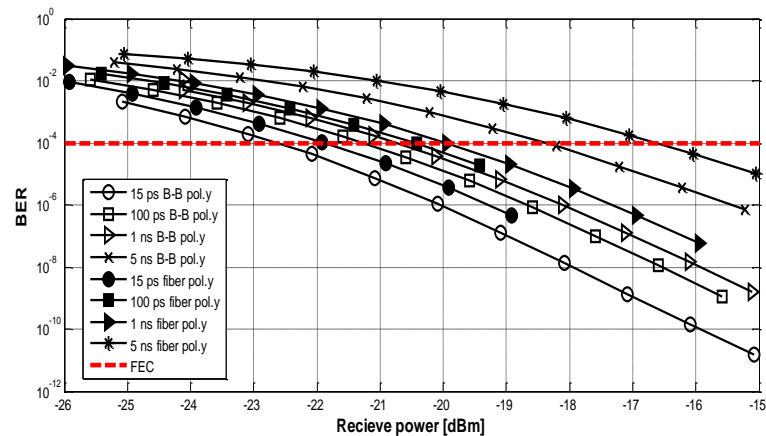
Parameter	Value
bit rate	100 Gbps
reach	20 km
up-down conversion	50 GHz
Sequence length	8192 bit
number of subcarrier	512 subcarrier

สัญญาณ CO-OFDM มีจำนวน 8 symbol ถูกส่งสัญญาณผ่าน SMF มี dispersion ดังแสดงในสมการที่ 2.5 เป็นตัวแปรจำกัดสมรรถนะของระบบ ในทางทฤษฎีหากไม่มีการชดเชยดีสเพอร์ชันเมื่อระยะทางมากขึ้น ส่งผลให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้นด้วย สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (dispersion compensation) ได้ด้วย DSP ดังนั้นความยาวคลื่นที่ 1525 นาโนเมตร มีค่าการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 0.191979 dB/km ซึ่งมีค่าอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณมากที่สุดเมื่อเดินทางผ่าน SMF บนช่วง c band เป็นปัจจัยหลักที่พิจารณาเพื่อศึกษาขีดจำกัดสมรรถนะของระบบ CO-OFDM บน fiber access network

การส่งสัญญาณ CO-OFDM ของระบบนี้ ไม่คิดผลกระทบโหมดการกระจายโพลาไรเซชัน (polarization mode dispersion: PMD) และความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity) เนื่องจากระบบนี้ใช้กำลังในการส่งสัญญาณต่ำและสื่อสัญญาณในระยะทางสั้นส่งสัญญาณบนโครงข่ายเข้าถึง (access network) แทบจะไม่ได้รับผลกระทบจาก PMD และ non-linearity สามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบจากกำลังรับสัญญาณ และระยะทางในการส่งสัญญาณสูงสุดบนช่วง c band นอกจากนี้ หากส่งสัญญาณบนความยาวคลื่นอื่นใน ช่วง c band จะประสบความสำเร็จเช่นกัน ซึ่งจะกล่าวถัดไปในบทที่ 4



ก.



ข.

รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร

ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y

รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y จากผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS แต่ละชนิดที่มีค่า time constant ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่าการส่งสัญญาณ CO-OFDM ด้วย 8 symbol โดย time constant ค่าน้อย นั้นคือ time constant เท่ากับ 15 ps มีสมรรถนะในการส่งสัญญาณของทั้ง back-to-back และ fiber ที่ดีกว่า time constant ที่มีค่ามาก เนื่องจาก WSS ที่มี time constant น้อย สามารถส่งสัญญาณได้เร็วกว่า นั้นคือ มีเวลาในการสับสวิตช์เร็ว ทำให้การส่งสัญญาณ CO-OFDM ด้วยจำนวน 8 symbol เกิดสัญญาณส่วนเกินบริเวณขอบของสัญลักษณ์น้อยกว่า WSS ที่มี time constant มาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณที่ดีกว่า ซึ่งสัญญาณส่วนเกินคือหากเวลาในการสับสวิตช์ช้าจะเกิด

สัญญาณรบกวนมากขึ้น เป็นสัญญาณส่วนที่ไม่ต้องการทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง กำลังรับสัญญาณของทั้ง back-to-back และ fiber ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y ประมาณ -22.2 dBm -21 dBm -22.5 dBm และ -22 dBm ตามลำดับ โดยพิจารณาค่า BER ภายใต้อัตรา 10^{-4} ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้

3.3.1 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ชนิดต่างๆ

การวิเคราะห์ระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ส่งด้วยอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ส่งด้วยระยะทาง 20 กิโลเมตร โดยการจำลองระบบที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุด บนความยาวคลื่นช่วง c band เป็นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบที่น่าเสนอ การส่งสัญญาณ CO-OFDM ซึ่งความถี่มีลักษณะสัญญาณเป็นแบบฟังก์ชันซิงกัดังรูปที่ 2.4 ซึ่งการส่งสัญญาณอินพุตด้วยจำนวน 8192 บิต มอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK การส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลสูง เมื่อเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยมากขึ้น จะส่งผลให้จำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณได้น้อยลง ทำให้ภาครับสัญญาณมีอัตราผิดพลาดน้อย เนื่องจากที่อัตราส่งข้อมูลเท่ากันหากใช้จำนวน symbol น้อย WSS ก็จะสามารถสับสวิตช์ได้จำนวนครั้งน้อยกว่าการใช้จำนวนคลื่นพาห่อย่อยน้อย นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยให้มากขึ้นส่งผลให้ความยาวของสัญญาณลักษณะ CO-OFDM เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งตัวแปรสำคัญของ WSS ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ CO-OFDM ของระบบนี้ คือ จำนวน symbol จำนวนบิตที่ส่ง และจำนวนคลื่นพาห่อย่อย แสดงดังตารางที่ 3.3

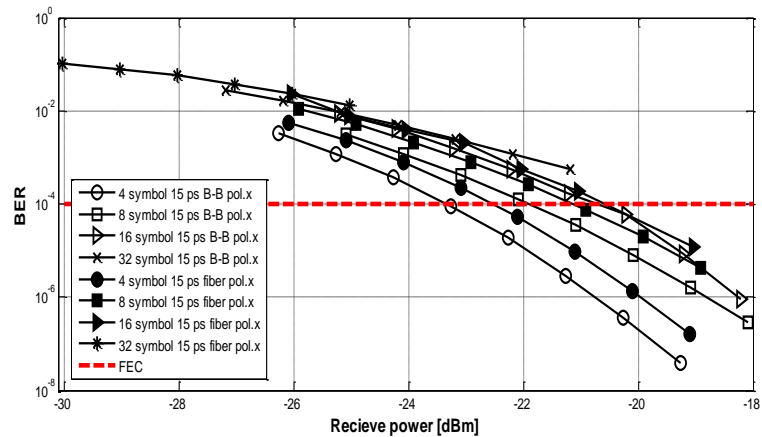
ตาราง 3.3 จำนวนสัญลักษณ์ จำนวนบิต และจำนวนคลื่นพาห่อย่อยสำหรับระบบ CO-OFDM ที่ใช้ QPSK

Number of symbol	Sequence length (bit)	Number of subcarrier
4	8192	1024
8	8192	512
16	8192	256
32	8192	128

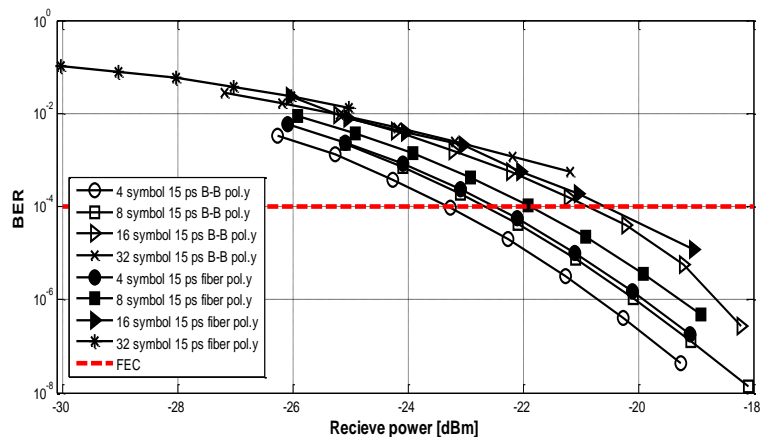
3.3.1.1 GaAs photonic crystal cavity ที่ time constant 15 ps

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 15 ps โดยการจำลองเพิ่มจำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back)

และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ให้มากขึ้นของแกนโพลาไรเซชัน x และแกนโพลาไรเซชัน y และเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

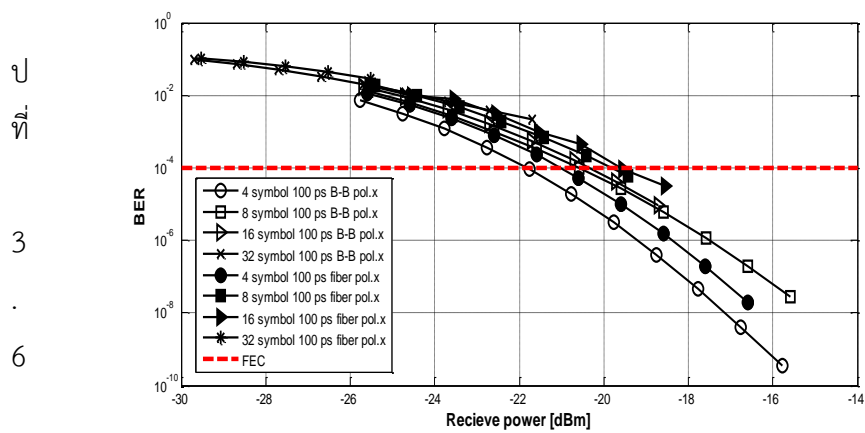
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity ก. แกนโพลาไรเซชัน x และ ข. แกนโพลาไรเซชัน y

รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 15 ps พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ที่มีจำนวน symbol เพิ่มขึ้นจาก 4 symbol 8 symbol 16 symbol และ 32 symbol ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนความยาวคลื่นช่วง c band สามารถส่งจำนวน symbol ได้สูงสุด 16 symbol ภายใต้ BER 10^{-4} ซึ่งมี

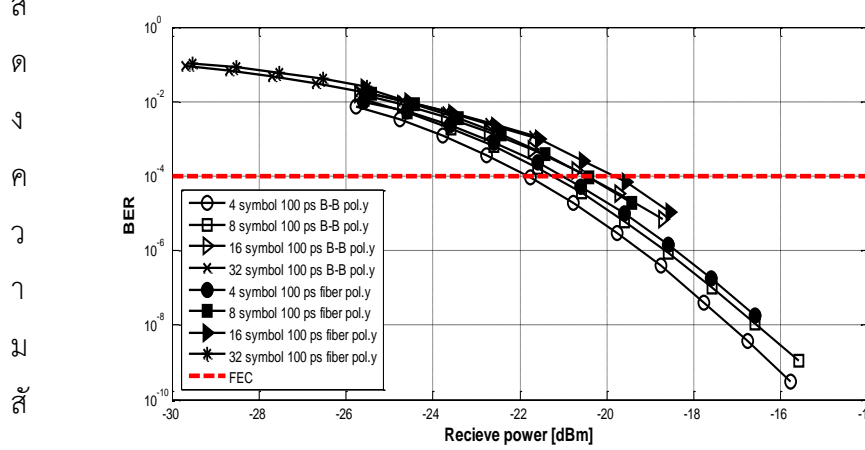
กำลังรับสัญญาณของแต่ละ symbol ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y แสดงดังตารางที่ 3.2

3.3.1.2 GaInAs /InP multiple quantum well switch (MQW) ที่ time constant 100 ps

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 100 ps โดยการจำลองเพิ่มจำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ให้มากขึ้นของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y และเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW

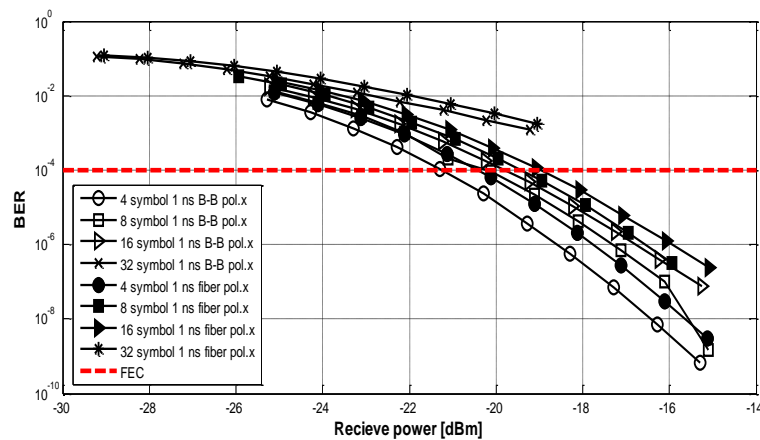
ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y

ร

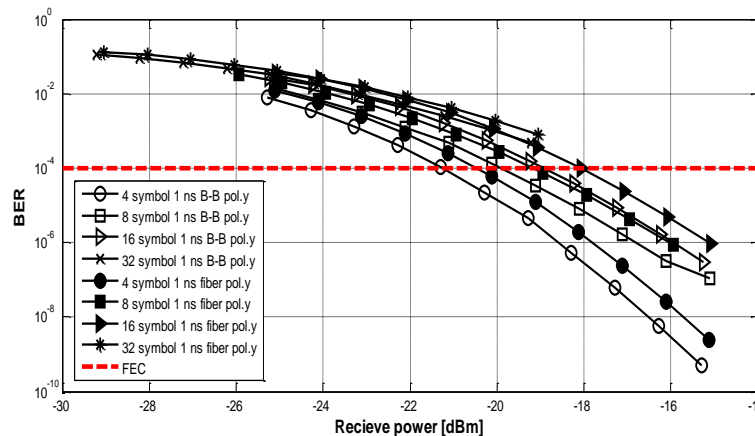
ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 100 ps พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ที่มีจำนวน symbol เพิ่มขึ้นจาก 4 symbol 8 symbol 16 symbol และ 32 symbol ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนความยาวคลื่นช่วง c band สามารถส่งจำนวน symbol ได้สูงสุด 16 symbol ภายใต BER 10^{-4} ซึ่งมีกำลังรับสัญญาณของแต่ละ symbol ของแกนโพลาไรเซชัน x และแกนโพลาไรเซชัน y แสดงดังตารางที่ 3.2

3.3.1.3 semiconductor optical amplifier (SOA) ที่ time constant 1 ns

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 1 ns โดยการจำลองเพิ่มจำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ให้มากขึ้นของแกนโพลาไรเซชัน x และแกนโพลาไรเซชัน y และเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ป.

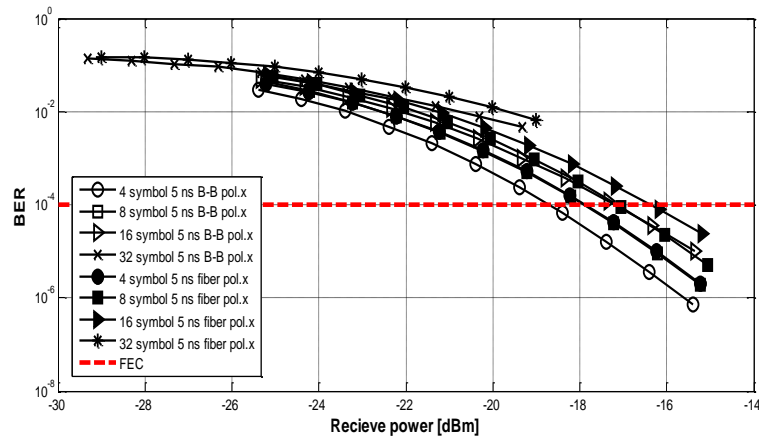
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA

ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y

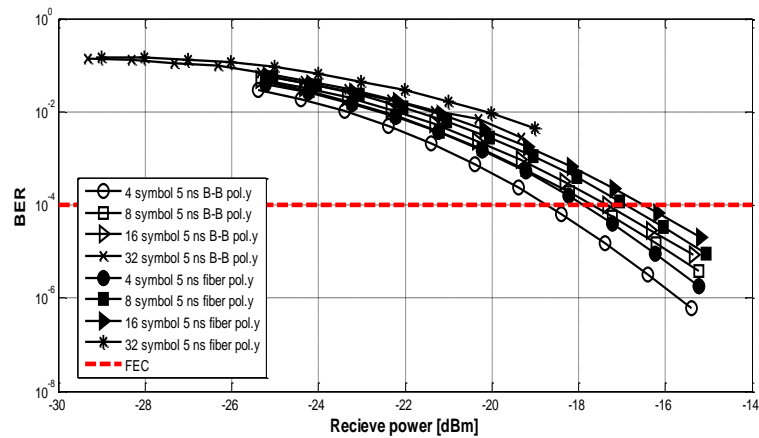
รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 1 ns พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ที่มีจำนวน symbol เพิ่มขึ้นจาก 4 symbol 8 symbol 16 symbol และ 32 symbol ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนความยาวคลื่นช่วง c band สามารถส่งจำนวน symbol ได้สูงสุด 16 symbol ภายใต้ BER 10^{-4} ซึ่งมีกำลังรับสัญญาณของแต่ละ symbol ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y แสดงดังตารางที่ 3.2

3.3.1.4 electro-optic ที่ time constant 5 ns

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 5 ns โดยการจำลองเพิ่มจำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ให้มากขึ้นของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y และเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ กำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic

ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y

รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 5 ns พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ที่มีจำนวน symbol เพิ่มขึ้นจาก 4 symbol 8 symbol 16 symbol และ 32 symbol ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนความยาวคลื่นช่วง c band สามารถส่งจำนวน symbol ได้สูงสุด 16 symbol ภายใต้ $BER = 10^{-4}$ ซึ่งมีกำลังรับสัญญาณของแต่ละ symbol ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y แสดงดังตารางที่ 3.2

จากกราฟแสดงผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ทั้ง 4 ประเภท บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ซึ่งมี loss มากที่สุด บนช่วง c band และเป็นปัจจัยหลักที่จำกัดขีดความสามารถของระบบ WSS ประเภท GaAs photonic crystal cavity ที่มี time constant 15 ps มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดี ที่สุด ซึ่งหากต้องการใช้อัตราข้อมูลน้อย จำนวน symbol ที่ต้องการใช้จะมีกำลังรับสัญญาณต่ำสุด แต่หากต้องการใช้อัตราข้อมูลมาก จะทำให้จำนวน symbol ที่ต้องการใช้มีกำลังรับสัญญาณมากขึ้น สามารถยอมรับได้ภายใต้ขีดจำกัด BER 10^{-4} ดังนั้นกำลังรับสัญญาณทั้งที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y สามารถสรุปกำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท แสดงในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ

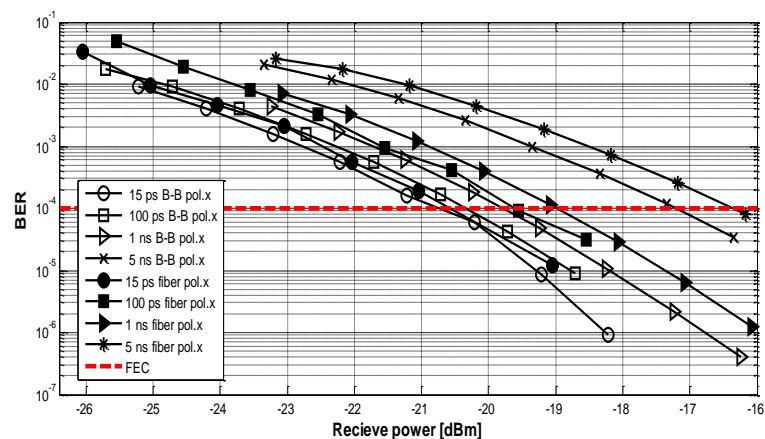
ตาราง 3.4 กำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ของแกนโพลาริเซชัน x

Type of WSS	receive power [dBm]							
	4 symbol		8 symbol		16 symbol		32 symbol	
	B-B	fiber	B-B	fiber	B-B	fiber	B-B	fiber
GaAs photonic crystal cavities switch	-23.3	-22.7	-22	-21	-20.7	-20.5	-	-
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	-22.4	-21.6	-21.3	-19.8	-20	-19	-	-
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	-21.2	-20.3	-20.1	-19.2	-19.7	-18.8	-	-
Electro-optic switch	-18.8	-17.9	-17.8	-17	-16.9	-16.1	-	-

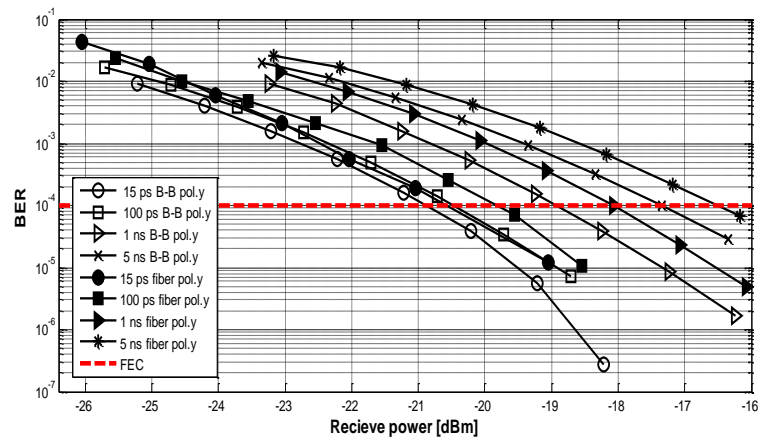
ตาราง 3.5 กำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ของแกนโพลาริเซชัน y

Type of WSS	receive power [dBm]							
	4 symbol		8 symbol		16 symbol		32 symbol	
	B-B	fiber	B-B	fiber	B-B	fiber	B-B	fiber
GaAs photonic crystal cavities switch	-23.2	-22.6	-22.4	-21.9	-21	-20.5	-	-
GaNAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	-22.2	-21.3	-21.6	-21	-20.6	-19.8	-	-
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	-21.3	-20.7	-20.1	-19.1	-18.9	-18	-	-
Electro-optic switch	-18.8	-17.9	-17.5	-17	-17.2	-16.4	-	-

จากความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภทบนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณมากสุดบนความยาวคลื่นช่วง c band สรุปได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบ WSS ทั้ง 4 ประเภทเกี่ยวกับสมรรถนะสูงสุดของระบบนี้ที่สามารถส่งสัญญาณ CO-OFDM ได้จำนวน symbol มากสุดเท่ากับ 16 symbol ซึ่ง WSS ประเภท GaAs photonic crystal cavity ที่ time constant 15 ps มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีที่สุดในทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) โดยมีกำลังรับสัญญาณของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y เท่ากับ -20.7 dBm -20.5 dBm และ -21 dBm -20.5 dBm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.9



ก.



ข.

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณ มี 16 symbol ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y

3.3.2 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ในเชิงระยะทาง

การจำลองระบบ CO-OFDM ด้วยการส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีการมอดูเลตแบบ QPSK โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.6

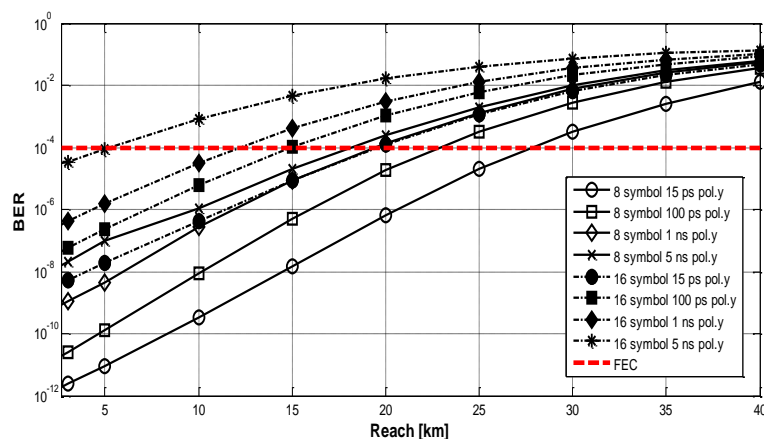
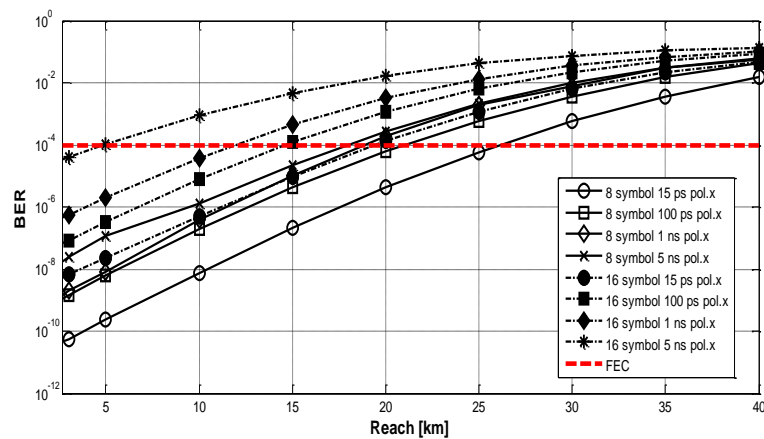
ตาราง 3.6 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1525 nm

Parameter	Value
bit rate	100 Gbps
up-down conversion	50 GHz
Sequence length	8192 bit
number of subcarrier	256 subcarrier, 512 subcarrier

การส่งสัญญาณผ่าน SMF ทำให้เกิดผลกระทบจากการลดทอนกำลังรับของสัญญาณและดิสเพอร์ชัน ซึ่งเป็นตัวแปรที่จำกัดสมรรถนะของระบบ จากที่กล่าวไปข้างต้นระบบสามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย DSP ดังนั้นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะการให้บริการในเชิงระยะทางของระบบ CO-OFDM บน fiber access network คือการลดทอนสัญญาณ ซึ่งระยะทางการให้บริการสำหรับความยาวคลื่นที่ 1525 นาโนเมตร มีอัตราการสูญเสียกำลังของ

สัญญาณมากที่สุดเมื่อเดินทางผ่าน SMF บนช่วง c band หากส่งสัญญาณบนความยาวคลื่นอื่นใน
บนช่วง c band จะประสบความสำเร็จเช่นกัน ซึ่งจะกล่าวถัดไปในบทที่ 4

วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant
แตกต่างกัน โดยเลือกพิจารณาจำนวน symbol ที่ 8 symbol และ 16 symbol มีจำนวน
คลื่นพาห่อย่อย 512 คลื่นพาห่ และ 256 คลื่นพาห่ ตามลำดับ จำนวนบิตที่ส่ง 8192 บิต แสดงดัง
ตารางที่ 3.6 โดยการจำลองเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้มากขึ้นจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมี
ค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ ทั้งแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริ
เซชัน y จะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณ สำหรับความยาวคลื่น
1525 นาโนเมตร ก. แกนโพลาริเซชัน x และ ข. แกนโพลาริเซชัน y

รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณสำหรับ WSS ทั้ง 4 ชนิด จากผลการทดลองระบบ CO-OFDM เพื่อหาขีดจำกัดในเชิงระยะทางการให้บริการไกลสุด ส่งด้วยอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนช่วง c band เป็นปัจจัยที่จำกัดขีดความสามารถของระบบที่นำเสนอ พบว่า WSS ที่ time constant เท่ากับ 15 ps. มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุดทั้งแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol ความสามารถในการส่งสัญญาณของแกนโพลาริเซชัน x ได้ระยะทาง 27 กิโลเมตร และแกนโพลาริเซชัน y ได้ระยะทาง 28 กิโลเมตร เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol ความสามารถในการส่งสัญญาณของแกนโพลาริเซชัน x ได้ระยะทาง 19 กิโลเมตร และแกนโพลาริเซชัน y ได้ระยะทาง 20 กิโลเมตร ภายใต้ BER 10^{-4} สามารถสรุประยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ได้ดังตารางที่ 3.3

ตาราง 3.7 ระยะทางที่ส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท

Type of WSS	reach (km)			
	8 symbol		16 symbol	
	Pol.x	Pol.y	Pol.x	Pol.y
GaAs photonic crystal cavities switch	27	28	19	20
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	21	23	15	15
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	19	20	12	12
Electro-optic switch	17	18	5	5

บทที่ 4

สมรรถนะโครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงแบบยืดหยุ่นของระบบ CO-OFDM

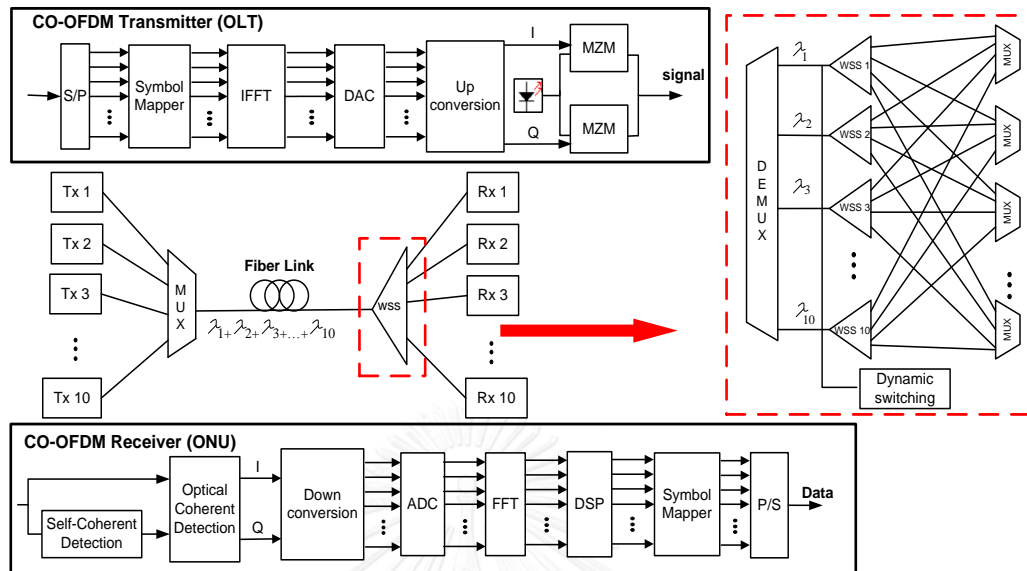
จากบทที่ 3 ได้วิเคราะห์ปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณมากสุดบนช่วงความยาวคลื่น c band เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ จะกล่าวถึงความสามารถในการทำงานของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS แต่ละประเภทที่มี time constant แตกต่างกัน โดยจะวิเคราะห์ถึงสมรรถนะการส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM ด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK ที่มีอัตราการส่งสัญญาณเท่ากับ 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ในเชิงของอัตราข้อมูล และระยะทางให้ได้มีประสิทธิภาพอย่างสูงสุด เพื่อตอบสนองตามความต้องการของผู้ใช้บริการแต่ละรายได้

4.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ส่งด้วยอัตราข้อมูล 1 Tbps จัดสรร 10 ความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย

โครงสร้างระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ซึ่งระบบนี้ถูกควบคุมการส่งสัญญาณ CO-OFDM แบบไดนามิก (dynamic switching) มอดูเลตสัญญาณแบบ QPSK ที่มีกำลังส่งของสัญญาณ 0 dBm ส่งสัญญาณผ่าน SMF ไปยังเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย DSP ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้ WSS ทั้งหมด 4 ประเภท จัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย ซึ่ง WSS แต่ละประเภทมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 3.1

จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ระบบนี้ออกแบบให้ส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps ส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ซึ่งเลือกจัดสรรความยาวคลื่น 10 ความยาวคลื่นที่ 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร บนช่วง c band ให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย แสดงดังตารางที่ 4.1 ภาคส่ง OLT นำสัญญาณมาเข้าสู่กระบวนการ up conversion เพื่อมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 GHz ต่อมานำสัญญาณที่ได้ไปมอดูเลตทางแสงที่ MZM จะได้สัญญาณ CO-OFDM ส่งสัญญาณผ่าน SMF ไปยังภาครับ ONU โดยนำสัญญาณ CO-OFDM ส่งไปที่ optical coherent detection โดย thermal noise เท่ากับ $12.83 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ และ dark current เท่ากับ 10 nA จากนั้นดีมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 GHz และแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย DSP ซึ่งระบบนี้เหมาะสมกับบริเวณที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลปริมาณมากที่มีการร้องขอสัญญาณจากผู้ใช้บริการ เช่น ต้องการดาวน์โหลดหนังภาพยนตร์ WSS ก็จะจัดสรรความยาวคลื่นให้ 8 symbol หรือต้องการประชุมผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต WSS จะจัดสรรความยาวคลื่นให้ 16 symbol เป็น

ต้น ช่วงความยาวคลื่น c band มีอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแตกต่างกันเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่าน SMF แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี 10 ความยาวคลื่น

ตาราง 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณบนช่วงความยาวคลื่น c band

Wavelength (nm)	Attenuation coefficient (dB/km)
1526	0.191773
1527	0.191574
1528	0.191382
1529	0.191198
1530	0.191022
1531	0.190853
1532	0.190691
1533	0.190538
1534	0.190393
1535	0.190255

4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ชนิดต่างๆ ส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps โดยจัดสรร 10 ความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย

จากรูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบนี้ ส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps ที่มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm มีจำนวนบิต 8192 บิต จำนวนคลื่นพาห่อย่อย 512 คลื่นพาห่ มีจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol ส่งระยะทาง 20 กิโลเมตร และส่งความยาวคลื่นได้ทั้งหมด 10 ความยาวคลื่นไปยังผู้ใช้บริการแต่ละราย สัญญาณถูกเข้ารหัสแบบ QPSK และ มอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้าที่ความถี่ 50 GHz ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร

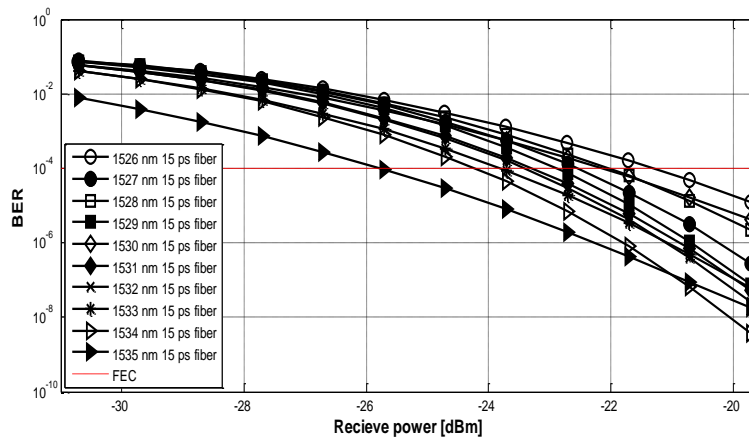
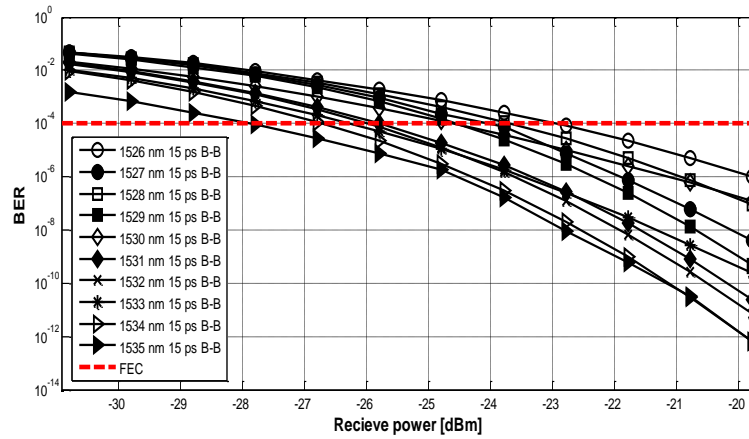
Parameter	Value
bit rate	1 Tbps
up-down conversion	50 GHz
reach	20 km
Sequence length	8192 bit
number of subcarrier	512 subcarrier

หลังจากนั้นส่งสัญญาณ CO-OFDM ผ่าน SMF G.652.D ไปสู่ภาครับ จากที่กล่าวในบทที่ 3 ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนความยาวคลื่นช่วง c band เป็นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ หากส่งสัญญาณบนความยาวคลื่นอื่นใน ช่วง c band จะประสบความสำเร็จเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการจำลองระบบที่ความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y ซึ่ง WSS จะเลือกรับหรือส่งความยาวคลื่นโดยการควบคุมของ dynamic switching ทำหน้าที่จัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และจัดสรรให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ

4.2.1 GaAs photonic crystal cavity ที่ time constant 15 ps

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 15 ps มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ของแกนโพลาริ

เซชัน x และแกนโพลาไรเซชัน y โดยเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



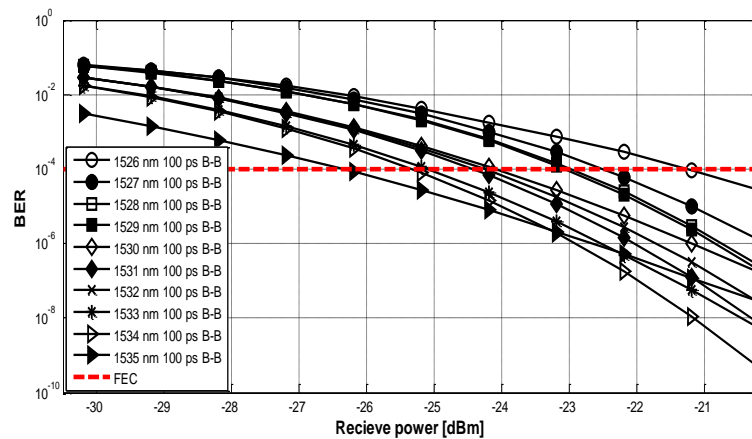
ข.

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity ก. back-to-back และ ข. fiber

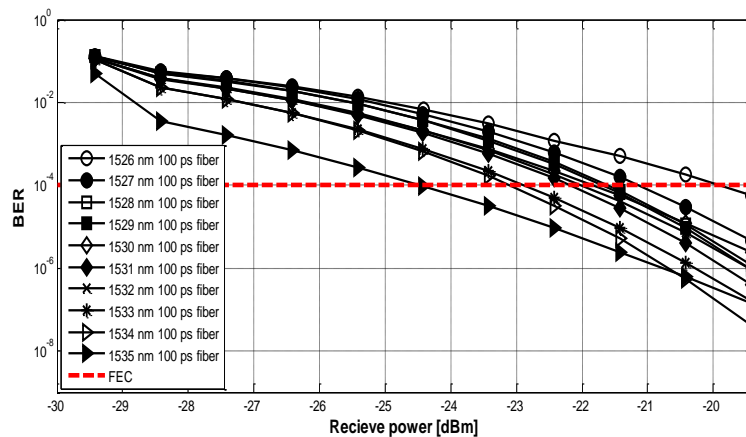
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity บนความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 15 ps พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps ที่มีจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol ส่งด้วยระยะทาง 20 กิโลเมตร ระบบมีสมรรถนะสูงสุดที่กำลังรับสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) เท่ากับ -27.8 dBm และ -25.5 dBm ตามลำดับภายใต้ BER 10^{-4} ซึ่งกำลังรับสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.3

4.2.2 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่ time constant 100 ps

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 100 ps มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ของแกนโพลาไรเซชัน x และแกนโพลาไรเซชัน y โดยเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW

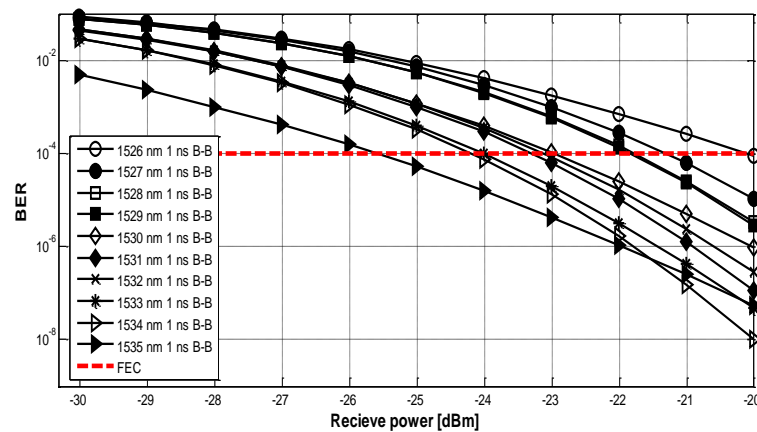
ก. back-to-back และ ข. fiber

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW บนความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 100 ps พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps ที่มีจำนวน symbol เท่ากับ 8

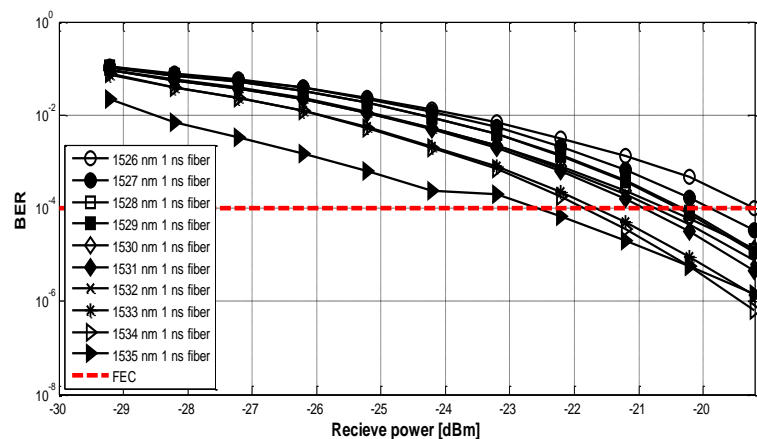
symbol ส่งด้วยระยะทาง 20 กิโลเมตร ระบบมีสมรรถนะสูงสุดที่กำลังรับสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) เท่ากับ -26.2 dBm และ -24.5 dBm ตามลำดับ ภายใต้ BER 10^{-4} ซึ่งกำลังรับสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.3

4.2.3 semiconductor optical amplifier (SOA) ที่ time constant 1 ns

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 1 ns มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y โดยเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

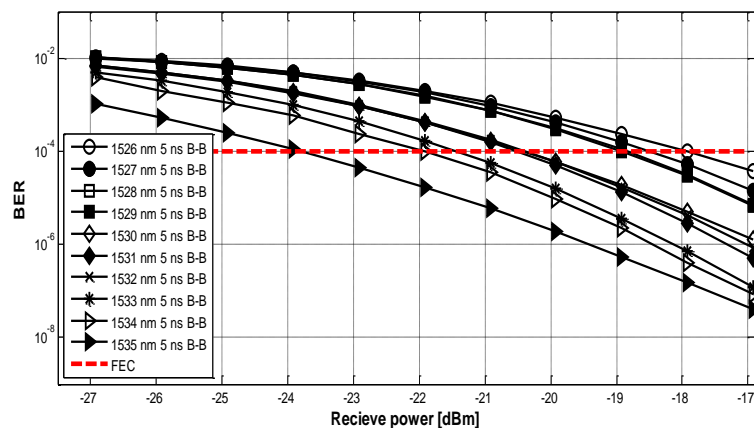
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA

ก. back-to-back และ ข. fiber

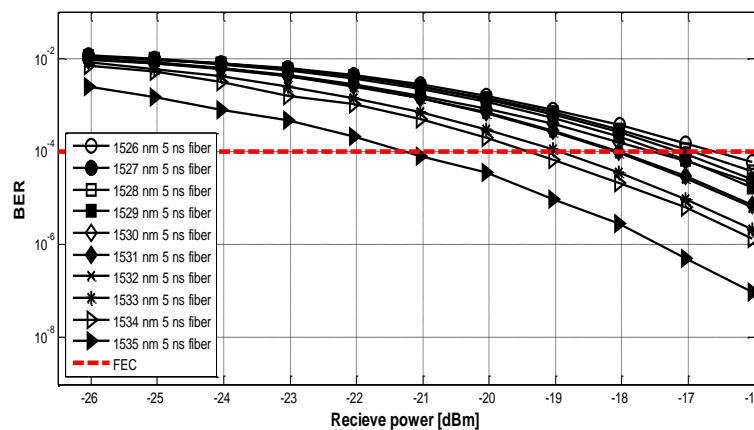
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA บนความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 1 ns พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps ที่มีจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol ส่งด้วยระยะทาง 20 กิโลเมตร ระบบมีสมรรถนะสูงสุดที่กำลังรับสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) เท่ากับ -25.8 dBm และ -22.5 dBm ตามลำดับ ภายใต้ BER 10^{-4} ซึ่งกำลังรับสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.3

4.2.4 electro-optic ที่ time constant 5 ns

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 5 ns มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร ส่งสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) ของแกนโพลาริเซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y โดยเปลี่ยนกำลังส่งสัญญาณจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic

ก. back-to-back และ ข. fiber

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic บนความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร จากผลการทดลอง WSS ที่มี time constant 5 ns พบว่า เมื่อส่งอัตราข้อมูล 1 Tbps ที่มีจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol ส่งด้วยระยะทาง 20 กิโลเมตร ระบบมีสมรรถนะสูงสุดที่กำลังรับสัญญาณทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) เท่ากับ -23.9 dBm และ -21.2 dBm ตามลำดับ ภายใต้ BER 10^{-4} ซึ่งกำลังรับสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.3

จากกราฟแสดงผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ทั้ง 4 ประเภท บนความยาวคลื่น 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุด 10 ความยาวคลื่น ซึ่งมีการลดทอนกำลังสัญญาณเป็นปัจจัยหลักที่จำกัดขีดความสามารถของระบบ ซึ่งความยาวคลื่นที่ 1535 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีที่สุด ซึ่งหากต้องการใช้อัตราข้อมูลน้อย จำนวน symbol ที่ต้องการใช้จะมีกำลังรับสัญญาณต่ำสุด แต่หากต้องการใช้อัตราข้อมูลมาก จะทำให้จำนวน symbol ที่ต้องการใช้มีกำลังรับสัญญาณมากขึ้น สามารถยอมรับได้ภายใต้ขีดจำกัด BER 10^{-4} ดังนั้นกำลังรับสัญญาณทั้งที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) สามารถสรุปกำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท แสดงในตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 กำลังรับสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท

Wavelength (nm)	Receive power [dBm]							
	GaAs photonic crystal cavities switch		GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)		Semiconductor optical amplifier switch (SOA)		Electro-optic switch	
	B-B	fiber	B-B	fiber	B-B	fiber	B-B	fiber
1526	-22.1	-21	-21.2	-20	-20	-19.2	-17.9	-16.5
1527	-23.1	-21.8	-22.4	-21.1	-21.2	-19.9	-18.5	-17
1528	-24.1	-21.9	-23.1	-21.5	-21.8	-20.2	-18.8	-17.3
1529	-24.4	-22.2	-23.2	-21.6	-23.3	-20.3	-18.9	-17.5
1530	-24.5	-22.5	-24.1	-21.7	-23	-20.6	-20.4	-17.4
1531	-25.8	-22.9	-24.2	-21.8	-22.9	-20.8	-20.5	-18

1532	-26.1	-23	-24.4	-21.9	-23.1	-20.9	-20.4	-18.1
1533	-26.3	-23.2	-25.1	-23	-24	-21.6	-21.5	-19
1534	-26.8	-24	-25.2	-23.2	-24.2	-21.9	-21.9	-19.4
1535	-27.1	-25.4	-26.3	-24.4	-25.6	-22.5	-23.9	-21.2

4.3 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ในเชิงระยะทาง

การจำลองระบบ CO-OFDM ด้วยการส่งอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรบนช่วง c band มีการมอดูเลตแบบ QPSK ถูกส่งสัญญาณผ่าน SMF ทำให้เกิดผลกระทบจากการลดทอนกำลังรับของสัญญาณและดีสเพอร์ชัน เป็นปัจจัยหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ ระบบนี้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย DSP ดังนั้นสมรรถนะการให้บริการในเชิงระยะทางของระบบ CO-OFDM บน fiber access network ถูกจำกัดจากการลดทอนสัญญาณเป็นปัจจัยหลัก จากที่กล่าวไปในบทที่ 3 ได้จำลองระบบโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ซึ่งมีอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณมากที่สุดบนช่วง c band หากส่งสัญญาณบนความยาวคลื่นอื่นในบนช่วง c band จะประสบความสำเร็จเช่นกัน ดังนั้นจึงออกแบบระบบให้มีสมรรถนะในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด เมื่อส่งสัญญาณผ่าน SMF ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร ซึ่งมีอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณน้อยสุดบนช่วง c band แสดงดังตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณบนช่วงความยาวคลื่น c band

Wavelength (nm)	Attenuation (dB/km)
1545	0.189339
1546	0.189296
1547	0.189262
1548	0.189237
1549	0.189222
1550	0.189216
1551	0.189220
1552	0.189234
1553	0.189258
1554	0.189292

4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ชนิดต่างๆ

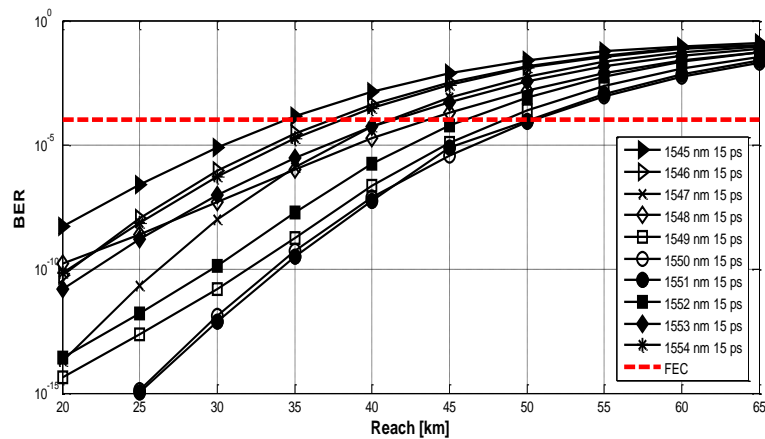
วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี time constant แตกต่างกัน ส่งอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps จำนวนบิตที่ส่ง 8192 บิต ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร โดยเลือกพิจารณาจำนวน symbol ที่ 8 symbol และ 16 symbol มีจำนวนคลื่นพาห่อย่อย 512 คลื่นพาห่ และ 256 คลื่นพาห่ ตามลำดับ การส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลมาก เมื่อเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยมากขึ้น จะส่งผลให้จำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณได้น้อยลง ทำให้ภาครับสัญญาณมีอัตราผิดพลาดน้อย แสดงดังตารางที่ 4.6

ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ CO-OFDM ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร

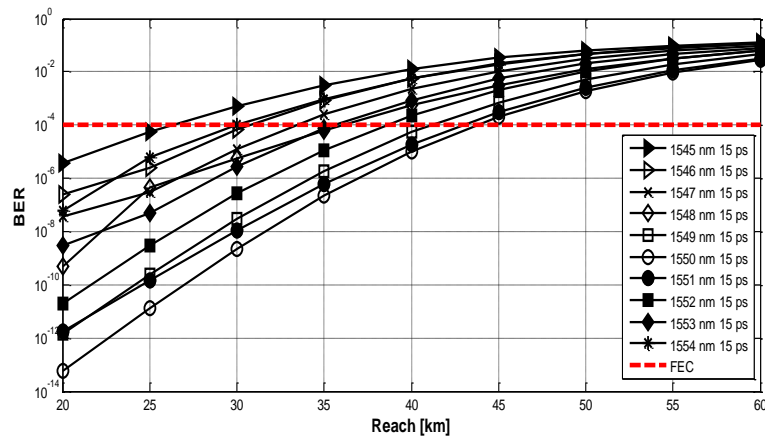
Parameter	Value
bit rate	1 Tbps
up-down conversion	50 GHz
Sequence length	8192 bit
number of subcarrier	256 subcarrier, 512 subcarrier

4.4.1 GaAs photonic crystal cavity ที่ time constant 15 ps

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 15 ps มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรผ่านเส้นใยแสง (fiber) โดยเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้มากขึ้นจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้จะได้อกราฟดังนี้



ก.



ข.

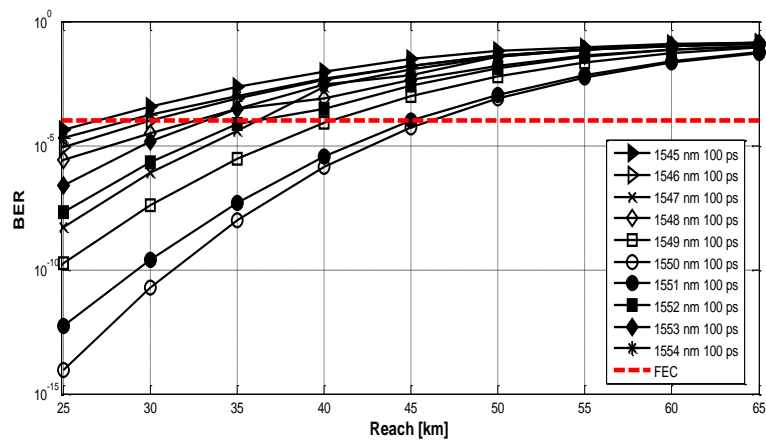
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity ก. จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol และ ข. จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด GaAs photonic crystal cavity จากผลการทดลองระบบ CO-OFDM เพื่อหาขีดจำกัดในเชิงระยะทางการให้บริการไกลสุด ส่งด้วยอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps บนความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณน้อยสุดบนช่วง c band พบว่า WSS ที่ time constant เท่ากับ 15 ps เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 50 กิโลเมตรบนความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol

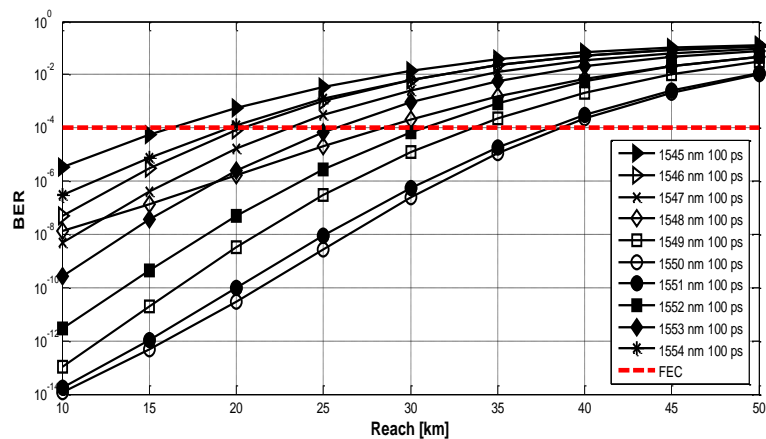
ความสามารถในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 44 กิโลเมตร ภายใต้ BER 10^{-4} สามารถสรุประยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 10 ความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 4.6

4.4.2 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่ time constant 100 ps

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 100 ps มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรผ่านเส้นใยแสง (fiber) โดยเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้มากขึ้น จนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้จะได้อกราฟดังนี้



ก.



ข.

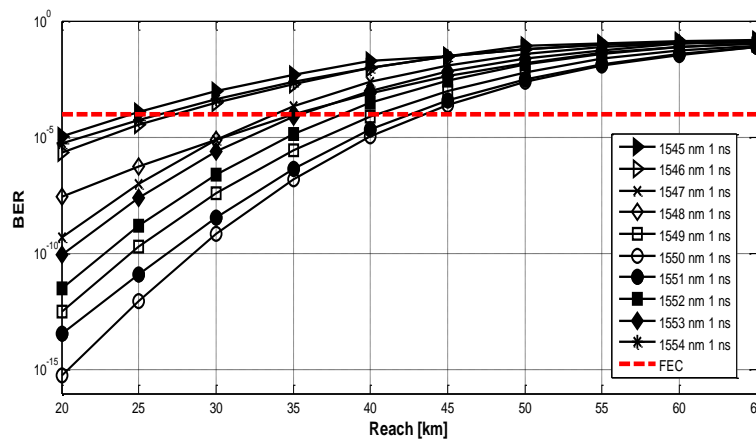
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด MQW

ก. จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol และ ข. จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol

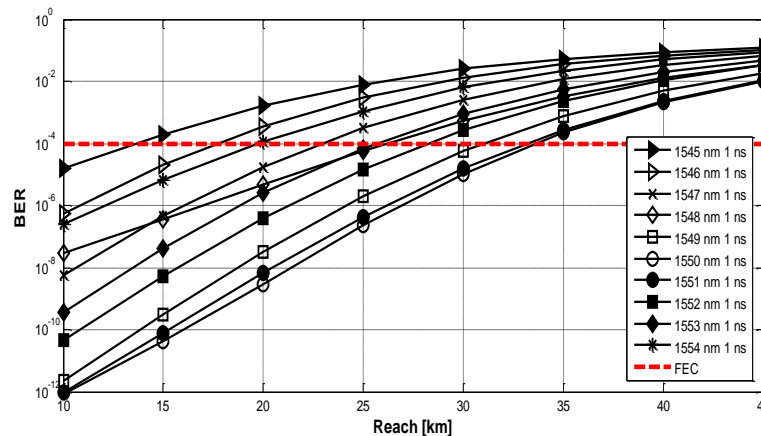
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด MQW จากผลการทดลองระบบ CO-OFDM เพื่อหาขีดจำกัดในเชิงระยะทางการให้บริการไกลสุด ส่งด้วยอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps บนความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณน้อยสุดบนช่วง c band พบว่า WSS ที่ time constant เท่ากับ 100 ps เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 47 กิโลเมตรบนความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol ความสามารถในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 38 กิโลเมตร ภายใต้ BER 10^{-4} สามารถสรุประยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 10 ความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 4.6

4.4.3 semiconductor optical amplifier (SOA) ที่ time constant 1 ns

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 1 ns มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรผ่านเส้นใยแสง (fiber) โดยเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้มากขึ้นจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้จะได้กราฟดังนี้



ก.



ป.

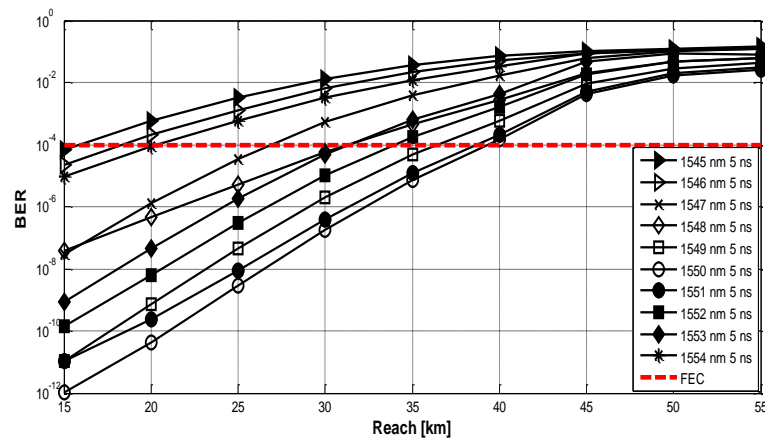
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด SOA

ก. จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol และ ข. จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol

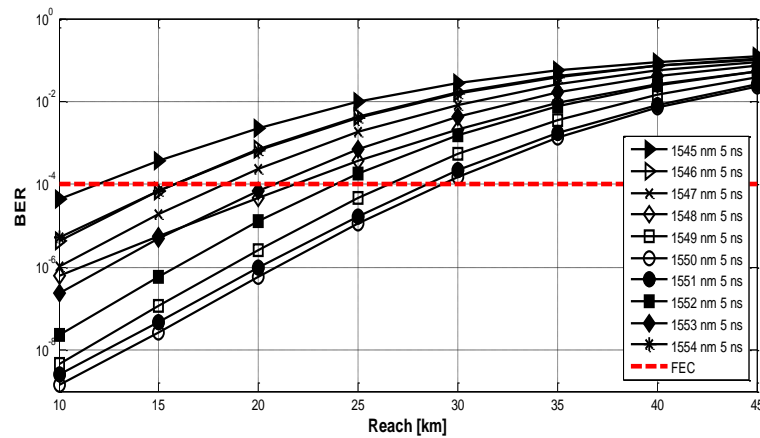
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด SOA จากผลการทดลองระบบ CO-OFDM เพื่อหาขีดจำกัดในเชิงระยะทางการให้บริการไกลสุด ส่งด้วยอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps บนความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณน้อยสุดบนช่วง c band พบว่า WSS ที่ time constant เท่ากับ 1 ns เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 43 กิโลเมตรบนความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol ความสามารถในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 33.5 กิโลเมตร ภายใต้ BER 10^{-4} สามารถสรุประยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 10 ความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 4.6

4.4.4 electro-optic ที่ time constant 5 ns

ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ที่มี time constant เท่ากับ 5 ns มีการจำลองระบบจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรผ่านเส้นใยแสง (fiber) โดยเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้มากขึ้นจนกระทั่งกำลังรับสัญญาณมีค่า BER ประมาณ 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้จะได้กราฟดังนี้



ก.



ข.

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทาง สำหรับ WSS ชนิด electro-optic ก. จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol และ ข. จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางการส่งสัญญาณสำหรับ WSS ชนิด electro-optic จากผลการทดลองระบบ CO-OFDM เพื่อหาขีดจำกัดในเชิงระยะทางการให้บริการไกลสุด ส่งด้วยอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps บนความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร ที่มีการลดทอนสัญญาณน้อยสุดในช่วง c band พบว่า WSS ที่ time constant เท่ากับ 5 ns เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 39 กิโลเมตรบนความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณด้วยจำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol ความสามารถในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด 28.5 กิโลเมตร ภายใต้ BER 10^{-4} สามารถสรุประยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 10 ความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 4.6

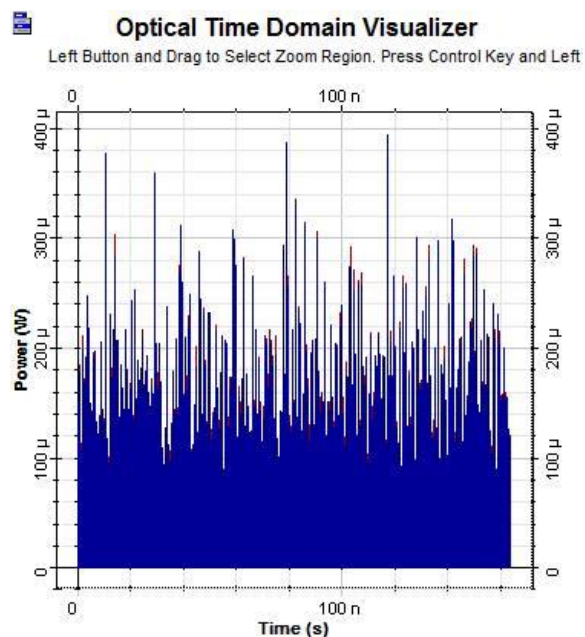
จากกราฟแสดงผลการจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ทั้ง 4 ประเภท สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุด 10 ความยาวคลื่น บนความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร ซึ่งมีการลดทอนกำลังสัญญาณเป็นปัจจัยหลักที่จำกัดขีดความสามารถของระบบ ซึ่งความยาวคลื่นที่ 1550 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุด ซึ่งหากต้องการใช้อัตราข้อมูลน้อย จำนวน symbol ที่ต้องการใช้จะมีกำลังรับสัญญาณต่ำสุดและสามารถส่งได้ระยะทางไกล แต่หากต้องการใช้อัตราข้อมูลมาก จะทำให้จำนวน symbol ที่ต้องการใช้มีกำลังรับสัญญาณมากขึ้นและส่งสัญญาณได้ระยะทางน้อยลง สามารถยอมรับได้ภายใต้ขีดจำกัด BER 10^{-4} ซึ่งสรุประยะทางในการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท แสดงในตารางที่ 4.6

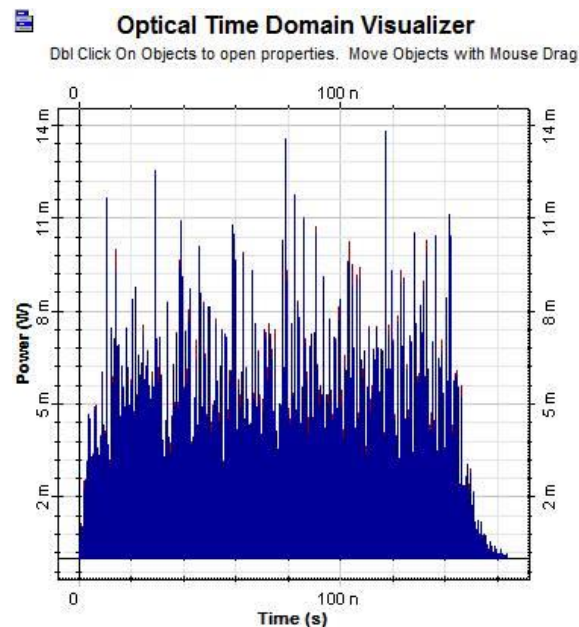
ตาราง 4.6 ระยะทางการส่งสัญญาณของ WSS ทั้ง 4 ประเภท ที่ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตรบนช่วง c band

Wavelength (nm)	reach [km]							
	GaAs photonic crystal cavities switch		GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)		Semiconductor optical amplifier switch (SOA)		Electro-optic switch	
	8 symbol	16 symbol	8 symbol	16 symbol	8 symbol	16 symbol	8 symbol	16 symbol
1545	35	26	27	16.5	24	14	16	12
1546	37.5	31	31	20.5	28	17.5	18	16
1547	41.9	33	37	23	34	23.3	27	18
1548	44	35.2	33	28	34.9	25.2	31	22
1549	47	42	41	34	41	31	36	27
1550	50.1	44	47	38	43.5	33.8	39	29
1551	50	43.5	45	37.5	43	33.7	38	28
1552	46	38	36	31	38	28	34	24
1553	42	35.1	33.5	26	36	25.1	31	21
1554	37.4	30	29	19	27	20	20	16

4.5 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ CO-OFDM ที่ได้รับผลกระทบจาก time constant

การส่งสัญญาณของระบบนี้จะทำงานร่วมกับ WSS โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบหากมีการสับสวิตช์คือ time constant ส่งผลให้เวลาในการสับสวิตช์ในการส่งสัญญาณ CO-OFDM ได้เร็วหรือช้ามันเอง ซึ่งหัวข้อนี้ยกตัวอย่างเปรียบเทียบการส่งสัญญาณที่มีค่า time constant เท่ากับ 15 ps. และ time constant เท่ากับ 5 ns ในรูปแบบของ optical time domain แสดงดังรูปที่ 4.41





จ.

รูปที่ 4.10 WSS ที่มีค่า time constant แตกต่างกัน ก. time constant เท่ากับ 15 ps.

และ ข. time constant เท่ากับ 5 ns.

จากรูปที่ 4.10 สังเกตได้ว่า การส่งสัญญาณของระบบนี้เมื่อใช้ WSS ที่มีค่า time constant น้อยจะมีประสิทธิภาพในการสับสวิตซ์ได้เร็วกว่า WSS ที่มีค่า time constant มาก เนื่องจากเวลาในการสับสวิตซ์ในรูป ข. ช้ากว่าการสับสวิตซ์ในรูป ก. ทำให้ช่วงเวลาแรกของการสับสวิตซ์ กราฟมีลักษณะค่อยๆเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล และเวลาในการสับสวิตซ์ที่ค่อนข้างช้านี้จะส่งผลให้ช่วงเวลาของการส่งสัญญาณตอนปลายเกิดสัญญาณที่ไม่ต้องการอีกด้วย ดังนั้น WSS ที่มีค่า time constant น้อยจะมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ดีกว่า WSS ที่มีค่า time constant มาก

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันการรับส่งอัตราข้อมูลมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองความต้องการจากผู้ให้บริการ มีการศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาตลอดเวลา การส่งข่าวสารในยุคเทคโนโลยีปัจจุบันได้นำการสื่อสารสัญญาณทางแสงมาประยุกต์ใช้ ซึ่งสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่าเทราบิตต่อวินาที ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาและออกแบบระบบของการสื่อสารสัญญาณให้สามารถตอบสนองความต้องการใช้แบนด์วิดท์ที่เพิ่มสูงอย่างมหาศาลจากผู้ให้บริการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอระบบที่มีความยืดหยุ่น สามารถจัดสรรแบนด์วิดท์เพื่อตอบสนองการบริการที่หลากหลายได้ตามความต้องการจากผู้ให้บริการ เช่น ผู้ให้บริการรายแรกต้องการติดต่อสื่อสารผ่าน video conference ส่วนผู้ให้บริการรายที่สองต้องการดาวน์โหลดเพลง เป็นต้น นั่นคือ ระบบ CO-OFDM ที่ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ซึ่งสามารถจัดสรรความยาวคลื่นไปยังผู้ให้บริการแต่ละรายที่มีความต้องการอัตราข้อมูลที่แตกต่างกัน เมื่อสัญญาณถูกส่งผ่าน SMF จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณและการลดทอนสัญญาณ ทำให้ได้รับสัญญาณผิดพลาด ระบบที่นำเสนอนี้สามารถชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ด้วย DSP ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ CO-OFDM คือ การลดทอนกำลังของสัญญาณ จึงได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อ switching characteristic ของ WSS แต่ละประเภทที่มี time constant แตกต่างกัน บนช่วงความยาวคลื่นที่ 1525 นาโนเมตร ซึ่งมีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนช่วง c band จากผลการจำลองระบบพบว่า WSS ที่มี time constant น้อย สามารถส่งสัญญาณได้เร็วกว่า ทำให้เวลาในการสับสวิตช์เร็ว ดังนั้นการส่งสัญญาณ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ WSS ที่มี time constant น้อย ความยาวคลื่นที่ 1525 นาโนเมตร จะเกิดแบนด์วิดท์ส่วนเกินบริเวณขอบของสัญญาณน้อยกว่า WSS ที่มี time constant มาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณที่ดีกว่า ซึ่งแบนด์วิดท์ส่วนเกินคือหากเวลาในการสับสวิตช์ช้าจะเกิดสัญญาณรบกวนมากขึ้น เป็นแบนด์วิดท์ที่ไม่ต้องการ ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง นอกจากนี้ตัวแปรสำคัญของ WSS ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ CO-OFDM ของระบบนี้ คือ จำนวน symbol จำนวนบิตที่ส่ง และจำนวนคลื่นพาห่อย่อย กล่าวคือเมื่อเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยให้มากขึ้น จะส่งผลให้จำนวน symbol ที่ส่งสัญญาณได้น้อยลง ทำให้ภาครับสัญญาณมีอัตราผิดพลาดน้อย ซึ่งการเพิ่มจำนวนคลื่นพาห่อย่อยให้มากขึ้นส่งผลให้ความยาวของสัญญาณลักษณะ CO-OFDM เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย จากผลการจำลองส่งอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 8192 บิต ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตรที่มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนช่วง c band มีสมรรถนะในการส่งสัญญาณทั้งแกนโพลาไร

เซชัน x และแกนโพลาริเซชัน y ได้จำนวน symbol สูงสุดเท่ากับ 16 symbol ภายใต้อัตรา 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ และมีกำลังรับสัญญาณดีที่สุดเมื่อใช้ WSS ประเภท GaAs photonic crystal cavity ที่ time constant 15 ps มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีที่สุดทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) โดยมีกำลังรับสัญญาณของแกนโพลาริเซชัน x เท่ากับ -20.7 dBm และ -20.5 dBm ตามลำดับ ส่วนแกนโพลาริเซชัน y เท่ากับ -21 dBm และ -20.5 dBm ตามลำดับ และมีสมรรถนะในการส่งสัญญาณของแกนโพลาริเซชัน x ได้ระยะทาง 19 กิโลเมตร และแกนโพลาริเซชัน y ได้ระยะทาง 20 กิโลเมตร ภายใต้อัตรา BER 10^{-4} เป็นขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ บนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตรที่มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนช่วง c band

ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ CO-OFDM ที่ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS หากส่งสัญญาณบนความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตรที่มีการลดทอนสัญญาณมากที่สุดบนช่วง c band บนความยาวคลื่นอื่นในช่วง c band จะประสบความสำเร็จเช่นกัน ดังนั้นจากผลการทดลองระบบที่มี 10 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูล 100 Gbps ต่อช่องสัญญาณ ระยะทาง 20 กิโลเมตร โดยจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1526 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตรไปยังผู้ใช้บริการ โดยใช้ WSS 4 ชนิด ที่มี time constant แตกต่างกันไปเลือกรับหรือส่งความยาวคลื่นโดยการควบคุมของ dynamic switching ทำหน้าที่จัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และจัดสรรให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ พบว่าข้อจำกัดระบบนี้ความยาวคลื่นที่มีอัตราลดทอนกำลังสัญญาณสูงเป็นปัจจัยที่จำกัดขีดความสามารถของระบบ ซึ่งกำลังรับสัญญาณดีที่สุดเมื่อใช้ WSS ประเภท GaAs photonic crystal cavity ที่ time constant 15 ps มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีที่สุดทั้งไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back) และผ่านเส้นใยแสง (fiber) เท่ากับ -27.8 dBm และ -25.5 ตามลำดับ สามารถสรุปเป็นแนวทางได้ว่าหากเลือกส่งสัญญาณบนความยาวคลื่นที่มีอัตราการลดทอนกำลังสัญญาณต่ำ จะทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงในการส่งสัญญาณ ดังนั้นการวิเคราะห์ระยะทางให้บริการสูงสุดกับผู้ใช้บริการ โดยส่งอัตราข้อมูลสูงสุด 1 Tbps ที่จำนวน 8 symbol และ 16 symbol บนความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร เป็นช่วงที่มีการลดทอนกำลังสัญญาณต่ำสุดบนช่วง c band ซึ่ง WSS ทั้ง 4 ประเภท มีสมรรถนะในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลสุดที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมการส่งสัญญาณ CO-OFDM ด้วยวิธีการมอดูเลชันรูปแบบอื่นเพิ่มเติม เช่น 16-QAM และ 32-QAM เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานหลากหลายมากขึ้น

รายการอ้างอิง

1. cisco, *Global mobile data traffic forecast*. 2014.
2. Yiyan, W. and B. Caron, *Digital television terrestrial broadcasting*. Communications Magazine, IEEE, 1994. 32(5): p. 46-52.
3. 24hrs, I. *IT technology 2014* 19 April]; Available from: <http://www.it24hrs.com/2014/korea-first-uhd-tv-channel/>
4. interesting, B., *NHK เตรียมส่งความชัด 8K ออกอากาศในปี 2020* 2014.
5. ฤกษ์บุตร, อ., *เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น*. 2003.
6. Hutcheson, L., *FTTx: Current Status and the Future*. Communications Magazine, IEEE, 2008. 46(7): p. 90-95.
7. แก้วปลั่ง, พ., *เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา Access networks*. 2014.
8. Sistemas, P.I.e., *Evolution of FTTH networks for NG-PON2.pdf*. 2014.
9. Wong, E., *Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies*. Lightwave Technology, Journal of, 2012. 30(4): p. 597-608.
10. Cvijetic, N., *OFDM for Next-Generation Optical Access Networks*. Lightwave Technology, Journal of, 2012. 30(4): p. 384-398.
11. Chandrasekhar, S. and L. Xiang, *OFDM Based Superchannel Transmission Technology*. Lightwave Technology, Journal of, 2012. 30(24): p. 3816-3823.
12. *Fiber to the home using a PON infrastructure, Fiber to the home using a PON infrastructure*,. Lightwave Technology, Journal of, 2006. 24: p. 4568-4583.
13. G.671, I.-T.R., *Transmission characteristics of optical components and subsystems*. 2012.
14. systems, O.f.c.a., *International Telecommunication Union*. 2009.
15. Armstrong, J., *OFDM for Optical Communications*. Lightwave Technology, Journal of, 2009. 27(3): p. 189-204.
16. Shieh, W., *OFDM for Flexible High-Speed Optical Networks*. Lightwave Technology, Journal of, 2011. 29(10): p. 1560-1577.

17. Chandrasekhar, S. and X. Liu. *400-Gb/s and 1-Tb/s superchannels using multi-carrier no-guard-interval coherent OFDM*. in *OptoElectronics and Communications Conference (OECC), 2010 15th*. 2010.
18. Ze, D., et al., *128-Gb/s Nyquist-WDM PDM-16QAM Generation and Transmission Over 1200-km SMF-28 With SE of 7.47 b/s/Hz*. *Lightwave Technology, Journal of*, 2012. 30(24): p. 4000-4005.
19. Qunbi, Z., B. Chatelain, and D.V. Plant. *Comparison of intra-channel nonlinearity tolerance between reduced-guard-interval CO-OFDM systems and nyquist single carrier systems*. in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*. 2012.
20. Le, S.T. *Power pre-emphasis for suppression of FWM in coherent optical OFDM transmission* Available from: <http://www.opticsinfobase.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-22-6-7238&id=282087>
21. Bosco, G., et al., *Performance Limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in High-Speed PM-QPSK Systems*. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2010. 22(15): p. 1129-1131.
22. Cheng, L., et al. *Joint ICI cancellation for superchannel coherent optical systems in nonlinear transmission regimes*. in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*. 2013.
23. Zhixue, H., et al. *Bandwidth-efficient LDPC coded CO-OFDM for 1-Tb/s superchannel 8000-km SSMF transmission*. in *Communications and Photonics Conference (ACP), 2012 Asia*. 2012.
24. Xinquan, Z., et al. *4x1.875-Tb/s transmission over 1280-km SSMF basing on superchannel coherent optical OFDM*. in *Communications and Photonics Conference (ACP), 2012 Asia*. 2012.
25. Ling, L., et al. *Initial tap setup of constant modulus algorithm for polarization de-multiplexing in optical coherent receivers*. in *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*. 2009.

26. Xiao, X., et al. *A 240 Gb/s self-coherent CO-OFDM transmission applying real-time reception over 48 KM SSMF*. in *Photonics Global Conference (PGC), 2012*. 2012.
27. da Silva, E.P., et al. *450 Gb/s CO-OFDM DP-QPSK superchannels for long-haul transmission with High Spectral Efficiency*. in *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International*. 2013.
28. Keiser, G., *Optical fiber communications 3rd edition*. 2000.
29. S, P., *Introduction OFDM and Its PAPR drawback*.
30. Richard van Nee, R.P., *OFDM for wireless multimedia communications*. 2000.
31. ดวงจรัส, ช., การส่งผ่านสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแสงบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ, in *วิศวกรรมไฟฟ้า*. 2010, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: บัณฑิตวิทยาลัย
32. Thorlabs. *SOA1013SXS - 1550 nm Polarization-Independent Optical Shutter/Switch, Butterfly, SMF, FC/APC*. Available from: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SOA1013SXS>.
33. Nashimoto, K. *Nano Nano-Speed PLZT Optical Switches*. Available from: http://www.nren.nasa.gov/workshops/pdfs9/PanelE_OpticalSwitches-Nashimoto.pdf.
34. S.Ponmalar, S.S., *Design of Ultra Fast Polymer Electro-Optic waveguide Switch for Intelligent Optical Networks*, in *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009.
35. Lei, X., et al. *Coherent Optical OFDM Systems Using Self Optical Carrier Extraction*. in *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on*. 2008.
36. Okoshi, T., *Recent advances in coherent optical fiber communication systems*. *Lightwave Technology, Journal of*, 1987. 5(1): p. 44-52.
37. Networks, I.S.f.I.T.T.a.I.E.B.S.L.a.M.A., *Specific Requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks, IEEE Standard 802.3av* Oct. 2009.





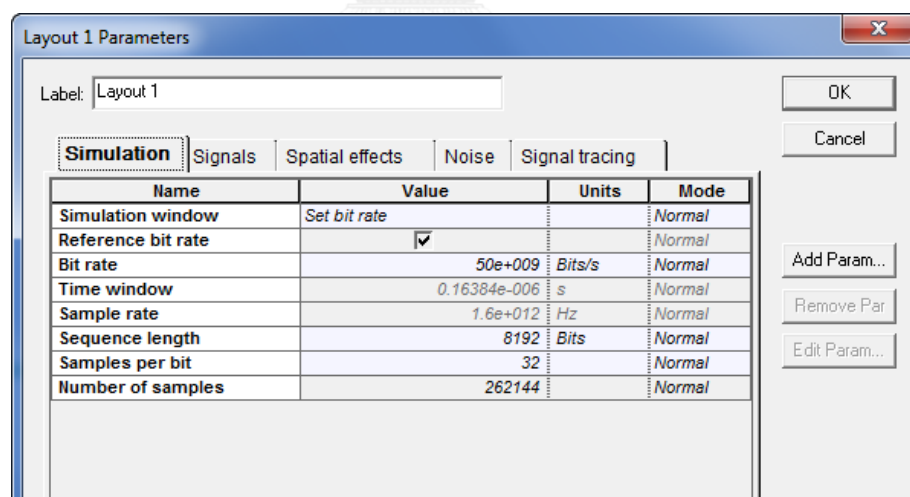
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โครงสร้างการออกแบบจำลองระบบ CO-OFDM ทำงานร่วมกับ self-coherent detection และ WSS ด้วยโปรแกรม optisystem software version 10 แสดงการกำหนดค่าตัวแปรของอุปกรณ์ที่ใช้จำลองระบบ CO-OFDM ส่วนแรกกล่าวถึง การกำหนดค่าตัวแปรหลัก (global parameter) ส่วนที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบตัวส่งสัญญาณ (OLT) ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง (SMF ITU-T G.652.D) ส่วนที่ 4 กล่าวถึง WSS ออกแบบด้วยโปรแกรม matlab จากนั้นนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรม optisystem software ส่วนสุดท้ายกล่าวถึงการออกแบบตัวรับสัญญาณ (ONU) อุปกรณ์ชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (DSP) และอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราบิดผิดพลาดออกแบบด้วยโปรแกรม matlab จากนั้นนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรม optisystem software

global parameter

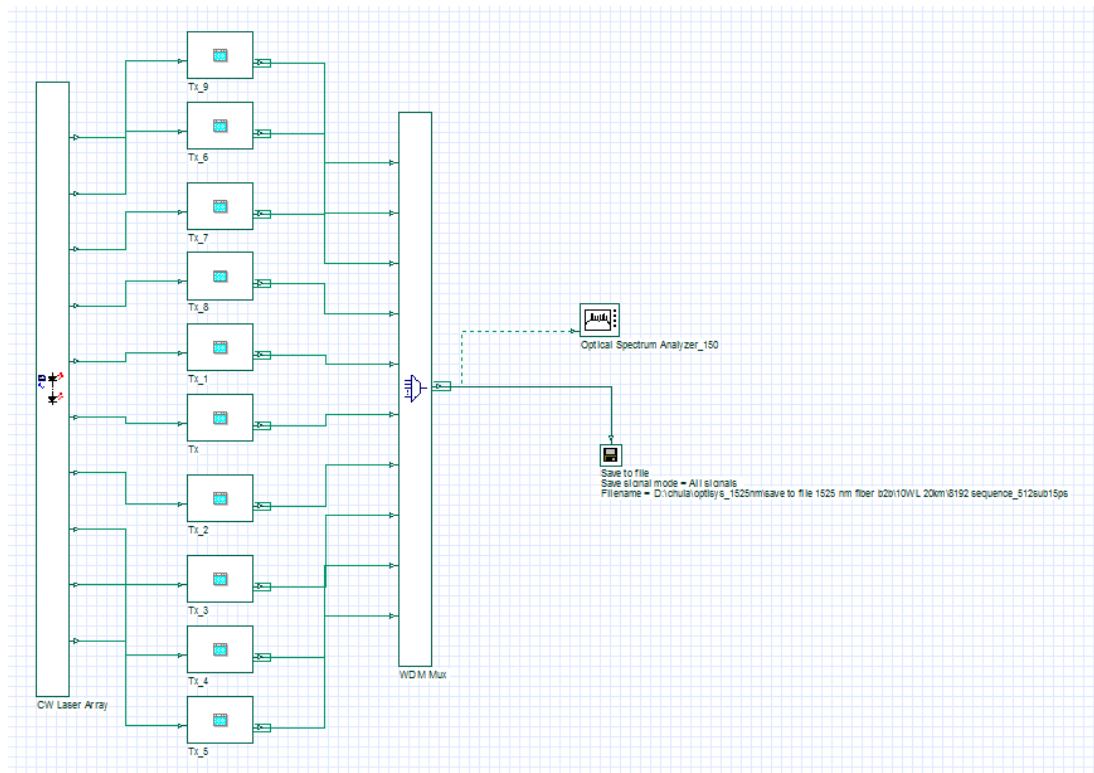
การกำหนดค่า global parameter ของระบบ CO-OFDM ได้แก่ อัตราข้อมูลของระบบ (bit rate) เท่ากับ 50 Gbps ต่อ 1 แคนโพลาไรเซชัน จำนวนบิตที่ส่งสัญญาณ (sequence length) เท่ากับ 8192 บิต และอัตราการสุ่มสัญญาณช่วงเวลา 1 คาบ (sample per bit) เท่ากับ 32 แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ค่า global parameter ของระบบ CO-OFDM

optical line terminal (OLT)

ตัวส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM ประกอบด้วย CW laser array ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแสงโดยกำหนดให้ใช้ความยาวคลื่นบนช่วง c band นำไปต่อกับตัวส่งสัญญาณ แล้วรวมทุกสัญญาณที่อุปกรณ์ WDM multiplexing มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 100 GHz เพื่อส่งไปยังเส้นใยแสง ในกรณีที่ใช้ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร กำหนดให้ใช้ย่านความถี่เท่ากับ 196.537 THz ถึง 195.337 THz และในกรณีที่ใช้ความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร กำหนดให้ใช้ย่านความถี่เท่ากับ 194.037 THz ถึง 192.937 THz แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ภาคส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM

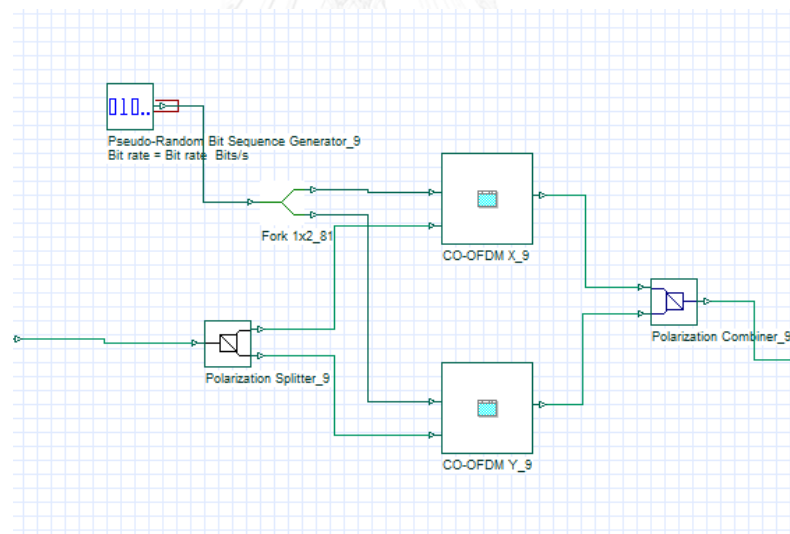
โครงสร้างภายในตัวส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM ประกอบด้วย pseudo-random bit sequence generator ทำหน้าที่สร้างบิตสัญญาณแบบสุ่ม ซึ่งจะส่งสัญญาณทั้งแกนโพลาไรเซชัน x และแกนโพลาไรเซชัน y โดยใช้อุปกรณ์กระจายสัญญาณ (polarization splitter) ต่อมาสัญญาณจะถูกมอดูเลตที่อุปกรณ์ PSK กำหนดให้มีจำนวนบิตต่อ symbol เท่ากับ 2 หลังจากนั้นส่งไปที่อุปกรณ์

OFDM modulator เพื่อกำเนิดสัญญาณพาหะที่มีลักษณะตั้งฉากกัน โดยการกำหนดจำนวนคลื่นพาห่อย่อย (number of subcarrier) ขึ้นอยู่กับจำนวน symbol ที่ต้องการจะส่งสัญญาณ แสดงดังตารางที่ ก.1

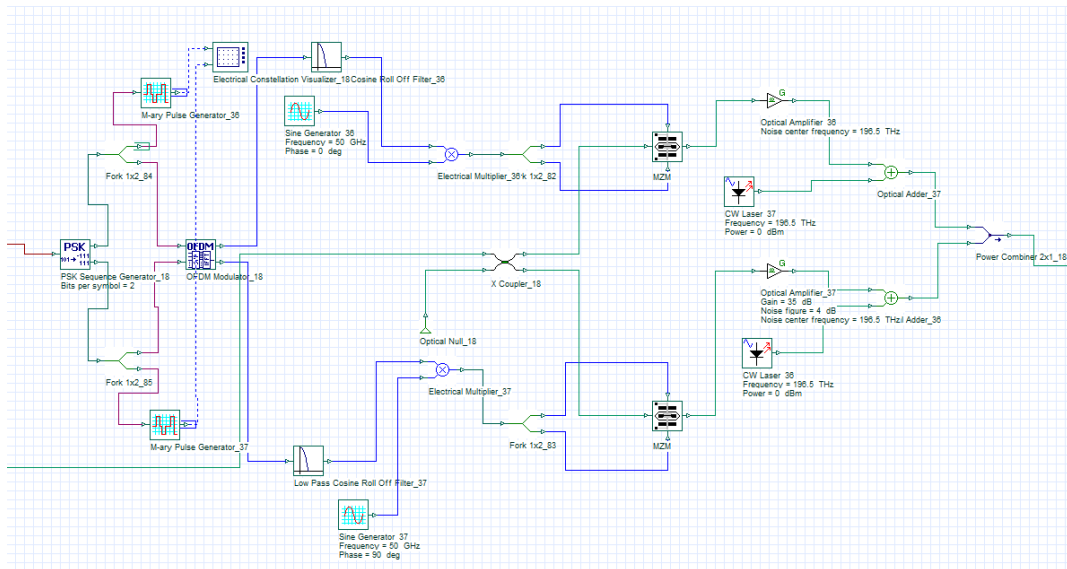
ตารางที่ ก.1 จำนวนคลื่นพาห่อย่อยสำหรับระบบ CO-OFDM

Number of symbol	Number of subcarrier
4	1024
8	512
16	256
32	128

จากนั้นกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการด้วยอุปกรณ์ LPF แล้วทำการ up conversion เพื่อมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ด้วยอุปกรณ์ sine generator ที่ความถี่ 50 GHz ต่อมาสัญญาณจะถูกมอดูเลตสัญญาณทางแสงด้วยอุปกรณ์ mach-zehnder modulator (MZM) จะได้สัญญาณ CO-OFDM ที่ภาคส่งแสดงดังรูปที่ ก.3



a.



b.

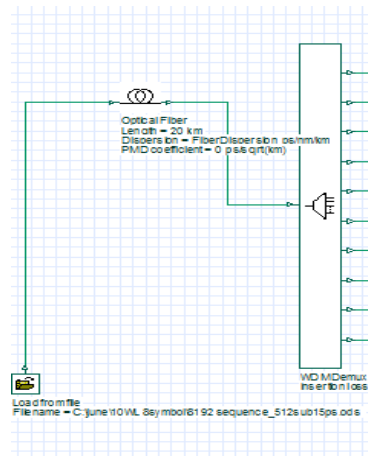
รูปที่ ก.3 โครงสร้างการจำลองระบบ CO-OFDM a. การส่งสัญญาณบนแกนโพลาริเซชัน x, y

และ

b. อุปกรณ์ภายในของภาคส่งสัญญาณระบบ CO-OFDM

เส้นใยแสง

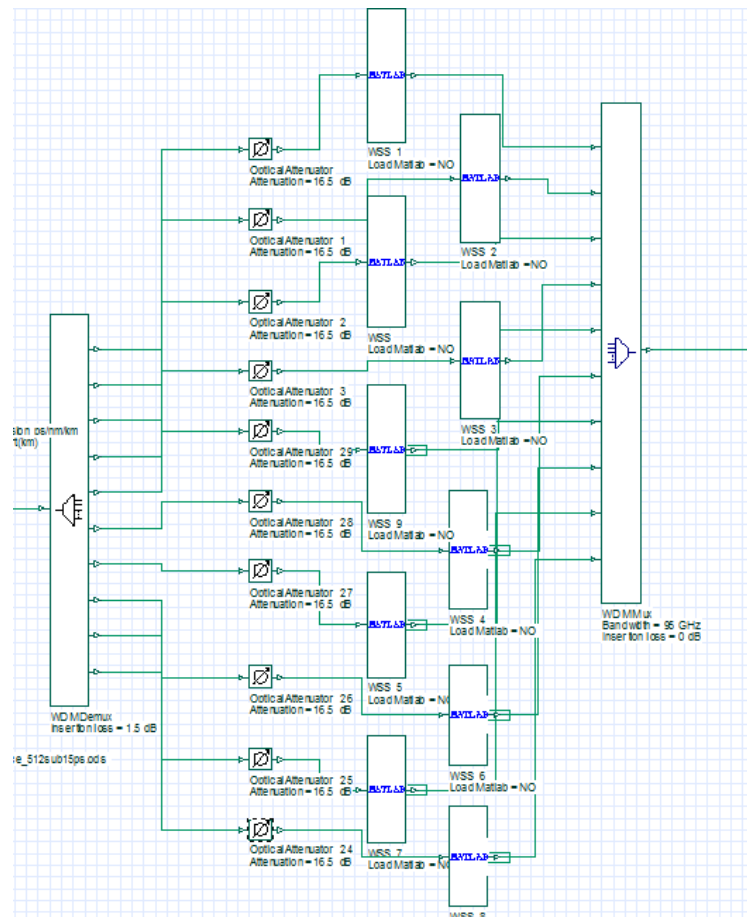
การกำหนดค่าตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักในการจำกัดสมรรถนะของระบบ CO-OFDM คือ การลดทอนกำลังสัญญาณ ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าการลดทอนกำลังสัญญาณแตกต่างกัน ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 สำหรับความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ถึง 1535 นาโนเมตร และตารางที่ 4.4 สำหรับความยาวคลื่น 1545 นาโนเมตร ถึง 1554 นาโนเมตร นอกจากนี้ความยาวเส้นใยแสงเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของการส่งสัญญาณระบบ CO-OFDM จากนั้นสัญญาณจะแยกแต่ละความยาวคลื่นด้วยอุปกรณ์ WDM de-multiplexing แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 การส่งสัญญาณระบบ CO-OFDM ผ่านเส้นใยแสง

wavelength selective switching (WSS)

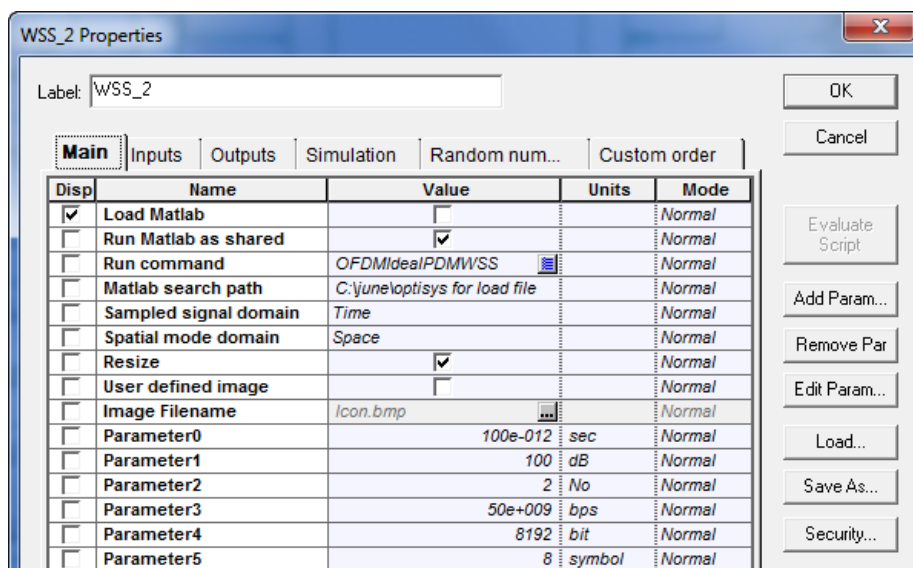
สัญญาณถูกส่งมาที่ WSS จะจัดสรรความยาวคลื่นไปยังภาครับสัญญาณ ในส่วนนี้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม matlab แล้วนำมาทำงานร่วมกับโปรแกรม optisystem ซึ่ง WSS แต่ละชนิดมีค่า insertion loss แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 สามารถกำหนดค่า insertion loss จากอุปกรณ์ optical attenuator จากนั้น WSS จะจัดสรรความยาวคลื่นไปยัง ONU ตามที่ผู้ใช้บริการร้องขอสัญญาณ โดยรวมสัญญาณเพื่อส่งไปยังผู้ใช้บริการแต่ละรายด้วยอุปกรณ์ WDM multiplexer แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 แบบจำลองระบบ CO-OFDM ในส่วนของ WSS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

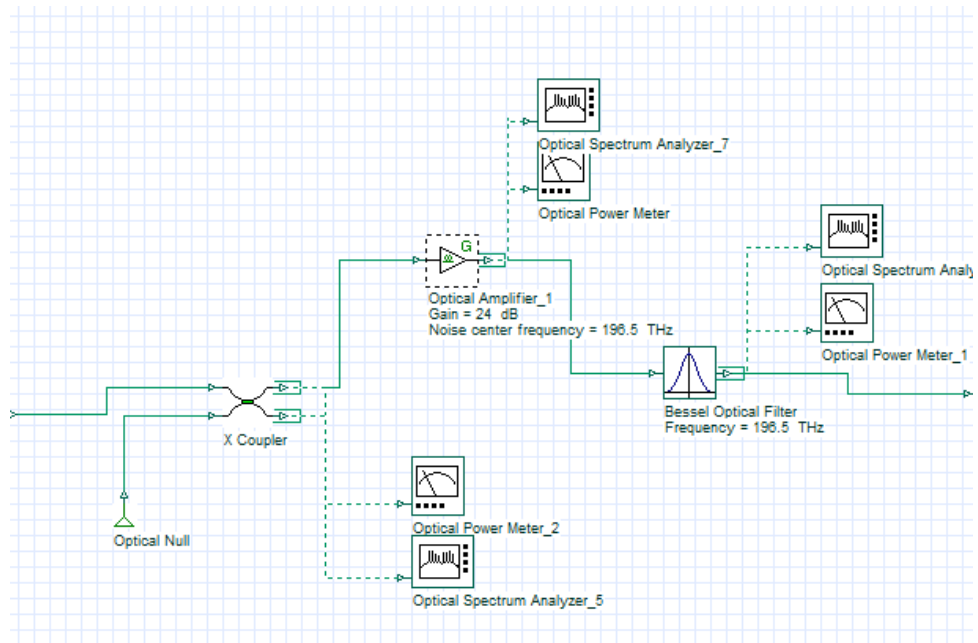
จากรูปที่ ก.6 แสดงการกำหนดค่าตัวแปรของ WSS ได้แก่ การเรียกโปรแกรมจาก matlab เพื่อทำงานร่วมกับ optisystem กำหนดชื่อไฟล์ที่ run command แล้วทำการเลือกไฟล์ข้อมูลที่ต้องการใช้งานที่ matlab search path โดย parameter 0 หมายถึงค่า time constant ของ WSS แต่ละประเภท parameter 1 หมายถึง ความลึกของการสับสวิตช์ นั่นคือความแรงของแสงในการส่งสัญญาณจากพอร์ตหนึ่งไปยังอีกพอร์ต parameter 2 หมายถึง ลำดับของ WSS parameter 3 หมายถึง อัตราข้อมูลต่อ 1 แคนโพลาริเซชัน parameter 4 หมายถึง จำนวนบิตที่ส่งเท่ากับ 8192 บิต parameter 5 หมายถึง จำนวน symbol parameter 6 หมายถึง จำนวน symbol ที่สวิตช์



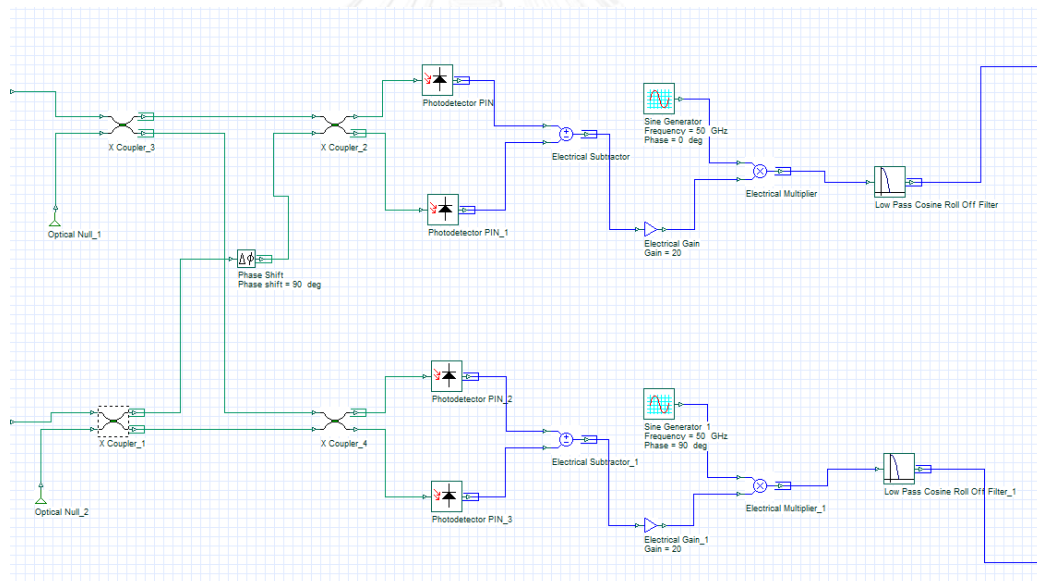
รูปที่ ก.6 ตัวแปรต่างๆของ WSS

optical network unit (ONU)

ภาครับสัญญาณประกอบด้วย self-coherent detection โดย band pass filter ทำหน้าที่กรองคลื่นพาห้หลักมาใช้เพื่อทำหน้าที่แทน LO จากนั้นในส่วนของโคฮีเรนต์ทั้งแกนโพลาริเซชัน x และ Y ตรวจจับสัญญาณด้วยอุปกรณ์ photodetector PIN เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีค่า dark current เท่ากับ 10 nA และ thermal noise เท่ากับ $12.826 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ แล้วทำการ down conversion เพื่อตีความสัญญาณทางไฟฟ้า RF ด้วยอุปกรณ์ sine generator ที่ความถี่ 50 GHz และกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการด้วยอุปกรณ์ LPF จากนั้นทำกระบวนการย้อนกลับจาก OLT ที่กล่าวในข้างต้นแล้วแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากอุปกรณ์ DSP จะได้สัญญาณข้อมูลของระบบ CO-OFDM ออกมา ดังแสดงในรูปที่ ก.7



a.



b.

รูปที่ ก.7 โครงสร้างของ a. self-coherent detection และ ข. coherent detection

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภััสสรวิภา วิจารณ์สถิตย์ เกิดวันพุธที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ใน งานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

1. บทความวิชาการในงานประชุม The 29th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC) จัดขึ้น ณ โรงแรม Phuket Graceland resort and spa จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย ในวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ.2557 ในชื่อบทความเรื่อง Evaluation in the Performance of Superchannel Coherent Optical OFDM Signal Transmission and Its Application to Fiber Access Network

2. บทความวิชาการในงานประชุม The 17th IEEE International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT) จัดขึ้น ณ โรงแรม Phoenix park ประเทศเกาหลี ในวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ.2558 ในชื่อบทความเรื่อง A Flexible Fiber Access Network Using Superchannel Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing