

การส่งสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ระยะทางไกลถึงจุดต่อจุดซึ่งใช้การสังยุคเฟสแสง



นายทศพล แจ่มกาญจนโลหะ

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 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LONG-HAUL COHERENT OPTICAL OFDM POINT-TO-
POINT TRANSMISSION USING OPTICAL PHASE CONJUGATION

Mr. Thosaphon Jaemkarnjanaloha



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

ทศพล แจ่มภาณูจนโละหะ : การส่งสัญญาณโอเอฟดีเอ็มทางแสงแบบโคฮีเรนต์ระยะทางไกลถึงจุดต่อจุดซึ่งใช้การสังยุคเฟสแสง (LONG-HAUL COHERENT OPTICAL OFDM POINT-TO-POINT TRANSMISSION USING OPTICAL PHASE CONJUGATION) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 102 หน้า.

การสื่อสารทางแสงระยะทางไกลยิ่งในระดับหลายพันกิโลเมตรแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ผ่านเส้นใยแสงนั้น จะเกิดผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ รวมไปถึงความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจากผลของดิสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงผ่านปรากฏการณ์เคอร์ อย่างไรก็ตามเราสามารถชดเชยผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง รวมไปถึงลดผลของดิสเพอร์ชันที่ส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากการกว้างออกทางด้านแกนเวลา และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงผ่านปรากฏการณ์เคอร์ได้โดยใช้วิธีสังยุคเฟสแสง optical phase conjugation (OPC) นอกเหนือจากนี้เราอาจใช้วิธีมอดูเลตสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงมาแก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณร่วมด้วยได้ วิธีมอดูเลตสัญญาณที่สามารถลดปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้วิธีหนึ่งคือ วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห์ หรือการมอดูเลตแบบ coherent optical-orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) ด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำต่อหนึ่งคลื่นพาห์ย่อย แต่ใช้คลื่นพาห์ย่อยจำนวนมากในการส่งผ่านข้อมูลไป จึงทำให้เกิดสัญญาณ CO-OFDM ที่มีอัตราเร็วข้อมูลสูงได้ ผลก็คือ ช่องสัญญาณต่าง ๆ จะเป็นอิสระต่อกัน และสามารถทนต่อดิสเพอร์ชันได้รวมทั้งใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบในการส่งสัญญาณให้ดียิ่งขึ้นจึงได้มีการนำเอาเทคนิคมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ Superchannel มาประยุกต์รวมในระบบ ซึ่งก็คือการนำเอาสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันมามัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสง โดยที่ความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณจะต้องอยู่ห่างกันมีค่าเท่ากับสองเท่าของความถี่ในควิสต์ (Nyquist frequency) ข้อดีของการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ Superchannel คือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth efficiency) และสามารถใช้แบนด์วิดท์ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการส่งผ่านสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลถึงจุดต่อจุด ซึ่งใช้การสังยุคเฟสแสง ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s รวมถึงวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM เช่น จำนวนคลื่นพาห์ย่อยของสัญญาณ CO-OFDM อัตราข้อมูลต่อคลื่นพาห์ย่อย ความยาวคลื่นของคลื่นพาห์หลัก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระยะทางที่มากที่สุดที่ส่งไปได้ เป็นต้น จากการจำลองระบบพบว่าประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 24,600 กิโลเมตร ณ ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670208721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: LONG-HAUL TRANSMISSION / COHERENT OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (CO-OFDM) / OPTICAL PHASE CONJUGATION (OPC) / SUPERCHANNEL

THOSAPHON JAEMKARNJANALOHA: LONG-HAUL COHERENT OPTICAL OFDM POINT-TO-POINT TRANSMISSION USING OPTICAL PHASE CONJUGATION. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 102 pp.

Long-haul optical fiber transmissions with data rates beyond Tb/s are next generation transmission systems to support consumer applications. The performance of the optical transmission system is limited by the waveform distortion induced from signal attenuation, the fiber dispersion and the nonlinear Kerr effect of optical fiber. The signal attenuation due to the fiber loss is periodically compensated by using the optical amplifier gains. Moreover, we can mitigate the effect of the dispersion and the nonlinear waveform by using midway optical phase conjugation (OPC). We can also use the advance modulation formats to increase the bandwidth efficiency. One of the modulation methods that can yield the highest bandwidth efficiency in optical fiber transmission is the coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM). CO-OFDM has the advantage of a well-defined power spectrum that enables superchannel transmission achieving an ultra-high spectral efficiency. In addition, CO-OFDM utilises available fiber bandwidth very efficiency since each subcarrier can be placed with channel spacing equivalent to the Nyquist frequency. These closely packed carriers in a WDM system collectively form a superchannel. Thus, Polarization Division Multiplexed (PDM) CO-OFDM superchannel is an efficiency system for long-haul high-capacity optical transmission system.

This dissertation propose the use of midway OPC to improve the performance of long-distance PDM-CO-OFDM transmission system by employing midway OPC. The system is designed to show the optimum number of sub-carriers, amplifier spacing and the maximum achievement reach at data rate 1Tb/s (10 x 100 Gb/s). The system is simulated with 10-WDM superchannel at 50 GHz channel spacing. From the simulation results, PDM-CO-OFDM, with midway OPC and the optimum system parameters, we can achieve the maximum reachable distance of 24,600 km at BER 4×10^{-3} .

Department: Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับหลักการและแนวคิดต่าง ๆ รวมไปถึงการคิดเชิงวิเคราะห์และเชิงวิพากษ์ ตลอดจนคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์ที่เป็นแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีธิกุลกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย รวมไปถึงซอฟต์แวร์ OptiSystem 10.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมหลักที่ใช้สำหรับการทดสอบผลในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนาย รชฎ มณีชาติ นิสิตชั้นปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์อย่างเต็มที่ ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้อง ในห้องปฏิบัติการวิจัยชั้น 13 ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือกันตลอดมารวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา สิ่งที่ได้รับจากทุกคนล้วนเป็นส่วนสำคัญในการรังสรรค์ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จ ดังนั้นจึงไม่มีคำกล่าวใด ๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	8
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	8
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	10
2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	10
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง.....	11
2.3 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณ CO-OFDM.....	12
2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (fiber attenuation).....	12
2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion).....	13
2.3.2.1 ดิสเพอร์ชัน (group velocity dispersion).....	14
2.3.2.2 ความชันดิสเพอร์ชัน (Dispersion slope).....	17
2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity).....	18
2.3.3.1 Self-phase modulation (SPM).....	19

2.3.3.2 Cross-phase modulation (XPM)	20
2.3.3.3 Four-wave mixing (FWM).....	22
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของการมอดูเลตสัญญาณที่เกี่ยวข้อง	24
2.4.1 การมอดูเลตสัญญาณแบบ Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	24
2.4.2 การมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM.....	25
2.4.2.1 การสร้างสัญญาณ CO-OFDM	27
2.4.2.2 guard interval และ cyclic prefix.....	28
2.4.2.3 เทคโนโลยี optical coherent detection.....	29
2.4.2.4 ภาคส่งและภาครับสัญญาณ OFDM	30
2.4.3 การส่งสัญญาณแบบ Superchannel.....	31
2.5 เครื่องสังยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugator: OPC).....	32
2.5.1 การกำเนิดสังยุคของสัญญาณ (Conjugated signal).....	35
2.5.2 ชนิดของ OPC	36
2.5.2.1 เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น.....	36
2.5.2.2 เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น.....	37
บทที่ 3 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งสัญญาณ CO-OFDM แบบจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC.....	38
3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ	38
3.2 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ	39
3.3 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel.....	40
3.4 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC.....	43
3.5 จำนวนคลื่นพหุย่อยที่ใช้สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC.....	44

3.5.1 จำนวนคลื่นพาร์ย่อยเท่ากับ 128 คลื่นพาร์.....	46
3.5.2 จำนวนคลื่นพาร์ย่อยเท่ากับ 256 คลื่นพาร์.....	47
3.5.3 จำนวนคลื่นพาร์ย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาร์.....	48
3.5.4 จำนวนคลื่นพาร์ย่อยเท่ากับ 1024 คลื่นพาร์.....	49
3.5.5 จำนวนคลื่นพาร์ย่อยเท่ากับ 2048 คลื่นพาร์.....	50
3.5.6 การวิเคราะห์จำนวนคลื่นพาร์ย่อยที่ใช้สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC.....	51
บทที่ 4 สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC.....	53
4.1 ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกล ยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC	53
4.1.1 ผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ.....	53
4.1.2 ผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง	54
4.1.3 ผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง.....	56
4.2 วิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด โดยการจำลองระบบแบบ back-to-back.....	58
4.2.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm.....	59
4.2.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm.....	60
4.2.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm.....	61
4.2.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm.....	62
4.2.5 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm.....	63
4.3 วิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC	64
4.3.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm.....	64

4.3.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm.....	69
4.3.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm.....	73
4.3.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm.....	77
4.3.5 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm.....	81
4.4 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC ที่ระบบสามารถส่งไปได้	85
4.4.1 การจำลองระบบระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ back-to-back.....	85
4.4.2 การจำลองระบบระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC	86
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	88
5.1 บทสรุป	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
รายการอ้างอิง	90
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	102

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลต และเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลต แบบ 4-QAM	24
ตารางที่ 3.1 ความยาวคลื่นและความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณของระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel	41
ตารางที่ 3.2 จำนวนจำนวนคลื่นพาห่อย่อย จำนวนบิต และจำนวนสัญลักษณ์สำหรับระบบ PDM- CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM.....	45
ตารางที่ 3.3 จำนวนจำนวนคลื่นพาห่อย่อยและกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ.....	52
ตารางที่ 4.1 อัตราการขยายสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง	54
ตารางที่ 4.2 ค่าดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองระบบของแต่ละช่องสัญญาณ.....	55
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D.....	57

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของแต่ละภูมิภาค ในปี ค.ศ. 2015 ถึง ค.ศ. 2020	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	10
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกำลังงาน และความยาวคลื่นที่ผลิตมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970.....	13
รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	14
รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น	15
รูปที่ 2.5 การเกิด Inter-symbol interference (ISI)	15
รูปที่ 2.6 ผลของดิสเพอร์ชันอันดับสามต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) สัญญาณพัลส์ขาเข้า (ข) สัญญาณพัลส์ขาออก (ค) สัญญาณสเปกตรัมขาเข้า และ (ง) สัญญาณสเปกตรัมขาออก.....	18
รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) ทางความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ.....	20
รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	21
รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	22
รูปที่ 2.10 constellation สัญญาณที่มอดูเลตแบบ 4-QAM.....	25
รูปที่ 2.11 สเปกตรัมสัญญาณ (ก) สัญญาณ FDM ที่คลื่นพายุย่อยไม่มีการซ้อนทับกัน และ (ข) สัญญาณ OFDM ที่คลื่นพายุย่อยมีการซ้อนทับกันแบบตั้งฉากซึ่งกันและกัน.....	26
รูปที่ 2.12 สเปกตรัมของสัญญาณ CO-OFDM.....	26
รูปที่ 2.13 การมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM	28
รูปที่ 2.14 การเติม guard interval โดยใช้สัญญาณเท่ากับ 0.....	29
รูปที่ 2.15 การทำ cyclic prefix extension.....	29
รูปที่ 2.16 โครงสร้างภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM ที่ใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์	30

รูปที่ 2.17 โครงสร้างภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM.....	30
รูปที่ 2.18 โครงสร้างภาครับของสัญญาณ CO-OFDM	31
รูปที่ 2.19 สเปกตรัมของสัญญาณแบบ Superchannel.....	32
รูปที่ 2.20 โครงสร้างการส่งสัญญาณของระบบ Superchannel CO-OFDM	32
รูปที่ 2.21 โครงสร้างการส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลาง ของระบบ	33
รูปที่ 2.22 กระบวนการส่งยุคเฟสแสง	34
รูปที่ 2.23 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในระบบการสื่อสารผ่าน เส้นใยแสง.....	34
รูปที่ 2.24 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตชนิดเลื่อนความยาวคลื่น	36
รูปที่ 2.25 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น.....	37
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของระบบ CO-OFDM ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM.....	38
รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของระบบ CO-OFDM ที่ทำการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM	39
รูปที่ 3.3 โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM-CO-OFDM.....	40
รูปที่ 3.4 โครงสร้างภาครับของระบบ PDM-CO-OFDM	40
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel.....	42
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC	43
รูปที่ 3.7 (ก) constellation ของสัญญาณ CO-OFDM ที่มีการมอดูเลตแบบ 4-QAM ไม่มีที่มี การติดตั้ง OPC (ข) constellation ของสัญญาณ CO-OFDM ที่มีการมอดูเลต แบบ 4-QAM ที่มีการติดตั้ง OPC	44
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO- OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 128	46
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO- OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 256	47

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512	48
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 1024	49
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 2048	50
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่จำนวนคลื่นพาห่อย่อยต่าง ๆ	51
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชัน	55
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังในการส่งสัญญาณและระยะทางสูงสุดเนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น	58
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm	59
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm	60
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm	61
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm	62
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละ ช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm	63
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km	66
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km	67

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km.....	80
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km.....	82
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km.....	83
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km.....	84
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ back-to-back ที่กำลังส่งสัญญาณต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังส่งสัญญาณ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC กำลังภาคส่งเท่ากับ 8 dBm ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงต่าง ๆ.....	87

บทที่ 1

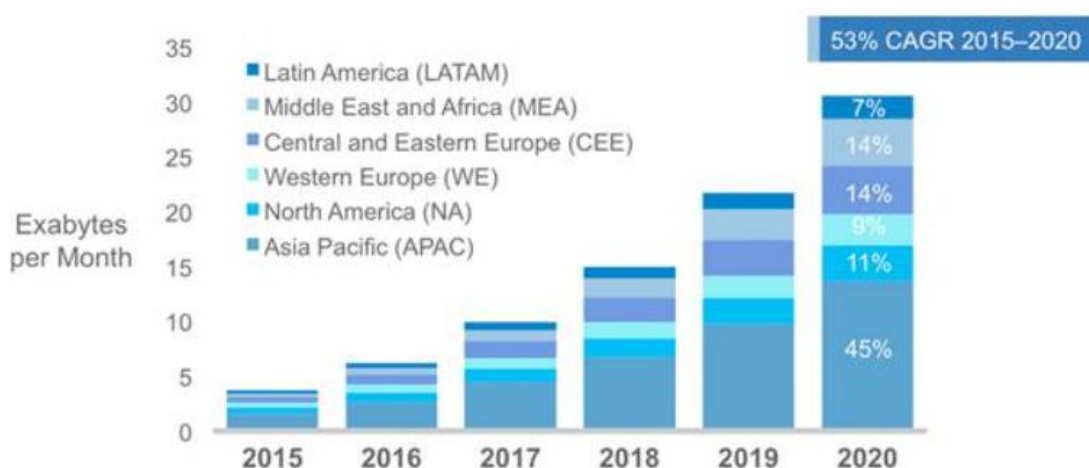
บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารทางแสงสามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงได้ในระยะทางไกล ซึ่งอัตราเร็วในการส่งสัญญาณกำลังพัฒนาเข้าสู่ระดับ Tb/s โดยส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงที่มีระยะทางไกลนับพันกิโลเมตร ดังนั้นการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อตอบสนองความต้องการในการสื่อสารที่มีแนวโน้มของการรับส่งข้อมูลปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในเวลาที่รวดเร็วขึ้น โดยที่การสื่อสารนั้นจะต้องเกิดความผิดพลาดของสัญญาณน้อยที่สุด รวมไปถึงการพัฒนาที่สามารถสื่อสารได้ระยะทางไกลเพิ่มขึ้นระหว่างผู้ส่งสัญญาณและผู้รับสัญญาณที่อยู่คนละประเทศให้ได้ครอบคลุมทั่วโลก สำหรับแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงความรู้พื้นฐานในระบบการสื่อสาร รวมไปถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อระบบและลักษณะความผิดพลาดของสัญญาณ จึงจะสามารถพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ เพื่อนำไปออกแบบระบบส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นจะเสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ตามลำดับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เป็นยุคแห่งโลกไร้พรมแดนที่การติดต่อสื่อสารระหว่างประเทศจากซีกโลกหนึ่งไปยังอีกซีกโลกคือเรื่องที่ไม่ไกลตัวอีกต่อไป เทคโนโลยีต่าง ๆ ถูกพัฒนาขึ้นให้ตอบรับกับการใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น voice over IP (VoIP), HD video coference หรือแม้แต่ digital television ล้วนแล้วแต่ต้องใช้งานผ่านอินเทอร์เน็ตทั้งสิ้น ส่งผลให้ความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตสูงขึ้นอย่างเป็นทวีคูณ จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตในแต่ละภูมิภาคของโลก [1] พบว่าการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมีอัตราการเพิ่มขึ้นของข้อมูลอย่างมากในทุกปี จากการคาดการณ์ภายในปี ค.ศ. 2020 ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกจะเป็นกลุ่มที่มีการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเติบโตมากที่สุดของโลกอยู่ที่ร้อยละ 45 เนื่องจากเป็นภูมิภาคที่มีจำนวนประชากรอาศัยอยู่มากที่สุด ภูมิภาคอเมริกาเหนือจากที่มีส่วนแบ่งการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโลกอยู่อันดับที่ 2 รองจากภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก จะมีส่วนแบ่งลดลงอยู่เป็นอันดับที่ 4

ในปี ค.ศ. 2020 เป็นรองภูมิภาคยุโรปกลางรวมกับยุโรปตะวันออก และภูมิภาคตะวันออกกลาง รวมกับแอฟริกา โดยภูมิภาคตะวันออกกลางรวมกับแอฟริกาจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้งาน ข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 71 ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 15 เท่า เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2015 ส่วนภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นอันดับที่สองอยู่ที่ร้อยละ 54 ซึ่งเพิ่มขึ้นเกือบ 9 เท่า เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2015



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของแต่ละภูมิภาค ในปี ค.ศ. 2015 ถึง ค.ศ. 2020 [1]

จากปริมาณการใช้งานข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของแต่ละภูมิภาคที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น อย่างเป็นทวีคูณดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ส่งผลให้เกิดการความพยายามในการเพิ่มขีดความสามารถ ของระบบการสื่อสารเพื่อตอบสนองความต้องการการใช้งานในแต่ละภูมิภาคทั่วโลก การวิจัยและ พัฒนาเทคโนโลยีทางการสื่อสารเพื่อเพิ่มสมรรถนะของเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมจึงเกิดขึ้น อย่างต่อเนื่อง ซึ่งถือเป็นเทคโนโลยีที่เป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาประเทศให้ก้าวไปสู่ความเป็นสากล รวมไปถึงยังสามารถตอบสนองความต้องการของประชากรในประเทศอีกด้วย

การสื่อสารทางแสงระยะทางไกลยิ่งในระดับหลายพันกิโลเมตรแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ผ่านเส้นใยแสงนั้น จะเกิดผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ รวมไปถึง ความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจากผลของดิสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ผ่านปรากฏการณ์เคอร์ [2] อย่างไรก็ตามเราสามารถชดเชยผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของ สัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง รวมไปถึงลดผลของดิสเพอร์ชันที่ส่งผลให้เกิด ความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากการกว้างออกทางด้านแกนเวลา และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใย แสงผ่านปรากฏการณ์เคอร์ได้โดยใช้วิธีสังยุคเฟสแสง optical phase conjugation (OPC) [3] ซึ่งสามารถนำมาใช้แก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากผลของดิสเพอร์ชัน และ

ปรากฏการณ์เคอร์ได้ในเวลาเดียวกันอย่างมีประสิทธิภาพ วิธีสังยุคเฟสแสงมีหลักการคือการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วนที่มีระยะทางเท่ากัน โดยในส่วนครึ่งแรกของเส้นใยแสงนั้น ผลของดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงผ่านปรากฏการณ์เคอร์จะก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง แต่เมื่อสัญญาณแสงผ่านเดินทางผ่าน OPC จะเกิดการคอนจูเกตสัญญาณเดิม เรียกสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นว่า สัญญาณคอนจูเกต (conjugation signal) จากนั้นเมื่อสัญญาณคอนจูเกตเดินทางผ่านในส่วนเส้นใยแสงครึ่งหลัง จะทำให้ความผิดเพี้ยนถูกชดเชยและสัญญาณแสงกลับคืนสู่รูปเดิมเสมือนต้นทางอีกครั้ง ทั้งนี้เส้นใยแสงที่อยู่ในระบบทั้งครึ่งแรกและครึ่งหลังจะต้องมีคุณสมบัติของเส้นใยแสงต่าง ๆ รวมถึงค่าดิสเพอร์ชันที่เหมือนกัน เพื่อให้ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันถูกชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ [4-7]

การประยุกต์ใช้วิธีสังยุคเฟสแสงกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงได้ถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกโดยงานวิจัยของ Yariv A. ที่เสนอการวาง OPC ไว้ที่กึ่งกลางของระบบเพื่อแก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ [8] ต่อจากนั้นการทดลองของ S. L. Jansen et al. [9] ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถรับส่งสัญญาณแบบ DWDM (dense wavelength-division multiplexed) จำนวน 22 ช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราเร็ว 21.4 Gb/s การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (standard single-mode fiber: SSF) เป็นระยะทางทั้งหมดถึง 10,200 กิโลเมตร ได้เป็นผลสำเร็จ

โดยทั่วไปแล้ว OPC จะถูกสร้างขึ้นจากการทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ในเส้นใยแสง [10, 11] หรือในอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor optical amplifier: SOA) [12-14] โดยในกรณี OPC แบบ SOA จะให้ค่า conversion efficiency (η) หรือ ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณคอนจูเกตหลังจากออกจาก OPC เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC ที่ค่อนข้างสูงกว่าแบบใช้เส้นใยแสง เนื่องจาก SOA อาศัยตัวกลางที่เป็นประเภทแอคทีฟ (active) จึงส่งผลให้เกิดอัตราการขยาย (gain) ในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ขึ้น แต่การใช้ SOA ทำ OPC มีข้อเสียคือ การเกิดปัญหา nonlinear distortion ที่ค่อนข้างรุนแรงกับสัญญาณแสง [15]

ในทางตรงกันข้ามหากใช้เส้นใยแสงในการสร้าง OPC ถึงแม้ว่าจะให้ค่า conversion efficiency ที่ไม่สูงนัก แต่ก็ไม่ต้องเผชิญกับปัญหา nonlinear distortion เหมือนแบบ SOA ทั้งนี้ OPC ที่สร้างจากเส้นใยแสงยังให้ค่า signal-to-background-noise ratio ที่สูงอีกด้วย [16] อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยแสงนั้นจะต้องประสบกับปัญหา Stimulated Brillouin Scattering (SBS) ที่ส่งผลให้สัญญาณแสงเกิดการสะท้อนกลับออกจากเส้นใยแสง ถ้าหากสัญญาณแสงนั้นมีกำลังสูงเกินกว่าค่า

SBS threshold ดังนั้นจึงเป็นการจำกัดมิให้ใช้สัญญาณปั๊ม (pump signal) มีค่ากำลังสูงมากเกินไป สำหรับการแก้ปัญหา SBS สามารถใช้วิธีการมอดูเลตทางความถี่หรือเฟสเพื่อเพิ่มค่า SBS threshold ให้สูงขึ้นได้ นอกจากนี้การใช้เส้นใยแสงยังเกิดปัญหาจากการที่แกน polarization ของสัญญาณที่จะเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่สัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล ซึ่งในการเกิดปรากฏการณ์ FWM นั้นจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อแกน polarization ของสัญญาณต่าง ๆ อยู่ในแกนเดียวกัน โดยหากแกน polarization เปลี่ยนไป ประสิทธิภาพของการเกิดปรากฏการณ์ FWM ก็จะลดลง ส่งผลให้ค่า conversion efficiency ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ polarization insensitivity ก็จะมีค่าด้อยลง หมายความว่าหากสัญญาณที่เข้าสู่ OPC มี polarization ต่างกันก็จะมีค่า conversion efficiency ที่ต่างกันออกไป ต่อมาภายหลังมีการคิดค้นวิธีใช้สัญญาณปั๊มซึ่งมีแกนของ polarization สองแกนที่ตั้งฉากกัน ซึ่งจะทำให้สัญญาณขาเข้าของ OPC ที่ถึงแม้จะมีแกน polarization แตกต่างกัน แต่ยังคงให้ค่า conversion efficiency ที่ใกล้เคียงกัน [11, 17, 18]

แม้ว่า OPC ที่ทำขึ้นมาจากเส้นใยแสงจะให้ค่า conversion efficiency ที่ค่อนข้างต่ำ แต่ปัญหานี้ก็ไม่หนักหนาเท่ากับปัญหา nonlinear distortion จากกรณีที่ใช้ SOA ในการสร้าง OPC ดังนั้นเส้นใยแสงจึงได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในทำ OPC มากกว่า SOA ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาเส้นใยแสงจนได้เส้นใยแสงชนิดใหม่แบบ photonics crystal fiber ซึ่งออกแบบขึ้นด้วยหลักการพิเศษทำให้มีการสูญเสียพลังงานในเส้นใยแสงต่ำมาก ซึ่งเส้นใยแสงที่กำลังได้รับความนิยมใช้ทำ OPC คือ เส้นใยแสงชนิด highly nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) ซึ่งมีค่า nonlinear coefficient เท่ากับ $11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนมาก และความยาวของเส้นใยแสงก็อยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 500 เมตร ไม่ถือว่ายาวจนเกินไป โดยจากการทดลองของ Yan Gengetal ซึ่งทำการทดลองกลับความยาวคลื่นสัญญาณ (wavelength converter) ที่จำนวน 6 ช่องสัญญาณ ด้วยอัตราข้อมูล 40 Gb/s โดยอาศัยเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ได้ค่า conversion efficiency มากกว่า -20.3 dBm เมื่อป้อนสัญญาณปั๊มที่ 25 dBm [19]

นอกเหนือจากนี้เราอาจใช้วิธีมอดูเลตสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงมาแก้ไขปัญหาค่าผิดเพี้ยนของสัญญาณร่วมด้วยได้ การมอดูเลตสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งวิธีมอดูเลตสัญญาณที่สามารถลดปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ดีวิธีหนึ่งคือ วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห์ หรือการมอดูเลตแบบ orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) [20] โดยเป็นการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลด้วยคลื่นพาห์ย่อยหลาย ๆ คลื่นพาห์ย่อยซ้อนทับกัน โดยคลื่นพาห์ย่อยแต่ละคลื่นพาห์นั้นจะมีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonality) ทำให้สัญญาณของแต่ละคลื่นพาห์ย่อยไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำต่อหนึ่งคลื่นพาห์ย่อย แต่ใช้คลื่นพาห์ย่อยจำนวนมากในการส่งผ่านข้อมูล

จึงทำให้สร้างสัญญาณ OFDM ที่มีอัตราเร็วข้อมูลสูงได้ ผลก็คือ ช่องสัญญาณต่าง ๆ จะเป็นอิสระต่อกัน และสามารถทนต่อดิสเพอร์ชันได้ดีกว่าวิธี on-off keying (OOK) ในปัจจุบัน รวมทั้งใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

ในยุคแรก ๆ การมอดูเลตสัญญาณแบบ OFDM ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อการใช้งานสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบเคลื่อนที่ที่แบนด์กว้างที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง ๆ และถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกิจการสื่อสารทางทหาร (ปี พ.ศ. 2503) ด้านระบบสื่อสารผ่านความถี่สูง (high frequency military system) เช่น KINEPLEX [21] นอกจากนี้การมอดูเลตสัญญาณแบบ OFDM ยังถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในระบบ LAN แบบไร้สาย (Wireless LAN) ระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงแบบไร้สาย (Wireless high speed internet) รวมถึงมาตรฐานสำหรับการแพร่สัญญาณภาพและเสียงในระบบดิจิทัล (digital audio broadcasting: DAB and Digital Video Broadcasting Terrestrial: DVB-T) ของ European Telecommunications Standards Institute: ETSI [22] high-definition television (HDTV) broadcasting [23] multi-media mobile access communications wireless LANs [22] และนำไปใช้ในชั้นกายภาพ (physical layer) ของ Wireless Local Area Network (WLAN, IEEE 802.11) ซึ่งโดยทั่วไปการมอดูเลตสัญญาณแบบ OFDM ถูกใช้อยู่ในคลื่นความถี่ 2.4 GHz ISM ซึ่งเป็นคลื่นความถี่มาตรฐานสำหรับมาตรฐานเครือข่าย IEEE 802.11g ในขณะที่ IEEE 802.11a ถูกเลือกใช้คลื่นความถี่ที่ 5 GHz UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) เป็นต้น

เมื่อไม่นานนี้ผู้วิจัยทางด้านการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงได้เริ่มให้ความสนใจในการประยุกต์ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ OFDM มากขึ้น ตัวอย่างเช่น บทความวิชาการ [24] สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของสเปกตรัมของการมอดูเลตแสงแบบ optical-OFDM (OOFDM) ในระบบการส่งสัญญาณความเร็วสูงที่มีการส่งสัญญาณแบบ RZ-OOK ได้อย่างน้อย 2.9 bits/s/Hz และเมื่อมีการส่งสัญญาณแบบ BPSK OOFDM ระบบจะสามารถส่งสัญญาณได้ประมาณ 1,200 km ด้วยอัตราเร็ว 40 Gb/s RZ-OOK จากนั้นบทความวิชาการ [25] สามารถส่งสัญญาณแบบ OFDM ผ่านเส้นใยแสงที่อัตราส่งสัญญาณ 100 Gb/s เป็นระยะทางไกล 3,840 กิโลเมตร เป็นผลสำเร็จโดยวิธี Single-sideband quadrature phase-shift keying และการเข้ารหัสแบบ Low-density parity-check

บทความวิชาการที่ผ่านมามีการวิเคราะห์ระบบทั้งการวิเคราะห์วิธีการจำลองระบบ และการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีหรือตัวเลขควบคู่กัน บทความวิชาการเกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ OFDM ในระบบการส่งสัญญาณทางแสงเสมือนว่าจะให้ความสนใจการวิเคราะห์ระบบด้วยวิธีการจำลองระบบ (simulation) [26-30] เป็นส่วนใหญ่ เมื่อเทียบกับการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่น เช่น บทความวิชาการ [27] เป็นวิธีการจำลองระบบการส่งสัญญาณทางแสงด้วยการมอดูเลตสัญญาณแบบ

OFDM กับการมอดูเลตสัญญาณทางแสงแบบ SSB (Optical single sideband) แสดงการชดเชยการเกิดดิสเพอร์ชันได้ตลอดระยะทางไม่จำกัด เมื่อไม่คิดความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใย แต่เมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงร่วมด้วยในบทความวิชาการ [27] ผลการทดลองระบบการส่งสัญญาณทางแสงแบบ OFDM ร่วมกับ OSSB/VSB สามารถชดเชยดิสเพอร์ชันในระบบ (Wavelength Division Multiplexing: WDM) ระยะทางไกลยิ่ง (ultra long-haul distance) โดยปราศจาก feedback path ได้ โดยจำกัดระยะทางการส่งสัญญาณได้ไกลประมาณ 4,000 กิโลเมตร และค่า Q factor มากกว่า 11.4 dB เมื่อส่งสัญญาณด้วยความเร็ว 10 Gb/s เมื่อแต่ละช่วงระยะอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier spacing) เท่ากับ 80 กิโลเมตร ส่วนบทความวิชาการ [31] เสนอวิธีการจำลองระบบการจัดการความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ โดยการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยขึ้นเพื่อเพิ่มค่า nonlinear threshold ทำให้ระบบที่มีกำลังของสัญญาณสูงสามารถเพิ่มระยะทางของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ หรือเพิ่มระยะทางในการส่งสัญญาณได้ โดยออกแบบการทำงานร่วมกันของการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยก่อน (pre-compensation) และหลัง (post-compensation) ในระบบการส่งสัญญาณแบบ OFDM ระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มกำลังสัญญาณอินพุตเท่ากับ 2 dB สำหรับระยะทางเท่ากับ 2,000 km (Standard single mode fiber: S-SMF) เมื่อค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16 ps/nm/km และเพิ่มกำลังสัญญาณอินพุตเท่ากับ 5 dB สำหรับค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 6 ps/nm/km ในเส้นใยแสง จากนั้นมีการนำเทคโนโลยี coherent detection [32] ซึ่งคือการทำ synchronous detection โดยนำอุปกรณ์ local oscillator (LO) มาทำหน้าที่ซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาห้ทั้งความถี่และเฟส ส่งผลให้สามารถมอดูเลตสัญญาณแบบเอ็น-ควอดเรเจอร์แอมพลิจูดมอดูเลชัน (n-quadrature amplitude modulation : n-QAM) หรือ เอ็ม-เฟสชิฟต์คีย์อิง (m-phase shift keying : m-PSK) ได้ ดังนั้นการนำเทคโนโลยี coherent detection มาใช้จึงส่งผลให้ระบบสามารถส่งข้อมูลที่มีจำนวนบิตต่อช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น และมีค่า bandwidth efficiency ที่สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้เทคโนโลยี coherent detection ยังสามารถนำมาประยุกต์ร่วมกับเทคโนโลยี polarization division multiplexing (PDM) [33] ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณไปในแนวแกน polarization 2 แกนที่ตั้งฉากกัน ส่งผลให้สามารถเพิ่ม bandwidth efficiency ของระบบได้เป็น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งสัญญาณไปในแกน polarization เพียงแกนเดียว ด้วยข้อจำกัดของระบบ non-coherent OFDM นั้น ไม่สามารถมอดูเลตสัญญาณโดยใช้คลื่นพาห้ทางไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก ๆ ได้ จึงเกิดการพัฒนาระบบเทคโนโลยีการส่งสัญญาณแบบ coherent optical-orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) [32] ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณโดยใช้คลื่นพาห้ทางแสงมอดูเลตกับสัญญาณข้อมูล ทำให้สามารถส่งสัญญาณที่มีปริมาณข้อมูลสูงได้ และยังสามารถเพิ่มอัตราข้อมูลรวมของระบบได้ด้วยเทคนิค Superchannel [34] หรือ การมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณที่มากกว่า 1 ช่องสัญญาณส่งไปในเส้นใยแสงพร้อมกันร่วมกับเทคนิค

nyquist-wavelength division multiplexing (N-WDM) [35] โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ จะมีระยะห่างกันเท่ากับสองเท่าของ nyquist frequency

อย่างไรก็ตามระบบส่งสัญญาณ OFDM ในเส้นใยแสงถูกจำกัดสมรรถนะของระบบส่งสัญญาณทางแสงระยะทางไกล เนื่องจากความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์รี่ที่ประกอบไปด้วยปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM เช่นกัน โดยปรากฏการณ์ SPM และ XPM นั้น ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมสัญญาณพัลส์จะขยายออก และส่งผลกระทบต่อความถี่รอบข้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนต่อสัญญาณของข้อมูลที่ภาครับได้ ถ้าหากสัญญาณเกิดปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM ความผิดเพี้ยนทางเฟสของสัญญาณที่ภาครับจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวและหมุนไปของ Constellation [23][25] เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณตลอดการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนทางเฟสของสัญญาณที่ภาครับตามไปด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบส่งสัญญาณทางแสงระยะทางไกลได้โดยนำวิธีสังยุคเฟสแสงมาประยุกต์ เพื่อแก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงที่เกิดจากดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์รี่ที่ประกอบไปด้วยปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM ได้ในเวลาเดียวกันอย่างมีประสิทธิภาพ ในด้านของการวิเคราะห์ระบบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นนั้น จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงหลักพื้นฐานของความผิดเพี้ยนของสัญญาณให้ถูกต้องแม่นยำ จึงจะสามารถพัฒนาการวิเคราะห์ระบบการส่งสัญญาณทางแสงให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการ หรือเพื่อการออกแบบระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการส่งสัญญาณ CO-OFDM ผ่านเส้นใยแสงมากขึ้น แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่นำการส่งสัญญาณ CO-OFDM มาประยุกต์ร่วมกับ OPC วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงศึกษาและนำเสนอการมอดูเลตสัญญาณแบบ CO-OFDM มาประยุกต์ร่วมกับ OPC โดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณของระบบที่นำเสนอ เช่น จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของสัญญาณ CO-OFDM อัตราข้อมูลต่อคลื่นพาห่อย่อย ความยาวคลื่นของคลื่นพาห่อย่อย หลัก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระยะทางที่มากที่สุดที่ส่งไปได้ เป็นต้น รวมไปถึงวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่ส่งผลต่อการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบให้ได้คุณภาพของสัญญาณที่ดีที่สุด ด้วยวิธี computer simulation โดยใช้โปรแกรม OptiSys

1.2 วัตถุประสงค์

1. นำเสนอการส่งผ่านสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ซึ่งใช้การส่งยุคเฟสแสง (OPC) เป็นครั้งแรก
2. นำเสนอการออกแบบการออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง
3. วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM เช่น จำนวนคลื่นพาทีย่อยของสัญญาณ CO-OFDM อัตราข้อมูลต่อคลื่นพาทีย่อย ความยาวคลื่นของคลื่นพาทีย่อยหลัก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระยะทางที่มากที่สุดที่ส่งไปได้ เป็นต้น
4. วิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ที่ส่งผลต่อการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
5. นำเสนอแนวทางการออกแบบระบบให้มีสมรรถนะสูงสุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ใช้การจำลองระบบด้วยซอฟต์แวร์ OptiSys ในการศึกษาวิเคราะห์การส่งผ่านสัญญาณ PDM-CO-OFDM โดยไม่มีการทดลองจริง
2. การศึกษาและวิเคราะห์จะใช้เฉพาะเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.655.D ในการส่งผ่านสัญญาณเท่านั้น
3. เครื่องส่งยุคเฟสแสงเป็นแบบอุดมคติ คือ ไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ และไม่เลื่อนความยาวคลื่นคิดแต่เพียง conversion loss เท่านั้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความเป็นมาและทฤษฎีของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง
2. ศึกษาวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM การส่งผ่านสัญญาณ PDM-CO-OFDM และการส่งยุคเฟสแสง
3. วิเคราะห์ประสิทธิภาพ การส่งผ่านสัญญาณของระบบที่นำเสนอ เช่น จำนวนคลื่นพาทีย่อยของสัญญาณ CO-OFDM อัตราข้อมูลต่อคลื่นพาทีย่อย ความยาวคลื่นของคลื่นพาทีย่อยหลัก ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระยะทางที่มากที่สุดที่ส่งไปได้ เป็นต้น

4. จำลองระบบการส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง โดยใช้โปรแกรม OptiSys
5. นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยและองค์ประกอบ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง
6. สรุปผลการวิเคราะห์จากการจำลอง ที่แสดงให้เห็นถึงปัจจัยต่างที่มีผลต่อการส่งสัญญาณของระบบข้างต้น
7. เสนอแนวทางการพัฒนาระบบการส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสงให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น
8. นำข้อมูลทั้งหมดมาเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

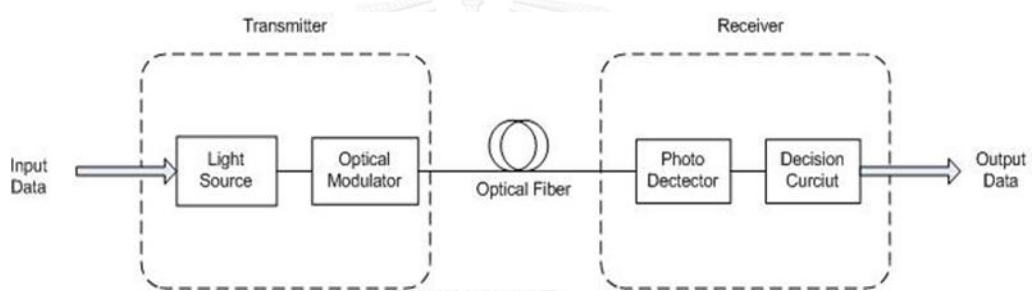
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความเป็นมาและทฤษฎีของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง
2. ความรู้เกี่ยวกับการส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสงไว้ตรงกลางของระบบ
3. สามารถอธิบาย วิเคราะห์ประสิทธิภาพ การส่งผ่านสัญญาณของระบบที่น่าเสนอ การจำลองระบบการส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง และปัจจัยหรือองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบการส่งสัญญาณทางแสงได้
4. นำเสนอแนวทางในการพัฒนาหรือออกแบบระบบการส่งสัญญาณทางแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นซึ่งสามารถนำไปใช้ในอนาคตได้
5. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์และได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

เส้นใยแสงถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเส้นใยแสงมีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะ เช่น มีอัตราการสูญเสียกำลังในเส้นใยแสงที่ต่ำ เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สามารถป้องกันผลกระทบต่อสัญญาณจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง เป็นต้น ระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลักสามส่วน คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (optical transmitter) เส้นใยแสง (optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (optical receiver) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง [36]

ในการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงนั้นอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงจะต้องมีส่วนมอดูเลตแสง โดยอุปกรณ์มอดูเลตแสงมีอยู่ 2 ประเภทหลักได้แก่ การมอดูเลตโดยตรง (direct modulation) ซึ่งแหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่ในอุปกรณ์เพียงชุดเดียว เป็นการมอดูเลตสัญญาณไฟฟ้าไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงโดยตรง ส่วนอีกประเภทจะเป็นการมอดูเลตภายนอก (external modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (modulator) แยกออกจากกันโดยต้องอาศัยอุปกรณ์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์มาใช้ในการมอดูเลตแสง แทนการมอดูเลตไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงโดยตรง ซึ่งการใช้การมอดูเลตภายนอกจะได้สัญญาณพัลส์ที่คล้ายกับสัญญาณไฟฟ้ามากกว่าการมอดูเลตโดยตรง โดยอุปกรณ์มอดูเลตโดยตรงจะมีความซับซ้อนน้อยกว่า และราคาถูกกว่าอุปกรณ์มอดูเลตภายนอก แต่ไม่สามารถให้กำเนิดสัญญาณที่อัตราบิตสูงเท่ากับการมอดูเลตภายนอก ในส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณแสงนั้น จะมีส่วนประกอบคือ ส่วนรับสัญญาณแสง และส่วนตัดสินใจโดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (photo detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้ามีสองชนิดคือ positive intrinsic

negative junctions (PIN) และ avalanche photodiode (APD) ส่วนองค์ประกอบที่สองของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงคือ วงจรตัดสินใจ (decision circuit) ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณเอาต์พุตควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า decision threshold ภายในวงจรตัดสินใจ [37]

เส้นใยแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสงจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงที่ใช้กันกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single mode fiber :SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (attenuation coefficient), แบบ (multi mode fiber :MMF) ซึ่งมีราคาถูกกว่า SMF แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสูงกว่า SMF และแบบชนิดเลื่อนการกระจาย (dispersion shifted fiber :DSF) ซึ่งจะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ย ความยาวคลื่น zero dispersion จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด (1550 nm)

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแส และสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็กท้ายที่สุดจะได้สมการการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า A สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ (nonlinear Schrödinger equation: NLSE) [38]

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

เมื่อ A เป็นกรอบคลื่น (envelope) ของสัญญาณ, α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation constant), β_2 เป็นค่า second order dispersion coefficient พิจารณาในรูปของ group-velocity dispersion (GVD), β_3 เป็นค่า third order dispersion coefficient พิจารณาในรูปของความชันดิสเพอร์ชัน (dispersion slope), γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient), z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง และ T เป็นกรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

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

โดย t เป็นเวลาจริงเมื่อพิจารณาพจน์ขวามือของสมการ (2.2) ที่แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A พจน์แรก คือ การลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของ

เส้นใยแสง นั่นคือเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงานของสัญญาณแสงลดต่ำลง แต่เราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สอง คือ GVD (β_2) เป็นส่วนที่ส่งผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และสำหรับพจน์สุดท้ายคือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (kerr effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง และยังส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกอีกด้วย โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

2.3 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณ CO-OFDM

จากหัวข้อที่ 2.2 พบว่าสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง จะมีรูปร่างและกำลังของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ การลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยจะกล่าวถึงปัจจัยแต่ละข้ออย่างละเอียดในหัวข้อนี้

2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (fiber attenuation)

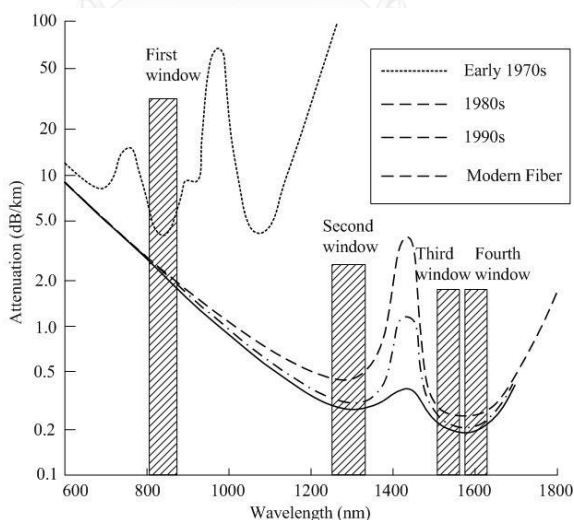
อัตราการลดทอนกำลังสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง เป็นส่วนสำคัญของการกำหนดลักษณะการออกแบบโครงข่ายทางแสง เนื่องจากสามารถกำหนดกำลังที่ออกจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงให้มีค่าเหมาะสมกับระยะทางในการสื่อสาร ความไวสัญญาณแสงของอุปกรณ์รับสัญญาณ และปริมาณการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยที่การลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสง เกิดจาก 3 สาเหตุหลัก คือ การดูดซึม (absorption) ที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุเอง, การกระเจิง (scattering) ที่เกิดจากทั้งคุณสมบัติของวัสดุและความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่น และการแผ่รังสี (radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง

แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงจะถูกลดทอนกำลังสัญญาณแบบเอกซ์โพเนนเชียลไปตามระยะทาง โดยมีสมการแสดงการลดทอนดังสมการ (2.3)

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

โดยที่ $P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ [dBm], $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L กิโลเมตร [km] จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ [dBm], α คือ ค่าคงตัวของ การลดทอนที่มีหน่วยเป็น เดซิเบล/กิโลเมตร [dB/km]

โดยค่าคงตัวการลดทอน α นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้ง 3 เส้น โดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประ แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเป็นเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกา และจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความชื้น (water peak) และผลของ rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราลดทอนสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูป ต่อจากนั้นมีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปลายปี 1977 บริษัท Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ทำให้ที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุด 0.2 dB/km ส่วนการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้น ๆ เช่น ระบบ LAN เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ในระบบส่งข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) โดยจะเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นแถบ 1625 nm ซึ่งไม่ได้มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่ลดลง แต่อาจจะทำให้ความยุ่งยากในการส่งสัญญาณระยะทางไกล หรือระบบการส่งสัญญาณแบบมีการมัลติเพล็กซ์หลายความยาวคลื่นลดลง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกำลังงาน และความยาวคลื่นที่ผลิตมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 [36]

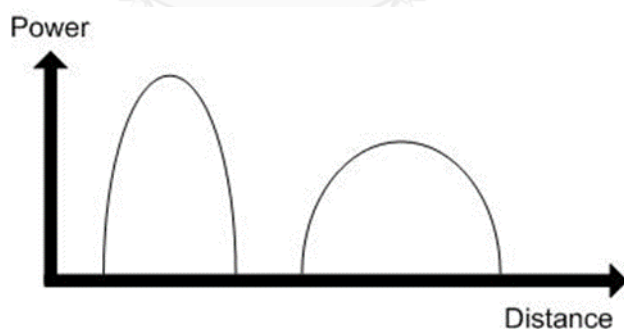
2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

การเกิดดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกัน คือ inter modal dispersion ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงแบบ MMF และ intra modal dispersion หรือ chromatic

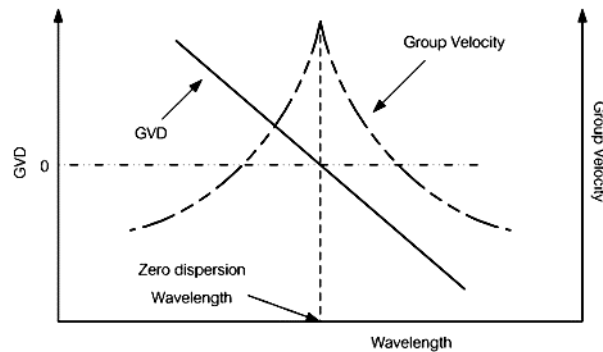
dispersion สำหรับเส้นใยแสงแบบ SMF ซึ่งใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดิสเพอร์ชันคือ ผลอันเนื่องมาจากสัญญาณแสงที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสัญญาณหลายความยาวคลื่น โดยแต่ละความยาวคลื่นมีค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้ทำให้แสงแต่ละความยาวคลื่นเดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้รูปร่างของพัลส์สัญญาณขยายตัวออก และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ซึ่งการขยายตัวของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วย โดยเส้นใยแสงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ SMF ที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลสูง มีแบนด์วิดท์กว้าง รวมไปถึงค่าอัตราสูญเสียกำลังต่ำโดย ดิสเพอร์ชันที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วย ดิสเพอร์ชัน (second order dispersion) และ ความชันดิสเพอร์ชัน (third order dispersion)

2.3.2.1 ดิสเพอร์ชัน (group velocity dispersion)

สาเหตุของการเกิดดิสเพอร์ชันหรือพิจารณาในรูปของ Second order dispersion coefficient (β_2) หรือ Group velocity dispersion: GVD คือ คุณสมบัติของความเร็วกุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วยผลของดิสเพอร์ชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [36]

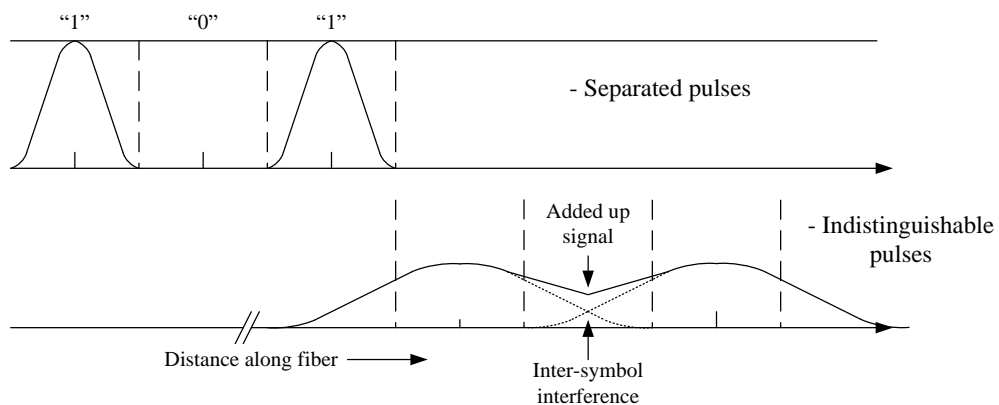


รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น [36]

รูปที่ 2.4 แสดงถึงตัวอย่างการแจกแจงความเร็วกลุ่ม และ GVD เทียบกับความยาวคลื่น ซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกัน และมีค่าสูงสุดที่ zero dispersion wavelength

เราสามารถแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชันในรูปที่ 8 ออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ดิสเพอร์ชันปกติ (normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า ดิสเพอร์ชันผิดปกติ (anomalous dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมี β_2 ความเร็วกลุ่มน้อยกว่า และดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่มีความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

GVD ส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณโดยทำให้พัลส์ที่อยู่ติดกันจะมีโอกาสเหลื่อมกัน (overlap) จนทำให้เกิด inter symbol interference (ISI) และอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ (error decision) ว่าสัญญาณแสงที่วิ่งเข้ามาควรจะเป็น บิต '1' หรือ บิต '0' ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิด Inter-symbol interference (ISI) [36]

รูปที่ 2.5 แสดงถึงการเกิด ISI ที่เกิดจากการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ เริ่มแรกส่งสัญญาณแบบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยบิต '1', '0', '1' ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ระหว่างบิตแยกจากกันอย่างชัดเจน เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงผลของ GVD ทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออก จนกระทั่งเกิด ISI ทำให้กำลังงานของสัญญาณในช่วงเวลา (time slot) บิต '0' เพิ่มขึ้น และอาจทำให้ตัดสินบิตผิดพลาดจากบิต '0' กลายเป็นบิต '1' หากสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมีค่าเกินขอบเขตที่เครื่องตัดสินบิตกำหนดไว้

เราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก chromatic dispersion โดยพิจารณาให้ τ แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่ ω [39]

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

โดยที่ L แทนความยาวของเส้นใยแสงหน่วย [km]

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

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

จากสมการที่ (2.4) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

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

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

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

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

เมื่อ

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

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นหน่วย [nm]

c คือ ความเร็วของสุญญากาศเท่ากับ [m/s]

เมื่อนำสมการที่ (2.8) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

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

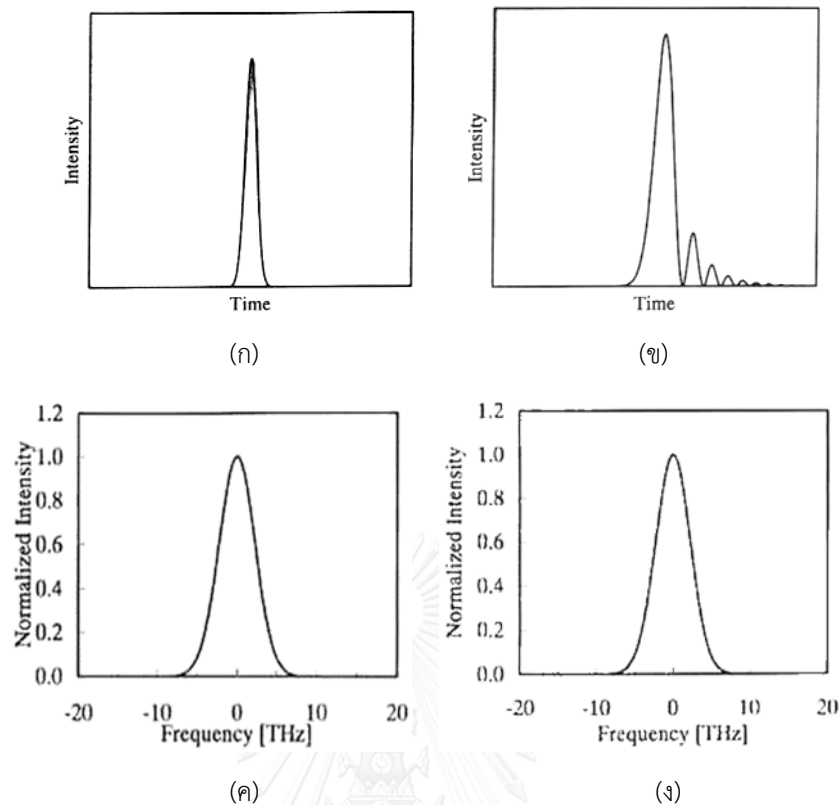
ดังนั้นเราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ในรูปของ D โดยนำสมการที่ (2.9) ที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.7) ได้ดังนี้

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

เมื่อ $\Delta \lambda$ แทนความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณแสง

2.3.2.2 ความชันดิสเพอร์ชัน (Dispersion slope)

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



รูปที่ 2.6 ผลของดิสเพอร์ชันอันดับสามต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) สัญญาณพัลส์ขาเข้า (ข) สัญญาณพัลส์ขาออก (ค) สัญญาณสเปกตรัมขาเข้า และ (ง) สัญญาณสเปกตรัมขาออก [36]

เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล ผลการกระจายของสัญญาณเนื่องจากดิสเพอร์ชันจะเด่นชัด ส่งผลให้ความถี่ในแต่ละสัญญาณมีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงแตกต่างกัน รวมไปถึงส่งผลให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออกและเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ดังนั้นความผิดเพี้ยนทางเฟสของสัญญาณเนื่องจากดิสเพอร์ชันและความชันดิสเพอร์ชัน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1) เมื่อไม่พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณแสดงในสมการ (2.12)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} \quad (2.12)$$

2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)

ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือ nonlinear stimulated inelastic scattering ซึ่งเป็นการกระเจิงแสงที่ไม่ยืดหยุ่น และ nonlinear refraction ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (refractive index, n) ที่ขึ้นอยู่กับระดับของกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect)

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มาจากปรากฏการณ์เคอร์เท่านั้น

ปรากฏการณ์เคอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงในเส้นใยแสง ส่งผลให้เฟสของสัญญาณแสงที่ปลายทางเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เฟสของสัญญาณแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงนี้เรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) ซึ่งสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ที่ส่งผลต่อสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงได้เป็นสามประเภทดังนี้ ประเภทแรก เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า self-phase modulation (SPM), ประเภทที่สอง เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยกำลังของสัญญาณต่างความยาวคลื่น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า cross-phase modulation (XPM) และประเภทที่สาม อาจเกิดการถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณความยาวคลื่นอื่น ผ่านปรากฏการณ์ four-wave mixing (FWM)

2.3.3.1 Self-phase modulation (SPM)

ปรากฏการณ์ Self-phase modulation (SPM) เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง ส่งผลให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการ (2.13)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \quad (2.13)$$

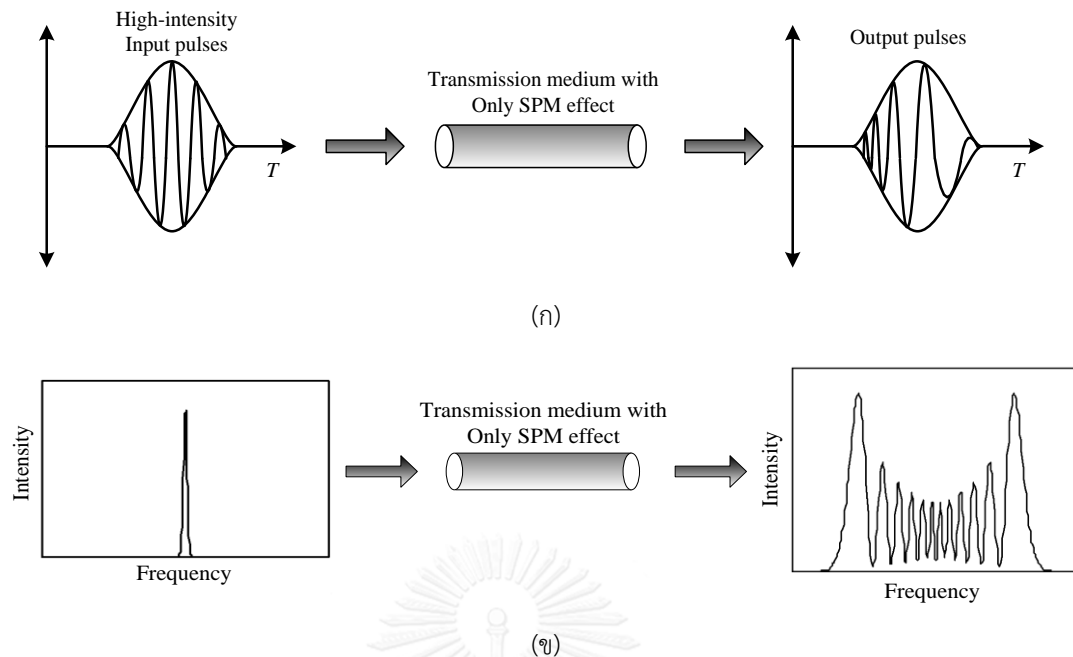
โดยที่ $\Delta\omega_{NL}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อหน่วยเวลา

ϕ_{NL} คือเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

ปรากฏการณ์ SPM จะส่งผลให้สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณขยายออก และเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังสัญญาณสูงสุดดังสมการ (2.14)

$$\phi_{NL,max} = L_{eff} P_0 \gamma \quad (2.14)$$

โดยที่ P_0 เป็นกำลังงานของสัญญาณพัลส์ $\phi_{NL,max}$ คือเฟสที่เลื่อนออกไปมากที่สุด ณ บริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ และ $L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{\alpha}$ คือความยาวประสิทธิผลเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแสง ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ SPM แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง (ก) ทางความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ [36]

รูปที่ 2.7 แสดงถึงผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง โดยในรูปที่ 2.7(ก) แสดงถึงผลของ SPM ต่อความถี่ของสัญญาณ จากรูปจะเห็นว่า SPM จะส่งผลให้ส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณมีความเร็วกลุ่มน้อยกว่าส่วนประกอบความถี่ต่ำ และในรูปที่ 2.7(ข) แสดงถึงผลของ SPM ต่อสเปกตรัมของสัญญาณ จากรูปจะเห็นว่านอกจาก SPM จะส่งผลให้ขนาดของสเปกตรัมสัญญาณแยกออก และยังส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกทางด้านแกนความถี่แบบสมมาตรกันอีกด้วย

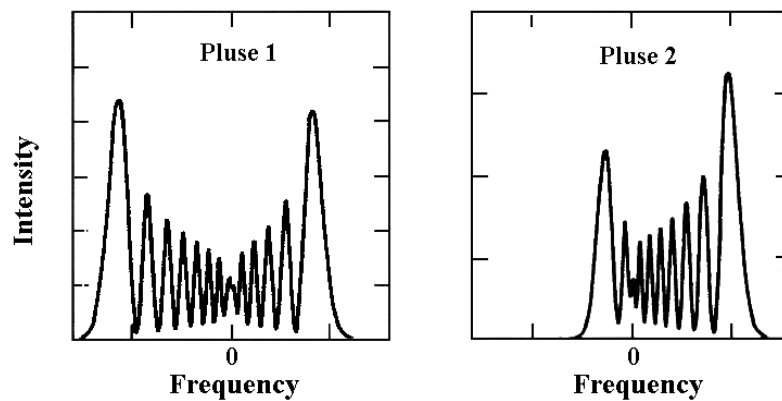
2.3.3.2 Cross-phase modulation (XPM)

ปรากฏการณ์ XPM จะเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณแสงสองสัญญาณที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกันร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ที่ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างกัน เหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม โดยทั่วไปเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มมีค่าไม่ตรงกันนี้จะเป็ปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองเดินทางตัดกัน ซึ่งผลของ XPM จะมีความมากกว่า SPM ถึง 2 เท่า โดยสามารถหาค่าเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากปรากฏการณ์ทั้งสองดังสมการ (2.15)

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.15)$$

เมื่อ $|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห้ ω_1

$|E_1|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห้ ω_2



รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [36]

รูปที่ 2.8 แสดงถึงผลของ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงที่มีกำลังสัญญาณต่างกัน ที่เดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่ากำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM แต่จะต่างกันตรงที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจากปรากฏการณ์ XPM จะขยายออกมากกว่า เนื่องจากผลของ XPM ต่อสัญญาณรุนแรงกว่า SPM ถึง 2 เท่า และการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจาก กำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่า ส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่าเมื่อพิจารณาจากสมการ (2.1) ซึ่งเป็นสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ที่มีเพียงช่องสัญญาณเดียวเท่านั้น สามารถดัดแปลงเป็นสมการ (2.16) ที่ทำการเพิ่มสัญญาณเข้าไปอีกหนึ่งช่องสัญญาณ

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_j + \frac{1}{v_{gr}} \frac{\partial A_j}{\partial t} = i\gamma (|A_j|^2 + 2|A_k|^2) A_j \quad (2.16)$$

กำหนดให้ j คือสัญญาณที่เราสนใจ และ k คือสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่ส่งไปพร้อมกัน พจน์แรกทางขวามือของสมการที่ (12.6) คือผลของ SPM ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และพจน์ที่สอง

ก็คือผลของ XPM นั่นเอง จะเห็นว่าพจน์ของ XPM จะมีค่าคงที่เท่ากับ 2 คูณอยู่ด้วยซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความรุนแรงของ XPM จะเป็น 2 เท่าของ SPM เมื่อสัญญาณทั้งสองมีกำลังที่เท่ากัน

2.3.3.3 Four-wave mixing (FWM)

FWM เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันจำนวน 4 ความถี่ มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (Frequency matching) จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้น โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลาย ๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1, f_2, f_3 เป็นไปตามสมการ (2.17)

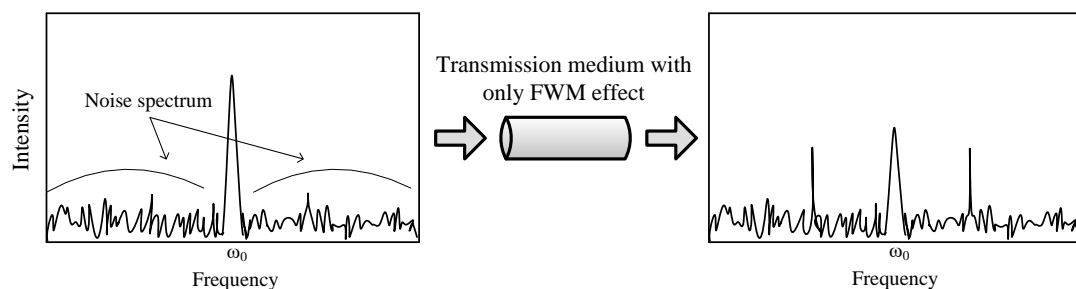
$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.17)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase matching condition) ดังสมการ (2.18)

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.18)$$

โดยที่ k_n คือค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่า intra-channel FWM (IFWM) จะส่งผลให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมามีลักษณะการถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกัน ส่งผลให้เกิด ghost pulse ขึ้นมาในสัญญาณที่มีอูเลตทางความเข้มแสงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [36]

จากรูปที่ 2.9 แสดงสัญญาณอินพุตทางขวามือ ถ้าความถี่ของสัญญาณข้อมูลและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็นไปตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ตามหลักของการเกิด FWM เมื่อสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย เดินทางไปในเส้นใยแสง จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทกำลังสัญญาณจาก

สัญญาณข้อมูลไปที่สัญญาณรบกวน ส่งผลให้กำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และกำลังของสัญญาณข้อมูลลดลง และจะมีการถ่ายเทลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ และถ้าระยะในการส่งสัญญาณมากขึ้น สัญญาณข้อมูลอาจจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนไปได้ในที่สุด

สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อน หรือเหลื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

ประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ FWM ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการจับคู่ของมุม (Phase - matching) ของคลื่นสัญญาณด้วย ความสัมพันธ์ของมุมของคลื่นสัญญาณดังกล่าวนี้ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเกิดดิสเพอร์ชัน และความกว้างของแต่ละช่องสัญญาณ อีกทั้งประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ FWM ยังขึ้นอยู่กับพลังงานแสงที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (optical power) และการสูญเสียพลังงานในเส้นใยแสง การคำนวณหาพลังงานของความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจะเริ่มพิจารณาจากการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง ค่าคงตัวของการลดทอนเท่ากับ พลังงานครอสทอล์ค (crosstalk power) ของการกำเนิดสัญญาณความถี่ใหม่อันเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ตามเงื่อนไขในสมการ (2.17) และพลังงานที่ป้อนเข้าสู่เส้นใยแสงที่ความถี่ f_1 , f_2 และ f_3 มีค่าเท่ากับ $P_1(0)$, $P_2(0)$ และ $P_3(0)$ ตามลำดับ เราสามารถคำนวณหาความยาวของเส้นใยแสงที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM L_{eff} (Effective length) ได้จากสมการ (2.19) เมื่อพิจารณาการดูดกลืนพลังงานตลอดความยาวของเส้นใยแสง

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (2.19)$$

ดังนั้นการลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง สามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุด เพื่อส่งผลต่อการวิงตัดกันของสัญญาณ เนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้ยากขึ้น พร้อมทั้งส่งผลให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของการมอดูเลตสัญญาณที่เกี่ยวข้อง

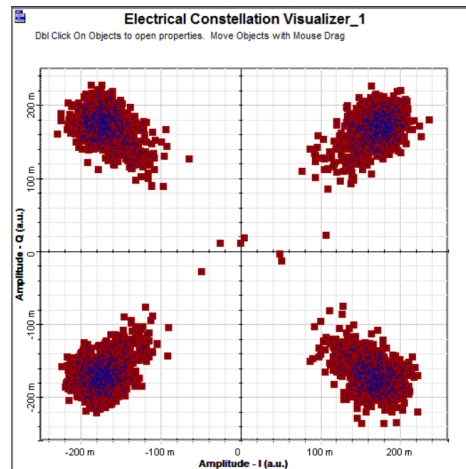
การมอดูเลต คือการกล้ำสัญญาณข้อมูลเข้ากับสัญญาณคลื่นพาห์ (carrier) ซึ่งการมอดูเลตสัญญาณทางแสงมีอยู่หลายวิธีในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการมอดูเลตสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่การมอดูเลตสัญญาณแบบ Quadrature Amplitude Modulation (QAM), การมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM และการส่งสัญญาณแบบ Superchannel ตามลำดับ

2.4.1 การมอดูเลตสัญญาณแบบ Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) คือ เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณรูปแบบหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ร่วมกับ OFDM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยจะนำสัญญาณมอดูเลตแบบ QAM ก่อนที่จะส่งสัญญาณไปแปลง Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) ในกระบวนการสร้างสัญญาณ OFDM เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของระบบ QAM คือการผสมสัญญาณการแปลงเฟส (Phase) และขนาด (Amplitude) ของสัญญาณควบคู่กัน ซึ่งการเปลี่ยนเฟสและขนาดของสัญญาณร่วมกัน จะช่วยให้ตัวรับสัญญาณสามารถแยกสัญญาณแต่ละสัญญาณออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ ปกติการมอดูเลตแบบ QAM นั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ สามารถเขียนเป็นแทนด้วยสมการ 2^n -QAM ตัวอย่างเช่น 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM หรือ 32-QAM เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ดังนั้นจำนวนบิตข้อมูลในแต่ละสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ 2 บิต โดยมีสัญลักษณ์บิตข้อมูลที่แสดงด้วยจำนวนเชิงซ้อน และเฟสของสัญญาณขาเข้า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ constellation ของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลต และเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM

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



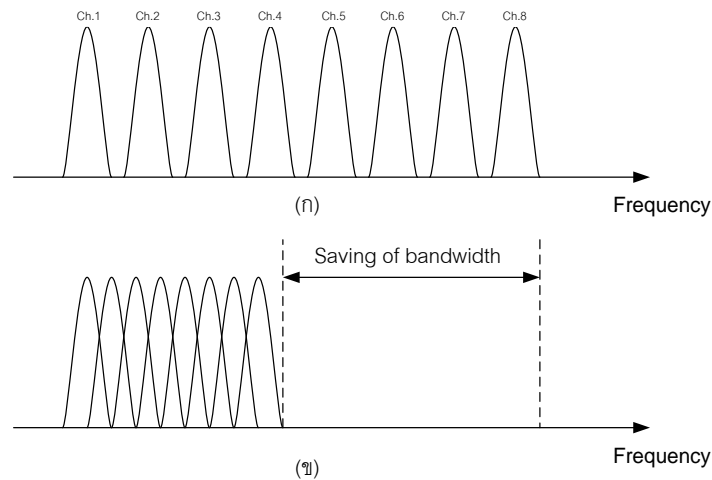
รูปที่ 2.10 constellation สัญญาณที่มอดูเลตแบบ 4-QAM

2.4.2 การมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM

เมื่อความต้องการในการส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลสูงมีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบต่าง ๆ เพื่อรองรับการส่งข้อมูลเหล่านั้น วิธีการมอดูเลตแบบหลายคลื่นพาห์ หรือการมอดูเลตแบบ CO-OFDM เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ เนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณแบบ CO-OFDM จะใช้การส่งผ่านข้อมูลด้วยคลื่นพาห์ย่อยหลาย ๆ คลื่นพาห์ย่อยซ้อนทับกัน โดยคลื่นพาห์ย่อยแต่ละคลื่นพาห์นั้นจะมีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonality) ส่งผลให้สัญญาณของแต่ละคลื่นพาห์ย่อยไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำต่อหนึ่งคลื่นพาห์ย่อย แต่ใช้คลื่นพาห์ย่อยจำนวนมากในการส่งผ่านข้อมูลไป จึงทำให้เกิดสัญญาณ CO-OFDM ที่มีอัตราเร็วข้อมูลสูงได้ ในทางปฏิบัติได้นำสัญญาณที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของ sinc มาใช้สร้างสัญญาณ CO-OFDM ดังแสดงในสมการที่ (2.20)

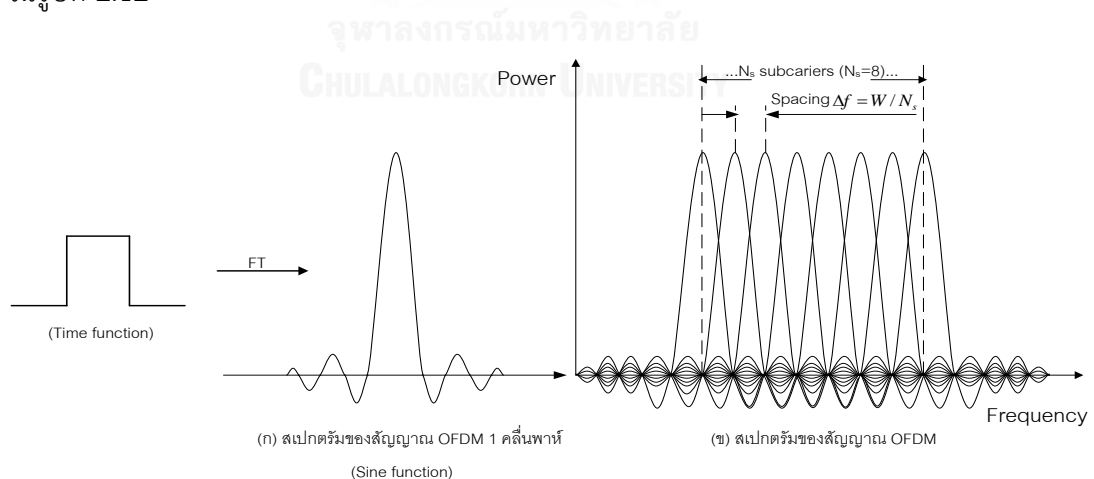
$$p(f) = \frac{1}{\Delta f} \operatorname{sinc} \left(\pi \frac{f}{\Delta f} \right) \quad (2.20)$$

จากคลื่นพาห์ย่อยที่มีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกันซึ่งกันและกัน จึงส่งผลให้แถบความถี่ของคลื่นพาห์ย่อยแต่ละคลื่นพาห์ย่อยที่ซ้อนทับกัน ปราศจากปรากฏการณ์การแทรกสอดกันของสัญญาณ (inter-carrier interference: ICI) อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของแบนด์วิดท์ที่ได้ประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับสัญญาณแบบ FDM ที่คลื่นพาห์ย่อยมีลักษณะช่องสัญญาณแบบไม่มีการซ้อนทับกัน แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมสัญญาณ (ก) สัญญาณ FDM ที่คลื่นพหุย่อยไม่มีการซ้อนทับกัน และ (ข) สัญญาณ OFDM ที่คลื่นพหุย่อยมีการซ้อนทับกันแบบตั้งฉากซึ่งกันและกัน [40]

หลักในการสร้างสัญญาณ CO-OFDM นั้น ใช้หลักการตามรูปที่ 2.11(ข) ซึ่งทำให้ประหยัดการใช้แบนด์วิดท์ได้ถึง 2 เท่า ดังนั้นการมอดูเลตสัญญาณแบบ CO-OFDM จึงทำให้ใช้ประโยชน์จากสเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด การซ้อนทับกันของคลื่นพหุย่อยนั้นจะต้องมีคุณสมบัติการตั้งฉากซึ่งกันและกัน (โดยให้ความถี่ห่างกันเท่ากับ $\Delta f = 1/T_s$ เมื่อ T_s คือคาบเวลาของสัญญาณ CO-OFDM) โดยสเปกตรัมของคลื่นพหุย่อยแต่ละคลื่นพหุย่อยมีค่าสูงสุดที่อยู่ความถี่ตรงกลางของคลื่นพหุย่อยนั้น และที่คลื่นพหุย่อยอื่น ๆ จะมีสเปกตรัมเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมของสัญญาณ CO-OFDM [40]

โดยในรูปที่ 2.12(ก) แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ CO-OFDM จำนวน 1 คลื่นพหุ และรูปที่ 2.12(ข) แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ CO-OFDM หลายคลื่นพหุ อีกทั้งการส่งสัญญาณโดย

คลื่นพายุย่อยที่มีอัตราข้อมูลต่ำขนานกันไป ยังสามารถลดปัญหาการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference: ISI) ได้อีกด้วย

2.4.2.1 การสร้างสัญญาณ CO-OFDM

การมอดูเลตสัญญาณแบบ CO-OFDM นั้นจะประกอบด้วยคลื่นพายุย่อยจำนวน N_s คลื่น ซึ่งคลื่นพายุย่อยแต่ละคลื่นพายุจะถูกนำไปมอดูเลตในลักษณะของสัญลักษณ์เชิงซ้อน d_i แบบ m-phase shift keying (m-PSK) หรือ n-quadrature amplitude modulation (n-QAM) โดยที่ i คือดัชนีคลื่นพายุย่อย, T_s คือคาบของสัญลักษณ์ CO-OFDM และ f_c คือความถี่คลื่นพายุหลัก ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ของสัญญาณ CO-OFDM จะเริ่มที่เวลา $t = t_s$ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.21)

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T_s} \right) (t-t_s) \right) \right\}, t_s \leq t \leq t_s + T_s \quad (2.21)$$

$$s(t) = 0, t < t_s \wedge t > t_s + T_s$$

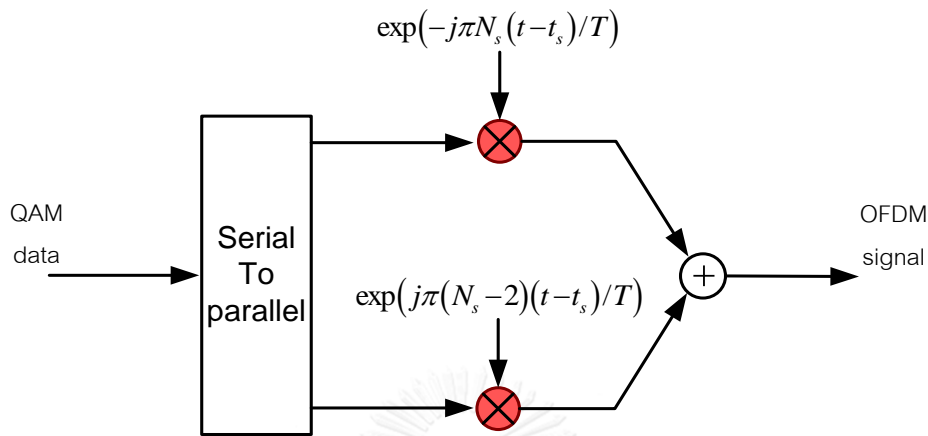
จากสมการที่ (2.21) สามารถเขียนแทนด้วยสมการของสัญญาณเบสแบนด์ ได้ดังสมการที่ (2.22)

$$s(t) = \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j2\pi \frac{i}{T_s} (t-t_s) \right), t_s \leq t \leq t_s + T_s \quad (2.22)$$

$$s(t) = 0, t < t_s \wedge t > t_s + T_s$$

สมการที่ (2.22) คือ สมการของสัญญาณเบสแบนด์ก่อนการมอดูเลตด้วยความถี่คลื่นพายุหลัก f_c โดยระบุสัญลักษณ์ของข้อมูลด้วยจำนวนเชิงซ้อนคือ $d_i = a_i^{(i)} + jb_0^{(i)}$ โดยที่ $i = 0, 1, \dots, N_s - 1$ และ $a_i^{(i)}, b_0^{(i)}$ คือองค์ประกอบของสัญลักษณ์ข้อมูล d_i ในส่วนจริง และส่วนจินตภาพซึ่งแทนส่วนของอินเฟส (in phase) และควอดเรเจอร์เฟส (quadrature phase) ของสัญญาณ CO-OFDM ตามลำดับ จากนั้นนำ $d_i, i = 0, 1, \dots, N_s - 1$ ไปคูณกับฟังก์ชัน cosine และ sine ของความถี่คลื่นพายุหลักเพื่อสร้างสัญญาณ CO-OFDM โดยรูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างการมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM เมื่อพิจารณาสัญญาณเชิงซ้อนเบสแบนด์ CO-OFDM ตามสมการที่ (2.22) จะเห็นว่าเป็นการแปลงฟูเรียร์กลับ (inverse Fourier transform: IFT) ของสัญญาณอินพุต n-QAM จำนวน N_s คลื่นพายุ

ย่อย ในกรณีที่เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องจะทำการแปลงฟูเรียร์วิฤตกลับ (inverse discrete fourier transform: IDFT) แสดงได้ดังสมการที่ (2.23)



รูปที่ 2.13 การมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM [40]

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left(j2\pi \frac{in}{N}\right) \quad (2.23)$$

เมื่อ เวลา t คือ จำนวนการสุ่ม n และ แทน N_s คือจำนวนการคำนวณใน IDFT

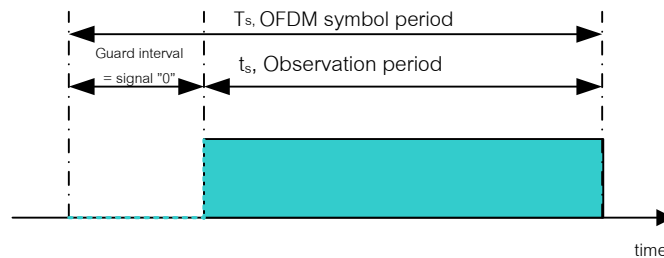
การติมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ที่ภาครับ ก็จะมีมีกระบวนการที่ตรงกันข้ามเมื่อเทียบกับการมอดูเลตสัญญาณที่ภาคส่ง การแปลงสัญญาณที่ภาครับนี้ตัวสัญญาณจะถูกส่งไปแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์เร็ว (fast fourier transform: FFT) โดยสัญญาณ d'_i คือสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นจากการแปลง FFT และ $r(n)$ แทนสัญญาณ IFFT ที่ได้รับ (IFFT received symbols) เขียนแทนด้วยสมการที่ (2.24)

$$d'_i = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N_s-1} r(n) \exp\left(-j2\pi \frac{ni}{N}\right) \quad (2.24)$$

2.4.2.2 guard interval และ cyclic prefix

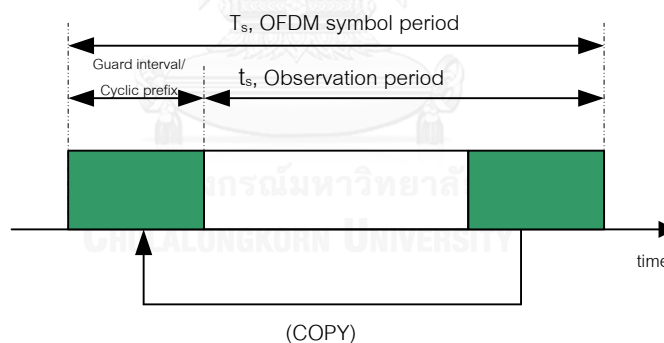
ผลของการเติม guard interval นั้นสามารถกำจัดผลของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) ได้ ซึ่งรูปแบบของ guard interval นั้นมีหลายรูปแบบ เช่น การเติมสัญลักษณ์ค่า 0 อย่างต่อเนื่องแทรกเข้าไปในช่วงต้นก่อนสัญลักษณ์ CO-OFDM ดังรูปที่ 2.14 สัญญาณ CO-OFDM ที่เติม guard interval โดยเติมสัญลักษณ์ค่า 0 อย่างต่อเนื่องในช่วงต้นก่อนสัญลักษณ์ OFDM ซึ่งในส่วนต้นของสัญญาณ OFDM ไม่ประกอบด้วยสัญลักษณ์ใด ๆ จึงทำให้สิ้นเปลืองช่วงเวลาของการส่งสัญญาณ

ที่ไม่ใช่ข้อมูลที่ต้องการไป การเติม guard interval ลักษณะนี้จะเกิดผลของการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณ (ICI) เนื่องจากการสูญเสียการตั้งฉากซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาย้อยแต่ละคลื่นพาย



รูปที่ 2.14 การเติม guard interval โดยใช้สัญญาณเท่ากับ 0 [40]

เพื่อแก้ปัญหา ICI การเติม guard interval ในรูปแบบที่เป็นแบบ cyclic extension หรือ cyclic prefix extension จึงถูกนำมาใช้ โดยมีหลักการคือ คัดลอกส่วนท้ายสุดของสัญลักษณ์ OFDM แล้วนำมาเติมในช่วงต้นก่อนสัญลักษณ์ OFDM เพื่อทำหน้าที่เป็น guard interval เนื่องจากสัญญาณในทางเวลายังคงลักษณะเดิม จึงทำให้คลื่นพาย้อยแต่ละคลื่นพาย้อยยังคงคุณสมบัติการตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15

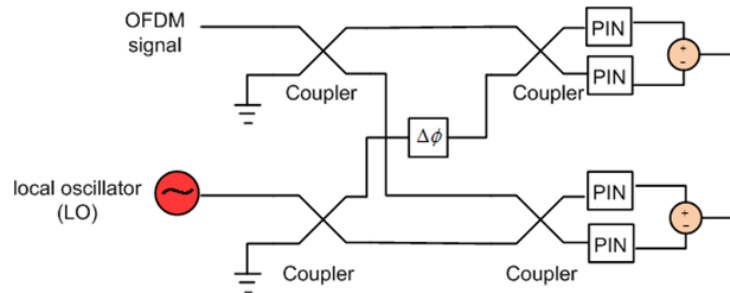


รูปที่ 2.15 การทำ cyclic prefix extension [40]

2.4.2.3 เทคโนโลยี optical coherent detection

การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (coherent detection) คือวิธีการตรวจจับสัญญาณโดยการใช้สัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ (local oscillator) คูณกับสัญญาณที่รับเข้ามาโดยที่สัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์จะซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาย ทั้งความถี่และเฟส จากรูปที่ 2.16 ที่ภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM เป็นแบบการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ สัญญาณแสงจะผ่านไปยัง coupler สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน สัญญาณจะถูกคูณกับสัญญาณแสงจาก LO โดยสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ

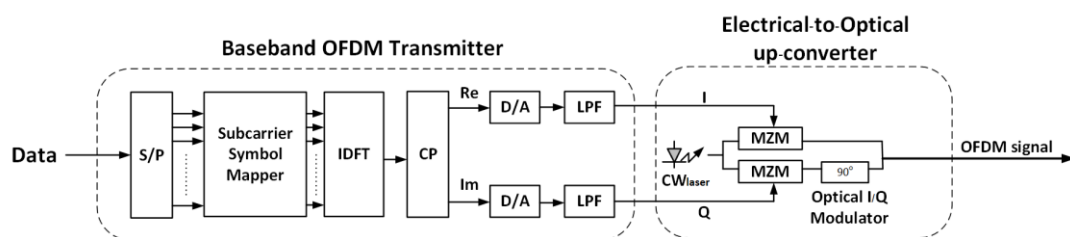
balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ subtractor แล้วผ่านไปยังอุปกรณ์ตีมอดูเลต สัญญาณ CO-OFDM ซึ่งการตรวจจับสัญญาณด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือ ทำให้จำนวนอัตราข้อมูลต่อ ช่องสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเกิดประโยชน์



รูปที่ 2.16 โครงสร้างภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM ที่ใช้การตรวจจับสัญญาณ แบบโคฮีเรนต์ [36, 41]

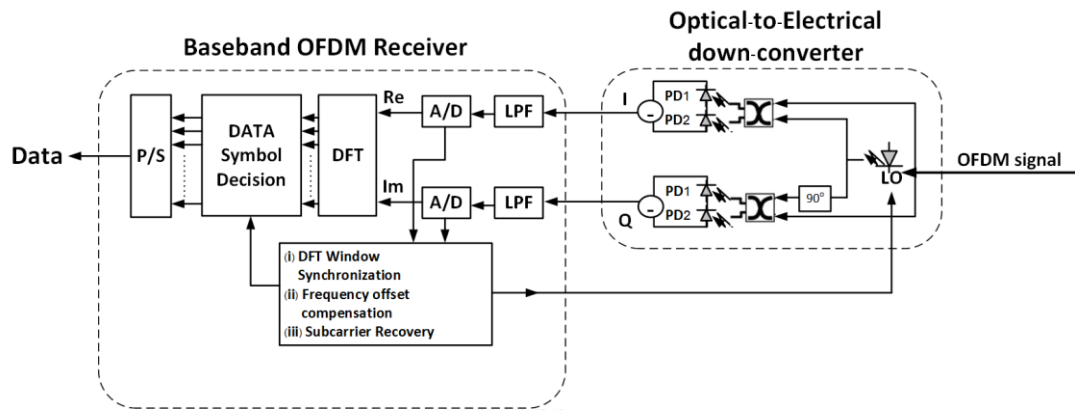
2.4.2.4 ภาคส่งและภาครับสัญญาณ OFDM

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการต่าง ๆ ในส่วนของภาคส่งและภาครับของสัญญาณ CO-OFDM ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โครงสร้างภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM เริ่มจากการนำสัญญาณ ข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูงขาเข้า มาแบ่งเป็นเป็นข้อมูลกลุ่มย่อย ๆ ความเร็วต่ำจำนวนหลายกลุ่ม ส่งแบบขนานกันไปเข้ารหัสที่ symbol mapper ซึ่งจำนวนบิตต่อ symbol จะเป็นไปตามรูปแบบของ การมอดูเลตสัญญาณลงบนคลื่นพาห่อย่อยแต่ละคลื่นพาห่ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปแปลงฟูเรียร์ เร็วกลับ (IFFT) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความถี่ขึ้นซึ่งกันและกันของคลื่นพาห่อย่อยแต่ละคลื่นพาห่ จึงได้สัญญาณ OFDM กระบวนการต่อไปคือการเติม cyclic prefix ลงบนสัญญาณ OFDM ตามหัวข้อ 2.4.2.2 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะลอก (digital to analog convertor: DAC) ก่อนที่จะนำสัญญาณแอนะลอกที่แยกออกเป็นสัญญาณ I Q นั้นไป มอดูเลตทางแสงด้วย Mach zenhder modulator (MZM) 2 ตัว จึงจะได้สัญญาณ CO-OFDM อย่างสมบูรณ์แบบที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ ต่างจากสัญญาณแบบ noncoherent OFDM ที่ใช้ MZM เพียงตัวเดียวในการมอดูเลตซึ่งได้สัญญาณ noncoherent OFDM ที่มีเฉพาะค่าบวก



รูปที่ 2.17 โครงสร้างภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM

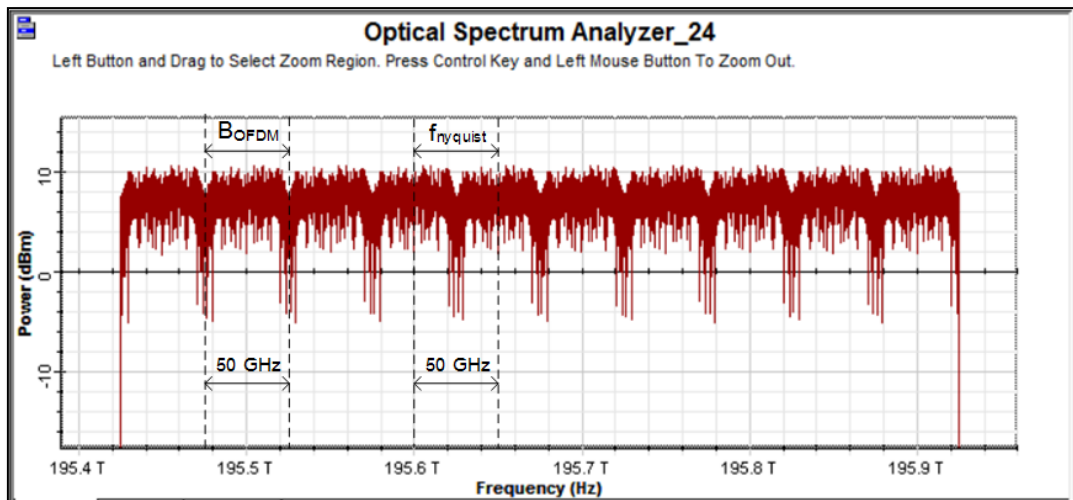
ในส่วนโครงสร้างภาครับของสัญญาณ CO-OFDM ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จะมีกระบวนการตรงข้ามกับกระบวนการส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM



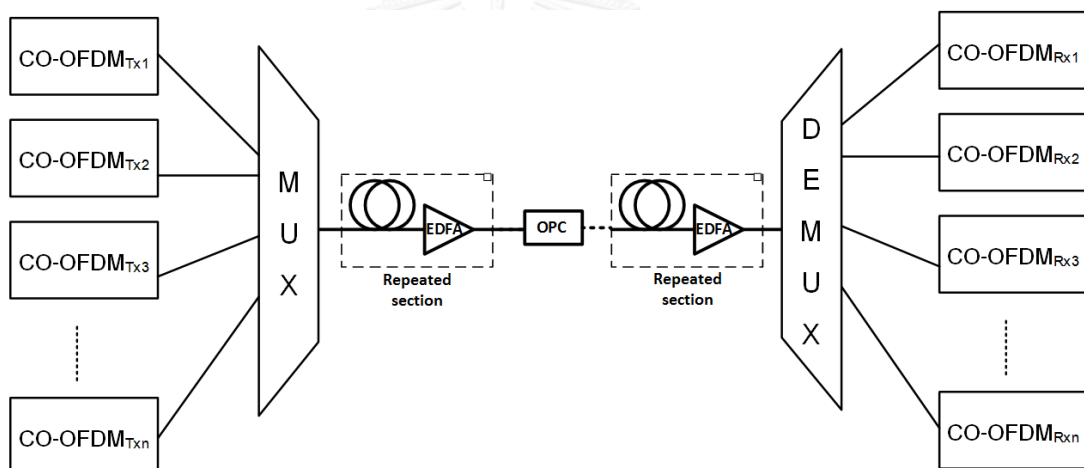
รูปที่ 2.18 โครงสร้างภาครับของสัญญาณ CO-OFDM

2.4.3 การส่งสัญญาณแบบ Superchannel

Superchannel คือเทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่พัฒนามาจากการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing : DWDM) การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ Superchannel เป็นการนำเอาสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันมา มัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสง โดยที่ความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณจะต้องอยู่ห่างกันมีค่าเท่ากับสองเท่าของความถี่ไนควิสต์ (Nyquist frequency) แสดงดังรูปที่ 2.19 สเปกตรัมของสัญญาณแบบ Superchannel ที่แต่ละช่องสัญญาณมีความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 50 GHz จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่ความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณที่อยู่ติดกันจะห่างกันมีค่าเท่ากับสองเท่าของความถี่ไนควิสต์ซึ่งก็คือ 50 GHz ข้อดีของการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ Superchannel คือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth efficiency) หรือการใช้แบนด์วิดท์ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุด เมื่อเทียบกับการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นแบบหนาแน่นแบบเดิม ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่มากกว่าทำให้สิ้นเปลืองแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปอย่างไม่เกิดประโยชน์ โครงสร้างการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ Superchannel นี้มักถูกนำมาใช้กับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์เพื่อสร้างระบบที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.20



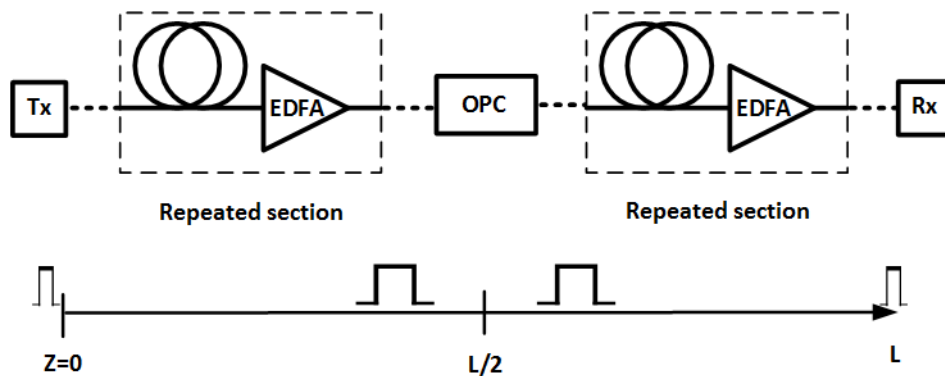
รูปที่ 2.19 สเปกตรัมของสัญญาณแบบ Superchannel



รูปที่ 2.20 โครงสร้างการส่งสัญญาณของระบบ Superchannel CO-OFDM

2.5 เครื่องส่งยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugator: OPC)

วิธีการชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดีสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง คือ วิธีการคอนจูเกตสัญญาณ (phase conjugated) โดยอาศัยการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง (optical phase conjugator, OPC) ไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วนแสดงดังรูปที่ 2.21

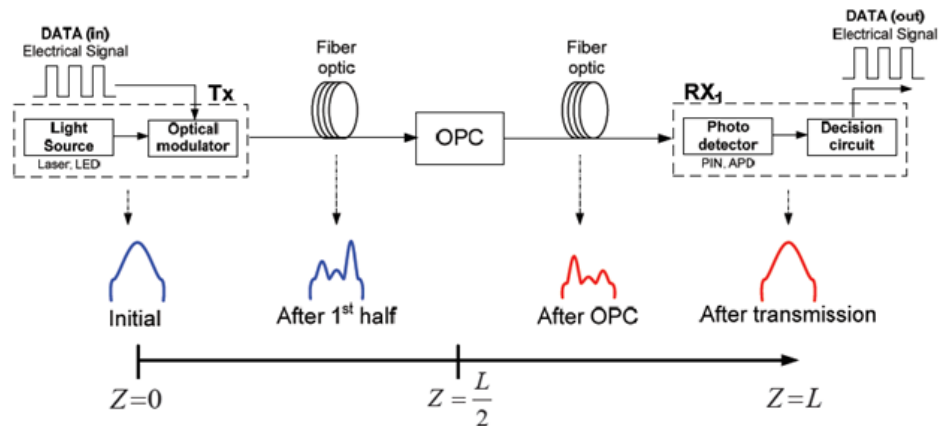


รูปที่ 2.21 โครงสร้างการส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลางของระบบ

เมื่ออุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงปล่อยสัญญาณแสงเข้าสู่เส้นใยแสง รูปสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านในส่วนครึ่งแรกของระบบ ซึ่งสามารถพิจารณาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณได้จากสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเจอร์ ในสมการที่ (2.1) จากนั้นสัญญาณแสงจากส่วนครึ่งแรกจะผ่านเข้าสู่ OPC ซึ่งมีหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณคอนจูเกต จากสัญญาณแสง A จะได้สัญญาณคอนจูเกต A^* ซึ่งเป็นสัญญาณแสงใหม่สำหรับเดินทางผ่านเส้นใยแสงในส่วนครึ่งหลัง ทำให้ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกถูกปรับเปลี่ยนกลับมาเป็นรูปสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเหมือนกับสัญญาณแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องส่งสัญญาณแสง ทั้งนี้สัญญาณคอนจูเกตจะเป็นไปตามสัญลักษณ์ของสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเจอร์ ดังสมการที่ (2.25)

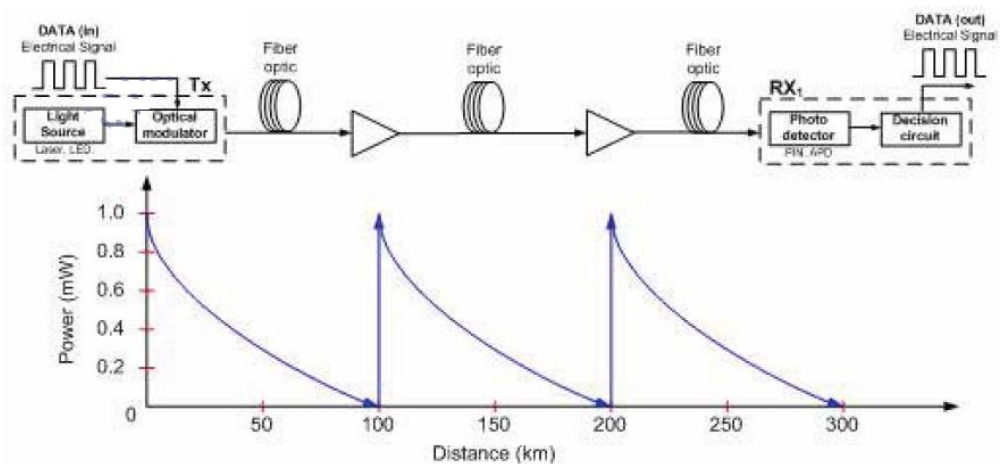
$$-\frac{\partial A^*}{\partial z} = +\frac{1}{2}\alpha A^* - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} + i\gamma |A^*|^2 A^* \quad (2.25)$$

จากทั้งสมการแสดงการเดินทางในส่วนครึ่งแรกและส่วนครึ่งหลังของระบบในสมการที่ (2.1) และ (2.25) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางในส่วนครึ่งแรกไประยะทางหนึ่ง จะเกิดดิสเพอร์ชันขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า β_2 และเมื่อสัญญาณคอนจูเกตที่ออกมาจาก OPC มีค่าดิสเพอร์ชันติดลบเป็น $-\beta_2$ ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นจากสัญญาณแสงที่เดินทางในส่วนครึ่งหลังสามารถหักล้างกับดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกได้หมด ทั้งนี้ตำแหน่งการวางของ OPC จะต้องอยู่กึ่งกลางของระยะทางทั้งหมด เพื่อให้ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันถูกชดเชยได้สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กระบวนการส่งยุคเฟสแสง [42]

แม้ว่า OPC จะสามารถชดเชยดิสเพอร์ชันได้อย่างสมบูรณ์ แต่ปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM ซึ่งเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์เคอร์ไม่สามารถถูกชดเชยได้สมบูรณ์เหมือนกับปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน ทั้งนี้เป็นเพราะปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM ขึ้นอยู่กับค่ากำลังของสัญญาณ เนื่องจากค่าการลดทอนกำลังสัญญาณที่ไม่เป็นศูนย์ ทำให้กำลังของสัญญาณแสงลดลงไปเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางผ่าน ซึ่งหากว่ากำลังของสัญญาณแสงลดลง ความรุนแรงของปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM ก็จะอ่อนลงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังของระบบไม่สมมาตรกันดังรูปที่ 2.23 ปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM ที่เกิดขึ้น ในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังจึงไม่สมดุลกัน ทำให้ไม่สามารถชดเชยปรากฏการณ์เคอร์ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.23 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง [42]

ถึงแม้ว่าวิธีการสังยุคเฟสแสงจะไม่สามารถชดเชยปรากฏการณ์เคอร์ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากปัญหาของปรากฏการณ์ SPM, XPM และ FWM แต่หากต้องการชดเชยปรากฏการณ์ดังกล่าว ยังมีวิธีที่สามารถนำมาช่วยชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ ขยายสัญญาณแสงในระบบการรับส่งสัญญาณให้สั้นลง [43] การใช้ dispersion-decreasing fiber [44] การใช้ Raman amplification [45] และการออกแบบตำแหน่งของอุปกรณ์ในระบบการรับส่งสัญญาณ [46-48] เป็นต้น

2.5.1 การกำเนิดสังยุคของสัญญาณ (Conjugated signal)

วิธีการคอนจูเกตสัญญาณหรือการสร้าง OPC จากเส้นใยแสงนั้น คือวิธีการสร้างสังยุคของสัญญาณ หรือ การสร้างสัญญาณคอนจูเกตขึ้นมาจากสัญญาณแสงเดิม โดยอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ FWM ซึ่งเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์สามชนิดภายใต้ปรากฏการณ์เคอร์ ปรากฏการณ์ FWM เกิดจากการที่มีสัญญาณแสง 4 สัญญาณเดินทางร่วมกันในเส้นใยแสง โดยสัญญาณแสงหนึ่งสามารถถ่ายเทพลังงานให้อีกสัญญาณแสงหนึ่งได้ ทั้งนี้สัญญาณแสงทั้ง 4 สัญญาณจะต้องมีความถี่และเฟสสอดคล้องกับเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition) และเงื่อนไขการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังแสดงในสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ

สมการเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.26)$$

สมการเงื่อนไขการจับคู่เฟส (phase matching condition)

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.27)$$

โดยที่ f_n คือ สัญญาณความถี่ n

k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

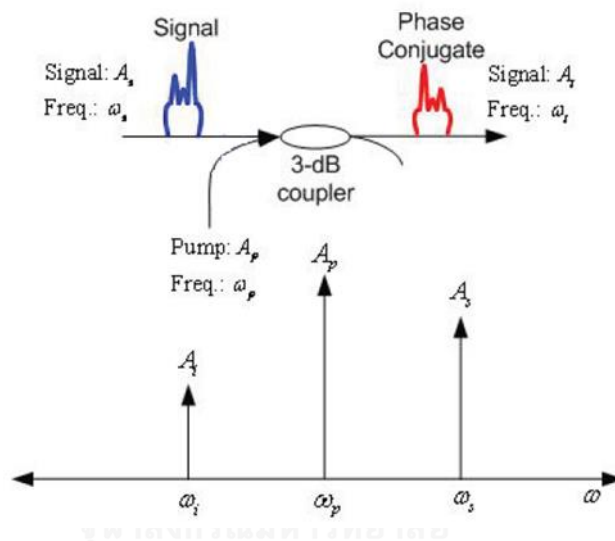
โดยส่วนใหญ่ปรากฏการณ์ FWM จะเกิดขึ้นในกรณีที่สัญญาณแสงเดินทางพร้อมกับสัญญาณรบกวนภายในเส้นใยแสง หรือในระบบ WDM ที่มีความสัมพันธ์ตรงตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่และเฟสพอดี สัญญาณแสงจะเกิดการถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณรบกวนหรือสัญญาณแสงอื่น ๆ ที่มีค่าความยาวคลื่นต่างออกไป ทำให้เกิดสัญญาณ crosstalk ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

2.5.2 ชนิดของ OPC

โดยทั่วไปแล้ว OPC สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดตามความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกต คือ ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift type) และ ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free type)

2.5.2.1 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น

โดยปกติ OPC ทั่วไปจะเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่นเนื่องจากในกระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตหรือสัญญาณคอนจูเกต สามารถทำได้ง่ายกว่า เพราะอาศัยสัญญาณปั๊มเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้นดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตชนิดเลื่อนความยาวคลื่น [42]

จากรูปที่ 2.24 จะเห็นว่ามีการใช้สัญญาณปั๊มเพียงสัญญาณเดียว โดยปั๊มสัญญาณปั๊มที่ความยาวคลื่น ω_p ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ส่งผลให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น แต่สัญญาณคอนจูเกตที่ได้จะมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป คือความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นที่อีกฝากหนึ่งของสัญญาณปั๊ม

สำหรับการชดเชยปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันด้วย OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้น จะต้องมี การคำนวณระยะทางในส่วนครึ่งแรกและระยะทางในส่วนครึ่งหลังให้เหมาะสม เพื่อให้ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังสมดุลกันพอดี การชดเชยความผิดเพี้ยนจึงจะเกิดขึ้นได้อย่าง สมบูรณ์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาว คลื่นเป็นดังสมการที่ 2.28

$$\beta_2(\omega_s) \times L_1 = \beta_2(\omega_i) \times (L - L_1) \quad (2.28)$$

โดยที่ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณในครั้งแรก

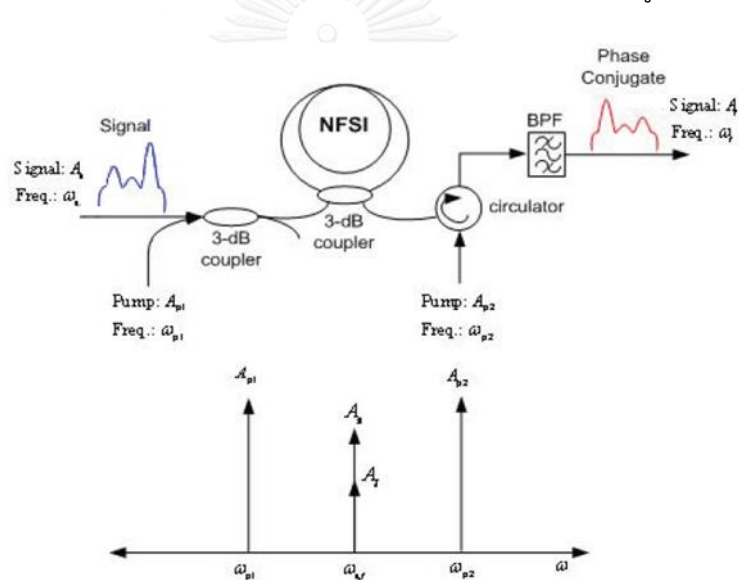
ω_i คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณในครั้งหลัง

L_1 คือ ระยะทางในครั้งแรก

L คือ ระยะทางในการรับส่งสัญญาณทั้งหมด

2.5.2.2 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

OPC ชนิดนี้ใช้ปรากฏการณ์ FWM ในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตเช่นเดียวกัน แต่จะให้สัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิม ดังนั้นในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตจึงต้องอาศัยสัญญาณปั๊มสองสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น [42]

จากรูปที่ 2.25 สัญญาณปั๊มแรกจะอยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p1} และสัญญาณปั๊มที่สองจะอยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p2} เมื่อความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มทั้งสองสอดคล้องกันตามเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM และมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมกันแล้ว จะทำให้ความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิมที่ความยาวคลื่น ω_s แต่กำลังสัญญาณของสัญญาณคอนจูเกตจะมีค่าลดลงไปจากสัญญาณแสงเดิม และมีค่ากำลังสัญญาณที่ต่ำกว่าสัญญาณคอนจูเกตแบบชนิดเลื่อนความยาวคลื่นอีกด้วย

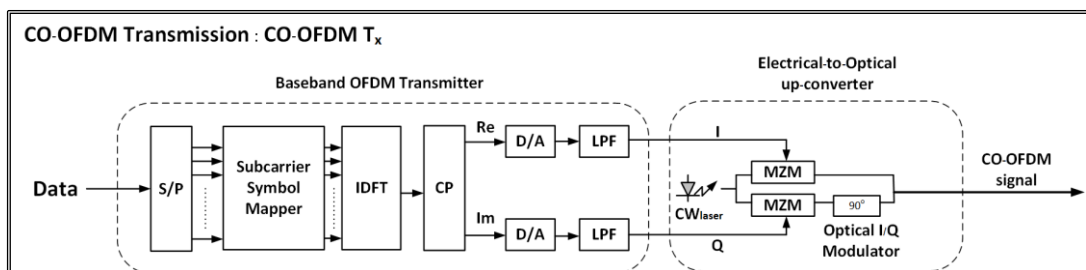
บทที่ 3

การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งสัญญาณ CO-OFDM แบบจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC

จากทฤษฎีพื้นฐานของการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM การมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM รวมไปถึงการส่งสัญญาณแบบ Superchannel และหลักการทำงานของ OPC ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ ร่วมกับ OPC พร้อมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งสัญญาณ CO-OFDM แบบจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ

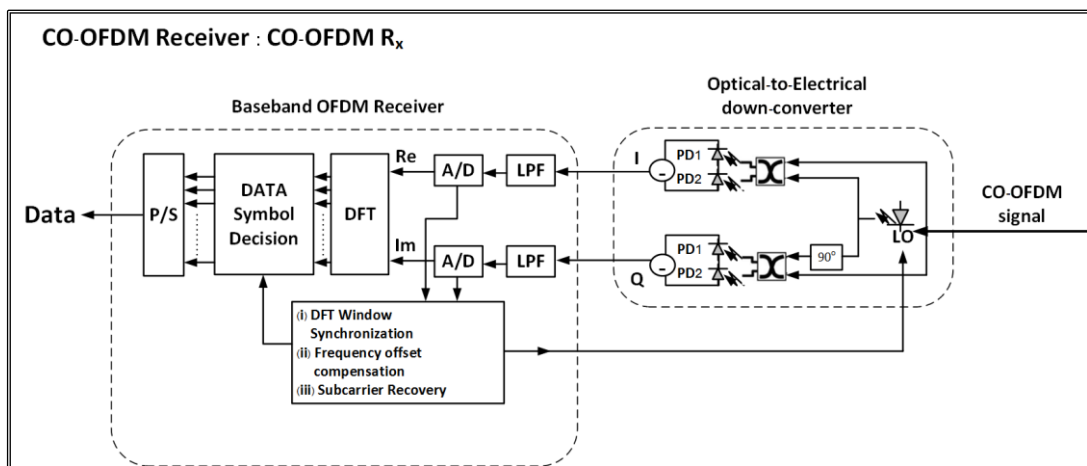
โครงสร้างในส่วนภาคส่งของสัญญาณ CO-OFDM ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เริ่มจากการนำสัญญาณข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูงที่มีอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s เข้ามาในระบบมาทำการเข้ารหัสแบบ 4-QAM ที่ symbol mapper ซึ่งจำนวนบิตต่อ symbol จะมีค่าเท่ากับ 2 บิตต่อหนึ่ง symbol เป็นไปตามรูปแบบของการมอดูเลตสัญญาณลงบนคลื่นพาห่อย่อยแต่ละคลื่นพาห่ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปแปลงฟูเรียร์เร็วกลับ (IFFT) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความถี่ขึ้นซึ่งกันและกันของแต่ละคลื่นพาห่อย่อยจึงได้สัญญาณ OFDM ต่อมนำสัญญาณ OFDM ที่ได้มาผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ DAC จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งเข้าสู่อุปกรณ์ Electrical-to-Optical up converter ที่ภายในจะทำการมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 Hz รวมไปถึงทำการมอดูเลตทางแสงด้วย MZM จึงจะได้สัญญาณ CO-OFDM ที่สมบูรณ์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งของระบบ CO-OFDM ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM

โครงสร้างภาครับของสัญญาณ CO-OFDM ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะมีกระบวนการตรงกันข้ามกับกระบวนการของภาคส่งสัญญาณ CO-OFDM โดยที่ภาครับจะนำสัญญาณ CO-OFDM เข้าสู่ อุปกรณ์ Optical-to-Electrical down converter ซึ่งภายในประกอบไปด้วย local oscillator (LO)

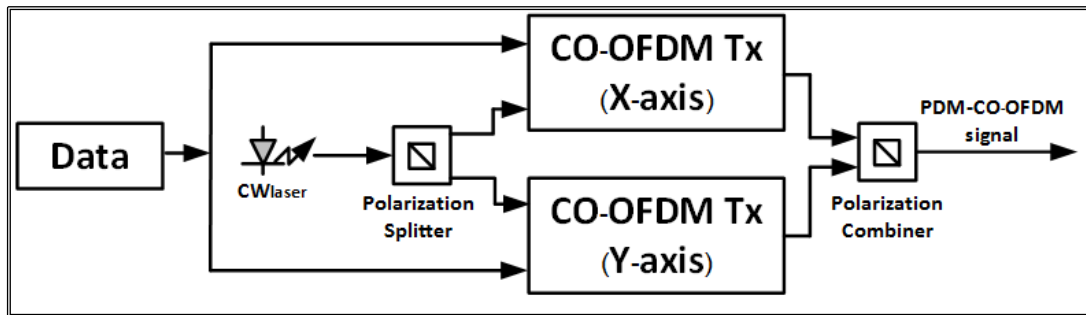
ทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่มีความถี่และเฟสเดียวกับสัญญาณที่รับเข้ามา โดยที่สัญญาณจาก LO จะซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาห์ที่รับเข้ามาทั้งความถี่และเฟส ต่อจากนั้นสัญญาณที่ซิงโครไนซ์แล้วจะถูกส่งเข้าสู่ photodiode (PD) ที่มีค่า thermal noise เท่ากับ $12.83 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ และ dark current เท่ากับ 10 nA ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางแสงที่ได้รับจาก LO เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้มาทำการตีมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 GHz ต่อจากนั้นนำสัญญาณที่ได้ส่งผ่าน ADC เพื่อทำการ sampling สัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลเข้า FFT เพื่อตีมอดูเลตคลื่นพาห์ย่อยทั้งหมดออก ต่อมานำสัญญาณมาทำการถอดรหัสที่ data symbol decision โดยการแปลงจากสัญญาณ symbol เป็นสัญญาณดิจิทัล และแปลงสัญญาณกลับเป็นแบบอนุกรมในขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.2 โครงสร้างภาครับของระบบ CO-OFDM ที่ทำการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM

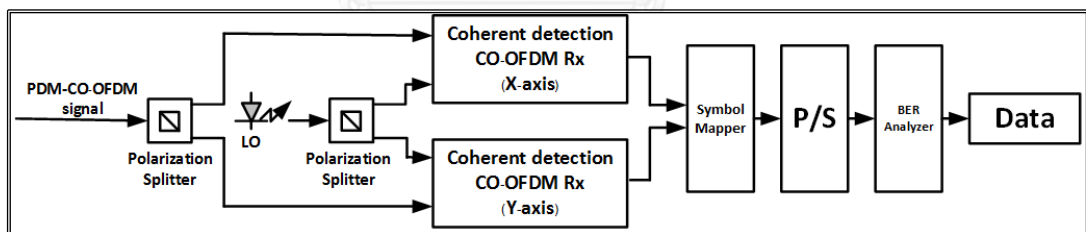
3.2 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ

โครงสร้างภาคส่งสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิด (CW laser) ซึ่งใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ต่อเข้ากับ Polarization splitter เพื่อทำการแยกสัญญาณทางแสงส่งออกไปทั้งในแนวแกน polarization X และ polarization Y จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการมอดูเลตสัญญาณแบบ CO-OFDM ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แขน คือ CO-OFDM T_x (X-axis) ทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่อัตราข้อมูล 50 Gb/s และ CO-OFDM T_y (y-axis) ทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่อัตราข้อมูล 50 Gb/s กระบวนการมอดูเลตทั้งสองแขนนี้จะเกิดไปพร้อม ๆ กัน ต่อจากนั้น polarization combiner จะทำหน้าที่รวมสัญญาณจาก CO-OFDM T_x (X-axis) และ CO-OFDM T_y (y-axis) เข้าด้วยกันเป็นสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM ที่มีอัตราข้อมูลรวมเป็น 100 Gb/s



รูปที่ 3.3 โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM-CO-OFDM

โครงสร้างภาครับของระบบ PDM-CO-OFDM แสดงดังรูปที่ 3.4 สัญญาณ PDM-CO-OFDM ที่มีอัตราข้อมูล 100 Gb/s จะถูกแยกสัญญาณกลับออกไปในแนวแกน polarization X และ polarization Y ที่ Polarization splitter จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบ โคฮีเรนต์ โดยที่สัญญาณของ LO จะซึ่งโครโนซ์กับสัญญาณคลื่นพาห้ทั้งความถี่และเฟส แล้วทำการ ดิมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ทั้งสองแกน polarization คือ CO-OFDM Rx (X-axis) ทำหน้าที่ ดิมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่อัตราข้อมูล 50 Gb/s และ CO-OFDM Rx (Y-axis) ทำหน้าที่ดิมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่อัตราข้อมูล 50 Gb/s ถัดจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราผิดพลาด (BER) ซึ่งออกแบบ ด้วยโปรแกรม matlab ที่ BER analyzer



รูปที่ 3.4 โครงสร้างภาครับของระบบ PDM-CO-OFDM

3.3 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel

ในหัวข้อนี้จะนำเอาโครงสร้างภาคส่งและภาครับของระบบ PDM-CO-OFDM จากที่ได้กล่าว ในหัวข้อที่แล้วมาทำการมัลติเพล็กซ์แบบ Superchannel โดยแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือ ภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ส่วนที่สองคือระบบสายส่งสัญญาณ และส่วนที่ สามภาครับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel โดยในส่วนแรกภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel คือการนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 10 ความยาว

คลื่นมัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงจำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s หรือ 1000 Gb/s วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ที่ใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ดังตารางที่ 3.1 แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing (Mux)

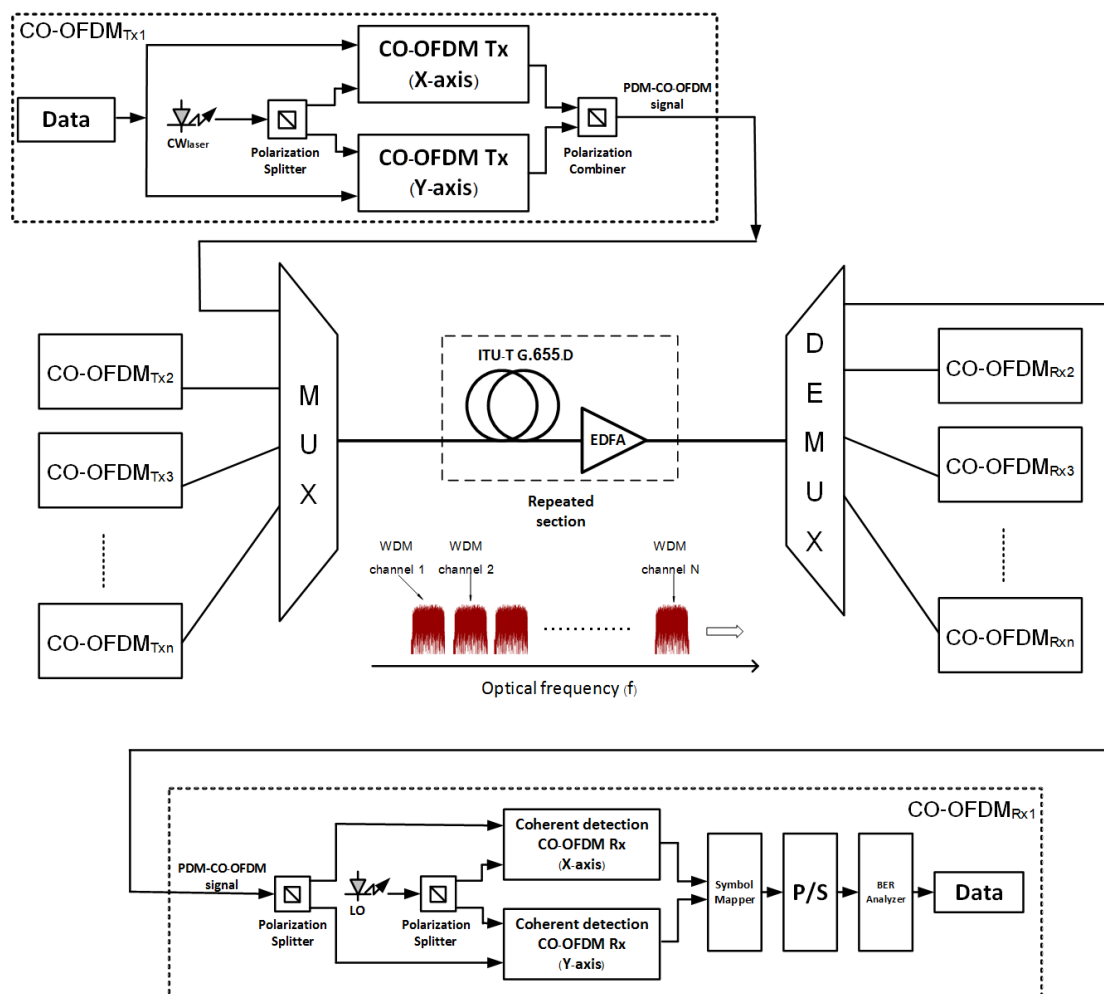
ตารางที่ 3.1 ความยาวคลื่นและความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณของระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel

ช่องสัญญาณ	ความยาวคลื่น (nm)	ความถี่ (THz)
1	1533.86	195.45
2	1533.47	195.50
3	1533.07	195.55
4	1532.68	195.60
5	1532.29	195.65
6	1531.90	195.70
7	1531.51	195.75
8	1531.12	195.80
9	1530.72	195.85
10	1530.33	195.90

ในส่วนที่สองระบบสายส่งสัญญาณ หลังจากทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจำนวน 10 ช่องสัญญาณด้วย MUX แล้วสัญญาณแสงจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) ที่ระยะต่าง ๆ ในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นแปรผันตรงกับระยะทางของเส้นใยแสง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการเลือกวิเคราะห์ระบบที่มีการติดตั้งตัวขยายสัญญาณแสงที่ระยะทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร

ส่วนที่สามภาครับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel เริ่มจากการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM demultiplexing (Demux) ที่รับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสง โดย Demux เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นสัญญาณแสง

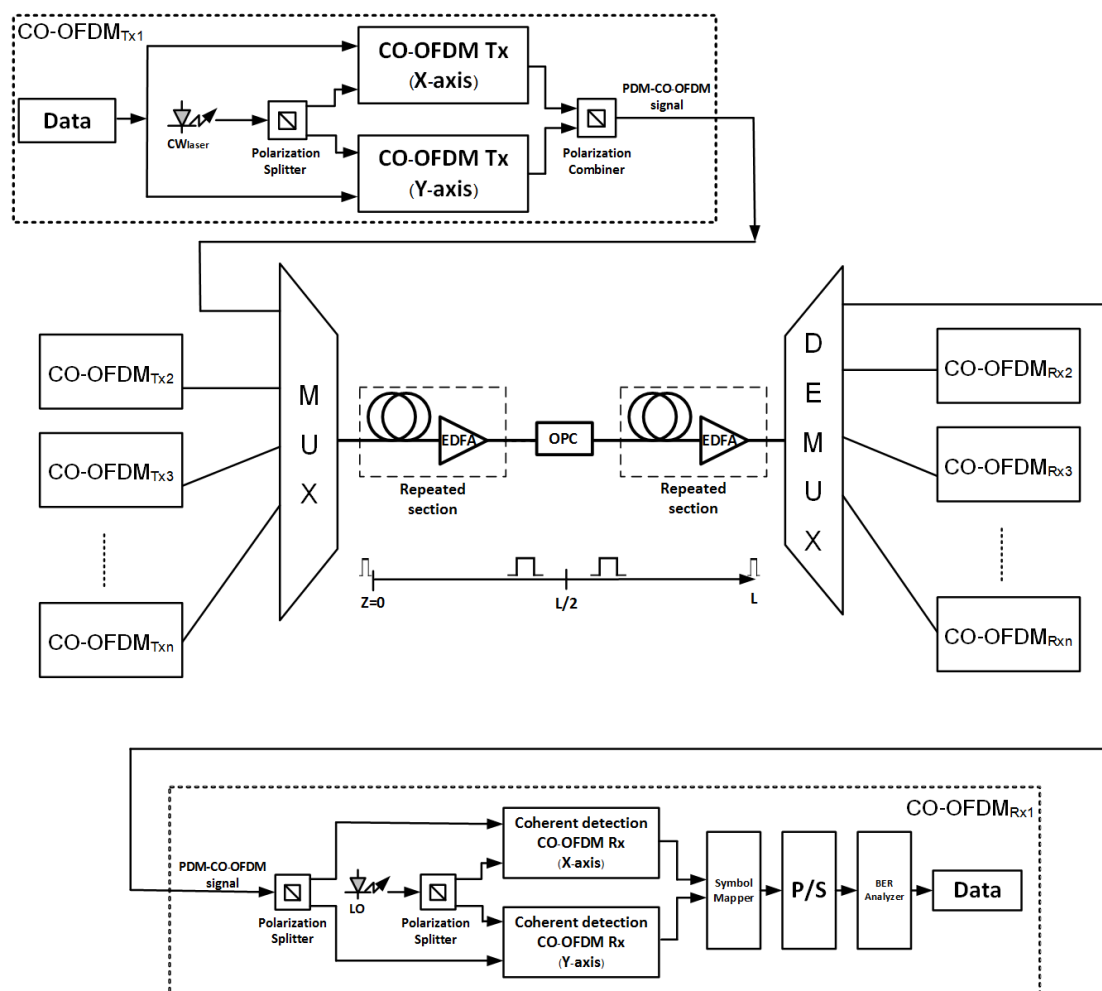
แต่ละความยาวคลื่น จะถูกแยกสัญญาณออกเป็นสองแกนคือ ในแนวแกน polarization X และ polarization Y ที่ Polarization splitter จากนั้นจะใช้ LO ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ แล้วจึงทำการตีมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ทั้งสองแกน polarization คือ CO-OFDM Rx (X-axis) ทำหน้าที่ตีมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X และ CO-OFDM Rx (Y-axis) ทำหน้าที่ตีมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ถัดจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาด (BER) ที่ BER analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel

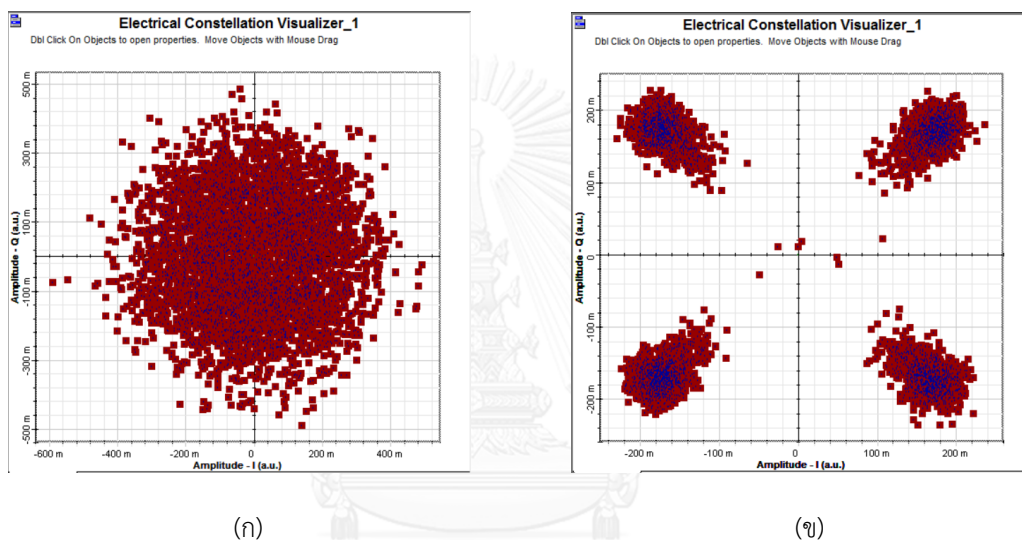
3.4 การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC

ที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยสัญญาณผิดเพี้ยนที่เกิดการขยายออกเนื่องจากปัญหาดีสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน เมื่ออุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงทำการปล่อยสัญญาณแสงเข้าสู่เส้นใยแสง สัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านในส่วนครึ่งแรกของระบบ จากนั้น สัญญาณแสงจากส่วนครึ่งแรกจะผ่านเข้าสู่ OPC ซึ่งมีหน้าที่ในการคอนจูเกตสัญญาณสัญญาณคอนจูเกตหลังจากที่ผ่าน OPC ซึ่งเป็นสัญญาณแสงใหม่สำหรับเดินทางผ่านเส้นใยแสงในส่วนครึ่งหลัง ทำให้ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกถูกปรับเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเหมือนกับสัญญาณแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องส่งสัญญาณแสง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางในส่วนครั้งแรกไประยะทางหนึ่ง จะเกิดดิสเพอร์ชันเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางของเส้นใยแสง และเมื่อสัญญาณคอนจูเกตที่ออกมาจาก OPC มีค่าดิสเพอร์ชันติดลบซึ่งเป็นค่าตรงกันข้ามกับดิสเพอร์ชันในส่วนระยะทางครั้งแรก ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นจากสัญญาณแสงที่เดินทางในส่วนครั้งแรกสามารถหักล้างกับดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครั้งแรกได้หมด ทั้งนี้ตำแหน่งการวางของ OPC จะต้องอยู่กึ่งกลางของระยะทางทั้งหมด เพื่อให้ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันถูกชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ โดยในรูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบ constellation ของสัญญาณ PDM-CO-OFDM ที่มีการมอดูเลตแบบ 4-QAM ของระบบสายส่งที่มีการติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ และระบบที่ไม่มีการติดตั้ง OPC



รูปที่ 3.7 (ก) constellation ของสัญญาณ CO-OFDM ที่มีการมอดูเลตแบบ 4-QAM ไม่มีที่มีการติดตั้ง OPC
(ข) constellation ของสัญญาณ CO-OFDM ที่มีการมอดูเลตแบบ 4-QAM ที่มีการติดตั้ง OPC

3.5 จำนวนคลื่นพาร์ย่อยที่ใช้สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC

การมอดูเลตสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาร์ย่อยแตกต่างกัน โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.23 แทนเวลา t ด้วยจำนวนการสุ่ม n และแทน N ด้วยจำนวนการคำนวณใน IDFT ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถแปลงฟูเรียร์เร็วกลับ IFFT แทนการแปลง IDFT ได้ การแปลงฟูเรียร์ของพัลส์สี่เหลี่ยมจะเกิดสัญญาณที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันซิงก์ (sinc function) ในทางความถี่ โดยการแปลงฟูเรียร์ของพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีคาน้อย จะส่งผลให้สัญญาณฟังก์ชันซิงก์ที่ได้ ออกมามีพลังงานที่ฮาร์มอนิกความถี่สูง ส่งผลให้เกิดแบนด์วิดท์ส่วนเกินตามมา เมื่อพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาร์ย่อยในการส่งที่เท่ากัน กรณีการส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลที่สูงกว่าจะส่งผลให้เกิดแบนด์วิดท์ส่วนเกินมากกว่าการส่งสัญญาณด้วยอัตรา

ข้อมูลที่ต่ำ และเมื่อพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้อย่อยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้คลื่นพาห้อย่อยแต่ละคลื่นพาห้มีการส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลที่ต่ำลง ซึ่งการเกิดแบนด์วิดท์ส่วนเกินก็จะน้อยลงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM ที่ใช้จำนวนคลื่นพาห้อย่อยที่น้อยกว่า แบนด์วิดท์ส่วนเกินนั้นจะทำให้เกิดการใช้แบนด์วิดท์อย่างไม่มีประสิทธิภาพ รวมไปถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการส่งสัญญาณเนื่องจากต้องใช้พลังงานในการส่งสูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นการเพิ่มจำนวนคลื่นพาห้อย่อยให้มีจำนวนมากขึ้นจะสามารถลดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้ และการเพิ่มจำนวนคลื่นพาห้อย่อยยังส่งผลต่อความยาวสัญลักษณ์ของสัญญาณแบบ PDM-CO-OFDM โดยความยาวสัญลักษณ์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัญญาณ PDM-CO-OFDM ทนทานต่อการประวิงเวลาของช่องสัญญาณได้มากขึ้นด้วย การเพิ่มจำนวนคลื่นพาห้ของสัญญาณยังส่งผลให้ที่ภาครับมีอัตราบิดผิดพลาดต่ำลง

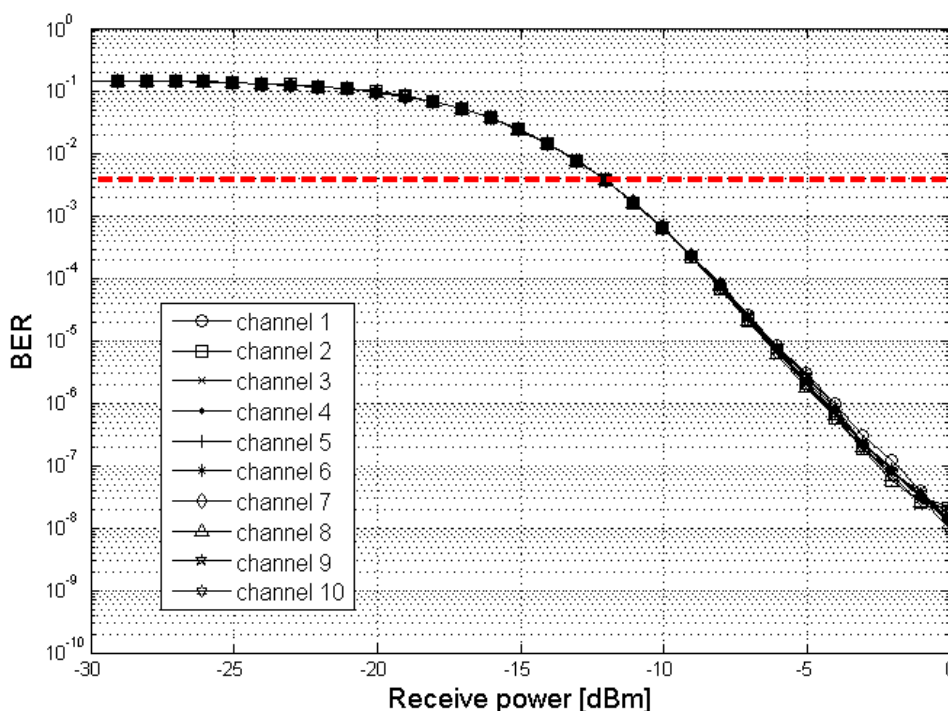
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาความยาวคลื่นและความถี่แต่ละช่องสัญญาณของระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ดังตารางที่ 3.1 โดยจำลองระบบแบบ back-to-back ซึ่งยังไม่มีมีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s หรือ 1000 Gb/s ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์หาจำนวนคลื่นพาห้อย่อยที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC ในบทต่อไป โดยจะพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER) เท่ากับ 4×10^{-3} ณ กำลังของสัญญาณที่ภาครับ (receive power) ที่มีค่าเท่ากัน ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิดผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 3.2 จำนวนจำนวนคลื่นพาห้อย่อย จำนวนบิต และจำนวนสัญลักษณ์สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM

Number of subcarrier	Sequence length (bit)	Number of symbol
128	8192	32
256	8192	16
512	8192	8
1024	8192	4
2048	8192	2

3.5.1 จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 128 คลื่นพายุ

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ที่ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ หรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 128 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 32 symbol แสดงดังรูปที่ 3.8



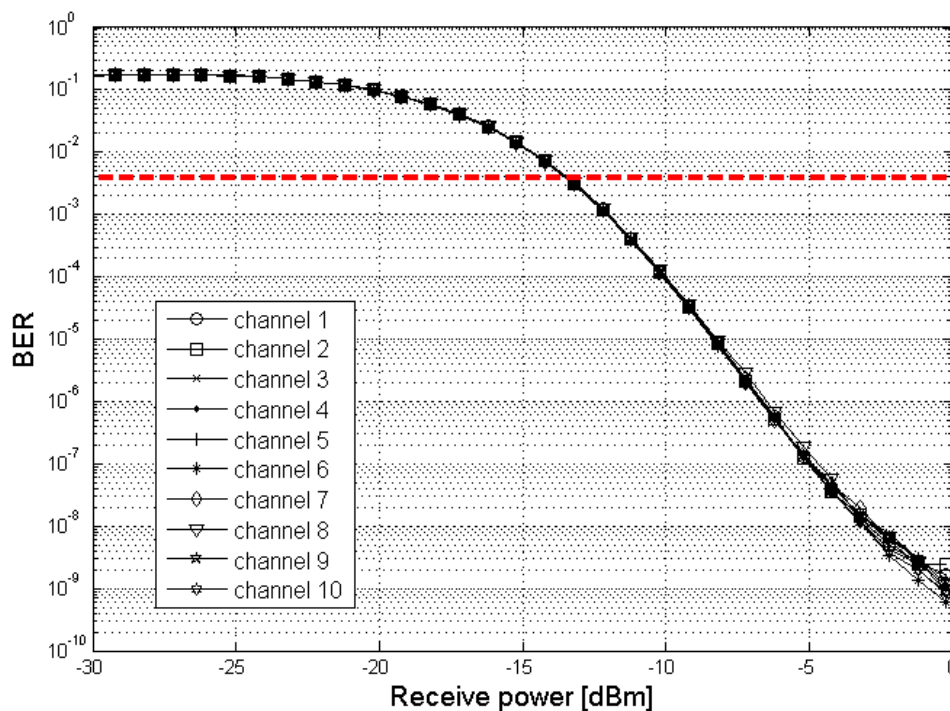
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 128

ผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 128 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 32 symbol พบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับ

เท่ากับ -12.052 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้ เท่ากับ 4×10^{-3}

3.5.2 จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 256 คลื่นพายุ

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ที่ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ หรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 256 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol แสดงดังรูปที่ 3.9



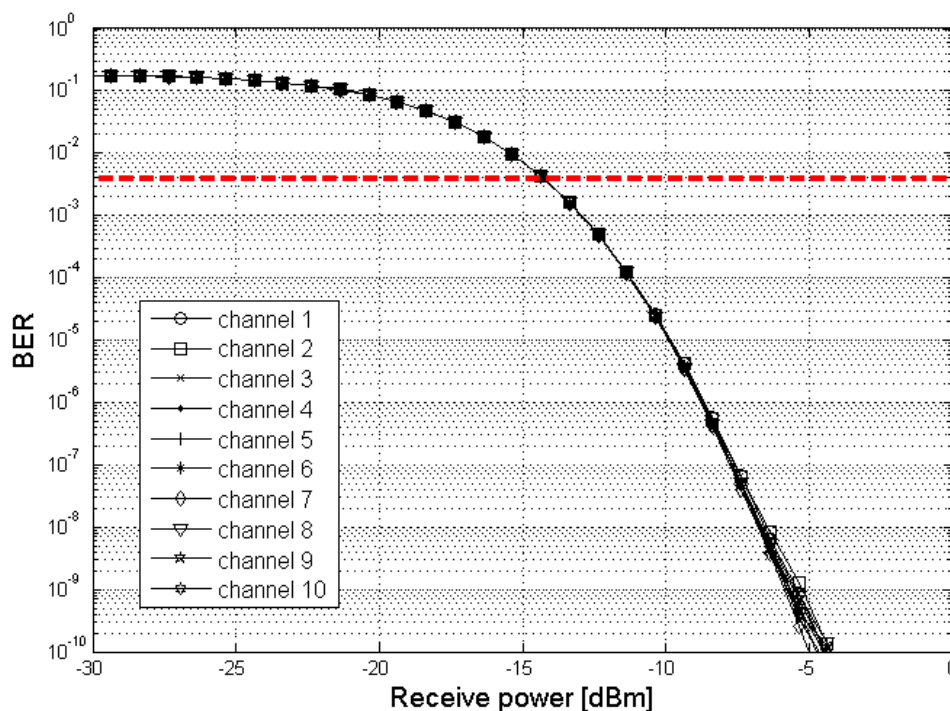
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 256

ผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 256 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 16 symbol พบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาด

ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับ เท่ากับ -13.206 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้ เท่ากับ 4×10^{-3}

3.5.3 จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพายุ

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ที่ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ หรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol แสดงดังรูปที่ 3.10



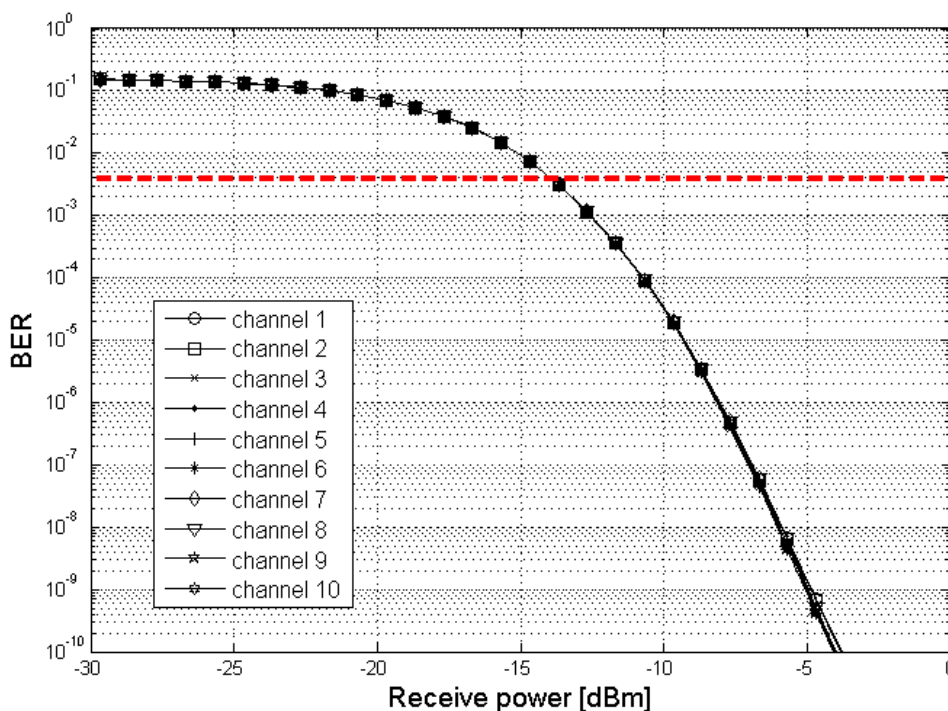
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512

ผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol พบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณภาครับที่ค่าต่าง ๆ

กันมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -14.363 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

3.5.4 จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 1024 คลื่นพายุ

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ที่ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ หรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 1024 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 4 symbol แสดงดังรูปที่ 3.11



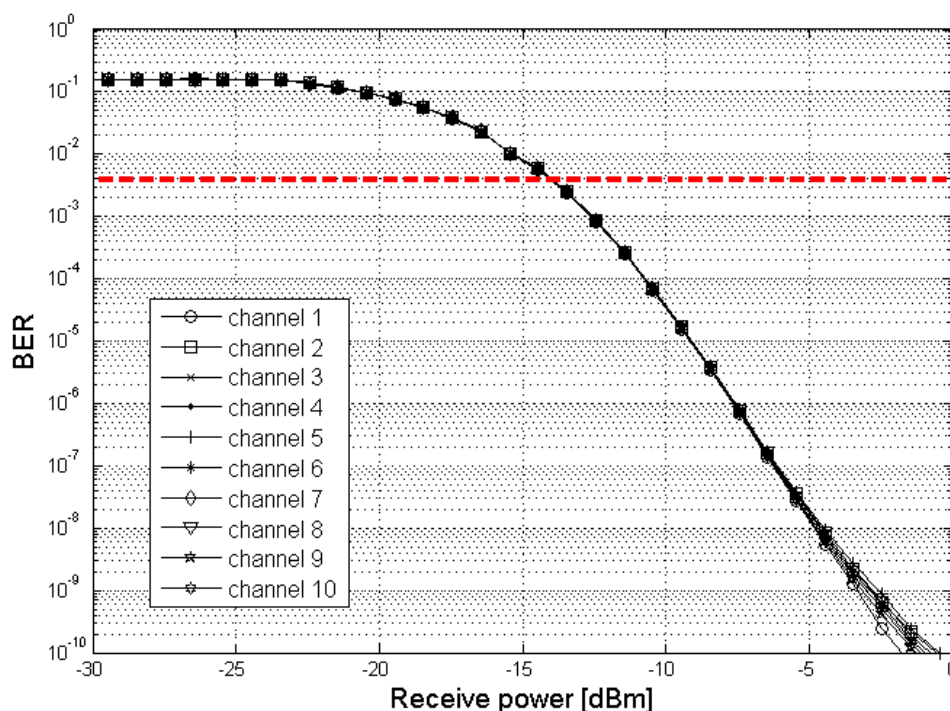
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 1024

ผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 1024 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ

4 symbol พบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -13.678 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

3.5.5 จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 2048 คลื่นพายุ

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ที่ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ หรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 2048 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 2 symbol แสดงดังรูปที่ 3.12

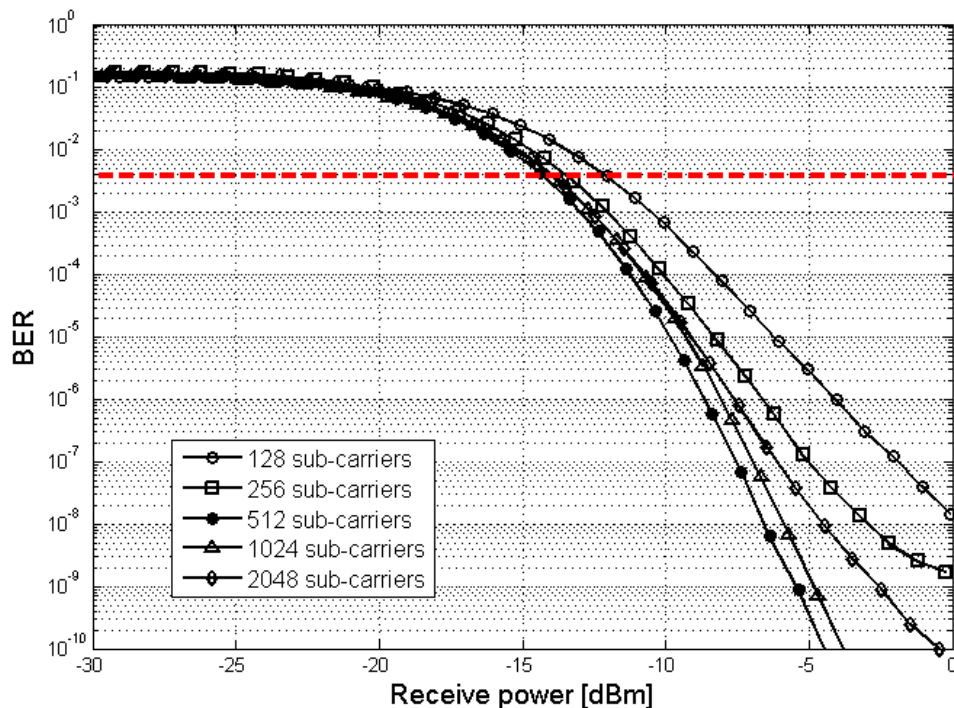


รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 2048

ผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 2048 คลื่นพาห่ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 2 symbol พบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -13.446 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

3.5.6 การวิเคราะห์จำนวนคลื่นพาห่อย่อยที่ใช้สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยมี จำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 128, 256, 512, 1024, 2048 คลื่นพาห่ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่จำนวนคลื่นพาห่อย่อยต่าง ๆ

ผลการจำลองระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM มีความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ โดยมีจำนวนคลื่นพาย่อยเท่ากับ 128, 256, 512, 1024, 2048 คลื่นพาย่อย ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของระบบที่มีจำนวนคลื่นพาย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาย่อย หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol มีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -14.363 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ ซึ่งเป็นค่ากำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระบบที่มีจำนวนคลื่นพาย่อยต่าง ๆ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนจำนวนคลื่นพาย่อยและกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ

Number of subcarrier	Receive power (dBm)
128	-12.052
256	-13.206
512	-14.363
1024	-13.678
2048	-13.446

จากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จำนวนคลื่นพาย่อยที่เหมาะสมที่สุดของระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM มีค่าเท่ากับ 512 คลื่นพาย่อย เนื่องจากเป็นระบบที่ให้กำลังภาครับที่ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดของระบบส่งสัญญาณที่สามารถส่งสัญญาณไปได้ รวมถึงยังสามารถตรวจจับสัญญาณได้ในสภาวะที่กำลังรับสัญญาณต่ำภายใต้ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกจำนวนคลื่นพาย่อยเท่ากับ 512 มาใช้กับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจะนำเสนอการจำลองและวิเคราะห์ระบบทั้งหมดในบทต่อไป

บทที่ 4

สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC

การวิเคราะห์หาจำนวนคลื่นพาห่อย่อยที่เหมาะสมของระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM พบว่าจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 จะถูกนำมาใช้ในการจำลองระบบ ร่วมกับปัจจัยที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบส่งสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ที่ส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ทำให้อัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s โดยเนื้อหาในบทที่ 4 นี้ จะกล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุดร่วมกับ OPC รวมไปถึงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุดร่วมกับ OPC โดยการจำลองแบบต่าง ๆ

4.1 ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC

สัญญาณ PDM-CO-OFDM ที่ส่งไปในเส้นใยแสง จะมีรูปร่างและกำลังของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบ ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ ผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ ผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง และผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยจะกล่าวถึงปัจจัยต่าง ๆ อย่างละเอียดในหัวข้อนี้

4.1.1 ผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ

ผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation loss) มีผลเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นหรือความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ และระยะทางของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดทอนกำลังของสัญญาณสามารถชดเชยได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier) โดยอัตราการขยายสัญญาณแสงมีความสัมพันธ์กับระยะทางของเส้นใยแสง เป็นไปตามสมการที่ 4.1

$$G = \alpha_{SMF} L_{SMF} \quad (4.1)$$

เมื่อ G คือ อัตราการขยายสัญญาณ [dB]

α_{SMF} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณ [dB/km]

L_{SMF} คือ ความยาวเส้นใยแสง [km]

ในวิทยัพนธ์ฉบับนี้ส่งสัญญาณในช่วงความถี่ C band ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.19 dB/km และกำหนดระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงของระบบทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร ดังนั้นอัตราการขยายสัญญาณของระบบจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยเมื่อระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการขยายสัญญาณจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย เพื่อชดเชยผลจากการลดทอนกำลังของสัญญาณในเส้นใยแสง

ตารางที่ 4.1 อัตราการขยายสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง

ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ [km]	อัตราการขยายสัญญาณ [dB]
60	11.4
80	15.2
100	19.0

4.1.2 ผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง

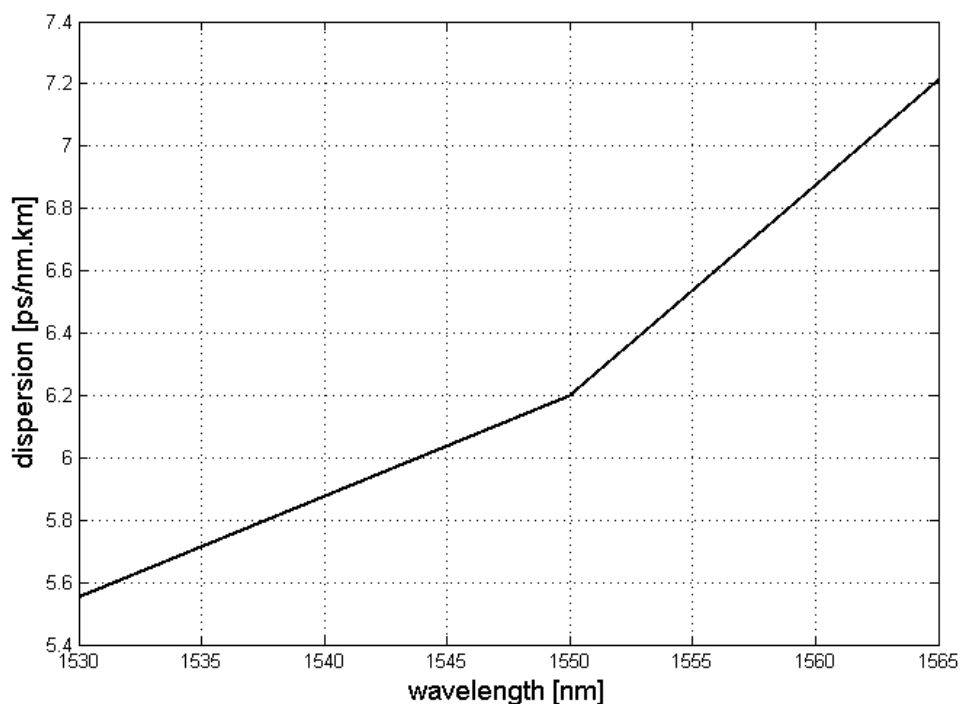
สัญญาณแสงที่ถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ในช่วงความถี่ C band ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 50 GHz จำนวน 10 ช่องสัญญาณ จะเกิดผลกระทบจากดิสเพอร์ชัน เนื่องจากสัญญาณแสงที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสัญญาณหลายความยาวคลื่น โดยที่แต่ละความยาวคลื่นมีค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่มีค่าต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้ ทำให้แสงแต่ละความยาวคลื่นเดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้รูปร่างของพัลส์สัญญาณขยายตัวออก และเดินทางมาถึงที่ภาครับไม่พร้อมกัน การขยายตัวออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วย ซึ่งสามารถหาค่าดิสเพอร์ชันได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น (λ) และค่าดิสเพอร์ชัน (D) ของเส้นใยแสง ดังสมการที่ 4.2

$$D(\lambda) = \begin{cases} \frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29 & ; \lambda = 1530 - 1550 \text{ nm} \\ \frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20 & ; \lambda = 1550 - 1565 \text{ nm} \end{cases} \quad (4.2)$$

เมื่อ $D(\lambda)$ คือ ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น λ [ps/nm.km]

λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ [nm]

สัญญาณแสงที่ถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ในช่วงความถี่ C band ตั้งแต่ 1530 – 1565 nm สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่งสัญญาณในช่วงความถี่ C band ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 50 GHz จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสำหรับแต่ละช่องสัญญาณที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 โดยในตารางที่ 4.2 แสดงค่าของดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองระบบของแต่ละช่องสัญญาณ

ตารางที่ 4.2 ค่าดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองระบบของแต่ละช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณ	ความยาวคลื่น (nm)	ค่าดิสเพอร์ชัน [ps/nm.km]
1	1533.86	5.68
2	1533.47	5.67
3	1533.07	5.65
4	1532.68	5.64
5	1532.29	5.63

6	1531.90	5.61
7	1531.51	5.60
8	1531.12	5.59
9	1530.72	5.58
10	1530.33	5.56

วิธีการชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดีสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีประสิทธิภาพคือ วิธีการคอนจูเกตสัญญาณ โดยอาศัยการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC) ไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณส่งผลให้ระบบมีอัตราบิดผิดพลาดที่ลดลงได้

4.1.3 ผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

ผลอันเนื่องมาจากของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงหรือปรากฏการณ์เคอร์คือปรากฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงในเส้นใยแสง ส่งผลให้เฟสของสัญญาณแสงที่ปลายทางเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสัญญาณแสงที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์เคอร์จะมีเฟสที่ผิดเพี้ยนไป ซึ่งระยะทางสูงสุดเมื่อถูกจำกัดด้วยผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของปรากฏการณ์เคอร์ เป็นผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ส่งไปในเส้นใยแสง และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (4.3)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (4.4)$$

เมื่อ L_{NL} คือ ระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยผลของความไม่เป็นเชิงเส้น [km]

γ คือ สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น [$W^{-1}.km^{-1}$]

n_2 คือ ดรรชนีหักเหของความไม่เป็นเชิงเส้น [m^2/W]

λ คือ ความยาวคลื่น [nm]

A_{eff} คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ [μm^2]

P_0 คือ กำลังที่ส่งไปในเส้นใยแสง [mW]

สัญญาณแสงที่ถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D มีคุณสมบัติ และค่าพารามิเตอร์จำเพาะดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D

Optical parameter	Values
ดรรชนีหักเหของความไม่เป็นเชิงเส้น	$2.6 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{W}$
ความยาวคลื่น	1550 nm
พื้นที่หน้าตัดสุทธิ	$80 \mu\text{m}^2$

แทนค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงสำหรับความไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ 4.4 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (γ) มีค่าเท่ากับ $13173 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$

กำลังที่ส่งไปในเส้นใยแสง (P_0) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.5

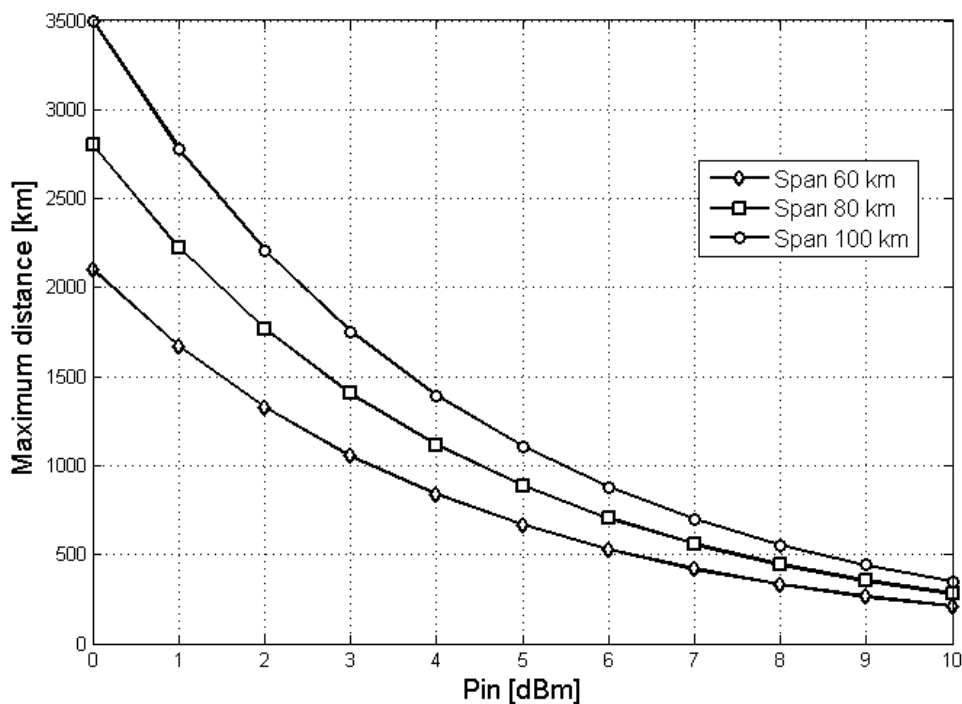
$$P_0 = P_{in} \cdot \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha L} \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังในการส่งสัญญาณ [mW]

α คือ ค่าลดทอนกำลังของสัญญาณ = $0.0461 \text{ [km}^{-1}]$

L คือ ระยะทางในการส่งสัญญาณ [km]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงของระบบทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังในการส่งสัญญาณ และระยะทางสูงสุดในการส่งสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลกระทบต่อระบบ โดยระบบที่ใช้กำลังในการส่งสัญญาณสูงจะได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของปรากฏการณ์เคอร์มากกว่า จึงส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่ลดลง ในทางกลับกันระบบที่ใช้กำลังในการส่งสัญญาณต่ำจะได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของปรากฏการณ์เคอร์น้อย จึงส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่เพิ่มขึ้น



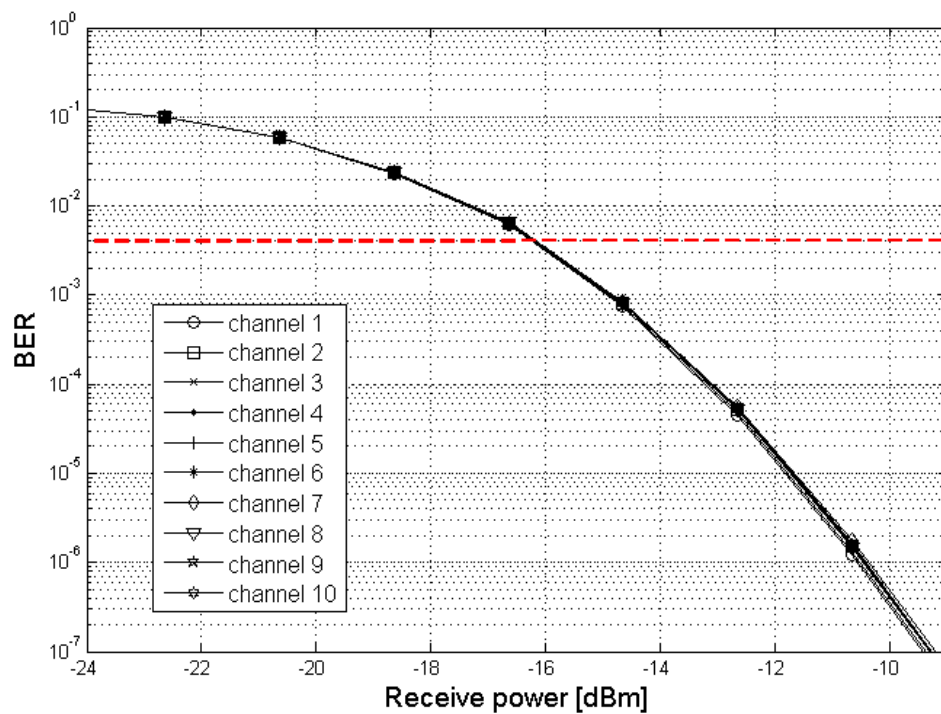
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังในการส่งสัญญาณและระยะทางสูงสุดเนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น

4.2 วิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด โดยการจำลองระบบแบบ back-to-back

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back back ซึ่งยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ที่มีความยาวคลื่นและความถี่ถึงตารางที่ 3.1 ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s หรือ 1000 Gb/s ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับ (receive power) และอัตราบิดผิดพลาด (BER) ของระบบที่ยอมรับได้ที่ 4×10^{-3} ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิดผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm จำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาห่ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol บนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s สัญญาณที่ภาคส่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ที่ภาครับ จากนั้นสัญญาณที่ทำการตีมอดูเลตแล้วจะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิดผิดพลาด โดยแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.3

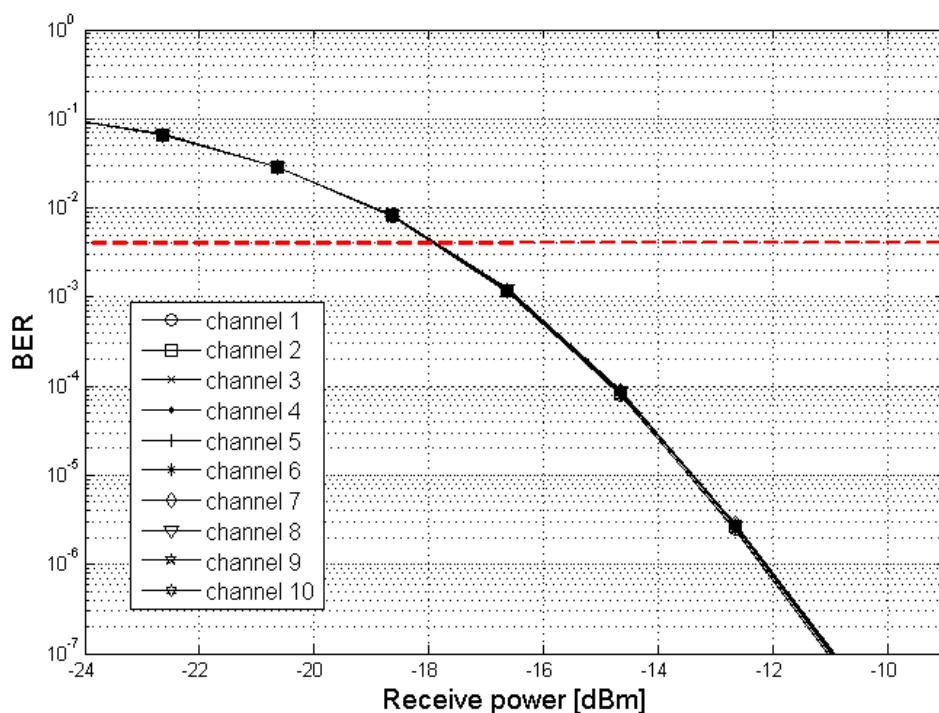


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm

ผลการจำลองพบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณที่ภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากระบบยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จึงยังไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จากนั้นเมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -16.252 dBm เป็นกำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

4.2.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol บนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s สัญญาณที่ภาคส่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ที่ภาครับ จากนั้นสัญญาณที่ทำการดีมอดูเลตแล้ว จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราผิดพลาด โดยแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.4

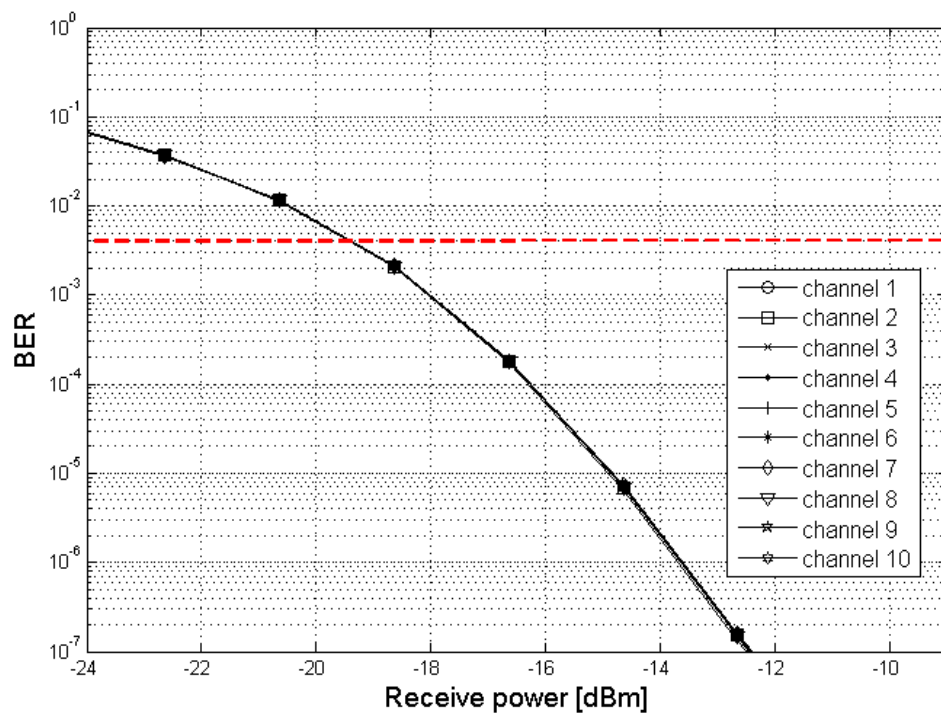


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm

ผลการจำลองพบว่าค่าอัตราผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณที่ภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากระบบยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จึงยังไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จากนั้นเมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -18.051 dBm เป็นกำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

4.2.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm จำนวนคลื่นพาร์ย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาร์ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol บนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s สัญญาณที่ภาคส่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ที่ภาครับ จากนั้นสัญญาณที่ทำการดีมอดูเลตแล้ว จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิดผิดพลาด โดยแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.5

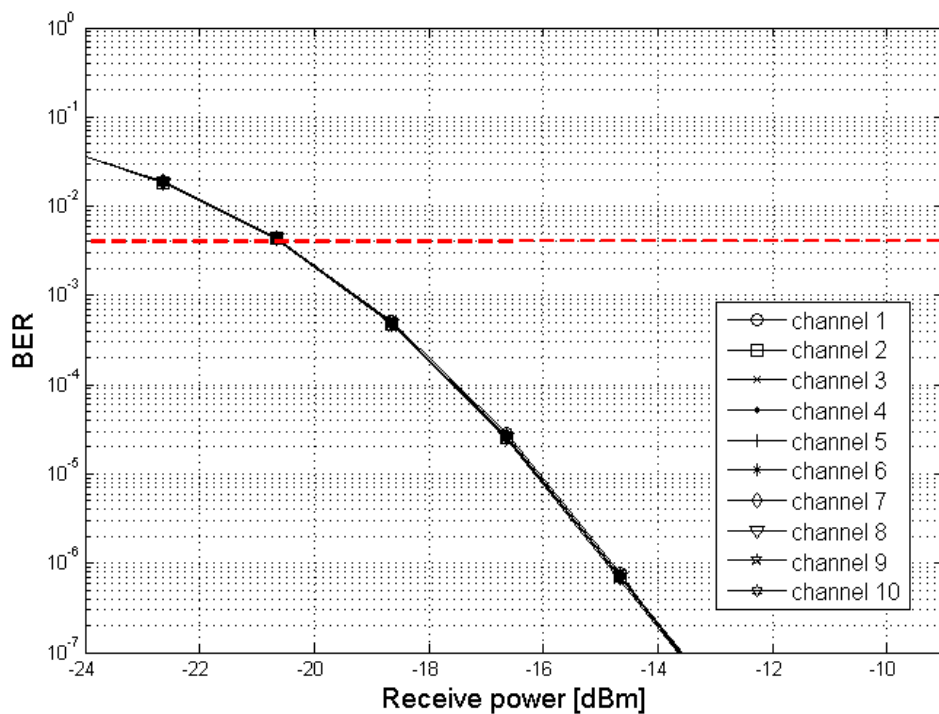


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm

ผลการจำลองพบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณที่ภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากระบบยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จึงยังไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จากนั้นเมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -19.650 dBm เป็นกำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

4.2.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm จำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาห่ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol บนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s สัญญาณที่ภาคส่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ที่ภาครับ จากนั้นสัญญาณที่ทำการตีมอดูเลตแล้ว จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิดผิดพลาด โดยแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.6

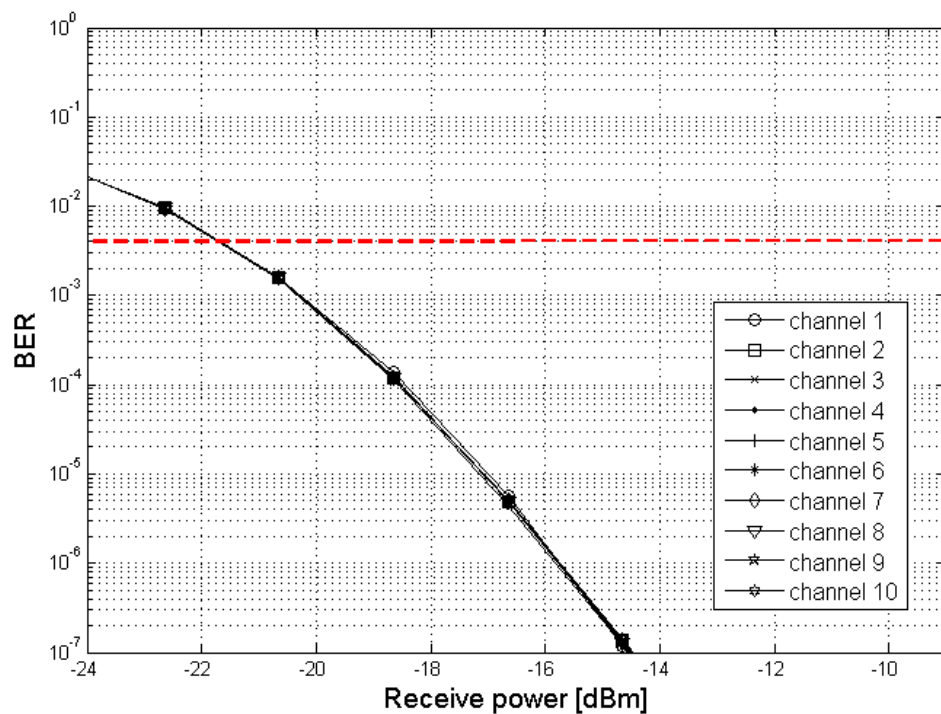


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm

ผลการจำลองพบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณที่ภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากระบบยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จึงยังไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จากนั้นเมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -20.650 dBm เป็นกำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

4.2.5 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm

ผลจากการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm จำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพาห่ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol บนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s สัญญาณที่ภาคส่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ที่ภาครับ จากนั้นสัญญาณที่ทำการดีมอดูเลตแล้ว จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิดผิดพลาด โดยแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm

ผลการจำลองพบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณที่ภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากระบบยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จึงยังไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จากนั้นเมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -21.851 dBm เป็นกำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

4.3 วิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสงที่กำลังส่งสัญญาณค่าต่าง ๆ กัน โดยจำลองโครงสร้างระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ทำให้เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รวมไปถึงผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน และติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เส้นใยแสงมีระยะห่างทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ โดยส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ที่มีความยาวคลื่นและความถี่ดังตารางที่ 3.1 ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s หรือ 1000 Gb/s ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับ (receive power) และอัตราผิดพลาด (BER) ของระบบที่ยอมรับได้ที่ 4×10^{-3} ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm

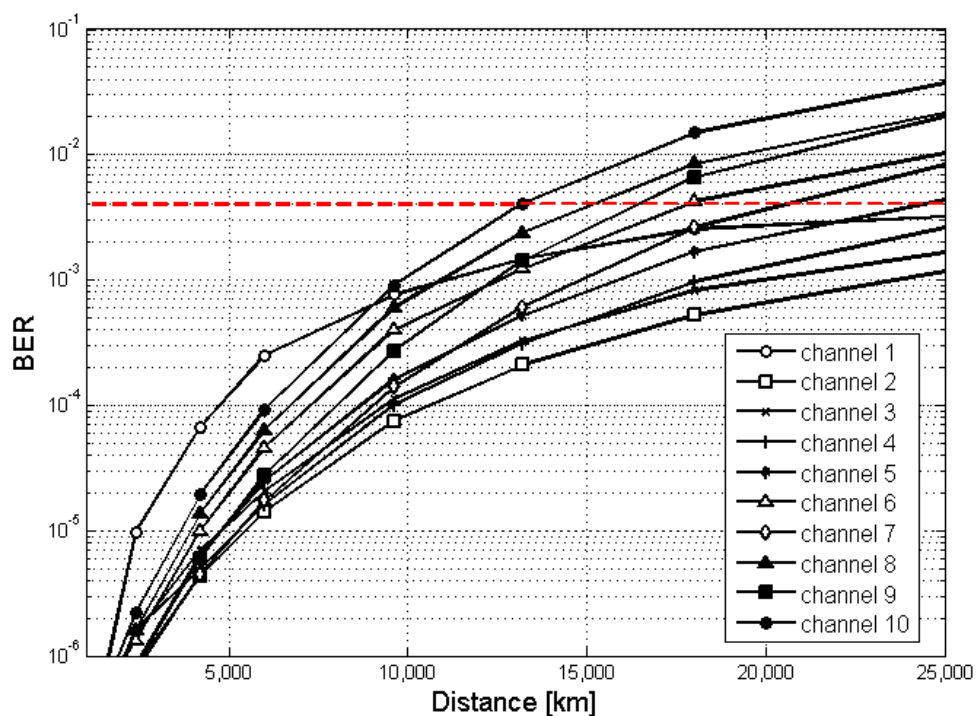
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง แบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM คือการนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 10 ความยาวคลื่น แต่ละความยาวคลื่นมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 มัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงจำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s อัตราข้อมูลรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s เลือกมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ที่ใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ดังตารางที่ 3.1 ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 2 dBm แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing (Mux) ในส่วนที่สองระบบสายส่งสัญญาณ หลังจากทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจำนวน 10 ช่องสัญญาณด้วย MUX แล้วสัญญาณแสงจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) ที่ระยะทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง และที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้ง

เครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหา ดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทาง ทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน และส่วนที่ สามารถรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel เริ่มจากการติ่มัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM demultiplexing (Demux) ที่รับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสง โดย Demux เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นจะใช้ LO ที่กำลังสัญญาณ 2 dBm ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ แล้วจึงทำการติ่มอดูเลตสัญญาณ PDM-CO-OFDM จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาดที่ BER analyzer

ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้จะแสดงผลการจำลองวิเคราะห์ระบบในรูปแบบของความสัมพันธ์ ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิตผิดพลาดของระบบ โดยจะพิจารณาจากค่าอัตรา บิตผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER) เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิตผิดพลาดของระบบให้มี ประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.1.1 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร

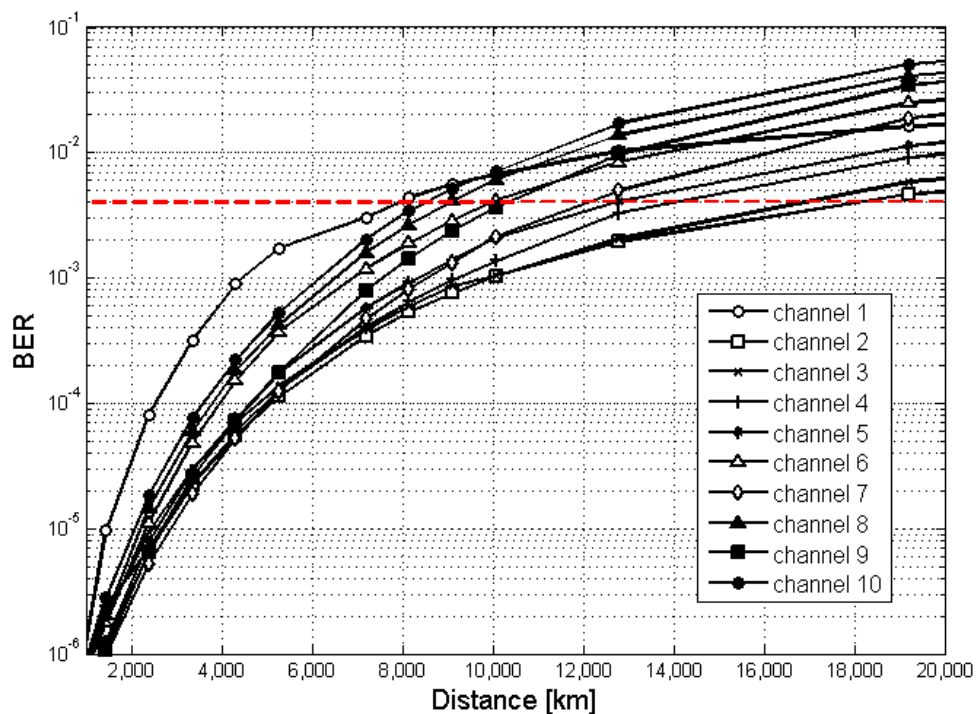
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 60 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 11.4 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -8.478 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิดพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.8 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 13,200 กิโลเมตร



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

4.3.1.2 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร

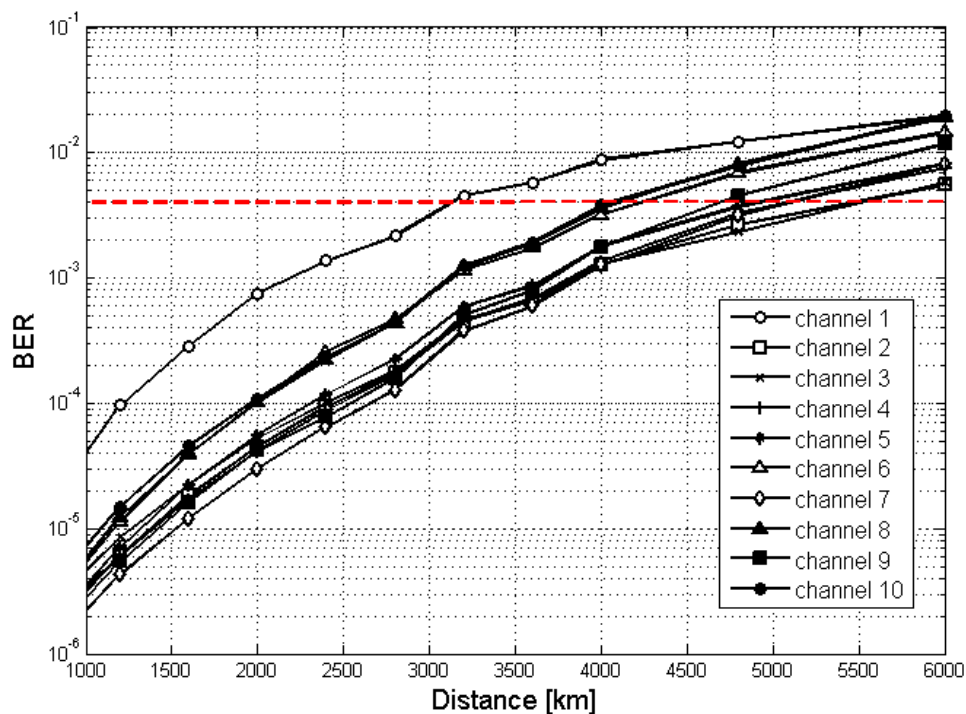
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 80 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 15.2 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -8.336 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิดพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.9 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 8,000 กิโลเมตร



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

4.3.1.3 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 100 กิโลเมตร

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาร์ย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาร์ หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 100 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 19.0 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่า กำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -8.470 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิดพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.10 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 3,100 กิโลเมตร



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

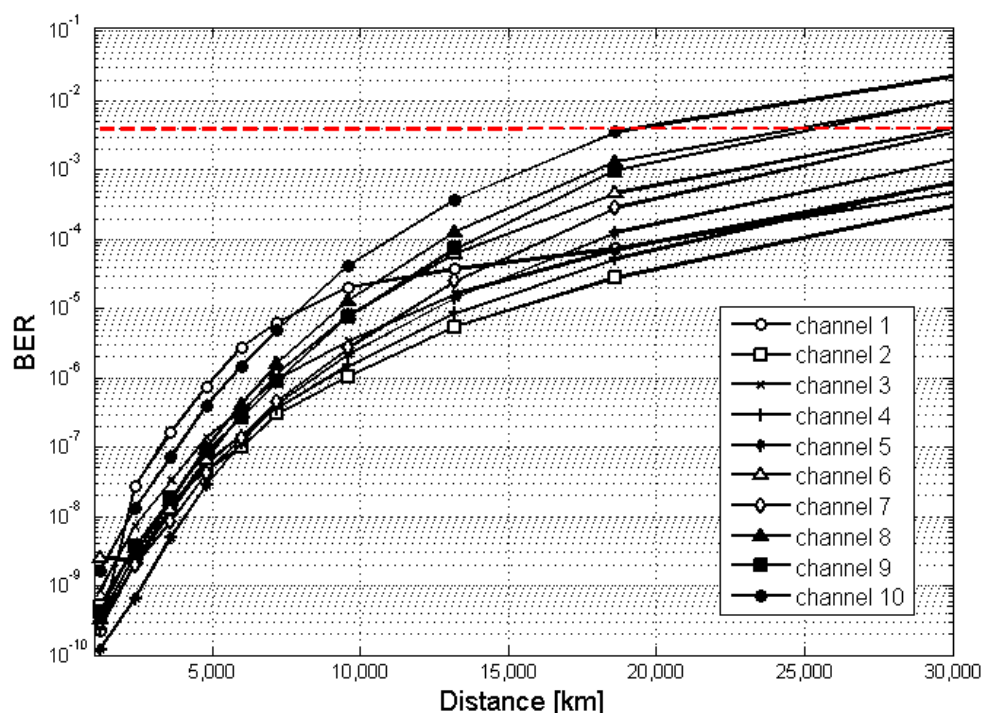
4.3.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง แบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM คือการนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 10 ความยาวคลื่น แต่ละความยาวคลื่นมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 มามัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงจำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s อัตราข้อมูลรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s เลือกรมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ที่ใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ดังตารางที่ 3.1 ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 4 dBm แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing (Mux) ในส่วนที่สองระบบสายส่งสัญญาณ หลังจากทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจำนวน 10 ช่องสัญญาณด้วย MUX แล้วสัญญาณแสงจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมตเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) ที่ระยะทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง และที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน และ ส่วนที่สามารถรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel เริ่มจากการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM demultiplexing (Demux) ที่รับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสง โดย Demux เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นจะใช้ LO ที่กำลังสัญญาณ 4 dBm ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ แล้วจึงทำการดีมอดูเลตสัญญาณ PDM-CO-OFDM จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาดที่ BER analyzer

ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้จะแสดงผลการจำลองวิเคราะห์ระบบในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิตผิดพลาดของระบบ โดยจะพิจารณาจากค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER) เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิตผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.2.1 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร

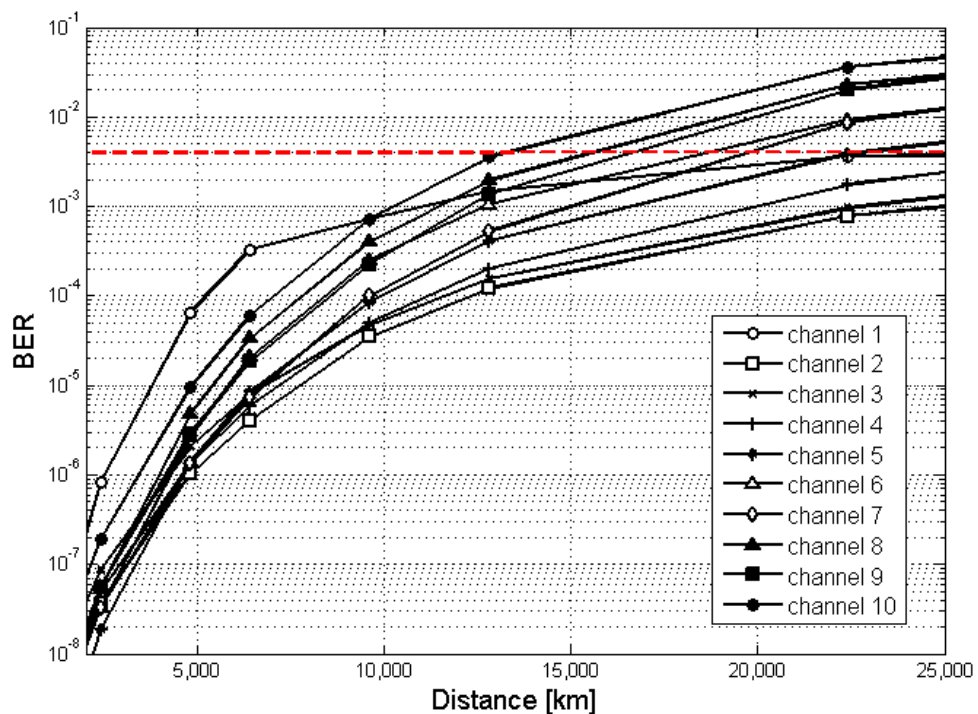
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 60 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 11.4 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -6.560 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.11 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 18,600 กิโลเมตร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

4.3.2.2 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร

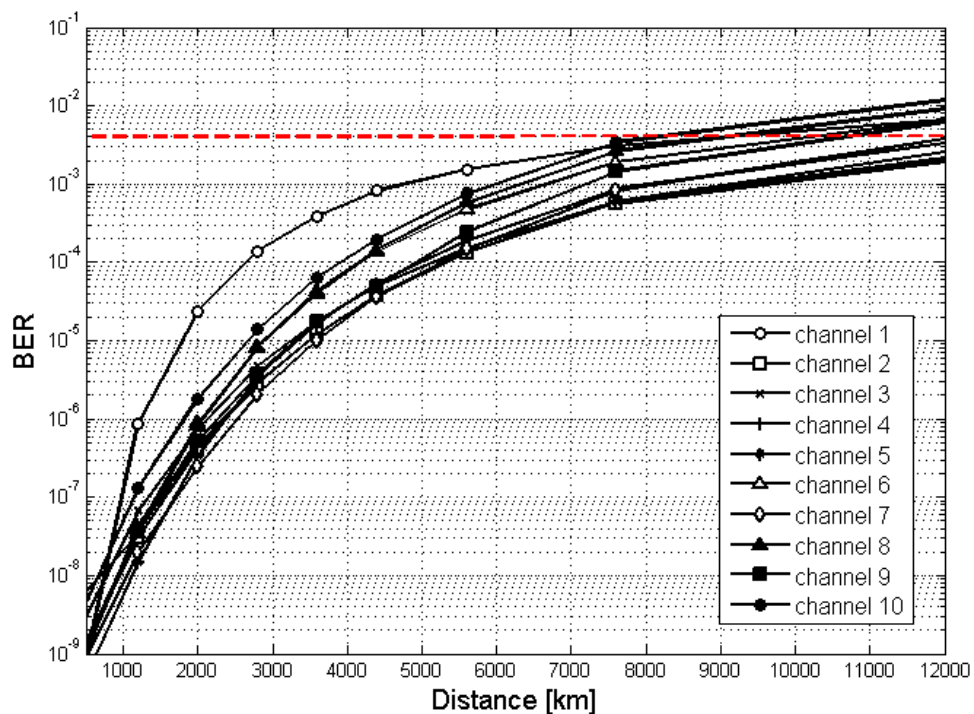
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 80 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 15.2 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -6.389 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.12 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 12,800 กิโลเมตร



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

4.3.3.3 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 100 กิโลเมตร

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 100 km ซึ่งมีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 19.0 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -6.493 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.13 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 7,600 กิโลเมตร



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 4 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

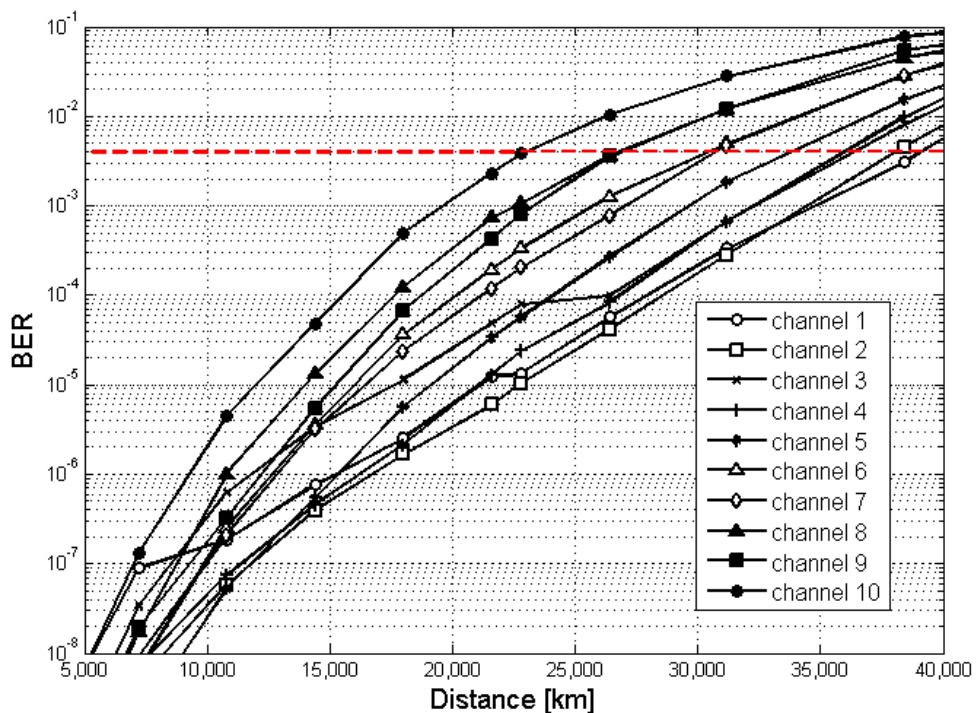
4.3.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง แบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM คือการนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 10 ความยาวคลื่น แต่ละความยาวคลื่นมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 มามัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงจำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s อัตราข้อมูลรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s เลือกรมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ที่ใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ดังตารางที่ 3.1 ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 6 dBm แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing (Mux) ในส่วนที่สองระบบสายส่งสัญญาณ หลังจากทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจำนวน 10 ช่องสัญญาณด้วย MUX แล้วสัญญาณแสงจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมตเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) ที่ระยะทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง และที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน และ ส่วนที่สามารถรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel เริ่มจากการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM demultiplexing (Demux) ที่รับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสง โดย Demux เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นจะใช้ LO ที่กำลังสัญญาณ 6 dBm ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ แล้วจึงทำการดีมอดูเลตสัญญาณ PDM-CO-OFDM จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาดที่ BER analyzer

ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้จะแสดงผลการจำลองวิเคราะห์ระบบในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิตผิดพลาดของระบบ โดยจะพิจารณาจากค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER) เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิตผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.4.3.1 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร

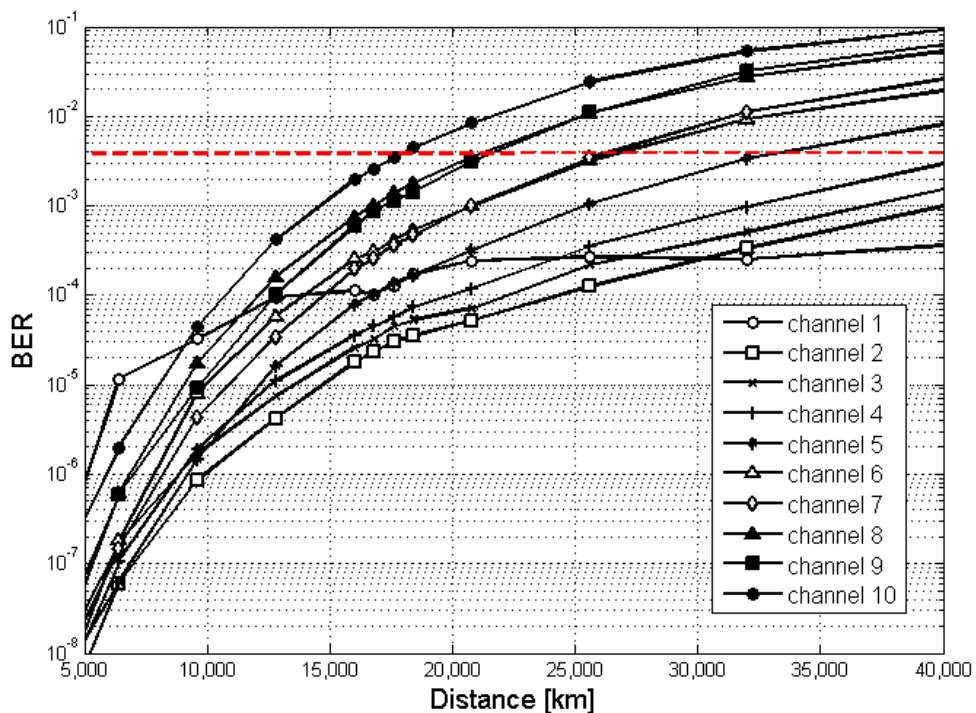
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาร์ย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาร์ หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 60 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 11.4 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -4.651 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.14 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 22,800 กิโลเมตร



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

4.4.3.2 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร

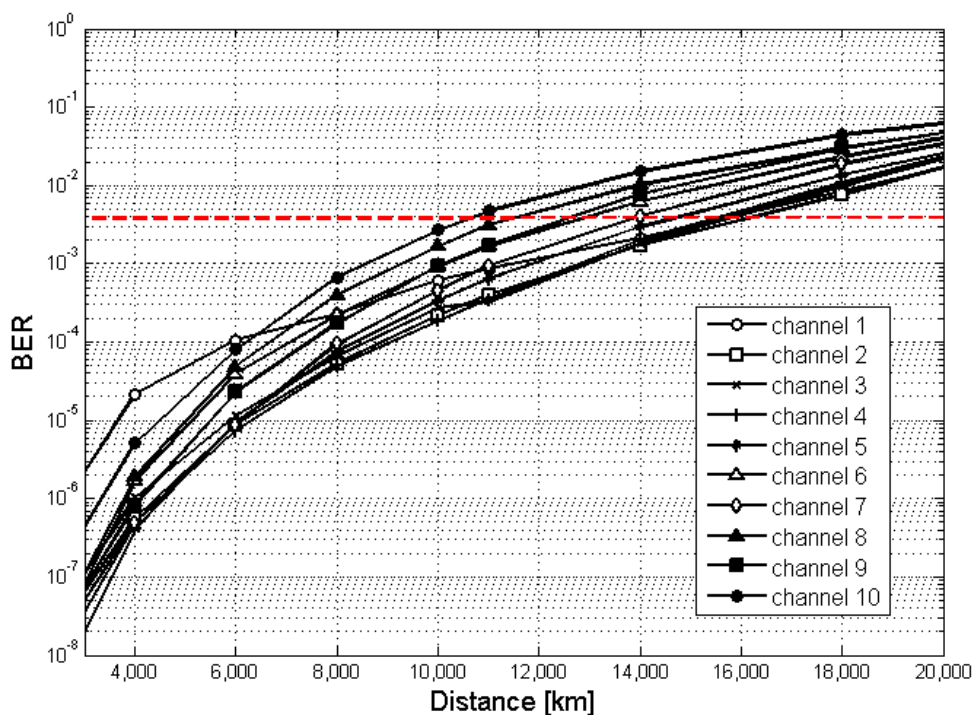
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 80 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 15.2 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -4.474 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.15 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 17,920 กิโลเมตร



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

4.3.3.3 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 100 กิโลเมตร

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 100 km ซึ่งมีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 19.0 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -4.676 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.16 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 11,000 กิโลเมตร



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 6 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

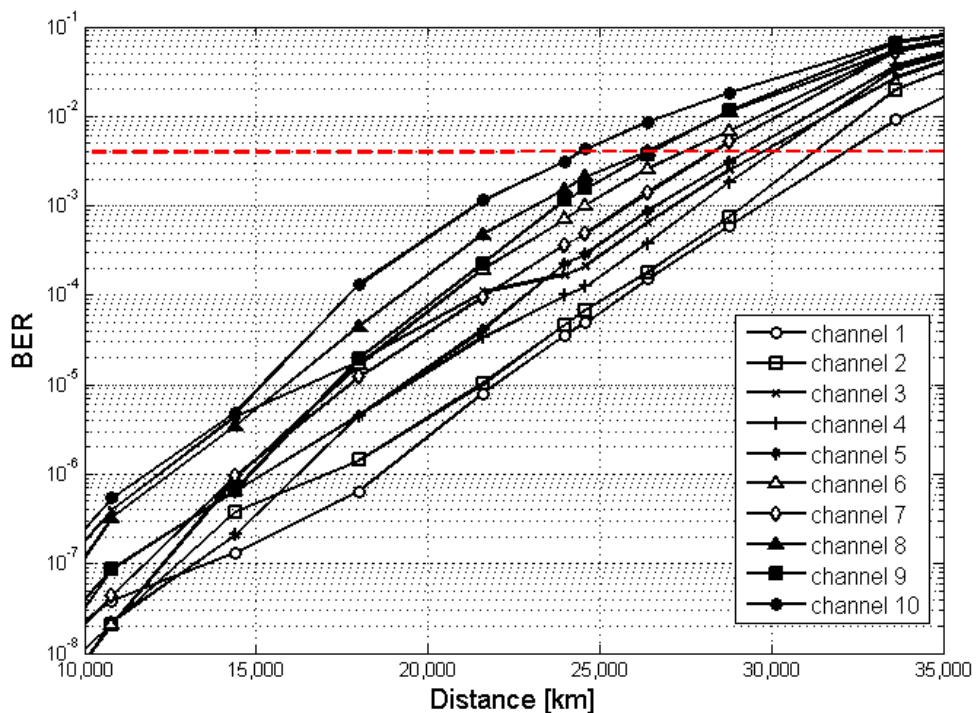
4.3.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง แบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM คือการนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 10 ความยาวคลื่น แต่ละความยาวคลื่นมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 มามัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงจำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s อัตราข้อมูลรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s เลือกรมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ที่ใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ดังตารางที่ 3.1 ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 8 dBm แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing (Mux) ในส่วนที่สองระบบสายส่งสัญญาณ หลังจากทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจำนวน 10 ช่องสัญญาณด้วย MUX แล้วสัญญาณแสงจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมตเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) ที่ระยะทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง และที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน และ ส่วนที่สามารถรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel เริ่มจากการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM demultiplexing (Demux) ที่รับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสง โดย Demux เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นจะใช้ LO ที่กำลังสัญญาณ 8 dBm ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ แล้วจึงทำการดีมอดูเลตสัญญาณ PDM-CO-OFDM จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาดที่ BER analyzer

ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้จะแสดงผลการจำลองวิเคราะห์ระบบในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิตผิดพลาดของระบบ โดยจะพิจารณาจากค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER) เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิตผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.4.1 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร

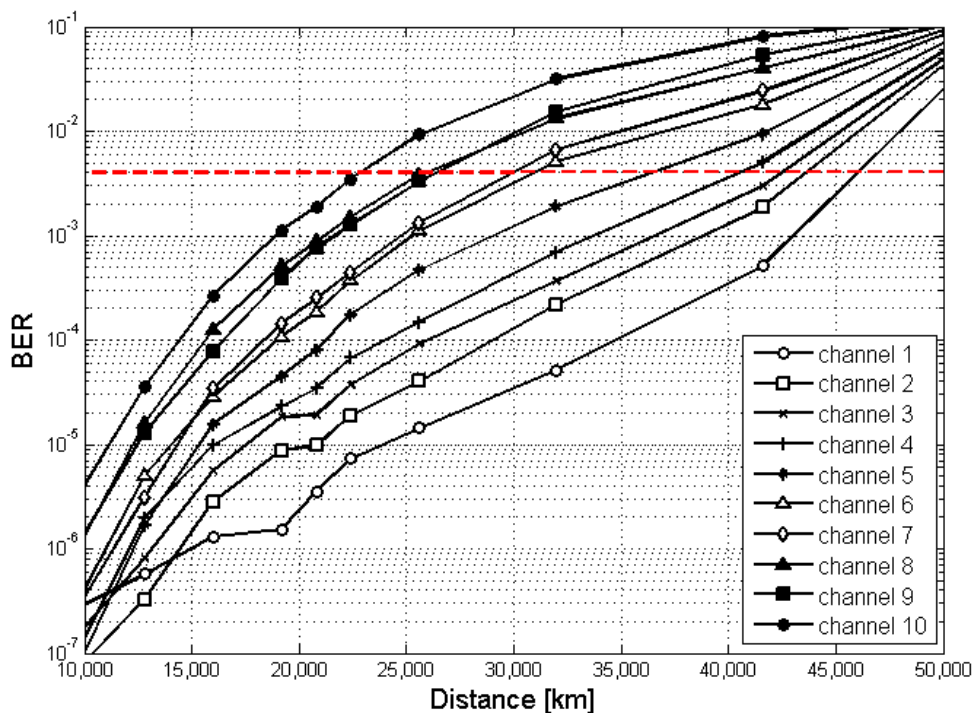
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 60 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 11.4 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -2.724 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.17 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 24,600 กิโลเมตร



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

4.3.4.2 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร

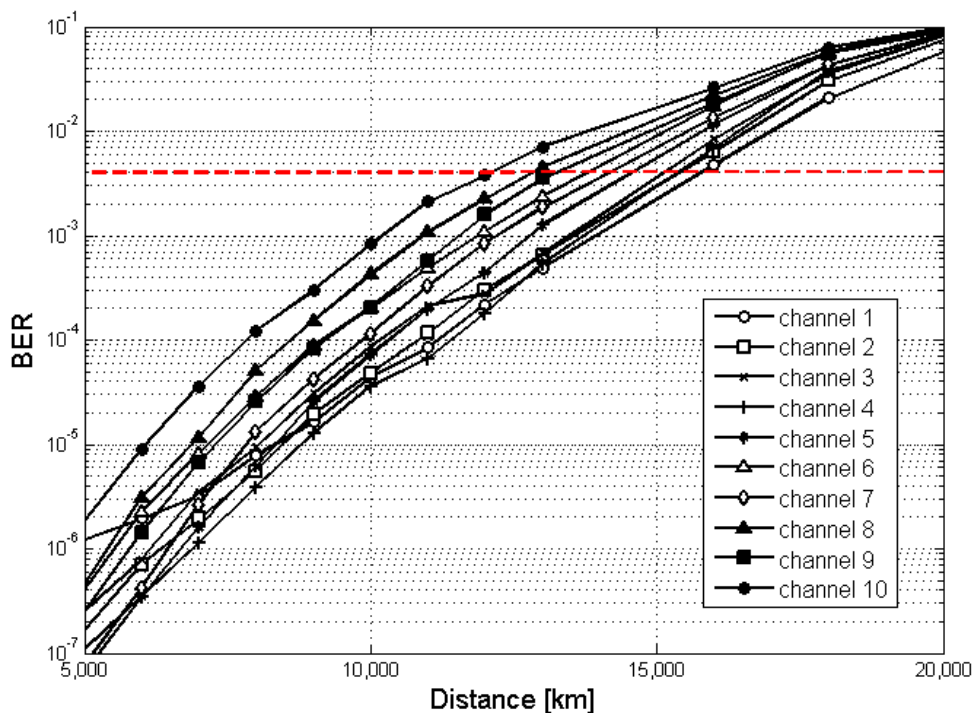
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาร์ย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาร์ หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 80 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 15.2 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -2.575 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.18 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 22,400 กิโลเมตร



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

4.3.3.3 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 100 กิโลเมตร

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 100 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 19.0 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -2.843 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.19 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 12,000 กิโลเมตร



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 8 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

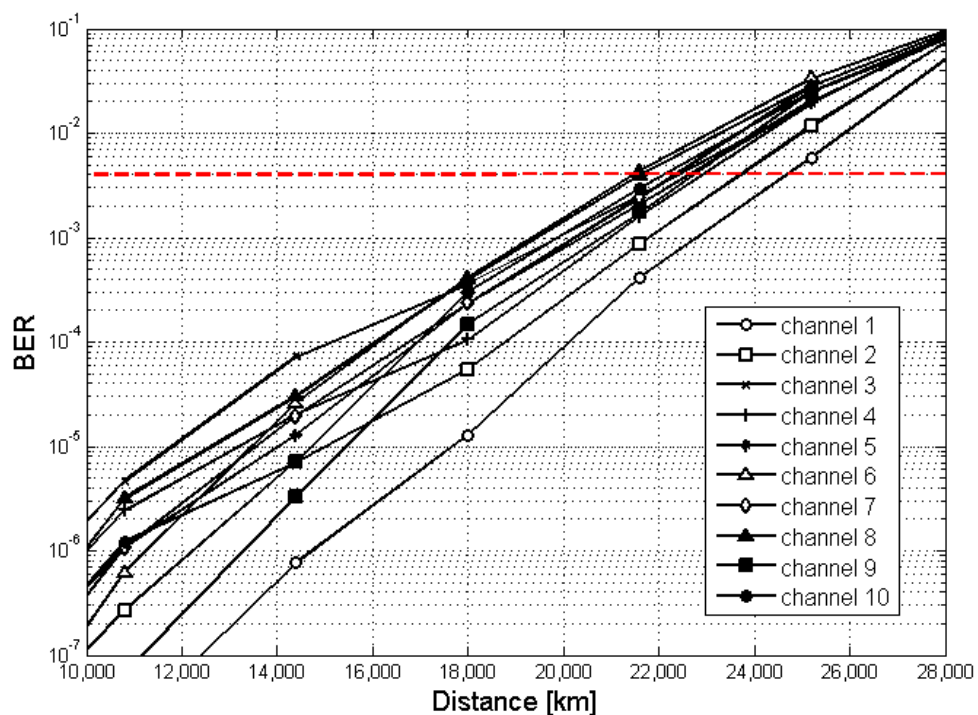
4.3.5 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง แบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกภาคส่งระบบ PDM-CO-OFDM คือการนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 10 ความยาวคลื่น แต่ละความยาวคลื่นมีจำนวนคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 512 มามัลติเพล็กซ์รวมกันแล้วส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงจำนวน 10 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s อัตราข้อมูลรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s เลือกรมอดูเลตทางแสงด้วย CW laser ที่ใช้ความถี่ในช่วงความยาวคลื่น C band ดังตารางที่ 3.1 ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 10 dBm แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM multiplexing (Mux) ในส่วนที่สองระบบสายส่งสัญญาณ หลังจากทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจำนวน 10 ช่องสัญญาณด้วย MUX แล้วสัญญาณแสงจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.655.D ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) ที่ระยะทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง และที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน และ ส่วนที่สามารถรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel เริ่มจากการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วย WDM demultiplexing (Demux) ที่รับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสง โดย Demux เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นจะใช้ LO ที่กำลังสัญญาณ 10 dBm ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ แล้วจึงทำการดีมอดูเลตสัญญาณ PDM-CO-OFDM จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาดที่ BER analyzer

ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้จะแสดงผลการจำลองวิเคราะห์ระบบในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิตผิดพลาดของระบบ โดยจะพิจารณาจากค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER) เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิตผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3.5.1 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร

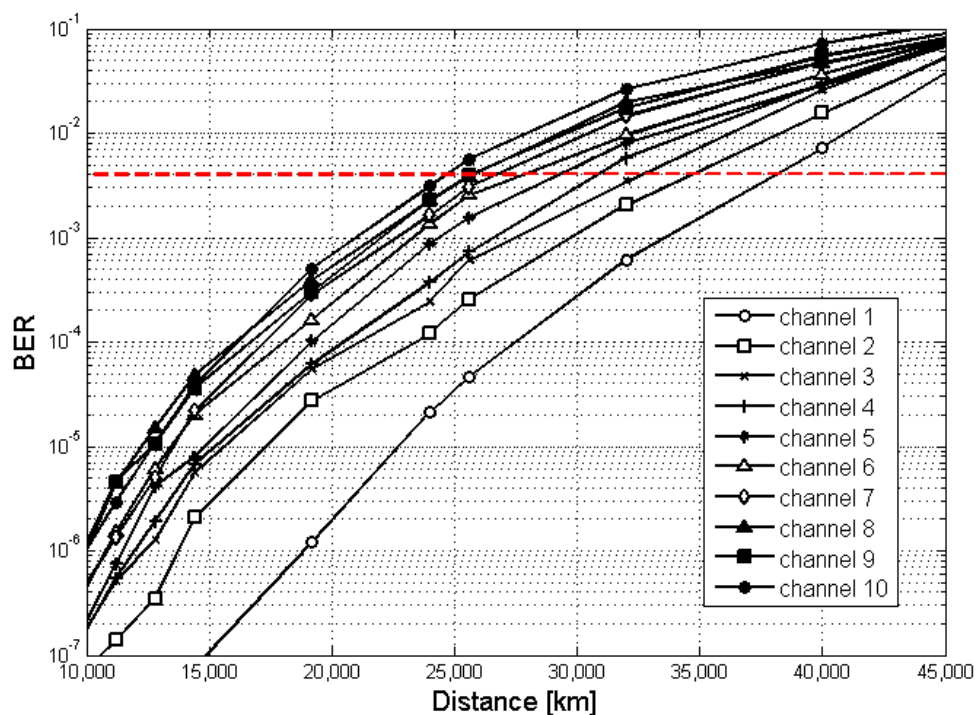
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 60 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 11.4 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -0.776 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.20 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 21,600 กิโลเมตร



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

4.3.5.2 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร

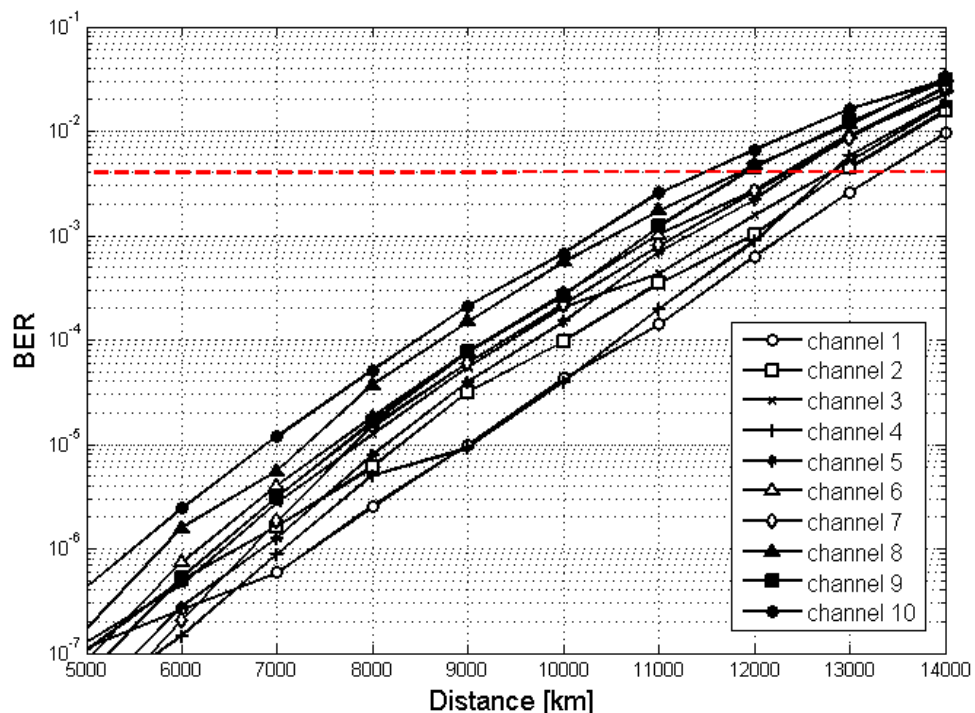
ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 80 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 15.2 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -0.661 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิตพลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.21 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิตพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิตพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 24,000 กิโลเมตร



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

4.3.5.3 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 100 กิโลเมตร

ระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการส่งยุคเฟสแสง จำนวนคลื่นพาห่อย่อยของระบบเท่ากับ 512 คลื่นพาห่หรือที่จำนวน symbol ของระบบเท่ากับ 8 symbol กำลังภาคส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และมีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 100 km ซึ่งมีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 19.0 dB พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีค่าดังตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับมีค่าต่ำสุดที่ -0.930 dBm โดยกำลังรับสัญญาณที่ภาครับของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิดผลาดของระบบ ดังรูปที่ 4.22 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิดผลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ณ ค่าอัตราบิดผิดผลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 11,500 กิโลเมตร

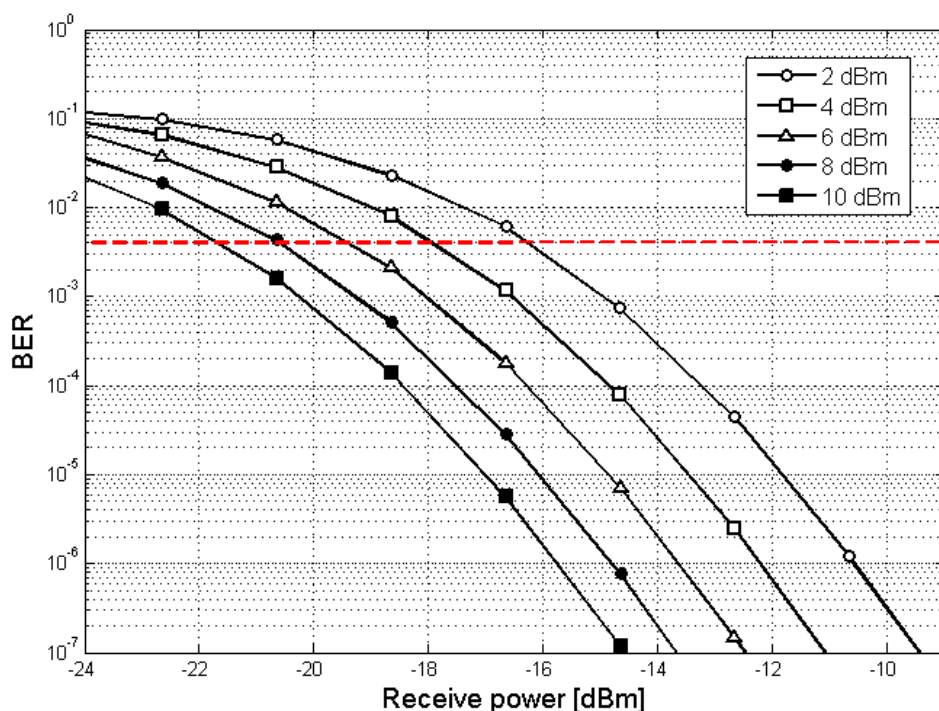


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ของแต่ละช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

4.4 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบส่งสัญญาณ CO-OFDM ระยะทางไกลยิ่งจุดต่อจุด ร่วมกับ OPC ที่ระบบสามารถส่งไปได้

4.4.1 การจำลองระบบระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ back-to-back

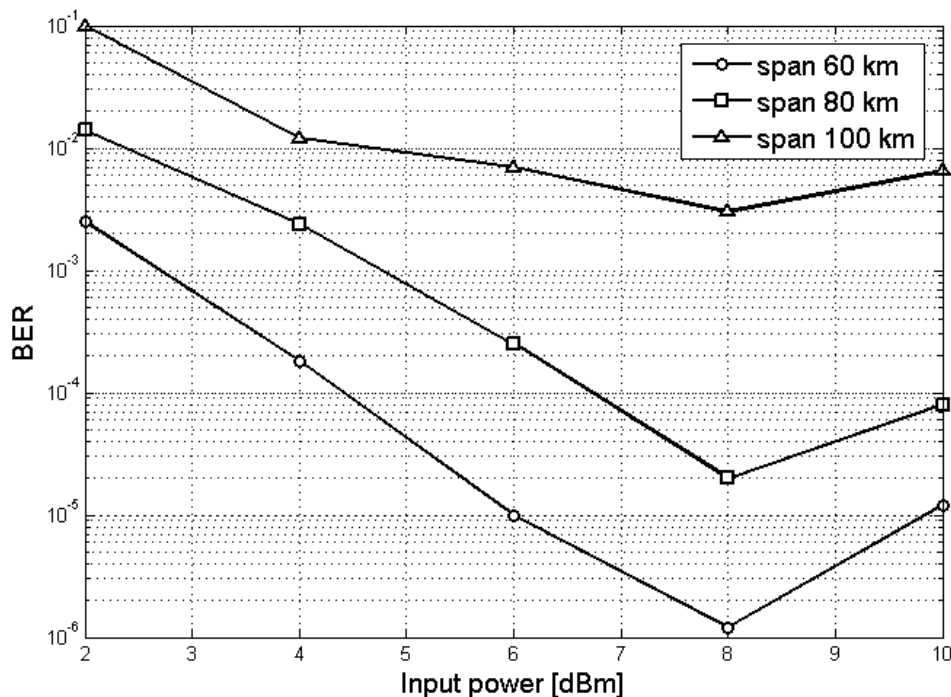
การจำลองระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel โดยยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ที่มีความยาวคลื่นและความถี่ตั้งตารางที่ 3.1 ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาครับ และอัตราบิดผิดพลาดของระบบที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ที่กำลังภาคส่งต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อกำลังในการส่งสัญญาณที่ภาคส่งเพิ่มสูงขึ้น ระบบจะสามารถสามารถตรวจจับสัญญาณได้ที่กำลังรับสัญญาณที่ภาครับต่ำลง กล่าวคือกำลังในการส่งสัญญาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากสามารถตรวจจับสัญญาณที่มีกำลังต่ำได้ แต่ผลกระทบที่ตามมาคือเมื่อกำลังในการส่งสัญญาณเพิ่มสูงขึ้นจะก่อให้เกิดผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของปรากฏการณ์เคอร์เพิ่มสูงขึ้นตามมา โดยจะแสดงผลดังกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณที่ภาครับ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM แบบ back-to-back ที่กำลังส่งสัญญาณต่าง ๆ

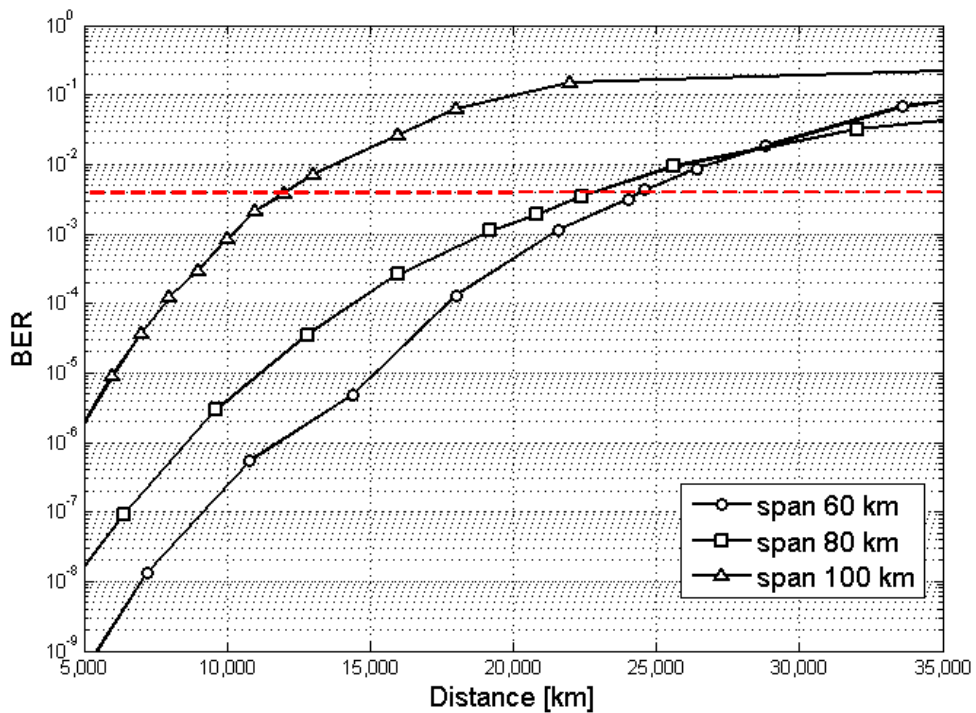
4.4.2 การจำลองระบบระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC

การจำลองระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง โดยจำลองโครงสร้างระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่ระยะ 12,000 กิโลเมตร และติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เส้นใยแสงมีระยะห่างทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ โดยส่งอัตราข้อมูลเท่ากับ 100 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ที่มีความยาวคลื่นและความถี่ตั้งตารางที่ 3.1 ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณที่ภาคส่ง และอัตราบิดผิดพลาดของระบบที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าที่กำลังภาคส่งเท่ากับ 8 dBm มีอัตราบิดผิดพลาดต่ำที่สุดของทุก ๆ ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ดังนั้นการส่งสัญญาณด้วยกำลังภาคส่งที่ 8 dBm เป็นกำลังในการส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ส่งผลให้ระบบสามารถส่งสัญญาณไปได้ระยะทางไกลที่สุด



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังส่งสัญญาณ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง โดยจำลองโครงสร้างระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใย ที่กำลังภาคส่งเท่ากับ 8 dBm จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิดพลาดของระบบ ที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60, 80 และ 100 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 4.25 ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดีสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร ให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 24,600 กิโลเมตร



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะทางที่ส่งไปได้ สำหรับระบบ PDM-CO-OFDM ร่วมกับ OPC กำลังภาคส่งเท่ากับ 8 dBm ที่ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงต่าง ๆ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการส่งผ่านสัญญาณ PDM-CO-OFDM ระยะทางไกลถึงจุดต่อจุดซึ่งใช้การส่งยุคเฟสแสงเป็นครั้งแรก การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับแบบ Superchannel ร่วมกับ OPC รวมถึงการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และแสดงผลการจำลองระบบโดยโปรแกรม OptiSys

การจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ที่ส่งสัญญาณบนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ หรือแต่ละความยาวคลื่นมีอัตราข้อมูลที่ 100 Gb/s ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s รวมกันกับสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่มีอัตราข้อมูล 50 Gb/s ดังนั้นอัตราข้อมูลรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1 Tb/s ที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 0 dBm โดยจำลองระบบที่จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 128, 256, 512, 1024, 2048 คลื่นพายุ พบว่าจำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol มีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -14.363 dBm เป็นขีดจำกัดของระบบ ซึ่งเป็นค่ากำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระบบที่มีจำนวนคลื่นพายุต่าง ๆ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ร่วมกับการติดตั้ง Forward Error Correction (FEC) เพื่อควบคุมและแก้ไขอัตราบิดผิดพลาดของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบโดยการจำลองโครงสร้างระบบ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM โดยจำลองโครงสร้างระบบแบบ back-to-back ส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10 dBm จำนวนคลื่นพายุย่อยเท่ากับ 512 คลื่นพายุ หรือที่จำนวน symbol เท่ากับ 8 symbol บนช่วงความถี่ C band จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ผลการจำลองพบว่าค่าอัตราบิดผิดพลาดของแต่ละช่องสัญญาณ ณ กำลังรับสัญญาณที่ภาครับที่ค่าต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากระบบยังไม่มี การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จึงยังไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จากนั้นเมื่อลดทอนค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 10 ช่องสัญญาณ จนกระทั่งระบบมีค่ากำลังรับสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ -16.252, -18.051,

-19.650, -20.650 และ -21.851 dBm ตามลำดับ เป็นกำลังรับสัญญาณที่ต่ำที่สุดซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3}

วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของเส้นใยแสงโดยการจำลองโครงสร้างระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ที่มีกรรมอดุลสัญญาณแบบ 4-QAM ร่วมกับการสังยุคเฟสแสงที่กำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10 dBm โดยจำลองโครงสร้างระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ทำให้เกิดผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง รวมไปถึงผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ ที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและบิดเบี้ยวเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ และติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ระยะห่างทุก ๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร เพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ พบว่าที่กำลังภาคส่งเท่ากับ 8 dBm มีอัตราบิดผิดพลาดต่ำที่สุดของทุก ๆ ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ดังนั้นการส่งสัญญาณด้วยกำลังภาคส่งที่ 8 dBm เป็นกำลังในการส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ส่งผลให้ระบบสามารถส่งสัญญาณไปได้ระยะทางไกลที่สุด จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งไปได้และอัตราบิดผิดพลาดของระบบ ที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60, 80 และ 100 กิโลเมตร ระยะทางของระบบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง ณ ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 4×10^{-3} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 60 กิโลเมตร ให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 24,600 กิโลเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ออกแบบระบบการส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM ด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณรูปแบบอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น 16-QAM และ 32-QAM เป็นต้น เพื่อพัฒนาระบบให้ประยุกต์ใช้ได้กับการใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

2. จำลองโครงสร้างระบบส่งสัญญาณ PDM-CO-OFDM แบบ Superchannel ร่วมกับการสังยุคเฟสแสง โดยเพิ่มจำนวนการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ระบบสายส่งสัญญาณ เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและบิดเบี้ยวเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Cisco. (2016). *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020* [online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [2] น. ชื่นประเสริฐสุข, "การศึกษาความเป็นไปได้การใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็นแบบวงแหวน," สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [3] C. Lorattanasane and K. Kikuchi, "Design theory of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 948-955, 1997.
- [4] S. Set, R. Girardi, E. Riccardi, B. Olsson, M. Puleo, M. Ibsen, *et al.*, "40Gbit/s field transmission over standard fibre using midspan spectral inversion for dispersion compensation," *Electronics Letters*, vol. 35, pp. 581-582, 1999.
- [5] P. Minzioni, I. Cristiani, V. Degiorgio, L. Marazzi, M. Martinelli, C. Langrock, *et al.*, "Experimental demonstration of nonlinearity and dispersion compensation in an embedded link by optical phase conjugation," *IEEE photonics technology letters*, vol. 18, pp. 995-997, 2006.
- [6] A. Chowdhury, G. Raybon, R.-J. Essiambre, J. H. Sinsky, A. Adamiecki, J. Leuthold, *et al.*, "Compensation of intrachannel nonlinearities in 40-Gb/s pseudolinear systems using optical-phase conjugation," *Journal of lightwave technology*, vol. 23, p. 172, 2005.
- [7] A. Chowdhury, G. Raybon, and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation for intra-channel nonlinearity compensation in 40 Gbit/s CSRZ pseudo-linear systems," *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 1442-1443, 2004.
- [8] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation," *Optics Letters*, vol. 4, pp. 52-54, 1979.

- [9] S. Jansen, D. Van Den Borne, P. Krummrich, S. Spalter, G.-D. Khoe, and H. De Waardt, "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 505-520, 2006.
- [10] K. Kikuchi and C. Lorattanasane, "Design of highly efficient four-wave mixing devices using optical fibers," *IEEE photonics technology letters*, vol. 6, pp. 992-994, 1994.
- [11] P. O. Hedekvist, M. Karlsson, and P. Andrekson, "Polarization dependence and efficiency in a fiber four-wave mixing phase conjugator with orthogonal pump waves," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, pp. 776-778, 1996.
- [12] S. Set, S. Yamashita, M. Ibsen, R. Laming, D. Nasset, A. Kelly, *et al.*, "Ultra-high bit rate optical phase conjugation/wavelength conversion in DSF and SOA with novel configuration incorporating inline fibre DFB lasers," *ELECTRONICS LETTERS-IEE*, vol. 34, pp. 1681-1682, 1998.
- [13] A. Mecozzi, G. Contestabile, F. Martelli, L. Graziani, A. D'Ottavi, P. Spano, *et al.*, "Optical spectral inversion without frequency shift by four-wave mixing using two pumps with orthogonal polarization," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 355-357, 1998.
- [14] U. Feiste, R. Ludwig, E. Dietrich, S. Diez, H. Ehrke, D. Razic, *et al.*, "40 Gbit/s transmission over 434 km standard fibre using polarisation independent mid-span spectral inversion," *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 2044-2045, 1998.
- [15] J. Herrera, F. Ramos, and J. Marti, "Nonlinear distortion generated by DSF-based optical-phase conjugators in analog optical systems," *Journal of lightwave technology*, vol. 20, p. 1688, 2002.
- [16] I. Zacharopoulos, I. Tomkos, D. Syridis, F. Girardin, L. Occhi, and G. Guekos, "Influence of phase mismatch on a spectral inverter based on four-wave mixing in dispersion-shifted fiber at 10 Gb/s," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 430-432, 1999.
- [17] H. C. Lim and K. Kikuchi, "A filter-free scheme for orthogonally pumped polarization-insensitive optical phase conjugation of broad-band optical signals," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, pp. 481-483, 2001.

- [18] H. C. Lim, F. Futami, and K. Kikuchi, "Polarization-independent, wavelength-shift-free optical phase conjugator using a nonlinear fiber Sagnac interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 578-580, 1999.
- [19] Y. Geng, P. A. Andersen, T. Tokle, C. Peucheret, and P. Jeppesen, "Wavelength conversion of a 6× 40 Gb/s DPSK WDM signal using FWM in a highly non-linear photonic crystal fiber," in *Proc. IEEE 31st European Conf. on Optical Communication*, 2005, pp. 205-206.
- [20] C. Lorattanasane and K. Kikuchi, "Parametric instability of optical amplifier noise in long-distance optical transmission systems," *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 33, pp. 1068-1074, 1997.
- [21] R. Mosier and R. Clabaugh, "Kineplex, a bandwidth-efficient binary transmission system," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol. 76, pp. 723-728, 1958.
- [22] R. Prasad, *OFDM for wireless communications systems*: Artech House, 2004.
- [23] Y. Wu and B. Caron, "Digital television terrestrial broadcasting," *IEEE Communications Magazine*, vol. 32, pp. 46-52, 1994.
- [24] I. B. Djordjevic and B. Vasic, "Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission," *Optics Express*, vol. 14, pp. 3767-3775, 2006.
- [25] I. B. Djordjevic and B. Vasic, "100-Gb/s transmission using orthogonal frequency-division multiplexing," *IEEE photonics technology letters*, vol. 18, p. 1576, 2006.
- [26] A. J. Lowery, L. B. Du, and J. Armstrong, "Performance of optical OFDM in ultralong-haul WDM lightwave systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, pp. 131-138, 2007.
- [27] A. J. Lowery, L. Du, and J. Armstrong, "Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems," in *Optical fiber communication conference*, 2006, p. PDP39.
- [28] A. J. Lowery and J. Armstrong, "10 Gbit/s multimode fiber link using power-efficient orthogonal-frequency-division multiplexing," *Optics Express*, vol. 13, pp. 10003-10009, 2005.

- [29] A. Lowery and J. Armstrong, "Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems," *Optics Express*, vol. 14, pp. 2079-2084, 2006.
- [30] R. Hui, "XPM and FWM in OFDM optical systems," in *Lasers and Electro-Optics Society, 2001. LEOS 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE, 2001*, pp. 281-282.
- [31] A. J. Lowery, "Fiber nonlinearity pre-and post-compensation for long-haul optical links using OFDM," *Optics Express*, vol. 15, pp. 12965-12970, 2007.
- [32] N. Cvijetic, "OFDM for next-generation optical access networks," *Journal of lightwave technology*, vol. 30, pp. 384-398, 2012.
- [33] S. Chandrasekhar and X. Liu, "400-Gb/s and 1-Tb/s superchannels using multi-carrier no-guard-interval coherent OFDM," in *OECC 2010 Technical Digest*, ed, 2010.
- [34] S. Chandrasekhar and X. Liu, "OFDM based superchannel transmission technology," *Journal of lightwave technology*, vol. 30, pp. 3816-3823, 2012.
- [35] Z. Dong, X. Li, J. Yu, and N. Chi, "6 128-Gb/s Nyquist-WDM PDM-16QAM Generation and Transmission Over 1200-km SMF-28 With SE of 7.47 b/s/Hz," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, pp. 4000-4005, 2012.
- [36] G. Keiser, *Optical fiber communications: Wiley Online Library*, 2003.
- [37] ล. วุฒิสัทธาภิบาล, หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [38] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics: Academic press*, 2007.
- [39] L. G. Kazovsky, S. Benedetto, and A. E. Willner, *Optical fiber communication systems: Artech House*, 1996.
- [40] ช. ดวงจรัส, "การส่งสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแสงบนโครงข่ายเข้าถึงเชิงแสงแบบพาสซีฟ," สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [41] W. Shieh, "OFDM for Flexible High-Speed Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1560-1577, 2011.
- [42] ภ. รังษี, "การส่งสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นที่ใช้วิธีสังยุคเฟสแสงโดยไม่มี การเลื่อนความยาวคลื่น," สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [43] W. Pieper, C. Kurtzke, R. Schnabel, D. Breuer, R. Ludwig, K. Petermann, *et al.*, "Nonlinearity-insensitive standard-fibre transmission based on optical-phase conjugation in a semiconductor-laser amplifier," *Electronics Letters*, vol. 30, pp. 724-726, 1994.
- [44] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, pp. 243-248, 1996.
- [45] I. Brener, B. Mikkelsen, K. Rottwitt, W. Burkett, G. Raybon, J. Stark, *et al.*, "Cancellation of all Kerr nonlinearities in long fiber spans using a LiNbO₃ phase conjugator and Raman amplification," in *Optical Fiber Communication Conference*, 2000, p. PD33.
- [46] X. Xiao, C. Yang, and P. Shum, "Analytical design of SPM-limited systems with optical phase conjugation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, pp. 472-474, 2008.
- [47] P. Minzioni, F. Alberti, and A. Schiffrini, "Techniques for nonlinearity cancellation into embedded links by optical phase conjugation," *Journal of lightwave technology*, vol. 23, pp. 2364-2370, 2005.
- [48] P. Minzioni, F. Alberti, and A. Schiffrini, "Optimized link design for nonlinearity cancellation by optical phase conjugation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 813-815, 2004.



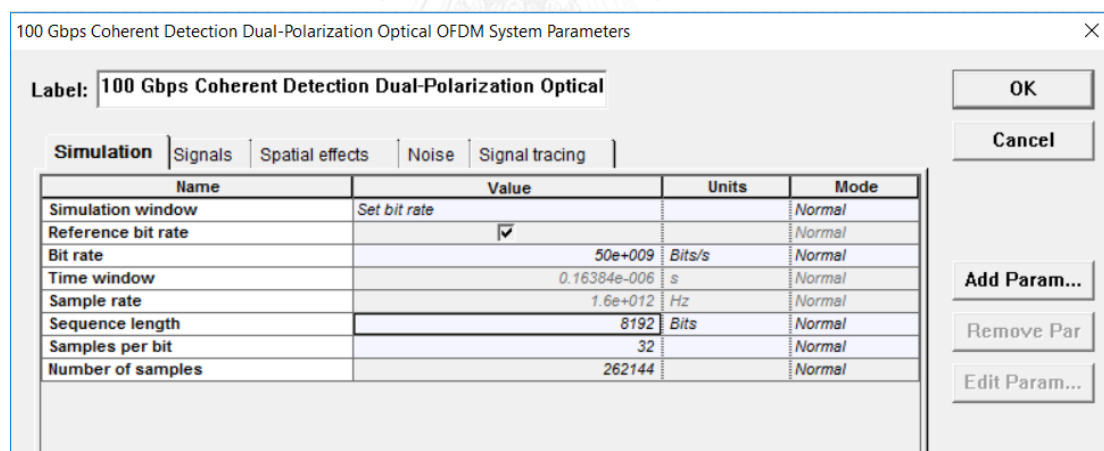
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การออกแบบจำลองโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC ด้วยโปรแกรม OptiSystem software แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ในส่วนแรกกล่าวถึง การกำหนดค่าตัวแปรหลักของระบบ (global parameter) ส่วนที่สอง คือ การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC ส่วนที่สาม คือ ลักษณะของเส้นใยแสง (SMF ITU-T G.655.D) และส่วนสุดท้าย คือ OPC ที่ออกแบบด้วยด้วยโปรแกรม matlab จากนั้นนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรม OptiSystem software

Global parameter

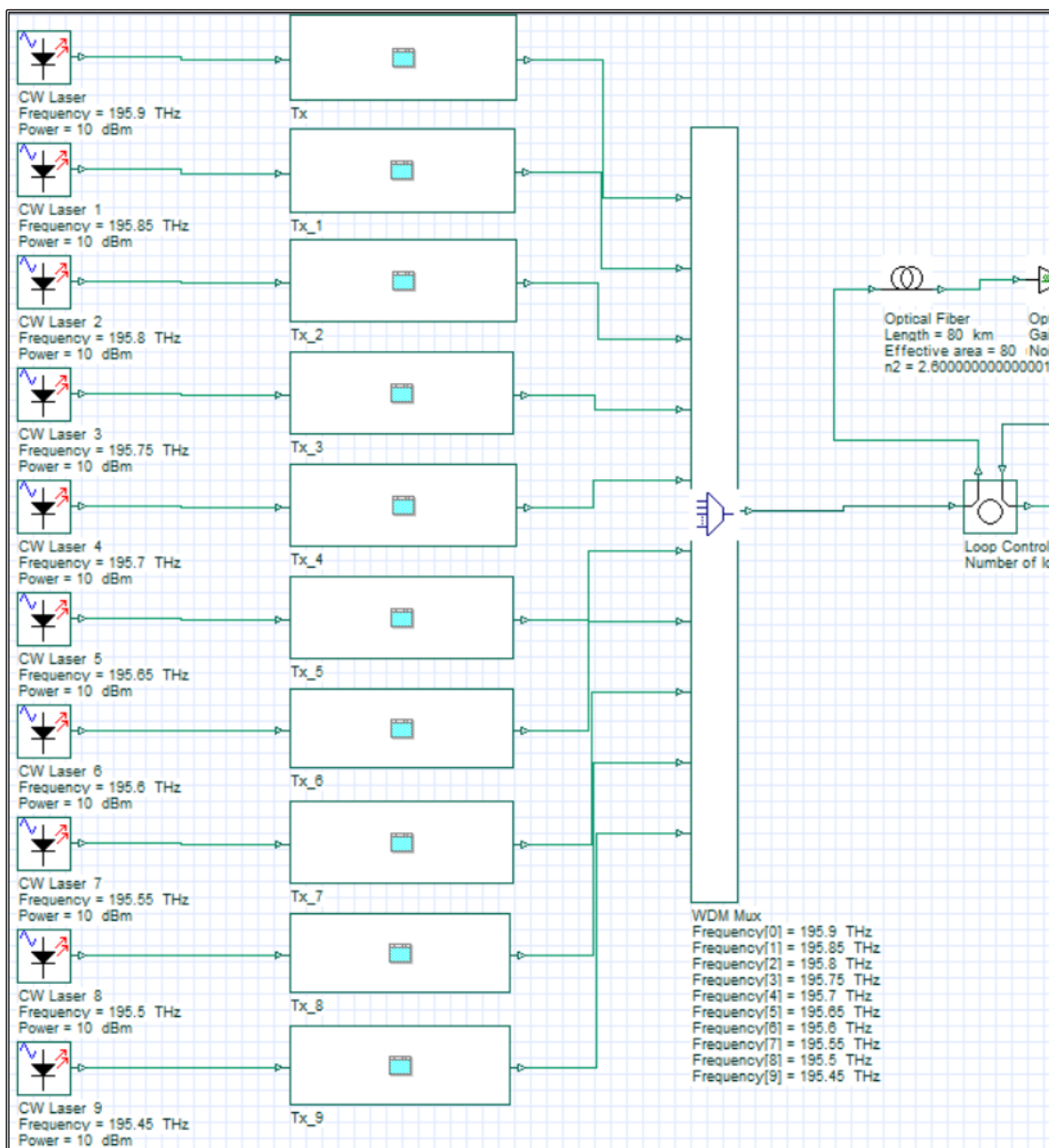
การกำหนดค่า global parameter ของระบบ CO-OFDM ได้แก่ อัตราข้อมูลของระบบ (bit rate) เท่ากับ 50 Gbps ต่อ 1 polarization จำนวนบิตที่ส่งสัญญาณ (sequence length) เท่ากับ 8192 บิต และอัตราการสุ่มสัญญาณช่วงเวลา 1 คาบ (sample per bit) เท่ากับ 32 แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ค่า global parameter ของระบบ CO-OFDM

การออกแบบโครงสร้างของระบบ PDM-CO-OFDM ทั้งภาคส่งและภาครับ แบบ Superchannel ร่วมกับ OPC

ตัวส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM ประกอบด้วย CW laser จำนวน 10 ตัว ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแสงโดยกำหนดให้ใช้ความยาวคลื่นบนช่วง c band นำไปต่อกับตัวส่งสัญญาณ แล้วรวมทุกสัญญาณที่อุปกรณ์ WDM multiplexing มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 50 GHz เพื่อส่งไปยังเส้นใยแสง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดความยาวคลื่นที่ 1530.33 นาโนเมตร ถึง 1533.86 นาโนเมตร ซึ่งเท่ากับย่านความถี่ที่ 196.537 THz ถึง 195.337 THz แสดงดังรูปที่ ก.2



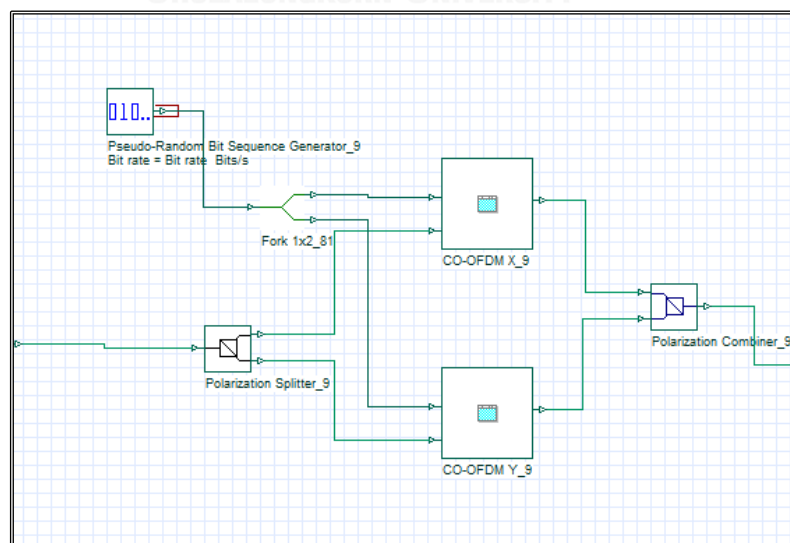
รูปที่ ก.2 ภาคส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM

โครงสร้างภายในตัวส่งสัญญาณของระบบ CO-OFDM ประกอบด้วย pseudo-random bit sequence generator ทำหน้าที่สร้างบิตสัญญาณแบบสุ่ม ซึ่งจะส่งสัญญาณแยกไปยังแนวแกน polarization X และ polarization Y โดยใช้อุปกรณ์กระจายสัญญาณ (polarization splitter) แสดงดังรูปที่ ก.3 ต่อมาสัญญาณจะถูกมอดูเลตที่อุปกรณ์ QAM กำหนดให้มีจำนวนบิตต่อ symbol เท่ากับ 2 หลังจากนั้นส่งไปที่อุปกรณ์ OFDM modulator เพื่อกำเนิดสัญญาณคลื่นพาห่ที่มีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยการกำหนดจำนวนคลื่นพาห่ย่อย (number of subcarrier) ขึ้นอยู่กับจำนวน symbol ที่ต้องการจะส่งสัญญาณ แสดงดังตารางที่ ก.1

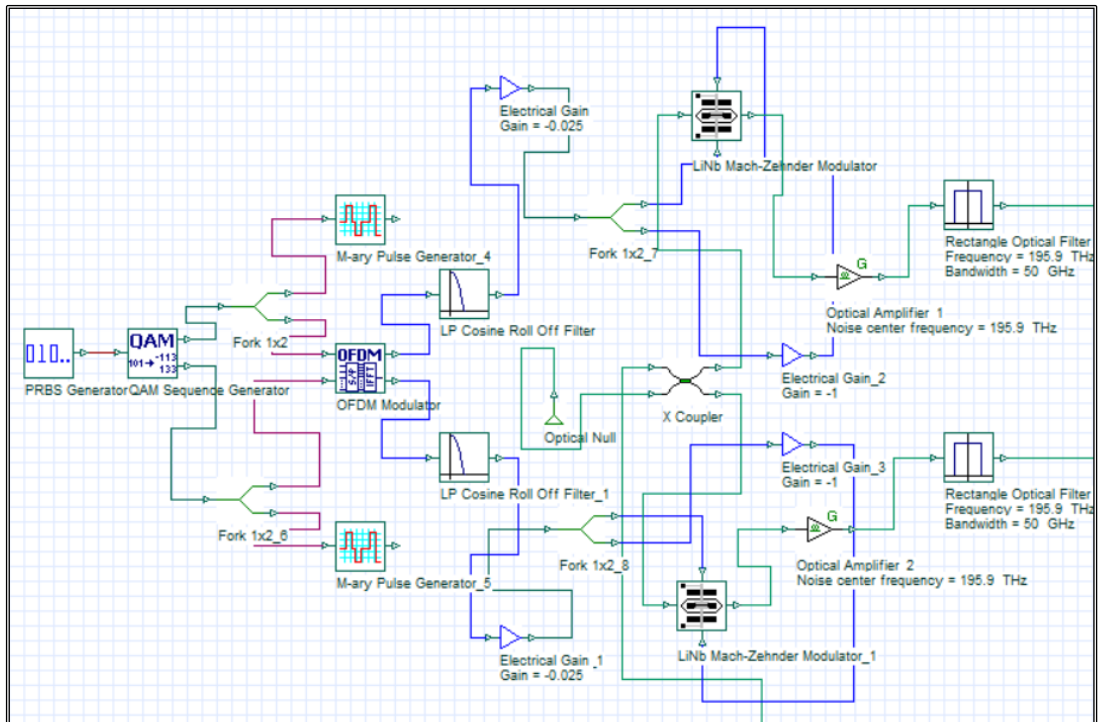
ตารางที่ ก.1 จำนวนคลื่นพาห่ย่อยสำหรับระบบ CO-OFDM

Number of subcarrier	Number of symbol
128	32
256	16
512	8
1024	4
2048	2

จากนั้นกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการด้วยอุปกรณ์ LPF แล้วทำการ up conversion เพื่อมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ด้วยอุปกรณ์ sine generator ที่ความถี่ 50 GHz ต่อมาสัญญาณจะถูกมอดูเลตสัญญาณทางแสงด้วยอุปกรณ์ mach-zehnder modulator (MZM) จะได้สัญญาณ CO-OFDM ที่ภาคส่งแสดงดังรูปที่ ก.4

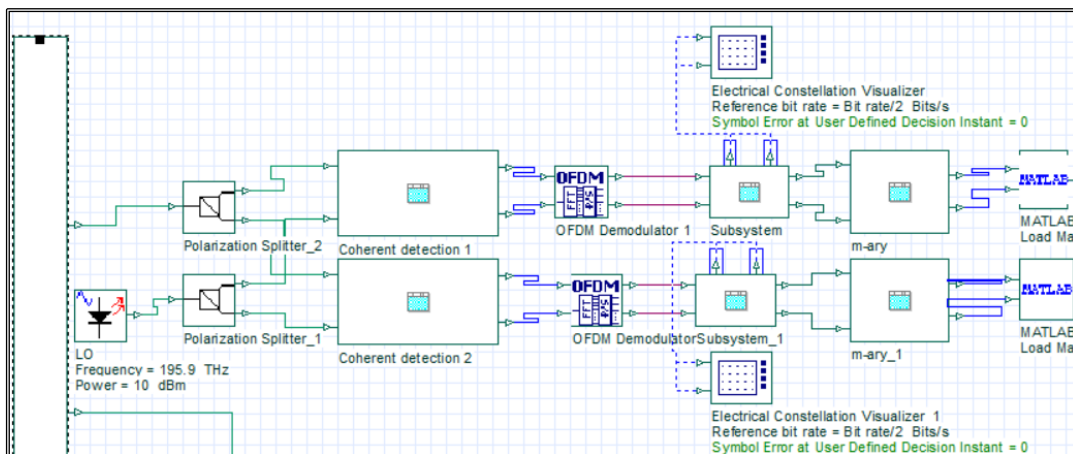


รูปที่ ก.3 โครงสร้างการจำลองระบบ CO-OFDM การส่งสัญญาณบนแกนโพลาไรเซชัน x, y



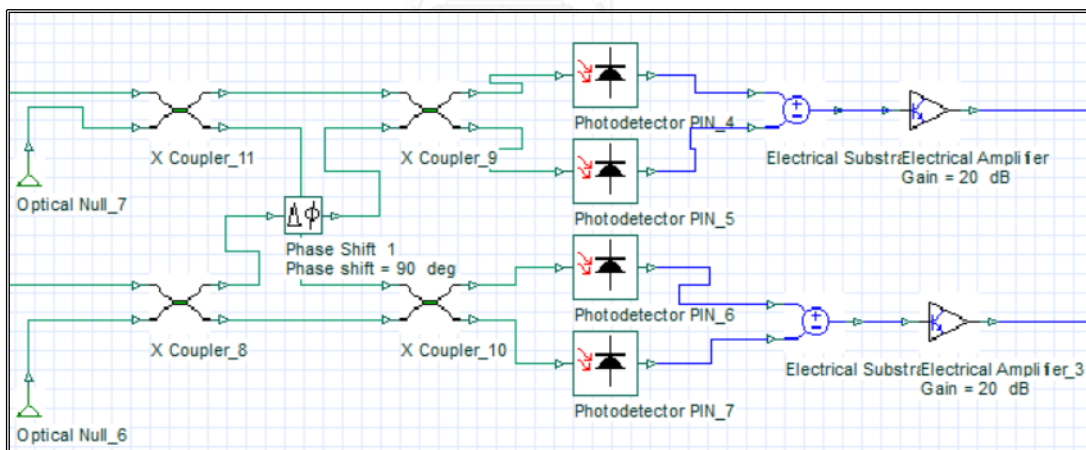
รูปที่ ก.4 อุปกรณ์ภายในของภาคส่งสัญญาณระบบ CO-OFDM

โครงสร้างภาครับของระบบ PDM-CO-OFDM แสดงดังรูปที่ ก.5 สัญญาณ PDM-CO-OFDM ที่มีอัตราข้อมูล 100 Gb/s จะถูกแยกสัญญาณกลับออกไปในแนวแกน polarization X และ polarization Y ที่ Polarization splitter จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตรวจจับสัญญาณแบบ โคฮีเรนต์ โดยที่สัญญาณของ LO จะซึ่งโครโมโซมกับสัญญาณคลื่นพาห้ทั้งความถี่และเฟส แล้วทำการ ตีמודูเลตสัญญาณ CO-OFDM ทั้งสองแกน polarization คือ CO-OFDM Rx (X-axis) ทำหน้าที่ตีมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization X ที่อัตราข้อมูล 50 Gb/s และ CO-OFDM Rx (Y-axis) ทำหน้าที่ตีมอดูเลตสัญญาณ CO-OFDM ในแนวแกน polarization Y ที่อัตราข้อมูล 50 Gb/s ถัดจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปตรวจวัดอัตราบิดผิดพลาด (BER) ซึ่งออกแบบด้วย โปรแกรม matlab ที่ BER analyzer



รูปที่ ก.5 โครงสร้างการจำลองระบบระบบ PDM-CO-OFDM ที่ภาครับ

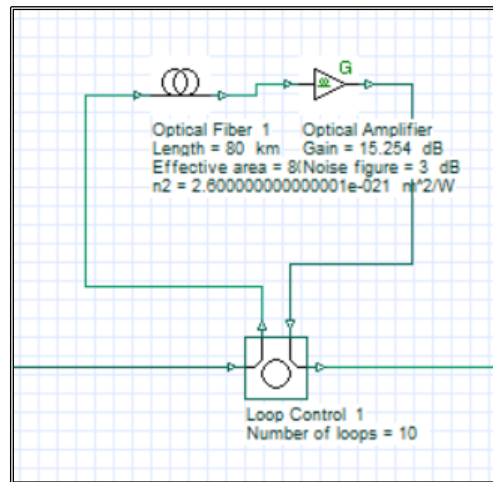
ในส่วนของการตรวจจับสัญญาณโคฮีเรนต์ทั้งแกนโพลาไรเซชัน X และ Y ตรวจจับสัญญาณด้วยอุปกรณ์ photodetector PIN เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีค่า dark current เท่ากับ 10 nA และ thermal noise เท่ากับ $12.83 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางแสงที่ได้รับจาก LO เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้มาทำการตีมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้า RF ที่ความถี่ 50 GHz แสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 โครงสร้างอุปกรณ์ภายใน coherent detection

เส้นใยแสง

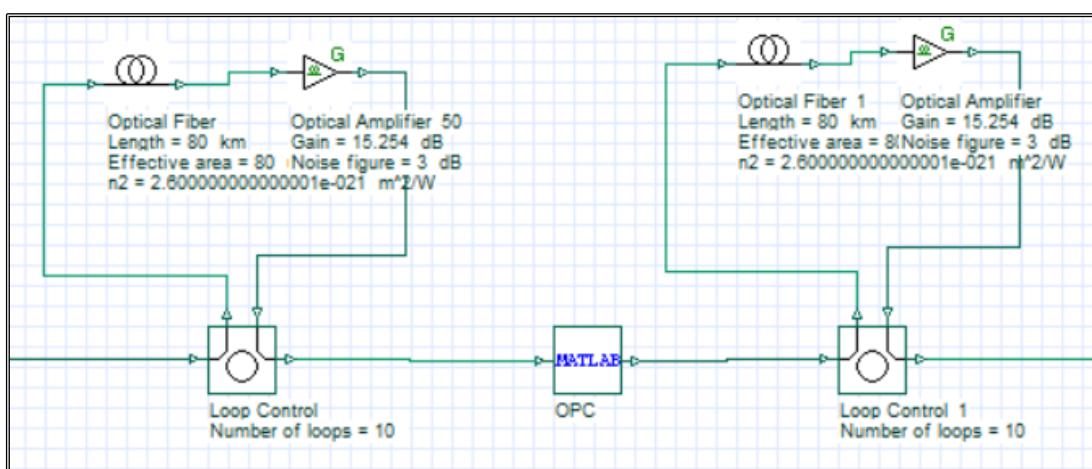
เส้นใยแสงเป็นปัจจัยหลักในการจำกัดสมรรถนะของระบบ PDM-CO-OFDM ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการลดทอนกำลังของสัญญาณ โดยแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าการลดทอนกำลังสัญญาณแตกต่างกัน การติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงสามารถชดเชยค่าดังกล่าวได้ ดังรูปที่ ก.7 นอกจากนี้ยังเส้นใยแสงยังมีผลกระทบอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงตามมาตรฐานเส้นใยแสงโหมดเดียว ITU-T G.655.D



รูปที่ ก.7 โครงสร้างระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC) ที่ออกแบบด้วยด้วยโปรแกรม matlab

ที่ระบบสายส่งสัญญาณจะทำการติดตั้งเครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC) เพื่อชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดีสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยติดตั้ง OPC ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน เมื่ออุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงทำการปล่อยสัญญาณแสงเข้าสู่เส้นใยแสง รูปสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านในส่วนครึ่งแรกของระบบ จากนั้นสัญญาณแสงจากส่วนครึ่งแรกจะผ่านเข้าสู่ OPC ซึ่งมีหน้าที่ในการคอนจูเกตสัญญาณสัญญาณคอนจูเกตหลังจากที่ผ่าน OPC ซึ่งเป็นสัญญาณแสงใหม่สำหรับเดินทางผ่านเส้นใยแสงในส่วนครึ่งหลัง ทำให้ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกถูกปรับเปลี่ยนกลับมาเป็นรูปสัญญาณเดิมที่ไม่มี ความผิดเพี้ยนเหมือนกับสัญญาณแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องส่งสัญญาณแสง แสดงดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 โครงสร้างระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่ติดตั้งเครื่องส่งยุคเฟสแสง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทศพล แจ่มกาญจนโลหะ เกิดวันเสาร์ที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 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 The Transmission Characteristics of Non-Coherent Optical OFDM signal on Optical Phase Conjugation

2. บทความวิชาการในงานประชุม The 7th International Conference on Optical Communication Systems (OPTICS 2016) จัดขึ้น ณ โรงแรม Marriot Lisbon Hotel กรุงลิสบอน ประเทศโปรตุเกส ในวันที่ 26-28 กรกฎาคม พ.ศ.2559 ในชื่อบทความเรื่อง Long-haul Coherent Optical OFDM Point-to-point transmission using Optical Phase Conjugation