

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบคิวเอเอ็มบนการ  
มัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์



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

PERFORMANCE ANALYSIS OF THE OPTICAL FIBER TRANSMISSION USING QAM BASED  
NYQUIST WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING WITH COHERENT DETECTION

Miss Pornrawin Pensri



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบคิวเอเอ็มบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสิสท์ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์

โดย

นางสาวพรวิมล เพ็ญศรี

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

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

พรวิรินทร์ เพ็ญศรี : การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบคิวเอเอ็มบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (PERFORMANCE ANALYSIS OF THE OPTICAL FIBER TRANSMISSION USING QAM BASED NYQUIST WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING WITH COHERENT DETECTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พสุ แก้วปลั่ง, 105 หน้า.

การสื่อสารสัญญาณแสงแบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ (N-WDM) ช่องสัญญาณแบบ Superchannel เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณหลายความยาวคลื่นส่งไปในเส้นใยแสง โดยที่แต่ละช่องสัญญาณมีระยะห่างของความถี่ในควิสต์ซึ่งทำให้แต่ละช่องสัญญาณจะอยู่ชิดกัน ดังนั้นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์นี้จึงช่วยประหยัดและใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการสื่อสารสัญญาณแสงจะเกิดผลกระทบของการลดทอนกำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมด โพลาริซและความเป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการจำกัดสมรรถนะของระบบ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการสร้างตัวกรองในควิสต์ และวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบได้แก่ ผลกระทบจากการลดทอนกำลังของสัญญาณสามารถแก้ไขได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ในส่วนของผลกระทบจากดิสเพอร์ชันสามารถชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ส่วนความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากการกระจายโหมดโพลาริซพบว่าไม่น้อยมากจึงไม่พิจารณาการชดเชยปัญหาในส่วนนี้ อย่างไรก็ตามยังมีผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบ จากการจำลองระบบสื่อสารสัญญาณ 2 ระบบคือ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 9720 กิโลเมตรโดยส่งที่กำลังภาคส่ง 6 dBm และการจำลองระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel 5 ช่องสัญญาณสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2560 กิโลเมตรโดยส่งกำลังภาคส่ง 4 dBm ที่อัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลที่ยอมรับได้  $4 \times 10^{-3}$

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5670294621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: OPTICAL FIBER TRANSMISSION / N-WDM / SUPERCHANNEL / OPTICAL COHERENT DETECTION / QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION (QAM) / POLARIZATION DIVISION MULTIPLEXING / DIGITAL SIGNAL PROCESSING

PORNRAWIN PENSRI: PERFORMANCE ANALYSIS OF THE OPTICAL FIBER TRANSMISSION USING QAM BASED NYQUIST WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING WITH COHERENT DETECTION. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 105 pp.

The Nyquist-WDM (N-WDM) transmission is technology that becomes a method to form Superchannel with sufficiently high bandwidth efficiency. N-WDM transmission reduces channel spacing equal to Nyquist frequency. Nevertheless, the N-WDM transmission was limited the performance of system by the impact of fiber attenuation, nonlinearity and fiber-dispersion, that can compensated with digital signal processing (DSP) for only fiber-dispersion. Then we use optical amplifier to compensate the fiber- attenuation. Only nonlinear is the limitation of transmission system as the impact of the nonlinearity on the Superchannel N-WDM transmission.

This dissertation propose the algorithm to design Nyquist-filter. Then we have successfully simulated 2 systems. First, PDM 4-QAM using coherent detection at data rate 200 Gb/s. It can achieve the maximum reachable distance 9,720 km at input power 6 dBm. Second, the Superchannel optical fiber transmission using 4-QAM based N-WDM using the coherent detection. The simulation results, the transmission system bit rate 200 Gb/s per channel to form Superchannel with net capacity of 1 Tb/s (5x200 Gb/s). At the optimum input power 4 dBm can transmit the signal as long as 2560 km at BER  $4 \times 10^{-3}$ .

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

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

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดการทำวิจัยจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำ การวิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีทธิกุลกิจ และ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุตเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการศึกษา ศิษย์ก้นกุฎิ ในหลักสูตรต่อเนื่อง และทุนสนับสนุนสำหรับการนำเสนอผลงานที่งานประชุมวิชาการ The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN 2014) ที่จังหวัดภูเก็ต

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย โดยเฉพาะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OptiSystem 10.0 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทำวิจัย

ขอขอบคุณนายรชฏ มณีชาติ รุ่นพี่นิสิตชั้นปริญญาเอกที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณพี่ เพื่อนและน้องทุกคน ในห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ชั้น 13 ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุนแก่ผู้จัดทำ การวิจัยและเป็นกำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	6
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	8
2.1 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง.....	8
2.2 เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว G.652.D.....	9
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพัลส์ N-WDM.....	9
2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation loss).....	9
2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion).....	11
2.3.4 การกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion).....	19
2.4 การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์.....	20
2.5 การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งโพลาไรซ์.....	24
2.6 การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์.....	24

2.7 การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ .....	25
2.8 Superchannel N-WDM .....	26
2.9 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	27
บทที่ 3 อัลกอริทึมสำหรับตัวกรองไนควิสต์และ โครงสร้างระบบ PDM 4-QAM และ PDM N-WDM .....	31
3.1 อัลกอริทึมสำหรับตัวกรองไนควิสต์ .....	31
3.1.1 การสร้างตัวกรองไนควิสต์สำหรับระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติ.....	32
3.1.2 การวิเคราะห์ตัวกรองไนควิสต์สำหรับระบบเส้นใยแสงแบบ 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ .....	34
3.2 การออกแบบโครงสร้างระบบ PDM 4-QAM ทั้งภาคส่งและภาครับสำหรับช่องสัญญาณปกติ 40	
3.3 การออกแบบโครงสร้างระบบ PDM N-WDM ทั้งภาคส่งและภาครับสำหรับช่องสัญญาณ Superchannel.....	42
บทที่ 4 การวิเคราะห์ระบบเส้นใยแสงสำหรับช่องสัญญาณปกติ และช่องสัญญาณ Superchannel .....	44
4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบเส้นใยแสง .....	44
4.1.1 ผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณ.....	44
4.1.2 ผลของดิสเพอร์ชัน .....	44
4.1.3 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้น .....	47
4.1.4 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์.....	48
4.2 การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติ .....	49
4.2.1 การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง ....	49
4.2.2 การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อผ่านเส้นใยแสง.....	54
4.3 การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel .....	69



4.3.1 การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง.....	69
4.3.2 การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อผ่านเส้นใยแสง .....	74
4.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ PDM 4-QAM และ PDM N-WDM.....	89
4.4.1การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง .....	89
4.4.2การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อผ่านเส้นใยแสง .....	89
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	92
รายการอ้างอิง .....	94
ภาคผนวก.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	105



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM.....	21
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างตัวกรองไนควิสต์.....	32
ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ไนควิสต์ของระบบกับกำลังภาครับที่ BER $4 \times 10^{-3}$ .....	39
ตารางที่ 3.3 ความยาวคลื่นและความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณของระบบ PDM N-WDM .....	42
ตารางที่ 4.1 อัตราการขยายสัญญาณแสงที่ระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ระยะต่างๆ ..	44
ตารางที่ 4.2 ช่องสัญญาณที่เลือกใช้สำหรับการจำลองระบบ.....	45
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของเส้นใยแสงแบบโหมดเดี่ยวชนิด G.652.D สำหรับค่าดิสเพอร์ชัน.....	45
ตารางที่ 4.4 ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	46
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของเส้นใยแสงแบบโหมดเดี่ยวชนิด G.652.D สำหรับความไม่เป็นเชิงเส้น.....	47
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาคส่งกับภาครับของช่องสัญญาณปกติและ Superchannel.....	89

## สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	กราฟแสดงปริมาณผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตในแต่ละปีของประเทศไทย [1].....	2
รูปที่ 1.2	กราฟแสดงจำนวนแบนด์วิดท์ในประเทศ (ก) และแบนด์วิดท์ต่างประเทศ (ข) [2] .....	2
รูปที่ 1.3	พัฒนาการความจุของเทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้สำหรับ DWDM [3].....	4
รูปที่ 1.4	การส่งสัญญาณแบบคลื่นพาห์เดียวกับหลายคลื่นพาห์แบบ Superchannel [3] .....	4
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [22] .....	10
รูปที่ 2.3	การเกิด Inter-symbol interference [23].....	12
รูปที่ 2.4	การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD ( $\beta_2$ ) เทียบกับความยาวคลื่น [23].....	12
รูปที่ 2.5	ผลของดิสเพอร์ชันอันดับสามต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [23] .....	14
รูปที่ 2.6	ผลของ SPM ต่อสัญญาณพัลส์ [23] .....	16
รูปที่ 2.7	ผลของปรากฏการณ์ XPM ต่อสัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสง [23].....	17
รูปที่ 2.8	ผลของปรากฏการณ์ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [23] .....	18
รูปที่ 2.9	ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [23].....	19
รูปที่ 2.10	สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 4-QAM.....	21
รูปที่ 2.11	แบบจำลองวงจรภาคส่งแบบ QAM [16].....	22
รูปที่ 2.12	แบบจำลองวงจรภาครับแบบ QAM [16].....	22
รูปที่ 2.13	โครงสร้างวงจรภาคส่งแบบ n-QAM.....	23
รูปที่ 2.14	โครงสร้างวงจรภาครับแบบ n-QAM .....	23
รูปที่ 2.15	โครงสร้างวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM.....	25
รูปที่ 2.16	โนควิสต์พัลส์และสเปกตรัมของโนควิสต์พัลส์.....	25
รูปที่ 2.17	สเปกตรัมของสัญญาณแบบ Superchannel N-WDM .....	26
รูปที่ 2.18	การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นโนควิสต์แบบ Superchannel N-WDM.....	26

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป [8].....	28
รูปที่ 2.20 วงจรการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล [8].....	29
รูปที่ 3.1 สเปกตรัมก่อนผ่านตัวกรองไนควิสต์ .....	32
รูปที่ 3.2 (ก) ตัวกรองไนควิสต์ $k=0.1$ (ข) สเปกตรัมหลังผ่านตัวกรองไนควิสต์.....	33
รูปที่ 3.3 (ก) ตัวกรองไนควิสต์ $k=0.2$ (ข) สเปกตรัมหลังผ่านตัวกรองไนควิสต์.....	33
รูปที่ 3.4 (a) ตัวกรองไนควิสต์ $k=0.3$ (b) สเปกตรัมหลังผ่านตัวกรองไนควิสต์.....	33
รูปที่ 3.5 (ก) ตัวกรองไนควิสต์ $k=0.4$ (ข) สเปกตรัมหลังผ่านตัวกรองไนควิสต์.....	34
รูปที่ 3.6 (ก) ตัวกรองไนควิสต์ $k=0.5$ (ข) สเปกตรัมหลังผ่านตัวกรองไนควิสต์.....	34
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.1.....	35
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.2.....	36
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.3.....	37
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.4.....	38
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.5.....	39
รูปที่ 3.12 โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM 4-QAM.....	40
รูปที่ 3.13 QAM Transmitter (QAM Tx) ของระบบ PDM 4-QAM.....	40
รูปที่ 3.14 โครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM.....	41
รูปที่ 3.15 การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (coherent detection) .....	41
รูปที่ 3.16 ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel.....	42
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับค่าดิสเพอร์ชัน .....	46

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังในการส่งสัญญาณกับระยะทางสูงสุดเนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น.....	48
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm.....	49
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm.....	50
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm.....	51
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm.....	52
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm.....	53
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km.....	55
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km.....	55
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km.....	56
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km.....	58
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km.....	58
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km.....	59
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km.....	61





รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km.... 87

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km.. 88

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูล ที่ระยะห่างของระบบ PDM 4-QAM ผ่านเส้นใยแสง 1200 km..... 90

รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลของระบบ PDM 4-QAM ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm..... 90

รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลที่ระยะห่างของระบบ PDM N-WDM ผ่านเส้นใยแสง 6000 km..... 91

รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลของระบบ PDM N-WDM ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ..... 91



## บทที่ 1

### บทนำ

เนื่องจากการใช้งานอินเทอร์เน็ตในปัจจุบันมีปริมาณความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องพัฒนาความสามารถของระบบการสื่อสารให้มีอัตราการส่งข้อมูล และแบนด์วิดท์ที่เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากในเชิงพาณิชย์ผู้ให้บริการมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้ได้มากขึ้นในขณะที่ใช้แบนด์วิดท์เท่าเดิม ซึ่งการมอดูเลตสัญญาณแบบคิวเอเอ็ม และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ต่างเป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลทั้งสิ้น ดังนั้นการออกแบบระบบโดยใช้สองเทคโนโลยีดังกล่าวรวมกันจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารได้ดีขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบคิวเอเอ็มบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ โดยเนื้อหาบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา แนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิทยานิพนธ์

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นับตั้งแต่อินเทอร์เน็ตเริ่มเข้ามาในประเทศไทยเมื่อปี 1991 อัตราการเพิ่มขึ้นของผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาที่ยี่สิบปีที่ผ่านมา และความต้องการในการใช้งานของผู้ใช้แต่ละคนก็เพิ่มสูงขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสารที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว จากสถิติจำนวนผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตในประเทศไทยจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) [1] รูปที่ 1.1 แสดงจำนวนผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตที่ขยายตัวจากปี 1991 ซึ่งเริ่มมีผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตเพียง 30 คนเป็น 37 ล้านคนในปี 2015 คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของประชากรในประเทศไทย

โดยในอดีตการใช้งานอินเทอร์เน็ตอาจมีเพียงการรับส่งอีเมล การค้นหาข้อมูลที่เป็นข้อความ แต่ในปัจจุบันมีการรับส่งข้อมูลทั้งภาพ เสียง ข้อมูลมัลติมีเดียชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีขนาดความจุที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้าขนาดของสัญญาณที่จะส่งมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แบนด์วิดท์ของโครงข่ายที่รองรับการใช้งานของผู้ใช้ย่อมต้องมีการพัฒนาให้มีขนาดที่เพียงพอต่อการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น จากสถิติการใช้งานแบนด์วิดท์ [2] จากสำนักงานคณะกรรมการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ( กสทช ) ซึ่งจำนวนแบนด์วิดท์ได้มาจากการหาผลรวมจำนวนแบนด์วิดท์ของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตในประเทศไทยรายต่างๆ แบ่งเป็น 2 ประเภท

แบนด์วิดท์ภายในประเทศ  
( domestic bandwidth )

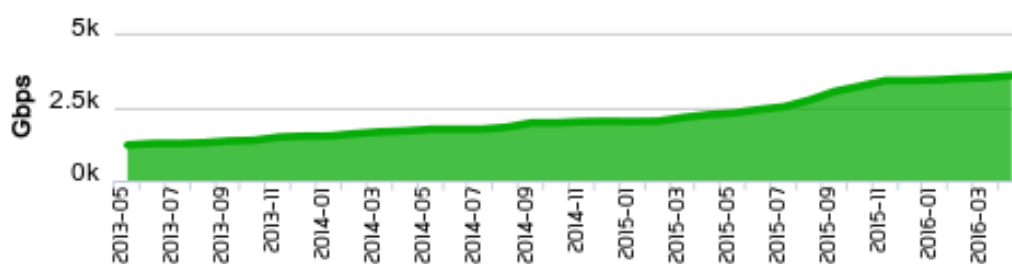
ผลรวมของแบนด์วิดท์ทั้งหมดของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เกตเวย์ภายในประเทศ (national internet exchange : NIX)

แบนด์วิดท์ที่ไปต่างประเทศ  
( international bandwidth )

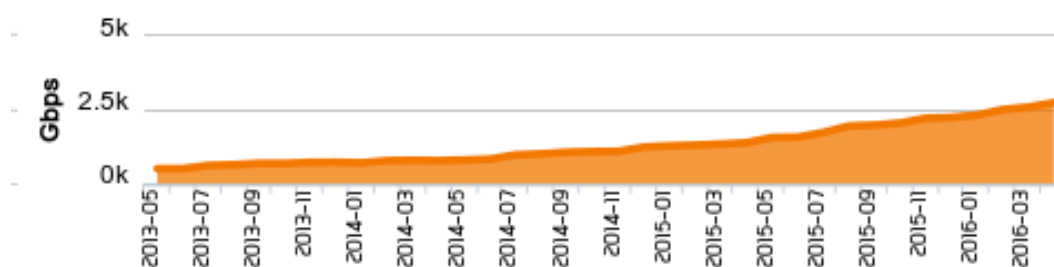
ผลรวมของแบนด์วิดท์ของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตทั้งหมดที่เชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เกตเวย์ไปต่างประเทศ ( international internet gateway : IIG) และจากผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่อไปต่างประเทศโดยตรง



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงปริมาณผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตในแต่ละปีของประเทศไทย [1]



(ก)



(ข)

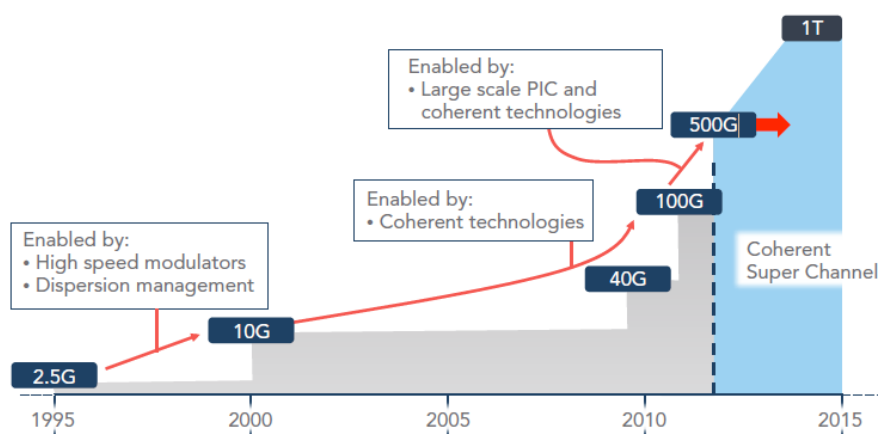
รูปที่ 1.2 กราฟแสดงจำนวนแบนด์วิดท์ในประเทศ (ก) และแบนด์วิดท์ต่างประเทศ (ข) [2]

ในช่วงระยะเวลาเกือบสิบปีอัตราการใช้งานแบนด์วิดท์ภายในประเทศเพิ่มขึ้นสูงอย่างต่อเนื่องมีการใช้งานมากกว่า 3000 Gb/s ในปี 2016 แสดงดังกราฟรูปที่ 1.2 (ก) กราฟรูปที่ 1.2 (ข) อัตราการใช้งานแบนด์วิดท์ไปต่างประเทศเพิ่มขึ้นสูงอย่างต่อเนื่องเช่นกันโดยมีการใช้งานมากกว่า 2500 Gb/s ในปี 2016 ดังนั้นจากการประมาณปริมาณแบนด์วิดท์ที่สูงขึ้นถึง 40% ต่อปีจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับผู้ให้บริการโครงข่ายต่างๆที่จะหาวิธีแก้ปัญหาการใช้งานแบนด์วิดท์ที่จะเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลในอนาคต เพราะฉะนั้นการวิจัยโครงข่ายหลัก (core network) ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถรองรับการใช้งานที่จะเพิ่มขึ้นและส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่มากขึ้นจึงเป็นงานวิจัยที่สมควรมีการศึกษาและพัฒนา

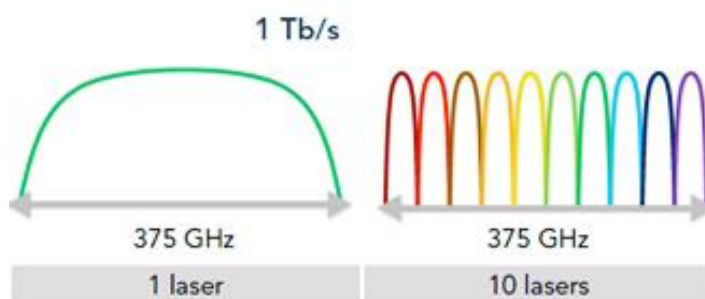
การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของโครงข่ายหลักที่มีคุณภาพสูงและมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันคือ dense wavelength division multiplexing (DWDM) เทคโนโลยีนี้ถูกกล่าวถึงมาตั้งแต่ปี 90 มีอัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 2.5 Gb/s หลังจากนั้นมีการเพิ่มแบนด์วิดท์เพื่อให้การส่งข้อมูลอยู่ที่อัตรา 10 Gb/s แต่ไม่ว่าจะเป็นอัตราการส่งข้อมูล 2.5 Gb/s หรือ 10 Gb/s ก็ยังคงใช้วิธีการมอดูเลตแบบพื้นฐานเช่น intensity modulation โดยการตรวจจับสัญญาณแบบไคเร็ค (IM-DD) หรือเรียกว่า on/off keying (OOK) และ non-return to zero (NRZ) ซึ่ง IM-DD สามารถตอบสนองได้ดี แต่มีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมและยังมีความอ่อนไหวต่อพารามิเตอร์ของเส้นใยแสง เช่น chromatic dispersion (CD) และ polarization mode dispersion (PMD) ต่อมามีการพัฒนาให้มีอัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 40 Gb/s โดยการเปลี่ยนมาใช้ในการมอดูเลตสัญญาณด้วยวิธีการที่ซับซ้อนขึ้นเช่น optical duo-binary (ODB) และ differential phase shift-keying (DPSK) อย่างไรก็ตามอุปสรรคในการส่งข้อมูลที่อัตราบิตเร็วมากกว่า 10 Gb/s ขึ้นไปนั้นปัญหาอยู่ที่การกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD) จึงจำเป็นต้องมีการชดเชย PMD แต่ถ้าคิดต้นทุนในทางการค้า พบว่าการทำเช่นนี้จะมีต้นทุนที่สูงไม่คุ้มค่ากับการพัฒนาความเร็วไปที่ 40 Gb/s หลังจากนั้นมีการวิจัยเทคโนโลยีใหม่ที่เรียกว่า “การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์” ใช้สำหรับการส่งข้อมูลที่อัตราบิตเร็วกว่า 10 Gb/s ข้อดีในการใช้เทคโนโลยีการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ประการแรกคือ การมอดูเลตที่ใช้ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ จะให้ประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมได้สูงกว่า การมอดูเลตแบบพื้นฐานที่ใช้การตรวจจับสัญญาณแบบไคเร็ค ประการที่สอง คือ การใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ จะประกอบไปด้วย การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นตัวช่วยในการแก้ปัญหา CD และ PMD และมีความสามารถในการส่งข้อมูลในระดับ 40 Gb/s ไม่น้อยไปกว่าในระดับ 10 Gb/s อีกด้วย จนกระทั่งในปี 2011 สามารถพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ให้มีอัตราบิตเรตได้ถึง 100 Gb/s ในขณะที่ยังคงความสามารถในการส่งได้ไกลเท่ากับการส่งด้วยอัตราบิตเรต 10 Gb/s เมื่อเทียบราคาต้นทุนต่อหน่วยแล้วอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและถูกกว่าการส่งด้วยอัตราบิตเรต 40 Gb/s [3]

จากที่ผ่านมามีการพัฒนาของการมัลติเพล็กซ์สัญญาณตั้งแต่ DWDM ที่มีอัตราบิตเรต 2.5 Gb/s จนกระทั่งมีการใช้เทคนิคการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์มาแทนการตรวจจับสัญญาณ

แบบไดเร็ก ในปัจจุบันที่มีอัตราเร็ว 100 Gb/s ดังรูปที่ 1.3 แต่ปริมาณความต้องการในการใช้แบนด์วิธยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดคำถามต่อไปว่าถ้ามีความต้องการใช้งานเกินแบนด์วิธ 100 Gb/s จะมีการแก้ปัญหาอย่างไรเช่น ถ้าต้องการแบนด์วิธ 200 Gb/s หรือ 500 Gb/s จำเป็นต้องสร้างคลื่นพาห์เดี่ยว(single-carrier) 200 G หรือ 500 G เป็นตัวส่งสัญญาณหรือไม่ซึ่งโครงสร้างของระบบที่เรามีการมอดูเลตขั้นสูงสามารถสร้างคลื่นพาห์หลายๆคลื่นในการส่งสัญญาณได้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานสเปกตรัมและตัวรับสเปกตรัมอีกทั้งเกิดการพัฒนาย่างต่อเนื่องจนพบเทคนิค Superchannel โดยที่ super-channel คือ การรวมคลื่นพาห์หลายๆคลื่นส่งไปในเส้นใยแสงพร้อมๆกัน โดยมีหลักการดังรูปที่ 1.4 ถ้าต้องการส่งข้อมูล 1 Tb/s ใช้การมอดูเลตแบบ QAM โดยเทียบระหว่างแสงเลเซอร์เดี่ยว เปรียบเทียบกับแสงเลเซอร์ 10 แสงที่นำมาใช้ในระบบ Superchannel โดยละเลยช่องว่าง 50 GHz ระหว่างแสงเลเซอร์ ดังนั้นแสงเลเซอร์สิบตัวของ Superchannel จะมีความกว้างสเปกตรัมเท่ากับแสงเลเซอร์เดี่ยว และถูกบีบอัดเข้าด้วยกันก่อนถูกส่งและขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ได้มาจากการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดการซ้อนทับของแต่ละช่องสัญญาณที่ตัวรับของ Superchannel



รูปที่ 1.3 พัฒนาการความจุของเทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้สำหรับ DWDM [3]



รูปที่ 1.4 การส่งสัญญาณแบบคลื่นพาห์เดียวกับหลายคลื่นพาห์แบบ Superchannel [3]

นอกจากนี้ในอนาคตยังมีเทคโนโลยีใหม่ๆที่กำลังพัฒนาและน่าสนใจคือ การมอดูเลตแบบ n-QAM บนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ Nyquist-wavelength-division multiplexing (N-WDM) ใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากเทคนิค DWDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ เนื่องจากเทคโนโลยี DWDM เมื่อส่งข้อมูลหลายๆช่องสัญญาณด้วยกำลังภาคส่งที่สูงขึ้นจะเกิดความร้อนในเส้นใยแสงค่อนข้างสูงทำให้เส้นใยแสงเกิดการละลายได้ง่ายแต่เทคนิค N-WDM สามารถส่งข้อมูลหลายๆช่องสัญญาณลงบนเส้นใยแสงเส้นเดียว โดยที่ความร้อนน้อยกว่าและมีการใช้พัลส์ข้อมูลแบบซิงค์ฟังก์ชันทำให้สเปกตรัมของซิงค์พัลส์เป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยที่ช่องว่างแต่ละสเปกตรัมจะแคบมาก เพื่อให้มีความกว้างของสเปกตรัมทั้งหมดเท่ากับ baud rate ดังนั้นจึงสามารถส่งข้อมูลในอัตราบิตเรตที่สูงมาก ในระดับ 500 Gb/s หรือในระดับ Tb/s [4-8] จึงมีประสิทธิภาพการใช้งานสเปกตรัม (SE) สูงและยังสามารถส่งข้อมูลได้ไกลเป็นระยะทางมากกว่าพันกิโลเมตร ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยมากมายสำหรับเทคโนโลยีนี้ที่ศึกษาการส่งสัญญาณทางแสงที่มีระยะทางไกลยิ่งและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมอย่างสูงสุดอีกด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ที่น่าสนใจ เช่น งานวิจัยจากประเทศเยอรมันสามารถส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธี N-WDM ด้วยแสงเลเซอร์เดี่ยวด้วยอัตราบิตเรตสูงถึง 32.5 Tb/s ส่งสัญญาณได้ระยะทาง 227 กิโลเมตรโดยไม่มีการชดเชยผลของดิสเพอร์ชัน [9] งานวิจัยจากประเทศจีนสามารถส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธี N-WDM ด้วยอัตราบิตเรต 128 Gb/s ต่อช่องสัญญาณจำนวน 6 ช่องสัญญาณส่งได้ไกลถึง 1200 กิโลเมตรโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ 16-QAM [10] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการส่งสัญญาณที่อัตราเร็วมากกว่า Tb/s โดยใช้เทคนิค N-WDM ในงานวิจัยของปีเตอร์ เจ [11] กล่าวถึงรูปแบบของการมอดูเลตที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมดีที่สุดซึ่งจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตแบบ n-QAM เป็นหนึ่งในเทคนิคการมอดูเลตที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ศึกษาสมรรถนะของ N-WDM โดยใช้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Superchannel มีอัตราบิตระดับ Tb/s ปรากฏว่าสามารถส่งข้อมูลได้ไกลกว่ากิโลเมตร [12] จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าเทคนิค N-WDM ในงานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนาประสิทธิภาพของการใช้งานสเปกตรัมเพิ่มระยะในการส่งสัญญาณ ข้อมูลให้ไกลยิ่งขึ้นและงานวิจัยอื่นๆ อีกมากมายจะเป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการใช้งานสเปกตรัม [13-15] แต่การศึกษาเทคนิค N-WDM ด้านขีดจำกัดของสมรรถนะของเทคนิคนั้น ยังไม่ได้รับความสนใจในการพิจารณาสำหรับงานวิจัยที่ผ่านมามากนัก ซึ่งพัฒนาการของระบบส่งสัญญาณแสงถูกพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งในปัจจุบัน เทคโนโลยีการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM บน N-WDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในระบบการสื่อสาร ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอนำเสนออัลกอริทึมสำหรับสร้างสัญญาณในควิสต์ นำเสนอการส่งผ่านสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ช่องสัญญาณปกติและ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ช่องสัญญาณแบบ Superchannel ภายใต้ผลกระทบของการลดทอนกำลังของสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมดโพลาริซ และความไม่เป็นเชิงเส้น โดยการจำลองระบบเพื่อประเมินขีดจำกัดและสมรรถนะของระบบในการหาระยะทางไกลสุดที่ระบบสามารถส่งได้จริงในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการสร้างสัญญาณไนควิสต์
- 1.2.2 นำเสนอการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติ และ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel
- 1.2.3 วิเคราะห์ผลกระทบของการลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมดโพลาไรซ์ และความไม่เป็นเชิงเส้น ต่อการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
- 1.2.4 นำเสนอแนวทางการออกแบบระบบให้มีสมรรถนะสูงสุดและหาระยะทางไกลสุดที่ระบบส่งได้

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาการสื่อสารสัญญาณ N-WDM ผ่านใช้เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว (SMF) ITU-T G.652.D เท่านั้น
- 1.3.2 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ในการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ให้เป็นอุดมคติ
- 1.3.3 ใช้การศึกษาในเชิงทฤษฎี และการจำลองระบบ N-WDM โดยไม่มีการทดลองจริง

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM
- 1.4.2 ศึกษาการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์
- 1.4.3 ศึกษาการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นไนควิสต์ (N-WDM)
- 1.4.4 ศึกษาผลกระทบของดิสเพอร์ชัน และปรากฏการณ์เคอร์ ต่อการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM บนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นไนควิสต์ (N-WDM) และใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์โดยใช้การจำลองระบบ
- 1.4.5 ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการสร้างสัญญาณไนควิสต์
- 1.4.6 ออกแบบการส่งผ่านสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติ และ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลกระทบของการลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมดโพลาไรซ์ และความไม่เป็นเชิงเส้น ต่อการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
- 1.4.8 ออกแบบระบบให้มีสมรรถนะสูงสุดและหาระยะทางไกลสุดที่ระบบส่งได้
- 1.4.9 สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการสร้างสัญญาณนาฬิกา
- 1.5.2 สามารถออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติ และ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel
- 1.5.3 สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมดโพลาไรซ์ และความไม่เป็นเชิงเส้น ต่อการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
- 1.5.4 สามารถนำเสนอแนวทางการออกแบบระบบให้มีสมรรถนะสูงสุดและหาระยะทางไกลสุดที่ระบบส่งได้
- 1.5.5 มีผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์และนำเสนอในงานประชุมวิชาการนานาชาติ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 2.1 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

สัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงคือสมการแมกซ์เวลล์(Maxwell's equation) พิจารณาจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงดังสมการที่(2.1) ซึ่งมีชื่อว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชโรดิงเจอร์ (nonlinear schrödinger equation, NLSE) [17]

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

โดยที่  $A$  คือ กรอบคลื่น (envelope) ของสัญญาณ

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation constant)

$\beta_2$  คือ ค่า group velocity dispersion (GVD)

$\beta_3$  คือ ค่า third order dispersion coefficient ในรูปของความชันดิสเพอร์ชัน (dispersion slope)

$\gamma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient)

$z$  คือ ระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง

$T$  คือ กรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม ( $v_g$ )

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาจริง  $t$  แสดงได้ในสมการที่ (2.2) ดังนี้ [18]

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

จากสมการที่ (2.2)  $t$  เป็นเวลาจริง เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.1) พบว่า

ปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ  $A$  มี 4 พจน์ คือ

พจน์ที่ 1 คือ การสูญเสียของกำลังสัญญาณซึ่งเพิ่มขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง

พจน์ที่ 2 คือ GVD ( $\beta_2$ ) ส่งผลให้พัลส์สัญญาณขยายกว้างออก

พจน์ที่ 3 คือ ผลของปรากฏการณ์ TOD จะส่งผลให้เกิดสัญญาณพัลส์ทางเวลาเกิดความผิดเพี้ยนแบบไม่สมมาตร

พจน์ที่ 4 คือ ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงหรือปรากฏการณ์เคอร์(Kerr effect) ซึ่งส่งผลให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและสเปกตรัมของ



สัญญาณขยายออกด้วยโดยความรุนแรงของปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นกับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง

## 2.2 เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว G.652.D

เส้นใยแสงเป็นศูนย์กลางของสัญญาณแสงชนิดหนึ่ง ที่ทำมาจากแก้วซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงมาก เส้นใยแสงมีลักษณะเป็นเส้นยาวขนาดเล็ก มีขนาดประมาณเส้นผมของมนุษย์เรา สายใยแก้วนำแสงที่ดีต้องสามารถนำสัญญาณแสงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้มีการสูญเสียของสัญญาณแสงน้อยมาก โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้เราจะวิเคราะห์ระบบที่ใช้เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว G.652.D เท่านั้น [19-21] คือ การใช้ตัวนำแสงที่บีบลำแสงให้พุ่งตรงไปตามท่อแก้ว โดยมีการกระจายแสงออกทางด้านข้างน้อยที่สุด เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวจึงเป็นเส้นใยแสงที่มีกำลังสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด เหมาะสำหรับในการใช้กับระยะทางไกลๆ การเดินสายเส้นใยแสงกับระยะทางไกลมาก เช่น เดินทางระหว่างประเทศ ระหว่างเมือง มักใช้เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว

เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว ตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ถูกออกแบบให้มีการสูญเสียเนื่องจากการลดทอนสัญญาณน้อยที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร และสามารถใช้ในการส่งสัญญาณได้หลายช่วงความถี่ตั้งแต่ความถี่ 1310 นาโนเมตร ถึง 1650 นาโนเมตร ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบ N-WDM ที่อัตราข้อมูล 1 Tbps โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณ ค่าดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง การกระจายโหมดโพลาริซ และความเป็นเชิงเส้นจะพิจารณาจากการจำลองระบบโดยใช้เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว G.652.D

## 2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อพัลส์ N-WDM

### 2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation loss)

อัตราการสูญเสียกำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสงเป็นส่วนสำคัญของการกำหนดคุณลักษณะในการออกแบบโครงข่ายทางแสง และเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระยะทางสูงสุดระหว่างตัวส่งและตัวรับโดยการลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงเกิดจาก 3 สาเหตุหลักคือ

1. การดูดซึม (absorption) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ
2. การกระเจิง (scattering) ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่นจากกระบวนการผลิต
3. การแผ่รังสี (radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางใดๆ จะเกิดการลดทอนค่ากำลังของสัญญาณดังสมการที่ (2.3)

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

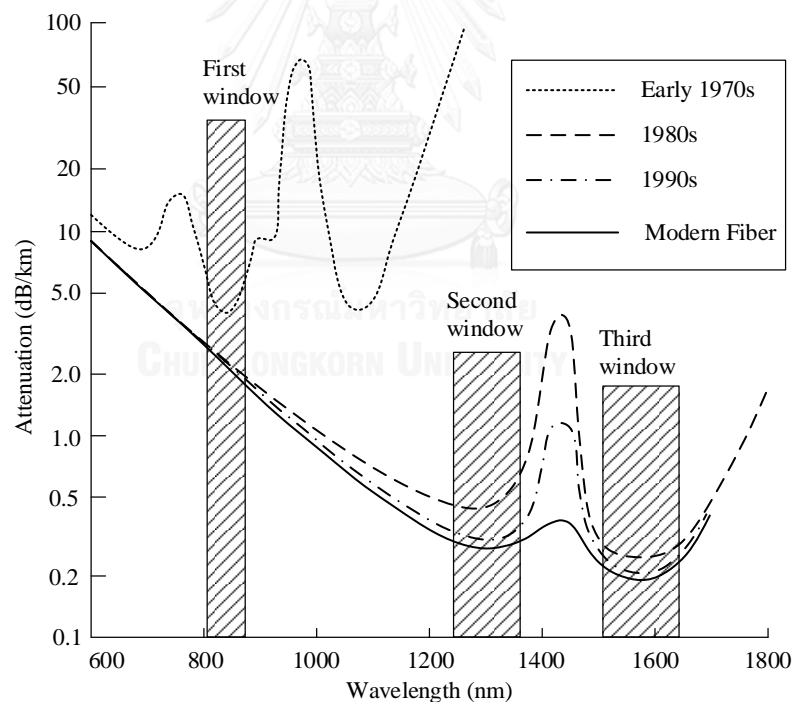
โดยที่  $P(L)$  คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ  $L$  [km] จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$P(0)$  คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$\alpha$  คือ ค่าคงตัวของการลดทอน [dB/km]

ค่าคงตัวการลดทอน ( $\alpha$ ) มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่น ซึ่งแสดงออกตามเส้นโค้ง 4 เส้น โดยแบ่งตามยุคของการสื่อสารในรูปที่ 2.1

1. ระบบเส้นใยแสงในยุคแรก (first window) จะทำงานในช่วงความยาวคลื่น 850 nm เส้นใยแสงในยุคแรกทำจากซิลิกาที่มีอัตราการลดทอนสัญญาณสูงซึ่งเกิดจากความชื้นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (rayleigh scattering) ทำให้ในยุคนี้อัตราการลดทอนสัญญาณมีค่าสูง
2. ระบบเส้นใยแสงยุคที่สอง (second window) มีการพัฒนาอุปกรณ์ให้ดีขึ้น ในช่วงความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km
3. ระบบเส้นใยแสงยุคที่สาม (third window) บริษัท NTT (nippon telegraph and telephone) ได้พัฒนาระบบเส้นใยแสงความยาวคลื่น 1550 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km
4. ระบบเส้นใยแสงยุคที่สี่ ปัจจุบันมีการใช้เส้นใยแสงในช่วงความยาวคลื่น 1625 nm [22]



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [22]

### 2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

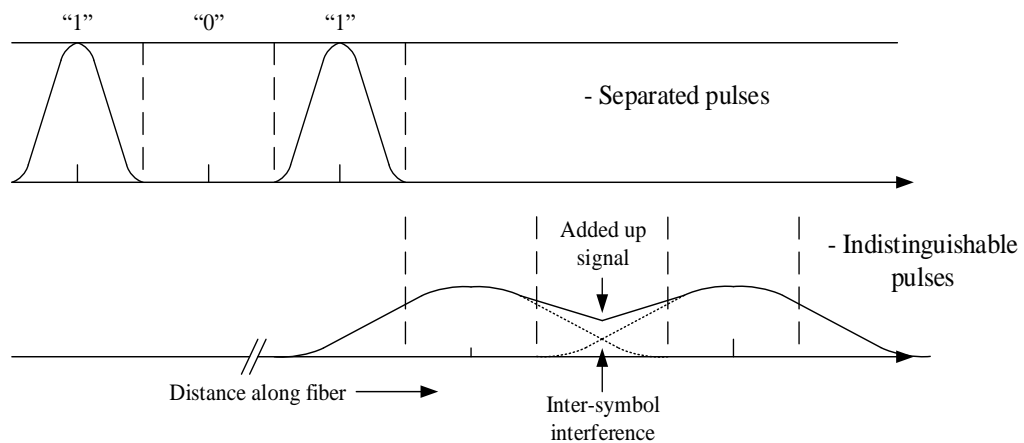
การเกิดดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสงมีสองประเภทด้วยกันคือ

1. inter-modal dispersion สำหรับ MMF
2. intra-modal dispersion หรือ chromatic dispersion สำหรับ SMF

การส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล เมื่อสื่อสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดี่ยว (SMF) ผลของการกระจายตามความถี่ของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทั้งนี้เราจะเลือกใช้ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงเพราะว่า SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงอัตราการสูญเสียกำลังที่น้อยกว่า ดังนั้นดิสเพอร์ชันที่พิจารณาในงานวิจัยนี้คือดิสเพอร์ชัน (second order dispersion) และความชันดิสเพอร์ชัน (third order dispersion)

#### 2.3.2.1 ความเร็วกลุ่มดิสเพอร์ชัน (group velocity dispersion)

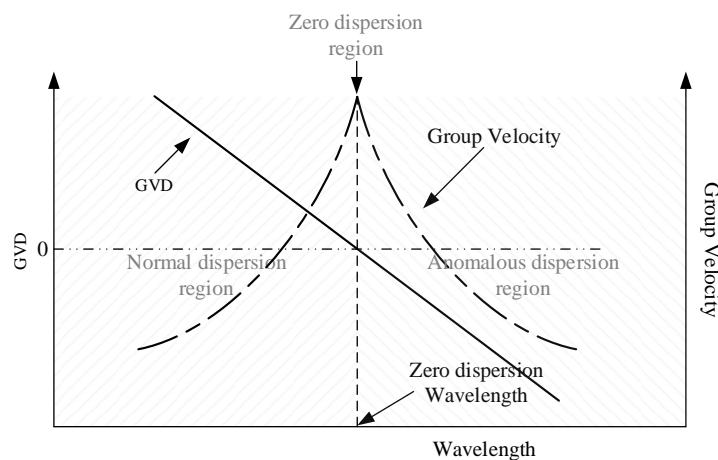
สาเหตุของการเกิดดิสเพอร์ชันหรือพิจารณาในรูปของ second order dispersion coefficient ( $\beta_2$ ) หรือ group velocity dispersion: GVD คือคุณสมบัติของความเร็วกลุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วย  $\beta_2$  ยังมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสัญญาณพัลส์อย่างมาก ในกรณีที่มีการสื่อสัญญาณพัลส์เป็นขบวนออกไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางไกล ๆ และสัญญาณพัลส์ที่อยู่ติดกันจะมีโอกาสเหลื่อมกันมากขึ้น (overlap) จนทำให้เกิด inter-symbol interference (ISI) และอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ (error decision) ว่าสัญญาณแสงที่วิ่งเข้ามาควรจะเป็น บิต '1' หรือ บิต '0' ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 แสดงถึงการเกิด ISI ที่เกิดจากการขยายตัวออกของสัญญาณพัลส์ โดยเริ่มแรกส่งสัญญาณแบบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยบิต '1', '0', '1' ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ระหว่างบิตแยกออกจากกันอย่างชัดเจน เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงผลของ GVD ทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออกจนกระทั่งเกิด ISI จากผลของ ISI ทำให้กำลังของสัญญาณในช่วงเวลา (time slot) บิต '0' เพิ่มขึ้นและอาจทำให้ตรวจจับสัญญาณผิดพลาดจากบิต '0' กลายเป็นบิต '1' หากว่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมาเลยค่าขอบเขตที่เครื่องตรวจจับสัญญาณกำหนดไว้



รูปที่ 2.2 การเกิด Inter-symbol interference [23]

การแจกแจงความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ zero-dispersion wavelength แสดงดังรูปที่ 2.2 เราสามารถแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชันในรูปที่ 2.3 ออกเป็น 3 ช่วงได้แก่

ดิสเพอร์ชันปกติ (normal dispersion)	ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า
ดิสเพอร์ชันผิดปกติ (anomalous dispersion)	เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มน้อยกว่า
ดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion)	เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2$ ประมาณ 0 โดยสัญญาณที่มีความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด



รูปที่ 2.3 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD ( $\beta_2$ ) เทียบกับความยาวคลื่น [23]

สามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก chromatic dispersion โดยพิจารณาให้  $\tau$  แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่  $\omega$

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

โดยที่  $L$  คือ ความยาวของเส้นใยแสงหน่วยกิโลเมตร (km)

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

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

เมื่อ  $\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}$  ถ้าสัญญาณมีความกว้างสเปกตรัมความถี่เท่ากับ  $\Delta \omega$  ดังนั้นความแตกต่างการประวิงแพร่กระจายในแต่ละส่วนประกอบของสเปกตรัมสามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.5)

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

การขยายตัวของสัญญาณพัลส์สามารถเขียนในรูปของสัมประสิทธิ์  $D$  (ns/km/nm) ได้ดังนี้

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \quad (2.6)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{2\pi c}{\lambda} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นหน่วยนาโนเมตร (nm)

$c$  คือ ความเร็วของสุญญากาศเท่ากับ  $2.99739 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที (m/s)

เมื่อนำสมการ (2.7) ไปแทนค่าในสมการ (2.6) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.8)$$

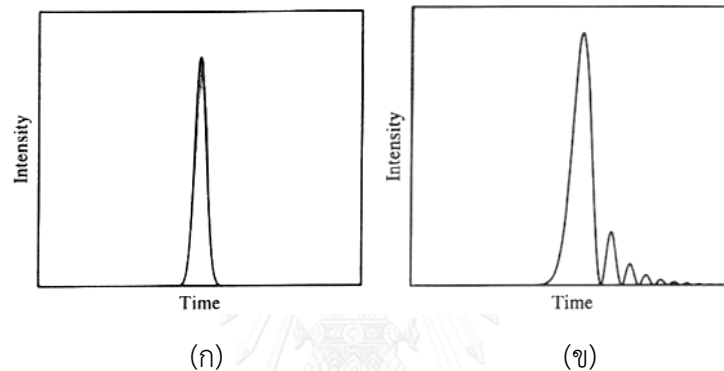
ดังนั้นเราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ในรูปของ  $D$  โดยนำสมการ (2.8) ที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการ (2.6) ได้ดังนี้

$$\Delta \tau = |D| \Delta \lambda L \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\Delta \lambda$  คือ ความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณแสง

### 2.3.2.2 ความชันดิสเพอร์ชัน (dispersion slope)

การเกิดความชันดิสเพอร์ชันสามารถพิจารณาในรูปของ Third order dispersion coefficient ( $\beta_3$ ) ในเส้นใยแสง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสัญญาณพัลส์อย่างมากในกรณีที่มีการส่งสัญญาณพัลส์เป็นขบวนออกไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางไกลๆ ด้วยอัตราเร็วสูง ผลกระทบของปรากฏการณ์ TOD จะส่งผลให้สัญญาณพัลส์ทางเวลาเกิดความผิดเพี้ยนแบบไม่สมมาตร (Asymmetric distortion) โดยจะมีสัญญาณพัลส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของสัญญาณพัลส์ (Trailing edge) ในทางเวลาดังรูปที่ 2.4 แต่ปรากฏการณ์ TOD จะไม่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมของสัญญาณทางความถี่



รูปที่ 2.4 ผลของดิสเพอร์ชันอันดับสามต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [23]

(ก) สัญญาณพัลส์อินพุต

(ข) สัญญาณพัลส์เอาต์พุต

### 2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity)

ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงหรือปรากฏการณ์เคอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังของสัญญาณทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปมีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) ปรากฏการณ์เคอร์มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็น 3 ประเภทคือ

#### 1. Self-phase modulation (SPM)

ปรากฏการณ์ SPM เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกัน เป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการ (2.10)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \quad (2.10)$$

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

$\phi_{NL}$  คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

จากสมการ ((2.11) ปรัชการณ SPM จะส่งผลให้สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณขยายออก และเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหี่ยวนามากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังสัญญาณสูงสุด

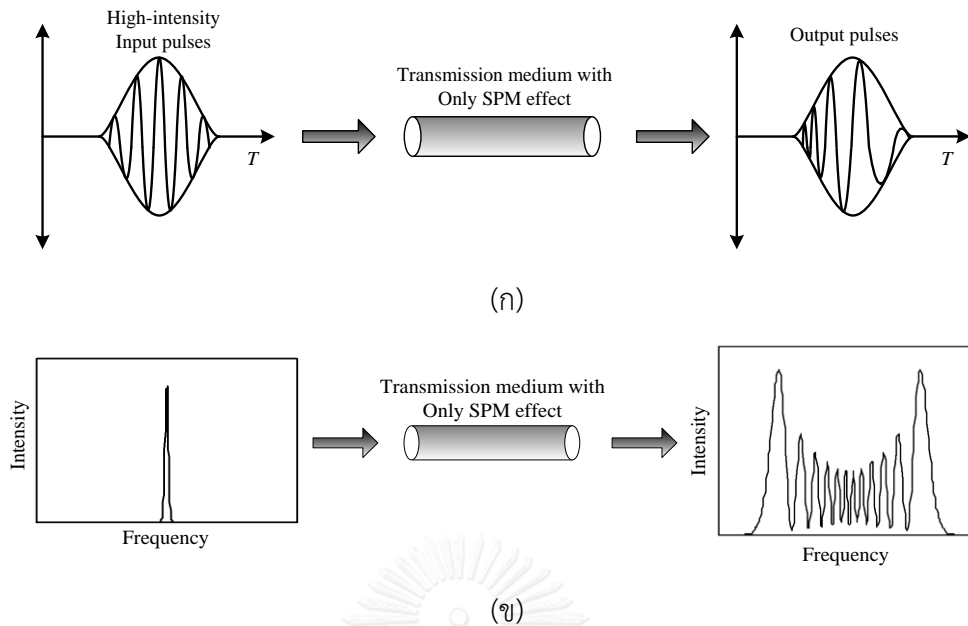
$$\phi_{NL,max} = L_{eff} P_0 \gamma \quad (2.11)$$

โดยที่  $P_0$  คือ กำลังของสัญญาณพัลส์  $\phi_{NL,max}$  เป็นเฟสที่เลื่อนออกไปมากที่สุด  
ณ บริเวณตรงกลาง สัญญาณพัลส์

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{\alpha} \quad \text{คือ ความยาวประสิทธิผลเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณ}$$

ในเส้นใยแสง

การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลของ SPM แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงถึงผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงโดยในรูปที่ 2.5 (a) แสดงถึงผลของ SPM ต่อความถี่ของสัญญาณจากรูปจะเห็นว่า SPM ส่งผลให้ส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณมีความเร็วกลุ่มน้อยกว่าส่วนประกอบความถี่ต่ำและในรูปที่ 2.5 (b) แสดงถึงผลของ SPM ต่อสเปกตรัมของสัญญาณ จากรูปจะเห็นว่านอกจาก SPM จะทำให้ขนาดของสเปกตรัมสัญญาณแตกออกแล้วยังจะทำให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกทางด้านข้างแบบสมมาตรกันด้วย



รูปที่ 2.5 ผลของ SPM ต่อสัญญาณพัลส์ [23]

(ก) ผลของ SPM ต่อความถี่สัญญาณ (ข) ผลของ SPM ต่อสเปกตรัมสัญญาณ

## 2. Cross-phase modulation (XPM)

ปรากฏการณ์ XPM นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ซึ่งมีค่าความถี่ต่างกันร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ที่ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของปรากฏการณ์ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์ที่มีความถี่ที่ต่างออกไป เหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม โดยทั่วไปเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองเนื่องจากปรากฏการณ์ปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลของมันจะมีค่ามากกว่าของปรากฏการณ์ SPM ถึง 2 เท่าโดยเราสามารถหาค่าเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.12)$$

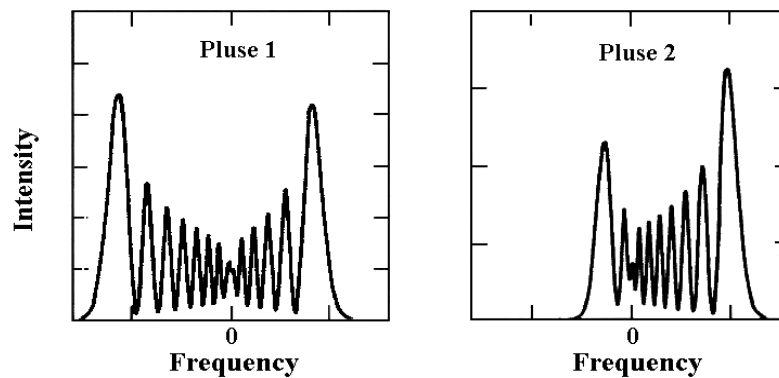
เมื่อ  $|E_0|^2$  คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์  $\omega_1$

$|E_1|^2$  คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์  $\omega_2$

ผลของปรากฏการณ์ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงแสดงดังรูปที่ 2.6 ที่มีกำลังสัญญาณต่างกันในเดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่ากำลัง



สัญญาณของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ SPM แต่จะต่างกันตรงที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจากปรากฏการณ์ XPM จะขยายออกมากกว่า เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ XPM ต่อสัญญาณรุนแรงกว่าปรากฏการณ์ SPM ถึง 2 เท่าและการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจาก กำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่า ส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจากปรากฏการณ์ XPM มากกว่า



รูปที่ 2.6 ผลของปรากฏการณ์ XPM ต่อสัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสง [23]

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.1) ซึ่งเป็นสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์สำหรับช่องสัญญาณเดียวเท่านั้น เมื่อเพิ่มช่องสัญญาณอีกหนึ่งช่องสัญญาณสามารถอธิบายด้วยสมการ(2.13)

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_j + \frac{1}{v_{gr}} \frac{\partial A_j}{\partial t} = i\gamma \left( |A_j|^2 + 2|A_k|^2 \right) A_j \quad (2.13)$$

กำหนดให้  $j$  คือ สัญญาณที่เราสนใจ

$k$  คือ สัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่ส่งไปพร้อมกัน

พจน์แรกทางขวามือของสมการ(2.13) ที่อยู่ในวงเล็บคือผลของปรากฏการณ์ SPM ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นและพจน์ที่สองคือผลของปรากฏการณ์ XPM นั้นเอง จะเห็นว่าพจน์ของปรากฏการณ์ XPM จะมีค่าคงที่เท่ากับ 2 คูณอยู่ด้วยซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความรุนแรงของปรากฏการณ์ XPM จะเป็น 2 เท่าของปรากฏการณ์ SPM เมื่อสัญญาณทั้งสองมีกำลังที่เท่ากัน

### 3. Four-wave mixing (FWM)

ปรากฏการณ์ FWM เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกันเป็นผลให้เกิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ ( $f_4$ ) จากสัญญาณความถี่  $f_1, f_2, f_3$  เป็นไปตามสมการ (2.14)

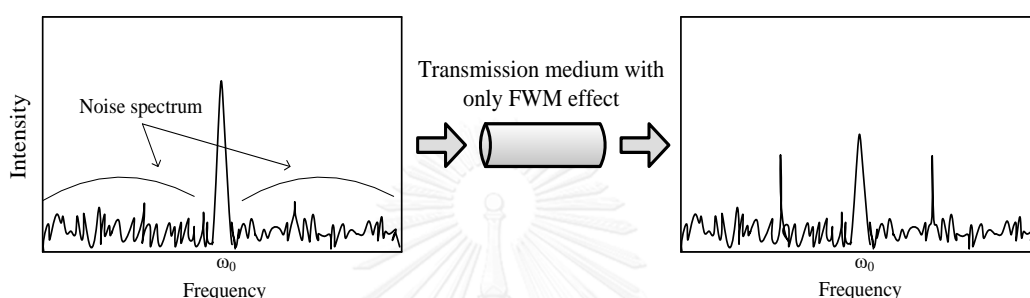
$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.14)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.15)$$

โดยที่  $k_n$  คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่  $n$

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่า intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังซึ่งกันและกันจนทำให้เกิด ghost pulse ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตทางความเข้มแสงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของปรากฏการณ์ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง [23]

ผลของปรากฏการณ์ FWM ในรูปที่ 2.7 แสดงสัญญาณอินพุตทางขวามือ ถ้าความถี่ของสัญญาณข้อมูลและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็นไปตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ตามหลักของการเกิด FWM เมื่อสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วยเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังสัญญาณจากสัญญาณข้อมูลไปยังสัญญาณรบกวน ทำให้กำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นและกำลังสัญญาณลดลงซึ่งจะมีการถ่ายเทลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ ถ้าระยะในการส่งสัญญาณมากขึ้น สัญญาณข้อมูลอาจจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนไปได้ในที่สุด

สำหรับผลของปรากฏการณ์ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณจะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมาและมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่เดิมซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นแต่ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่าปรากฏการณ์ XPM

ประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ FWM ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการจับคู่ของมุม (Phase - matching) ของคลื่นสัญญาณด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคลื่นสัญญาณดังกล่าวนี้ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเกิดดิสเพอร์ชันและความกว้างของแต่ละช่องสัญญาณ อีกทั้งผลของปรากฏการณ์ FWM ยังขึ้นอยู่กับพลังงานแสงที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (optical power) และการสูญเสียพลังงานในเส้นใยแสง การคำนวณหาพลังงานของความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจะเริ่มพิจารณาจากการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง ค่าคงตัวของการลดทอนเท่ากับ พลังงานคอร์สทอล์ก (crosstalk power) ของการกำเนิดสัญญาณความถี่ใหม่อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ FWM ตามเงื่อนไข

ในสมการ (2.14) และพลังงานที่ป้อนเข้าสู่เส้นใยแสงที่ความถี่  $f_1, f_2$  และ  $f_3$  มีค่าเท่ากับ  $P_1(0)$ ,  $P_2(0)$  และ  $P_3(0)$  ตามลำดับ

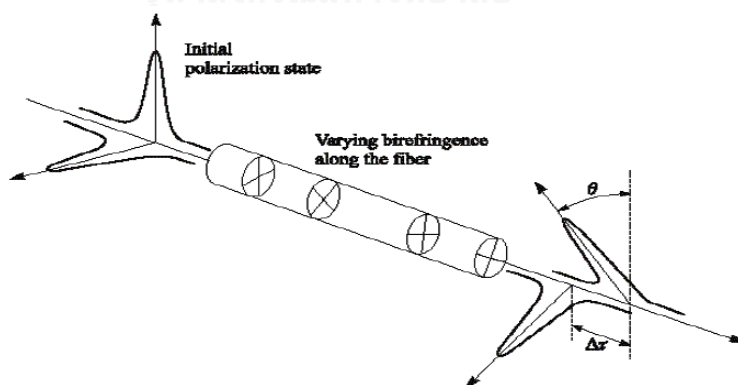
สามารถคำนวณหาความยาวของเส้นใยแสงที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM  $z_{eff}$  (Effective length) ได้จากสมการ (2.16) เมื่อพิจารณาการดูดกลืนพลังงานตลอดความยาวของเส้นใยแสง

$$z_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} \quad (2.16)$$

ดังนั้นการลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุดเพื่อลดการวิ้งตัดกันของสัญญาณ เนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันอีกทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เกิดได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

### 2.3.4 การกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion)

การกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion : PMD) เป็นเหตุให้พัลส์ของสัญญาณขยายตัวกว้างออกดังรูปที่ 2.8 องค์กรประกอบของแสง 2 โหมดโพลาไรซ์ซึ่งตั้งฉากกัน (orthogonal) เดินทางผ่านเส้นใยแสงด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน (differential group delay : DGD) เล็กน้อยโดยมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติ (birefringence) ของเส้นใยแสง ซึ่งเกิดจากธรรมชาติของเส้นใยแสงที่มีความไม่เรียบในบริเวณแกน (core) หรือความเครียดภายในเส้นใยแสง (internal stresses) รวมไปถึงผลกระทบจากภายนอกเช่น การโค้งงอ (bending) และการบิดเกลียว (twisting) ของเส้นใยแสง โดยจะส่งผลกระทบมากในโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปในระยะทางไกล และอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 10 Gbps สามารถคำนวณความเร็วที่ต่างกันได้จากสมการ (2.17) และสมการที่ (2.18)



รูปที่ 2.8 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [23]

$$\Delta\tau = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \quad (2.17)$$

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

$L$  คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

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

อย่างไรก็ตาม PMD เปลี่ยนแปลงไปอย่างสุ่มระหว่างการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง เนื่องจากผลของคุณสมบัติ (birefringence) ของเส้นใยแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ  $\Delta\tau$  จากสมการที่ (2.17) จึงไม่สามารถใช้ได้โดยตรง เราจึงประมาณค่า  $\Delta\tau$  ได้ดังสมการที่ (2.18) [X]

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2.18)$$

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

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

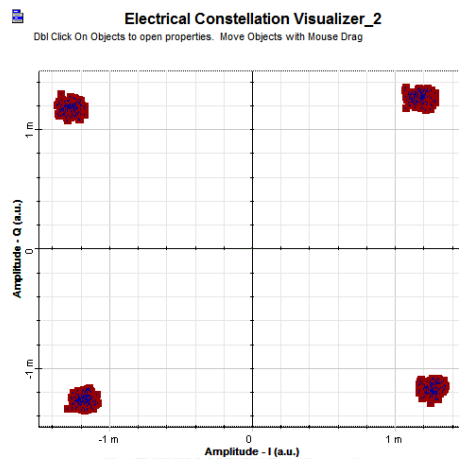
ผลของการกระจายโหมดโพลาริซเซชันต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณคือ โหมดโพลาริซเซชันของแสงที่ตั้งฉากกันทั้ง 2 แกนจะเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันและบิดไปจากแกนเดิมอย่างไม่มีแบบแผน (random) จึงส่งผลให้พัลส์ของสัญญาณขยายกว้างออก เมื่อไปถึงภาครับจึงไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกต้องได้

## 2.4 การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์

การมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์ (quadrature amplitude modulation : QAM) คือการส่งสัญญาณเบสแบนด์ 2 ชุดที่แตกต่างกันมาส่งลงในช่องสัญญาณสื่อสารในสเปกตรัมช่วงเดียวกัน ทำให้ระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าโดยที่แบนด์วิดท์มีขนาดเท่าเดิม โดยการมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM คือการผสมสัญญาณการแปลงเฟส (phase) และขนาด (amplitude) ของสัญญาณควบคู่กันเป็นการรวมวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK และ PSK การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM นั้นมีหลายรูปแบบ เช่น 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM หรือ 64-QAM สามารถเขียนแทนด้วย  $2^n$ -QAM โดย  $n$  คือ จำนวนบิตข้อมูลที่แสดงสถานะของแต่ละสัญญาณข้อมูล ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ 4-QAM ดังนั้นในแต่ละสัญญาณจะมีจำนวนบิตข้อมูลที่แสดงสถานะของแต่ละสัญญาณที่ละ 2 บิต โดยสามารถระบุสัญลักษณ์บิตข้อมูลด้วยเลขเชิงซ้อน (Complex number) และเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM นั้นแสดงในตารางที่ 2.2 และสัญญาณ 4-QAM Constellation ดังรูปที่ 2.9 [16, 24]

ตารางที่ 2.1 ค่าบิตข้อมูลสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตและเฟสของสัญญาณอินพุตที่มอดูเลตแบบ 4-QAM

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



รูปที่ 2.9 สัญญาณการมอดูเลตสัญญาณแบบ coherent 4-QAM ที่ปรากฏใน electrical constellation visualizer

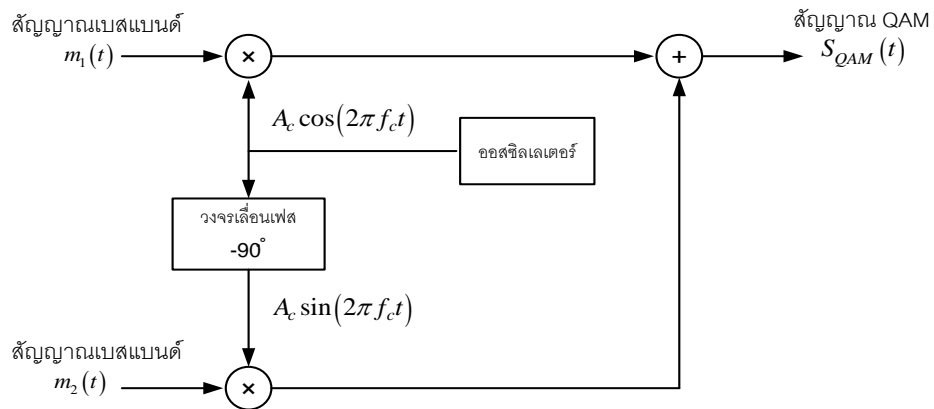
การมอดูเลตสัญญาณแบบ QAM มีสัญญาณเบสแบนด์ 2 สัญญาณคือ  $m_1(t)$  และ  $m_2(t)$  พิจารณาโครงสร้างของวงจรการกำเนิดสัญญาณ QAM ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สัญญาณเบสแบนด์ทั้งสองถูกป้อนเข้าสู่วงจรคูณกับสัญญาณคลื่นพาห์ 2 คลื่นพาห์ที่มีความถี่เดียวกันแต่มีเฟสต่างกัน  $-90$  องศา จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มารวมกันเป็นสัญญาณ QAM ทางไฟฟ้าผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปของสมการ (2.19)

$$S_{QAM}(t) = A_c m_1(t) \cos(2\pi f_c t) + A_c m_2(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (2.19)$$

จากสมการสัญญาณ QAM นี้

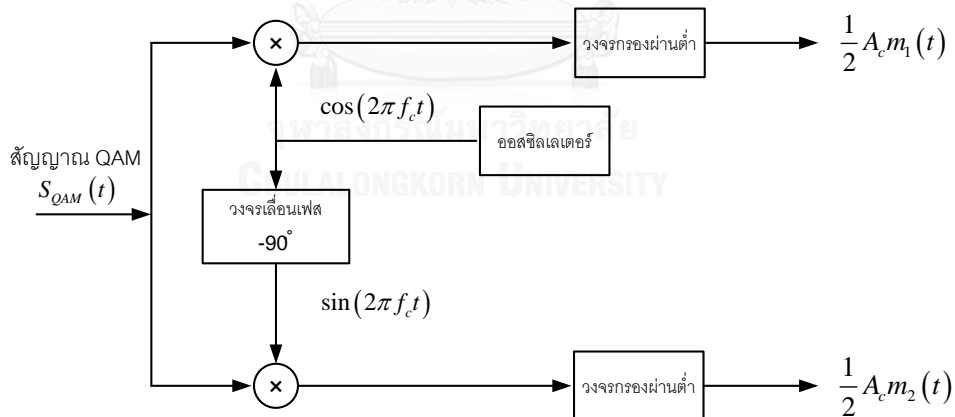
$A_c m_1(t)$  เรียกว่า องค์ประกอบอินเฟส (In-phase component)

$A_c m_2(t)$  เรียกว่า องค์ประกอบควอดเรเจอร์ (Quadrature component)

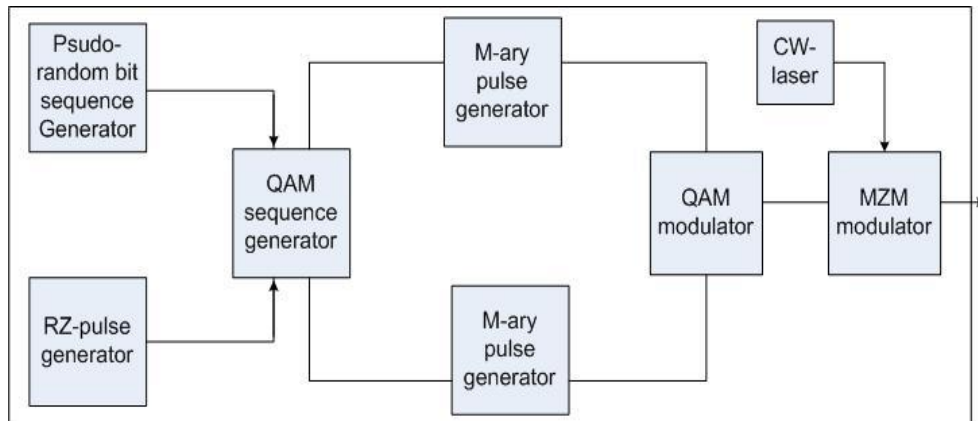


รูปที่ 2.10 แบบจำลองวงจรภาคส่งแบบ QAM [16]

ส่วนวงจรภาครับสัญญาณแบบ QAM มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 แสดงสัญญาณ QAM ที่ได้ถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกถูกนำไปคูณกับคลื่นสัญญาณ  $\cos(2\pi f_c t)$  และนำไปผ่านวงจรกรองผ่านต่ำก็จะได้สัญญาณเบสแบนด์  $\frac{1}{2} A_c m_1(t)$  สำหรับส่วนที่สองนำไปคูณกับคลื่นสัญญาณ  $\sin(2\pi f_c t)$  และนำไปผ่านวงจรกรองผ่านต่ำก็จะได้สัญญาณเบสแบนด์  $\frac{1}{2} A_c m_2(t)$  แต่ปัญหาหลักของการตีมอดูเลตสัญญาณ QAM คือการซิงโครไนซ์สัญญาณคลื่นพาห้ทั้งเชิงความถี่และเฟสระหว่างสัญญาณ QAM กับสัญญาณที่กำเนิดจากโลกออสซิลเลเตอร์ให้ตรงกันตลอดเวลา มิฉะนั้นจะเกิดการรบกวนกันระหว่างทั้งสองสัญญาณได้

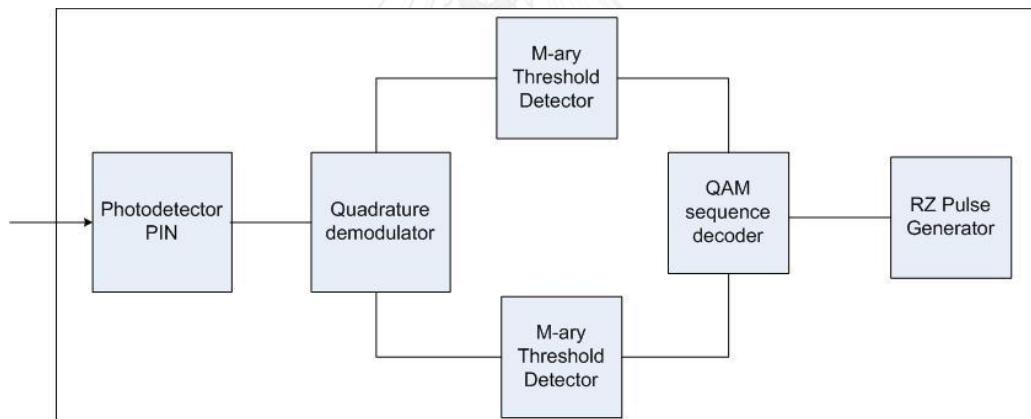


รูปที่ 2.11 แบบจำลองวงจรภาครับแบบ QAM [16]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างวงจรรภาคส่งแบบ n-QAM

วงจรรภาคส่งของระบบ QAM แสดงดังรูปที่ 2.12 QAM sequence generator ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ I และ Q ไปมอดูเลตสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณแบบ QAM ที่ QAM modulator จากนั้นมอดูเลตทางเฟสเข้ากับสัญญาณจาก CW laser ที่ MZM สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว



รูปที่ 2.13 โครงสร้างวงจรรภาครับแบบ n-QAM

วงจรรภาครับของระบบ QAM แสดงดังรูปที่ 2.13 สัญญาณแสงจะถูกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณแบบ balanced detector ด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN photodetector จากนั้นสัญญาณแสงที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจะถูกส่งผ่าน quadrature demodulator ได้สัญญาณเป็น I และ Q ส่งไปยัง M-ary threshold detector ซึ่งมีหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ (multilevel pulse) ให้เป็นสัญญาณแบบ M-ary สัญญาณสองส่วนจะถูกรวมและเข้าสู่ QAM sequence decoder เพื่อถอดรหัสสัญญาณแบบ M-ary ให้เป็นสัญญาณหลายระดับ

## 2.5 การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งโพลาริซ

การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งโพลาริซ (PDM) คือ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่สามารถส่งสัญญาณพร้อมกันโดยส่งคนละแกนโพลาริซทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการใช้งานแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เทคนิคนี้มักถูกนำมาใช้ร่วมกับการมอดูเลตแบบ QAM ที่อัตราเร็วระบบมากกว่า 100 Gb/s ขึ้นไป แล้วใช้เทคโนโลยีโคฮีเรนต์และ DSP มาประยุกต์ใช้ร่วมกันให้สามารถแยกสัญญาณข้อมูลทั้งสองแกนออกจากกัน แม้ว่าแกนโพลาริซคู่ของสัญญาณจะหมุนเปลี่ยนทิศทางและทำให้แกนโพลาริซทั้งคู่ของสัญญาณไม่คงความตั้งฉาก เนื่องจากเส้นใยแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันตลอด ซึ่งการส่งสัญญาณแบบ PDM ผ่านเส้นใยแสงสามารถแยกสัญญาณข้อมูลออกจากกันได้ด้วย DSP ทำให้สามารถตรวจจับและแก้ไขสัญญาณได้ถูกต้อง

## 2.6 การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์

การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์ คือ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่เหมาะสมกับการใช้ในระบบเส้นใยแสงแบบ Superchannel ที่มีอัตราเร็วมากกว่า 500 Gb/s โดยที่แต่ละช่องสัญญาณเมื่อผ่านตัวกรองจะได้สัญญาณที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นเทคนิคที่เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานสเปกตรัมให้สูงขึ้น

การวางสเปกตรัมของในควิสต์พัลส์แต่ละตัวจะต้องมีความกว้างอย่างน้อยสองเท่าของความถี่ในควิสต์แต่ใน N-WDM มีความกว้างแต่ละสเปกตรัมเท่ากับความถี่ในควิสต์พอดี ตามสมการที่ (2.20) ส่วนความห่างของแต่ละสเปกตรัมจะพยายามทำให้มีระยะชิดกันมากที่สุด [27, 28]

$$f_{\text{Nyquist}} = 1/2T = f_T / 2 \quad (2.20)$$

โดยที่  $T$  คือ Symbol rate

ถ้าต้องการให้ระยะห่างของสเปกตรัมชิดกันมากที่สุดโดยไม่เกิด crosstalk จะต้องใช้สเปกตรัมรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีสัญญาณทางเวลาเป็นฟังก์ชันซิงค์ ดังสมการ 2.21 เมื่อผ่านการแปลงฟูเรียร์จะได้สัญญาณทางความถี่เป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.16 ดังนั้นการที่สเปกตรัมมีความกว้างเท่าสองเท่าของความถี่ในควิสต์จึงทำให้มีการใช้แบนด์วิดท์น้อยลง

สมการสัญญาณทางเวลา คือ

$$E(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \text{sinc}\left(\pi \frac{t-nT}{T}\right) \cdot \Pi\left(\frac{t-nT}{kT}\right) \quad (2.21)$$

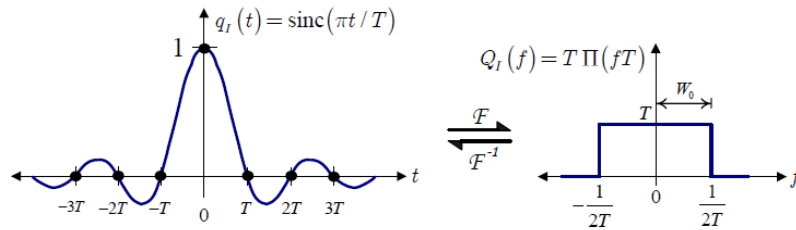
โดยที่  $\text{sinc } x = \frac{\sin x}{x}$

$\Pi\left(\frac{t}{T}\right)$  คือ ช่วงของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่าอัตรา symbol โดยที่  $t=0$



$c_n$  คือ ข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสบน symbol ลำดับที่  $n$  โดยที่  $c_n \in \{-1,1\}$

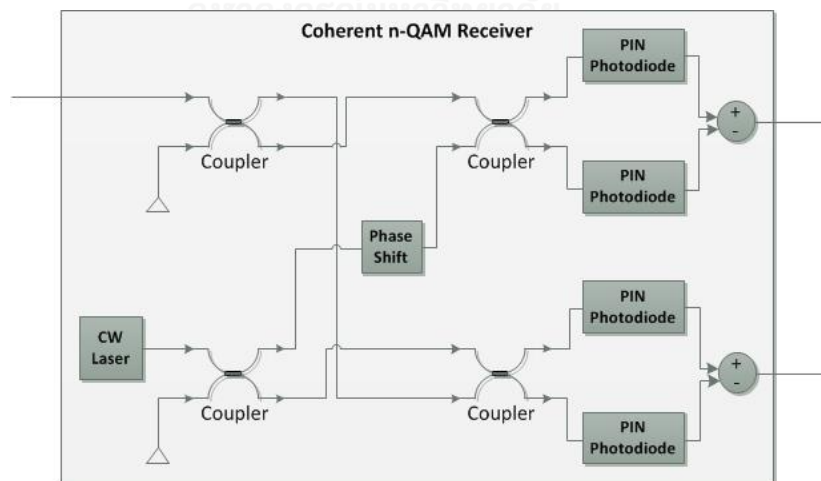
$k$  คือ จำนวน symbol



รูปที่ 2.14 ไนควิสต์พัลส์และสเปกตรัมของไนควิสต์พัลส์

### 2.7 การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์

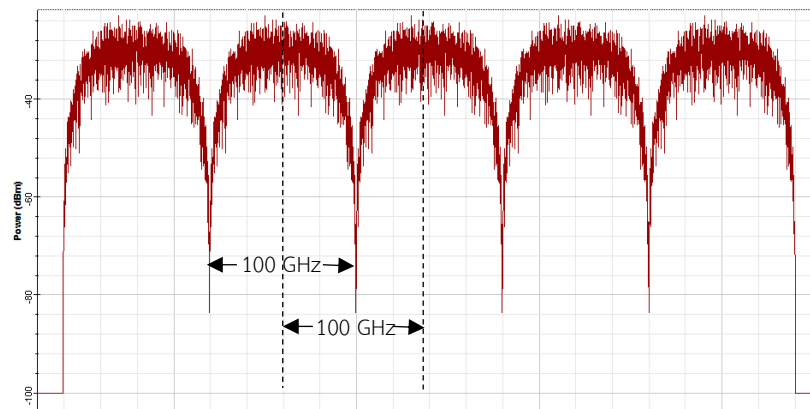
การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (coherent detection) คือวิธีการตรวจจับสัญญาณ โดยการใช้สัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ (local oscillator) คู่กับสัญญาณที่รับเข้ามา โดยที่สัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์จะซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาห้ทั้งความถี่และเฟส จากรูปที่ 2.15 ที่ภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM เป็นแบบการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ สัญญาณแสงจะผ่านไปยัง coupler สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน สัญญาณจะถูกคูณกับสัญญาณแสงจาก LO โดยสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodetector แบบ balanced detector สัญญาณ 2 ส่วน รวมกันที่ subtractor แล้วผ่านไปยัง LPF และ M-ary threshold detector ทำหน้าที่ถอดรหัสพัลส์ของสัญญาณหลายระดับ จากนั้นสัญญาณถูกส่งไปยัง QAM sequence decoder เพื่อถอดรหัสสัญญาณ I และ Q ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.15 [16, 25, 26]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรภาครับของการมอดูเลตสัญญาณแบบ n-QAM ที่ใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์

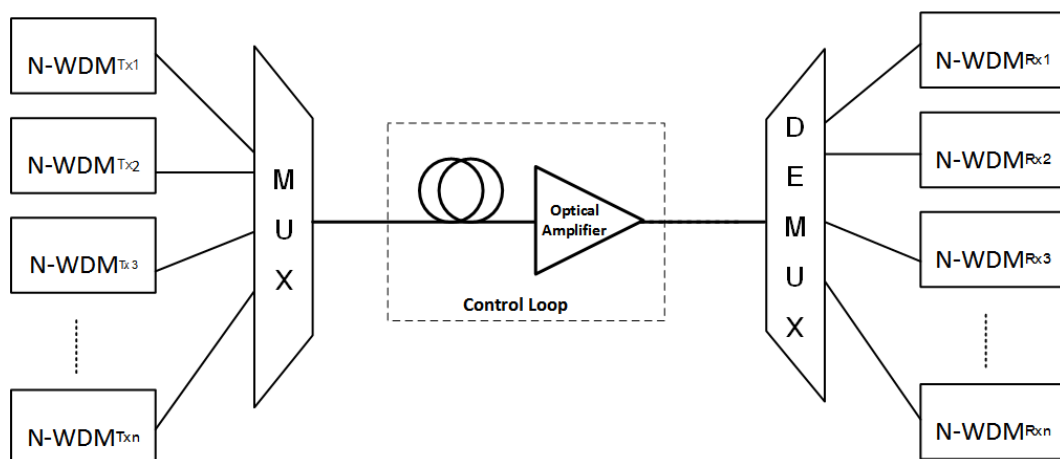
## 2.8 Superchannel N-WDM

การส่งข้อมูลที่ใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM) เป็นการรวมสัญญาณหลายๆ ความยาวคลื่นส่งไปในเส้นใยแสงพร้อมๆกัน แต่ไม่จำเป็นต้องส่งสัญญาณที่มีความถี่ใกล้ๆกันนั้นคือมากกว่าสองเท่าของความถี่ในควิสต์ อาจมีช่องว่างระหว่างสัญญาณแต่ละความถี่ในเส้นใยแสงทำให้สิ้นเปลืองแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งข้อมูล จึงมีการพัฒนารูปแบบการส่งข้อมูลที่ส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นพร้อมกัน โดยที่แต่ละความยาวคลื่นอยู่ชิดกันมากๆ คือมีระยะห่างเท่ากับสองเท่าของความถี่ในควิสต์ ดังตัวอย่างส่งสัญญาณแบบ Superchannel 5 ช่องสัญญาณที่มีสเปกตรัมกว้าง 100 GHz ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ ความถี่ของช่องสัญญาณถัดกันจะมีค่าห่างเท่ากับสองเท่าของความถี่ในควิสต์ซึ่งก็คือ 100 GHz พอดีดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สเปกตรัมของสัญญาณแบบ Superchannel N-WDM

การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์แบบ Superchannel N-WDM จำนวน  $n$  ช่องสัญญาณดังรูปที่ 2.17 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ [8, 29, 30]



รูปที่ 2.17 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในควิสต์แบบ Superchannel N-WDM

## 2.9 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing : DSP) เป็นกระบวนการลดความผิดพลาดของสัญญาณมีหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ [8, 29, 30]

### 2.9.1 การชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensation)

ดิสเพอร์ชันทำให้สัญญาณมีเฟสที่เปลี่ยนไปทำให้เกิดการกระจายของสัญญาณในทางเวลา ทำให้การตรวจจับสัญญาณที่ภาครับเกิดความผิดพลาดของสัญญาณ สามารถวิเคราะห์ความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณจากดิสเพอร์ชัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.22)

$$A(z, T) = \sum_{m=1}^{N_s} A_m(z, T) \exp(j\omega_m T) \quad (2.22)$$

กำหนดให้  $A(z, T)$  คือ สัญญาณที่ภาคส่งแต่ละความถี่

$\omega_m$  คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณ

$N_s$  คือ จำนวนความถี่ของสัญญาณที่ภาคส่ง

พิจารณาผลกระทบเนื่องจากดิสเพอร์ชันเพียงอย่างเดียว สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.23

$$\frac{\partial A_m(z, T)}{\partial z} + \frac{j\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_m(z, T)}{\partial T^2} = 0 \quad (2.23)$$

จากสมการ 2.6 เมื่อแปลงฟูเรียร์จะได้สมการในรูปของสเปกตรัมทางความถี่ดังสมการ 2.24

$$\frac{\partial A_m(z, \omega_m)}{\partial z} - \frac{j\beta_2 \omega_m^2}{2} A_m(z, \omega_m) = 0 \quad (2.24)$$

ผลเฉลยของสมการ 2.24 เขียนได้ดังสมการ 2.25

$$A_m(z, \omega_m) = A_m(0, \omega_m) \exp\left(\frac{j\beta_2 \omega_m^2}{2} z\right) \quad (2.25)$$

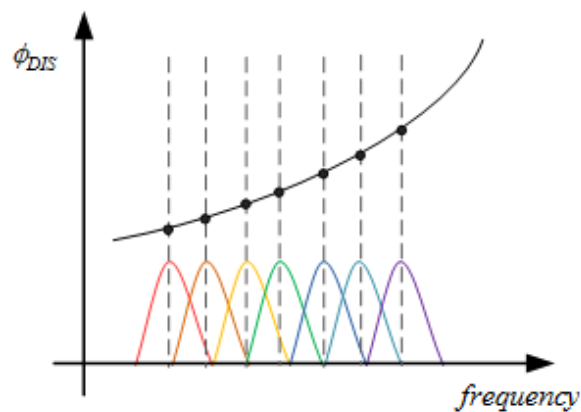
โดยที่พจน์ของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของสมการ 2.25 เป็นความผิดพลาดทางเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากดิสเพอร์ชันดังนั้นความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากดิสเพอร์ชัน ( $\phi_m^{DIS}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.26

$$\phi_m^{DIS} = \left[ \frac{1}{2} \beta_2 (2\pi f_m)^2 \right] z \quad (2.26)$$

ความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากดิสเพอร์ชันทำให้แต่ละคลื่นพาทีย่อย มีการหมุนของเฟสไม่เท่ากัน คลื่นพาทีย่อยที่มีความถี่น้อย เฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงจากผลกระทบของดิสเพอร์ชันน้อย หากคลื่นพาทีย่อยที่มีความถี่มาก เฟสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากผลกระทบของดิสเพอร์ชันมากขึ้น ดังนั้นหากมีจำนวนคลื่นพาทีย่อยที่มากขึ้น และส่งสัญญาณเป็นระยะทางที่ไกลขึ้น เฟสจะมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการนำการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมาใช้เพื่อชดเชยดิสเพอร์ชัน การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะตรวจจับสัญญาณที่เปลี่ยนจาก

สัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะทำหน้าที่ปรับให้สัญญาณแบบเดิมกลับมา โดยการคำนวณจากสมการ 2.27

$$A_m(z, \omega_m) = A_m(0, \omega_m) \exp\left(\frac{j\beta_2 \omega_m^2}{2} z\right) \exp(-j\phi_m^{DIS}) \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป [8]

### 2.9.2 Polarization division multiplexing (PDM)

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีโคฮีเรนต์และ DSP มาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถแยกสัญญาณข้อมูลทั้งสองแกนออกจากกัน แม้ว่าแกนโพลาไรซ์ทั้งคู่ของสัญญาณจะหมุนเปลี่ยนทิศทางและทำให้แกนโพลาไรซ์ทั้งคู่ของสัญญาณไม่คงความตั้งฉาก เนื่องจากเส้นใยแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันตลอด ซึ่งการส่งสัญญาณแบบ PDM ผ่านเส้นใยแสงสามารถแยกสัญญาณข้อมูลออกจากกันได้ด้วย DSP ทำให้สามารถตรวจจับและแก้ไขสัญญาณได้ถูกต้อง โดยทางคณิตศาสตร์นำทฤษฎีของโจนส์เมทริกซ์ (Jones matrix) มาคำนวณดังสมการที่ 2.28

$$H = \begin{bmatrix} H_{XX} & H_{XY} \\ H_{YX} & H_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} e^{i\delta} & -\sqrt{1-\alpha} \\ \sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} e^{-i\delta} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

- เมื่อ  $H$  คือ โจนส์เมทริกซ์  
 $\alpha$  คือ แบ่งกำลังของสัญญาณ  
 $\delta$  คือ ความแตกต่างของเฟสระหว่างโพลาไรซ์เซชันแกนสองแกน

เราสามารถหาสัญญาณเอาต์พุตจากสมการเมทริกซ์ 2.29

$$\begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่  $R_X$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของโพลาริซ์เซชันแกน x

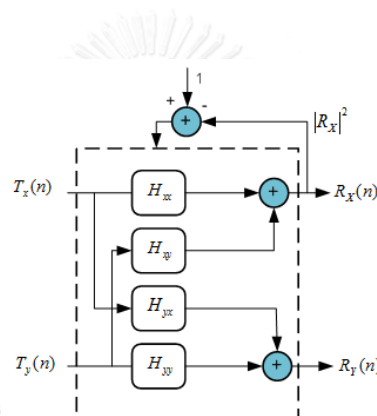
$R_Y$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของโพลาริซ์เซชันแกน y

$T_X$  คือ สัญญาณอินพุตของโพลาริซ์เซชันแกน x

$T_Y$  คือ สัญญาณอินพุตของโพลาริซ์เซชันแกน y

ดังนั้น สามารถนำอินเวอร์สเมทริกซ์  $H$  มาเพื่อแยกสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณแบบ PDM ได้ จากสมการเมทริกซ์ 2.30 และมีวงจรถ่ายผลสัญญาณดิจิทัลดังรูปที่ 2.19

$$\begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{XX} & H_{XY} \\ H_{YX} & H_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \end{bmatrix} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.19 วงจรการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล [8]

### 2.9.3 carrier phase estimation มหาวิทยาลัย

การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ จะต้องมีโลคอลออสซิลเลเตอร์ (local oscillator : LO) เพื่อสร้างสัญญาณที่มีความถี่ตรงกับสัญญาณข้อมูล แต่เฟสของโลคอลออสซิลเลเตอร์จะมีความผิดพลาดไปจากสัญญาณข้อมูล ซึ่งในอดีตไม่สามารถสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีเฟสตรงกันกับสัญญาณข้อมูลที่เข้ามาได้เนื่องจากเฟสของแสงเปลี่ยนแปลงเร็วมาก ต่อมาจึงนำการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมาแก้ปัญหาค่าความไม่ตรงกันของเฟสได้



### บทที่ 3

## อัลกอริทึมสำหรับตัวกรองไนควิสต์และ โครงสร้างระบบ PDM 4-QAM และ PDM N-WDM

### 3.1 อัลกอริทึมสำหรับตัวกรองไนควิสต์

ตัวกรองไนควิสต์ คือ ตัวกรองที่ใช้กรองสัญญาณแสงให้มีรูปแบบของสเปกตรัมของไนควิสต์พัลส์ทางความถี่เป็นรูปสี่เหลี่ยม เพื่อให้สัญญาณแสงหลายๆความถี่ถูกส่งไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกันด้วยแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุด จากการมอดูเลตแบบ 4-QAM ได้สัญญาณดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของไนควิสต์พัลส์ยังไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีการเสนออัลกอริทึมสำหรับตัวกรองไนควิสต์เพื่อแปลงรูปแบบของสเปกตรัมทางความถี่ดังนี้

$$F_n(i) = (f(i), A(i)) \quad (3.1)$$

โดยที่  $F_n(i)$  คือ ตัวกรองไนควิสต์ลำดับที่  $i$

$f(i)$  คือ ความถี่ของสัญญาณลำดับที่  $i$

$A(i)$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณลำดับที่  $i$

$i$  คือ ลำดับที่  $i$

ฟังก์ชันของตัวกรองไนควิสต์แต่ละช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันของคู่อันดับ  $x$  และ  $y$  ดังสมการ 3.1 ซึ่งสามารถหาความถี่ของสัญญาณแต่ละคู่อันดับได้ดังสมการที่ 3.2 และหาแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละคู่อันดับได้ดังสมการที่ 3.3

$$f(i) = \left( f - \frac{R_b \cdot N_b}{2} \right) + (i-1) \cdot \frac{R_b \cdot N_b}{N_s} \quad (3.2)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ของช่องสัญญาณ

$R_b$  คือ อัตราข้อมูล (bit rate)

$N_b$  คือ จำนวนตัวอย่างสุ่มต่อหนึ่งบิต (samples per bit)

$N_s$  คือ จำนวนของตัวอย่างสุ่มทั้งหมด (number of samples)

$$A(i) = \begin{cases} 1 \times 10^{-10} & ; i \in I^+ \quad ; 0 < i \leq \frac{N_s - S_l}{2} \\ \left( \frac{2k}{S_l - 2} \right) \cdot \left( i - \frac{N_s}{2} \right)^2 + (1-k) & ; i \in I^+ \quad ; \frac{N_s - S_l}{2} < i \leq \frac{N_s + S_l}{2} \\ 1 \times 10^{-10} & ; i \in I^+ \quad ; \frac{N_s + S_l}{2} < i \leq N_s \end{cases} \quad (3.3)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ในควิสต์ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

$S_l$  คือ sequence length

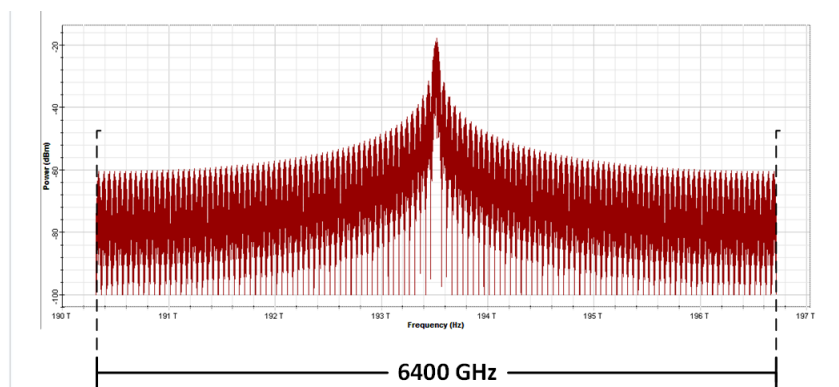
### 3.1.1 การสร้างตัวกรองในควิสต์สำหรับระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติ

การสร้างตัวกรองในควิสต์สำหรับระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติมีพารามิเตอร์ของระบบดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างตัวกรองในควิสต์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$R_b$	100 Gb/s
$S_l$	1024 bits
$N_b$	64
$N_s$	65536
$f$	193.4145 THz
$k$	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

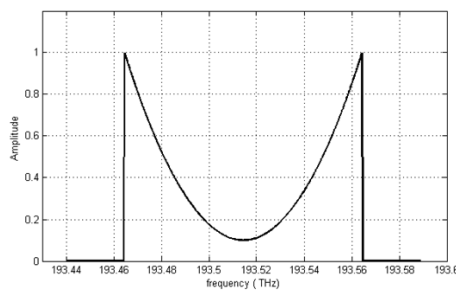
หลังจากสัญญาณแสงออกจากการมอดูเลต QAM ทั้งสองแกนโพลาไรซ์เซชันมารวมกันด้วยตัวรวมสัญญาณโพลาไรซ์จะได้ในควิสต์พัลส์ดังรูปที่ 3.1 พบว่าความยาวในควิสต์พัลส์ทั้งหมดคือ 6400 GHz



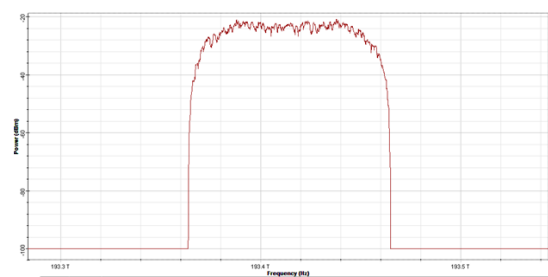
รูปที่ 3.1 สเปกตรัมก่อนผ่านตัวกรองในควิสต์



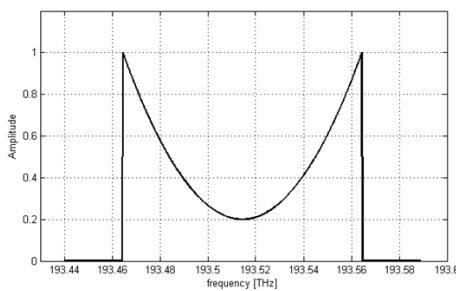
จากอัลกอริทึมการสร้างตัวกรองไนควิสต์ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ได้วิเคราะห์ลักษณะของตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ไนควิสต์ทั้งหมด 5 ค่า คือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 สามารถสร้างตัวกรองไนควิสต์และไนควิสต์พัลส์ของสัญญาณหลังจากผ่านตัวกรองแต่ละแบบ ดังรูปที่ 3.2-3.6 ซึ่งจากรูปไนควิสต์พัลส์ของสัญญาณสังเกตได้ว่าถ้าใช้อัลกอริทึมที่มีค่าคงที่ของไนควิสต์น้อยเกินไปดังรูปที่ 3.2 ไนควิสต์พัลส์จะมีลักษณะโค้งและแยกเป็นร่องตรงกลาง แต่ถ้าใช้อัลกอริทึมที่มีค่าคงที่ของไนควิสต์มากเกินไปดังรูปที่ 3.6 ลักษณะของไนควิสต์พัลส์จะโค้งแหลม ในการวิเคราะห์ตัวกรองทั้ง 5 แบบพบว่าที่ ค่าคงที่ไนควิสต์ เท่ากับ 0.4 ( $k=0.4$ ) ให้รูปแบบของไนควิสต์พัลส์มีลักษณะใกล้เคียงสี่เหลี่ยมมากที่สุด และให้อัตราข้อมูลบิดผิดพลาด (BER) ที่ต่ำที่สุด



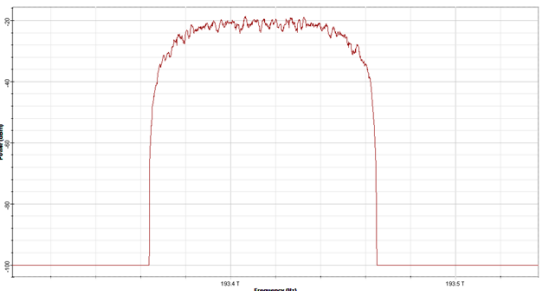
(ก)



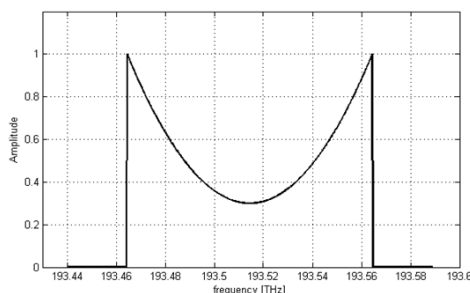
(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) ตัวกรองไนควิสต์  $k=0.1$  (ข) ไนควิสต์พัลส์หลังผ่านตัวกรองไนควิสต์

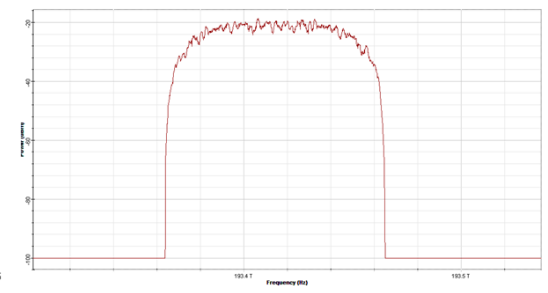
(ก)



(ข)

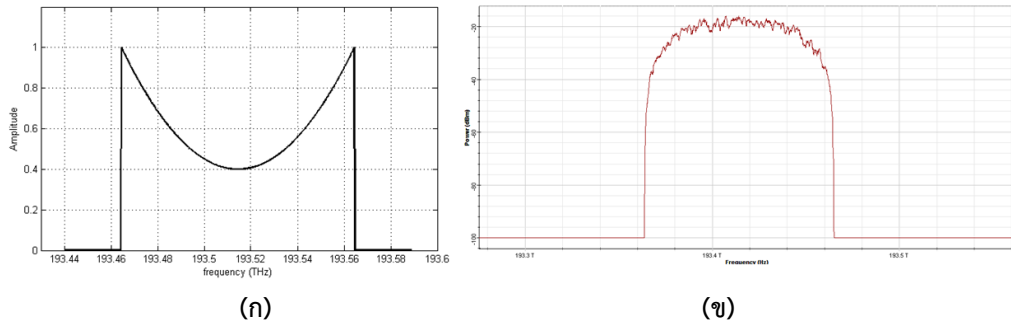
รูปที่ 3.3 (ก) ตัวกรองไนควิสต์  $k=0.2$  (ข) ไนควิสต์พัลส์หลังผ่านตัวกรองไนควิสต์

(ก)

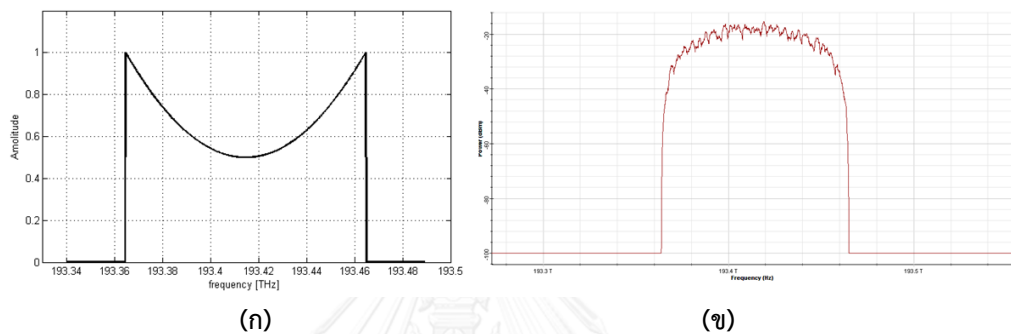


(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) ตัวกรองไนควิสต์  $k=0.3$  (ข) ไนควิสต์พัลส์หลังผ่านตัวกรองไนควิสต์



รูปที่ 3.5 (ก) ตัวกรองไนควิสต์  $k=0.4$  (ข) ไนควิสต์พัลส์หลังผ่านตัวกรองไนควิสต์

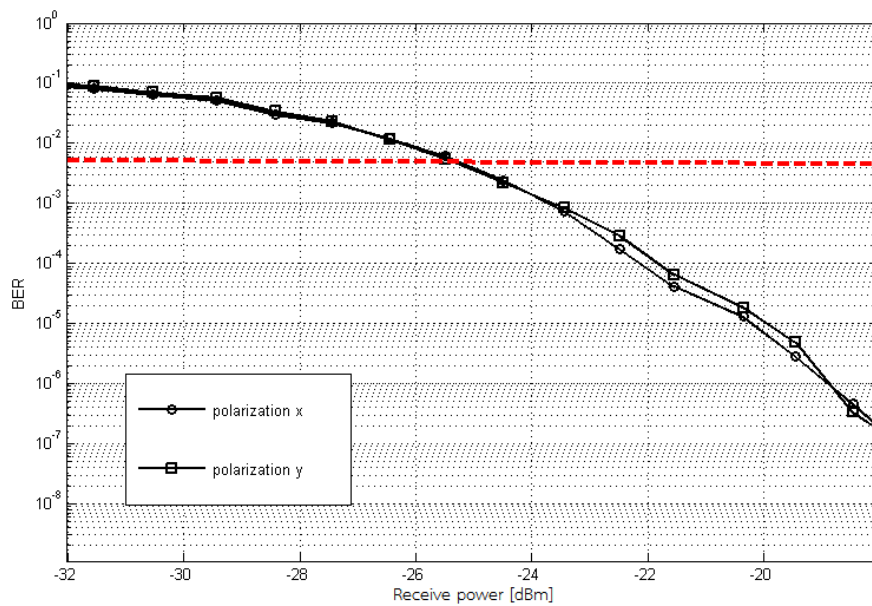


รูปที่ 3.6 (ก) ตัวกรองไนควิสต์  $k=0.5$  (ข) ไนควิสต์พัลส์หลังผ่านตัวกรองไนควิสต์

### 3.1.2 การวิเคราะห์ตัวกรองไนควิสต์สำหรับระบบเส้นใยแสงแบบ 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์

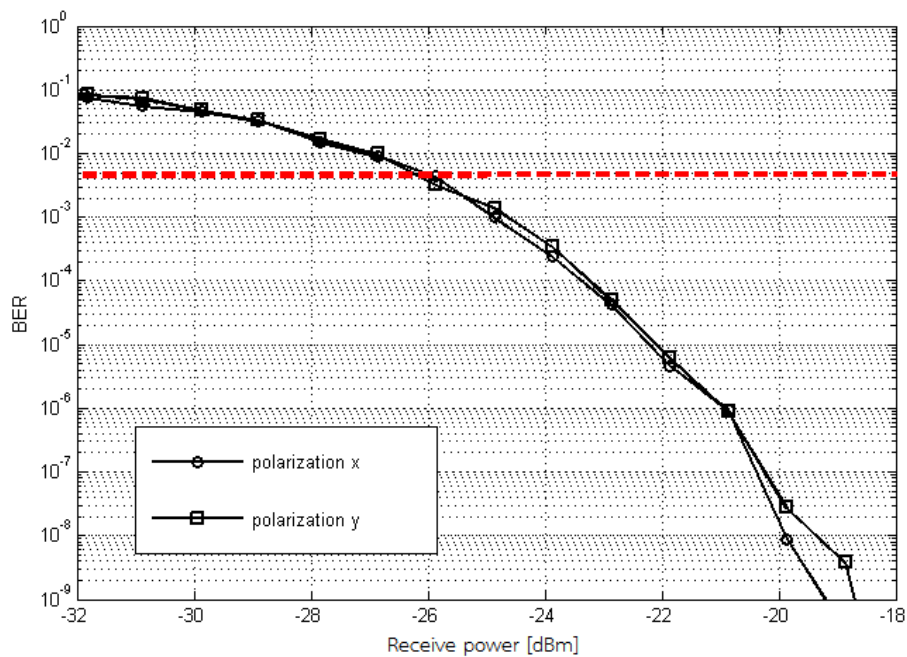
การจำลองระบบเส้นใยแสงแบบ PDM 4-QAM แบบช่องสัญญาณปกติ เพื่อวิเคราะห์หาตัวกรองไนควิสต์ที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มากที่สุด โดยเราจะวิเคราะห์จากระบบเส้นใยแสงแบบช่องสัญญาณปกติ และนำผลการวิเคราะห์นี้มาใช้ในระบบเส้นใยแสง 4-QAM บน N-WDM แบบช่องสัญญาณ Superchannel เนื่องจากจำนวนของช่องสัญญาณไม่มีผลต่อลักษณะของสัญญาณในภาคส่ง การวิเคราะห์หาตัวกรองไนควิสต์ที่ดีที่สุดจากกำลังภาครับที่ต่ำที่สุด ในขณะที่มีอัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้ (BER)  $4 \times 10^{-3}$  จากการจำลองระบบแบบไม่มีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง(back-to-back) โดยเปรียบเทียบผลจากค่าคงที่ไนควิสต์ทั้ง 5 ค่าคือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบเช่นเดียวกับตารางที่ 3.1 ได้ผลการจำลองระบบดังนี้

การจำลองระบบเส้นใยแสงแบบ PDM 4-QAM แบบช่องสัญญาณปกติ ซึ่งใช้ตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงตัวในควิสต์เท่ากับ 0.1 แสดงกราฟดังรูปที่ 3.7 ว่าการจำลองระบบมีการเปลี่ยนกำลังภาครับเมื่อลดกำลังภาครับอัตราบิดผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในแนวแกนโพลาไรซ์เซชัน x และ y จนกำลังภาครับมีค่า -25.312 dBm ที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  เป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้



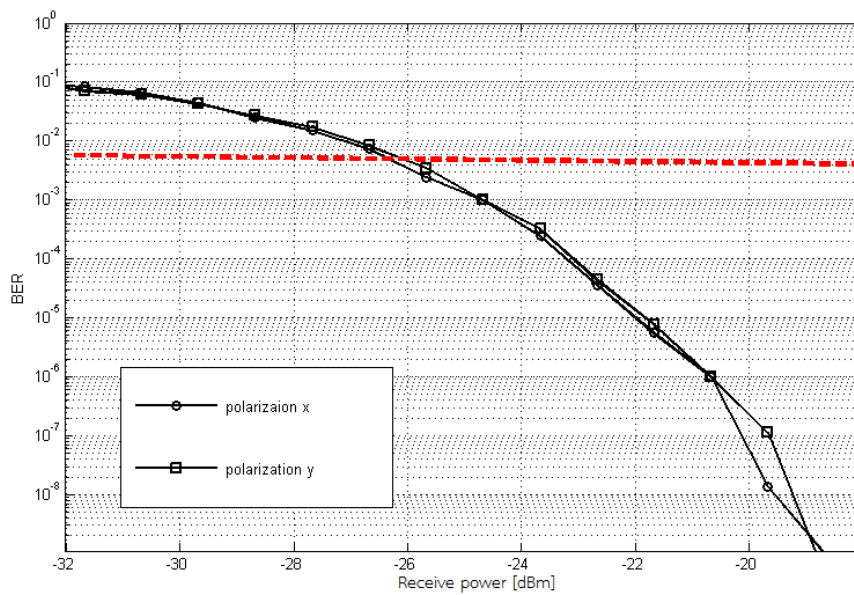
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ที่ค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.1

การจำลองระบบเส้นใยแสงแบบ PDM 4-QAM แบบช่องสัญญาณปกติ ซึ่งใช้ตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงตัวในควิสต์เท่ากับ 0.2 แสดงกราฟดังรูปที่ 3.8 ว่าการจำลองระบบมีการเปลี่ยนกำลังภาครับ เมื่อลดกำลังภาครับอัตราบิดพลาตจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในแนวแกนโพลาไรซ์เซชัน x และ y จนกำลังภาครับมีค่า -26.025 dBm ที่อัตราบิดพลาตประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  เป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้



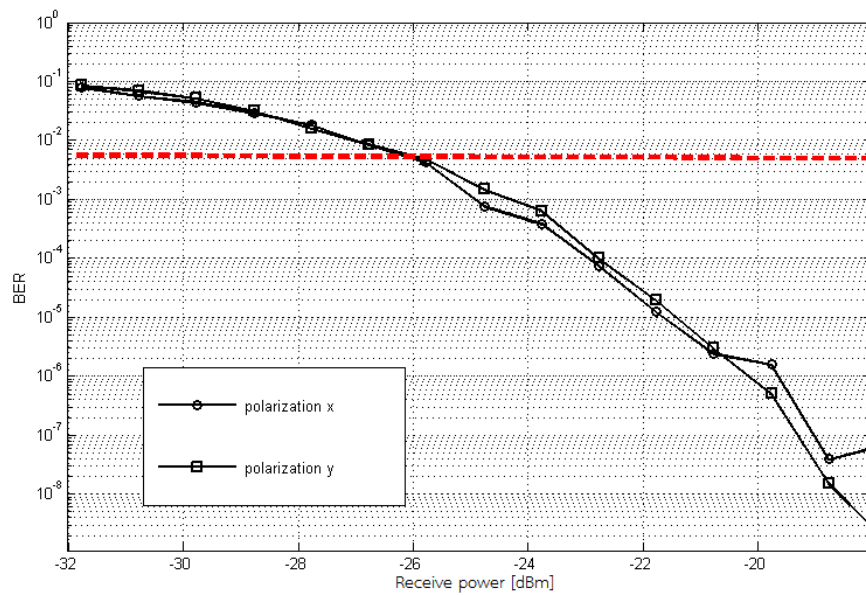
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.2

การจำลองระบบเส้นใยแสงแบบ PDM 4-QAM แบบช่องสัญญาณปกติ ซึ่งใช้ตัวกรองในคริสตัลที่มีค่าคงตัวในคริสตัลเท่ากับ 0.3 แสดงกราฟดังรูปที่ 3.9 ว่าการจำลองระบบมีการเปลี่ยนกำลังภาครับ เมื่อลดกำลังภาครับอัตราบิดผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในแนวแกนโพลาไรซ์เซชัน x และ y จนกำลังภาครับมีค่า -26.142 dBm ที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  เป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้



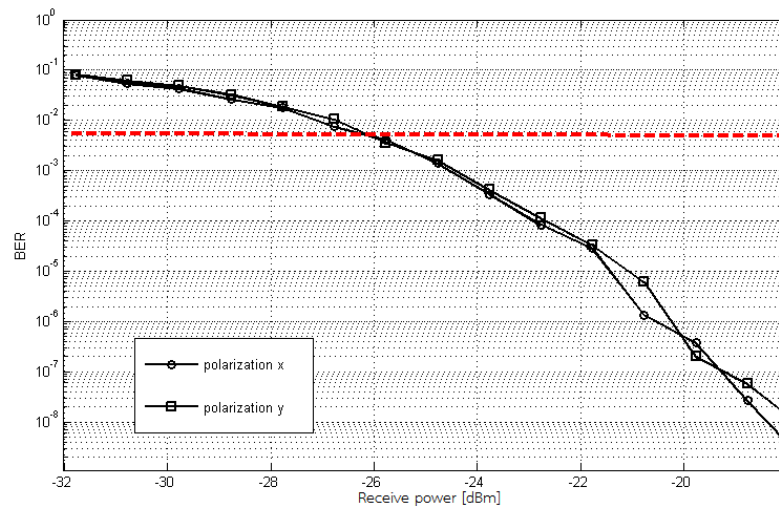
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ในคริสตัลเท่ากับ 0.3

การจำลองระบบเส้นใยแสงแบบ PDM 4-QAM แบบช่องสัญญาณปกติ ซึ่งใช้ตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงตัวในควิสต์เท่ากับ 0.4 แสดงกราฟดังรูปที่ 3.10 ว่าการจำลองระบบมีการเปลี่ยนกำลังภาครับ เมื่อลดกำลังภาครับอัตราบิดผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในแนวแกนโพลาริเซชัน x และ y จนกำลังภาครับมีค่า -26.255 dBm ที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  เป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4

การจำลองระบบเส้นใยแสงแบบ PDM 4-QAM แบบช่องสัญญาณปกติซึ่งใช้ตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงตัวในควิสต์เท่ากับ 0.5 แสดงกราฟดังรูปที่ 3.11 ว่าการจำลองระบบมีการเปลี่ยนกำลังภาครับ เมื่อลดกำลังภาครับอัตราบิดผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในแนวแกนโพลาไรซ์เซชัน x และ y จนกำลังภาครับมีค่า -26.181 dBm ที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  เป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้



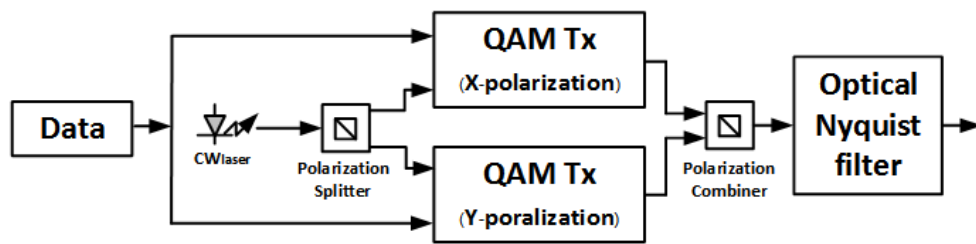
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังรับสัญญาณสำหรับระบบ 4-QAM N-WDM ค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.5

ความสัมพันธ์ของอัตราบิดผิดพลาดกับกำลังที่ภาครับของทั้งโพลาไรซ์เซชันในแนวแกน x และ y ของแต่ละค่าคงที่ในควิสต์ให้ผลใกล้เคียงกัน นั่นคือเราสามารถส่งข้อมูลได้ทั้งสองแกนพร้อมกัน โดยที่ยังให้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งสองแกนที่อัตราบิดผิดพลาดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ  $4 \times 10^{-3}$  ในแต่ละระบบมีกำลังภาครับดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเราพิจารณาระบบที่เหมาะสมที่สุดจากระบบที่มีกำลังภาครับที่ต่ำที่สุด เพราะความผิดเพี้ยนของสัญญาณขึ้นกับกำลังของสัญญาณถ้าระบบมีกำลังภาครับต่ำจะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่า ดังนั้นระบบเส้นใยแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมดจะจำลองระบบที่ใช้ค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพราะให้ค่ากำลังภาครับที่ต่ำที่สุด

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ในควิสต์ของระบบกับกำลังภาครับที่ BER  $4 \times 10^{-3}$

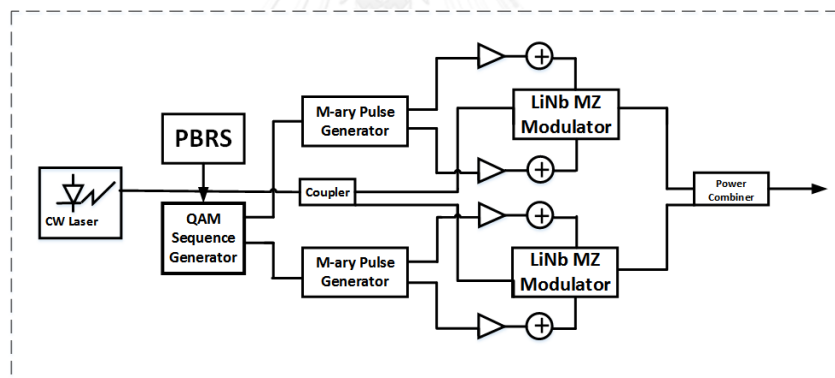
ค่าคงที่ในควิสต์	กำลังภาครับ [dBm]
0.1	-25.302
0.2	-26.025
0.3	-26.142
0.4	-26.255
0.5	-26.181

### 3.2 การออกแบบโครงสร้างระบบ PDM 4-QAM ทั้งภาคส่งและภาครับสำหรับช่องสัญญาณปกติ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM 4-QAM

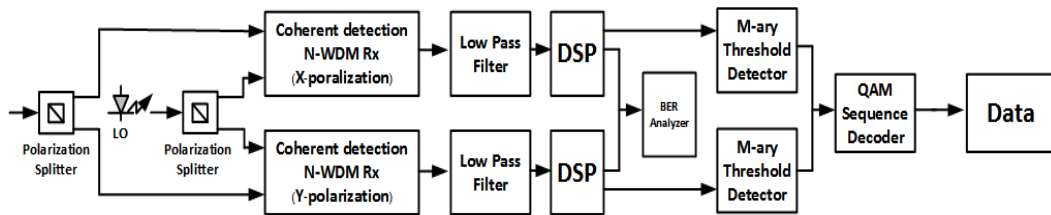
โครงสร้างภาคส่งของ PDM 4QAM ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser สัญญาณแสงไปยัง QAM transmitter (QAM Tx) ทั้งแกนโพลาไรซ์เซชันในแนวแกน x และ y ที่อัตราข้อมูล 100 Gb/s โดยส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1550 nm หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณ ค่าดิสเพอร์ชัน และค่าความไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.13 QAM Transmitter (QAM Tx) ของระบบ PDM 4-QAM

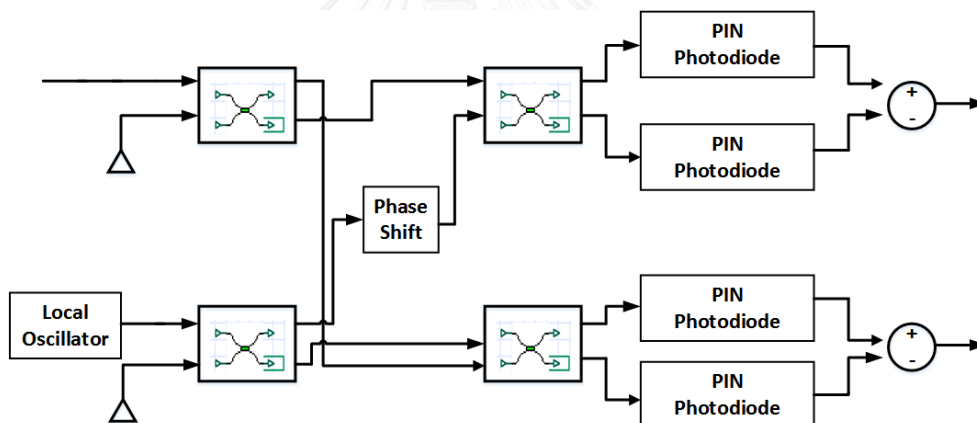
โครงสร้าง QAM Tx ของระบบ PDM 4-QAM แสดงดังรูปที่ 3.13 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า PRBS generator ส่งข้อมูลบิต 0 และ 1 ไปยัง QAM sequence generator โดยกำหนดจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับ 2 สำหรับการส่งสัญญาณแบบ 4-QAM จากนั้นสัญญาณจะถูกแบ่งไปยัง M-ary pulse generator เข้าสู่ electrical gain และ electrical bias โดย coupler รับสัญญาณแสงจาก CW laser ที่ความยาวคลื่น 1550 nm หรือสัญญาณที่ความถี่ 193.41 THz เพื่อมอดูเลตสัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้าที่ LinbMZ จะได้สัญญาณ I และ Q ซึ่งถูกส่งไปยังตัวกรองในควิสต์ก่อนที่จะส่งไปเส้นใยแสงเป็นลำดับต่อไป





รูปที่ 3.14 โครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM

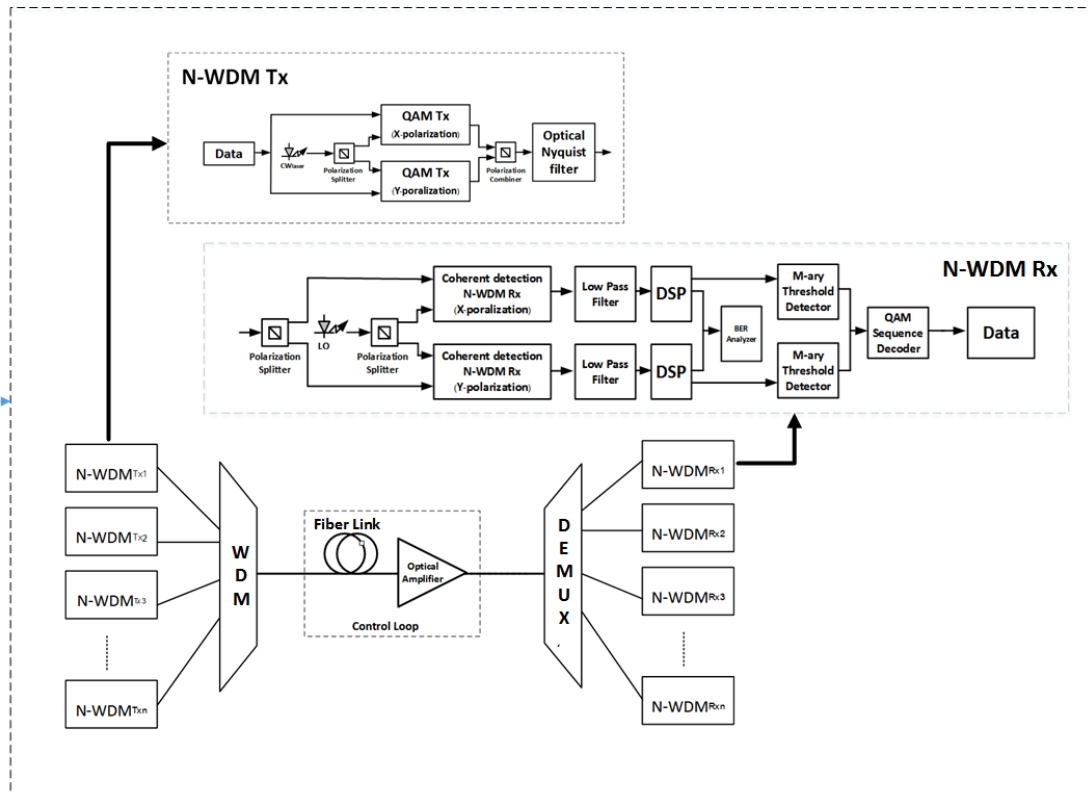
ภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากเส้นใยแสงจะถูกแยกออกเป็นสองแกนด้วย ตัวแยกสัญญาณโพลาไรซ์ จากนั้นส่งไปยังการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ซึ่งสัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกคูณกับสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันที่สร้างมาจาก Local oscillator (LO) ทำให้สัญญาณแสงที่เข้ามาถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วผ่านตัวกรองความถี่ต่ำเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออก ถัดจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่าน DSP เพื่อทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ แล้วสัญญาณจะถูกแยกไปยัง BER analyzer เพื่อวัดอัตราผิดพลาดของระบบ และไปยัง M-ary threshold- detector ที่ทำหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ สัญญาณ I และ Q จะรวมกันที่ QAM sequence decoder ถอดรหัสได้ข้อมูลออกมาดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.15 การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (coherent detection)

การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์จากรูปที่ 3.15 เริ่มจากสัญญาณแสงเมื่อผ่านไปยัง coupler สัญญาณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ต่อมาสัญญาณของโลคอลออสซิลเลเตอร์ (local oscillator) จะถูกคูณกับสัญญาณที่รับเข้ามา โดยที่สัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์จะซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาห์ทั้งความถี่และเฟส ซึ่งจะต้องมีเฟสและความถี่ที่ตรงกันกับสัญญาณที่รับเข้ามา โดยสัญญาณแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN photodiode แบบ balanced detector ถัดจากนั้นสัญญาณทั้ง 2 ส่วน จะรวมกันที่ subtractor แล้วส่งต่อไปที่ภาครับสัญญาณเป็นลำดับต่อไป

### 3.3 การออกแบบโครงสร้างระบบ PDM N-WDM ทั้งภาคส่งและภาครับสำหรับช่องสัญญาณ Superchannel



รูปที่ 3.16 ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel

ในหัวข้อที่ 3.1 แล้วซึ่งอธิบายระบบ PDM 4-QAM ทั้งภาคส่งและภาครับแบบช่องสัญญาณปกติหรือช่องสัญญาณเดี่ยวแต่ในหัวข้อนี้มีการพัฒนาระบบให้มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นได้ด้วยการนำภาคส่งและภาครับหลายๆช่องสัญญาณมารวมกันแบบ Superchannel โดยมีการออกแบบแต่ละช่องสัญญาณเช่นเดียวกันกับช่องสัญญาณเดี่ยวดังรูปที่ 3.16 แต่ละช่องสัญญาณถูกส่งด้วยอัตราเร็ว 200 Gb/s ดังนั้นในการออกแบบระบบสำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel 5 ช่องสัญญาณจะส่งด้วยความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณที่มีความห่างของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับสองเท่าของความถี่ในควิสต์นั้นคือ 100 GHz ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความยาวคลื่นและความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณของระบบ PDM N-WDM

ช่องสัญญาณ	ความยาวคลื่น (nm)	ความถี่ (THz)
1	1550.000	193.4145
2	1549.199	193.5145
3	1548.398	193.6145
4	1547.599	193.7145
5	1546.801	193.8145

โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser สัญญาณแสงไปยัง QAM transmitter (QAM Tx) ทั้งแกนโพลาริซเซชันในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความถี่ต่างกันทั้ง 5 ช่องสัญญาณ จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาริซเซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสิสต์เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปในเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D

หลังจากข้อมูลถูกมอดูเลตลงบนสัญญาณแสงจากหลายช่องสัญญาณผ่านการรวมสัญญาณด้วยการมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM สัญญาณแสงถูกส่งผ่านเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D และมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier) ในระบบเส้นใยแสงในระยะห่างต่างกันโดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกวิเคราะห์ระบบที่มีการติดตั้งตัวขยายสัญญาณ ทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร

โครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM ประกอบด้วย WDM DEMUX ซึ่งรับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสงทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน จากนั้นแสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกแยกออกเป็นสองแกนด้วย ถัดจากนั้นส่งไปยังการตรวจจับสัญญาณแบบ โคฮีเรนต์ ซึ่งสัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกคูณกับสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันที่สร้างมาจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ทำให้สัญญาณแสงที่เข้ามาถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วผ่านตัวกรองความถี่ต่ำเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออก ถัดจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ แล้วสัญญาณจะถูกแยกไปยัง BER analyzer เพื่อวัดอัตราผิดพลาดของระบบ และไปยัง M-ary threshold detector ที่ทำหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ สัญญาณ I และ Q จะรวมกันที่ QAM sequence decoder ถอดรหัสข้อมูล

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ระบบเส้นใยแสงสำหรับช่องสัญญาณปกติ และช่องสัญญาณ Superchannel

#### 4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบเส้นใยแสง

##### 4.1.1 ผลของการลดทอนกำลังของสัญญาณ

การลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation loss) ขึ้นกับความยาวคลื่นที่ใช้ส่งสัญญาณ และความยาวของเส้นใยแสง สามารถชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier) โดยกำหนดอัตราการขยายสัญญาณดังสมการที่ 4.1 [31]

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

เมื่อ  $G$  คือ อัตราการขยายสัญญาณ [dB]

$\alpha_{SMF}$  คือ การลดทอนกำลังของสัญญาณ = 0.189 [dB/km]

$L_{SMF}$  คือ ความยาวเส้นใยแสง [m]

กำหนดให้ระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงของระบบทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร ดังนั้นจะต้องใช้อัตราการขยายสัญญาณดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงจะต้องเพิ่มอัตราการขยายสัญญาณแสงด้วย

ตารางที่ 4.1 อัตราการขยายสัญญาณแสงที่ระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง [km]	อัตราการขยายสัญญาณ [dB]
60	11.34
80	15.12
100	18.9

##### 4.1.2 ผลของดิสเพอร์ชัน

ช่องสัญญาณตามมาตรฐานของเส้นใยแสงแบบโหมดเดี่ยว ITU-T G.652.D ในช่วง C band มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz ทั้ง 5 ช่องสัญญาณที่ถูกเลือกมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดังตารางที่ 4.2 และมีคุณสมบัติของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ช่องสัญญาณที่เลือกใช้สำหรับการจำลองระบบ

THz	nm
193.414	1550.000
193.514	1549.199
193.614	1548.399
193.714	1547.599
193.814	1546.801

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของเส้นใยแสงแบบโหมดเดียวชนิด G.652.D สำหรับค่าดิสเพอร์ชัน

Optical parameter	Values
zero dispersion slope ( $S_0$ )	$\leq 0.090$ [ps/nm <sup>2</sup> .km]
zero dispersion point ( $\lambda_0$ )	1300-1324 [nm]
Chromatic dispersion in 1550 nm (D)	$\leq 18.0$ [ps/nm.km]

การเกิดดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสงเกิดจากความยาวคลื่นในการส่งสัญญาณ ดังนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) กับค่าดิสเพอร์ชัน ( $D$ ) เป็นไปดังสมการที่ 4.2 [32, 33]

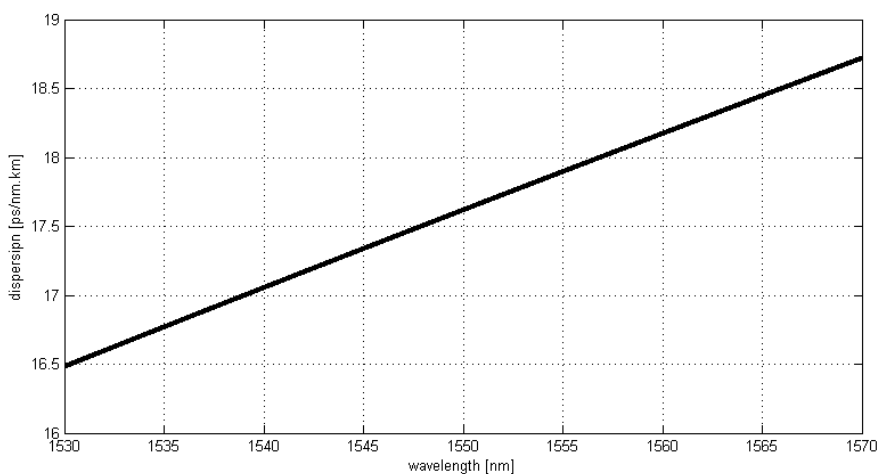
$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (4.2)$$

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

$S_0$  คือ zero dispersion slope = 0.09 [ps/nm<sup>2</sup>.km]

$\lambda_0$  คือ zero dispersion point = 1300 [nm]

จากสมการที่ 4.2 สามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับค่าดิสเพอร์ชันในช่วงความยาวคลื่น c band ตั้งแต่ 1530-1570 นาโนเมตรได้ดังกราฟรูปที่ 4.1 เมื่อความยาวคลื่นมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าดิสเพอร์ชันของระบบมากขึ้น



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับค่าดิสเพอร์ชัน

แทนค่าสมการ 4.2 ด้วยความยาวคลื่นทั้ง 5 ช่องสัญญาณได้ค่าดิสเพอร์ชันของระบบเส้นใยแสงที่ใช้ในการจำลองระบบดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่น [nm]	ค่าดิสเพอร์ชัน [ps/nm.km]
1550.000	17.610
1549.199	17.573
1548.399	17.529
1547.599	17.484
1546.801	17.439

การชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันทำได้โดยติดตั้งหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล นอกจากนี้ยังสามารถชดเชยเฟสของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปได้อีกด้วยทำให้ระบบเส้นใยแสงสามารถมีอัตราบิดผิพลาตที่น้อยลง

### 4.1.3 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้น

ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงหรือปรากฏการณ์เคอร์ทำให้เฟสของสัญญาณผิดเพี้ยนไปสามารถหาระยะทางสูงสุดเมื่อถูกจำกัดด้วยผลของความไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ 4.3 [34]

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (4.3)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (4.4)$$

เมื่อ	$L_{NL}$	คือ	ระยะทางที่ถูกจำกัดด้วยผลของความไม่เป็นเชิงเส้น [km]
	$\gamma$	คือ	สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น [ $W^{-1} \cdot km^{-1}$ ]
	$n_2$	คือ	ดรรชนีหักเหของความไม่เป็นเชิงเส้น [ $m^2/W$ ]
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น [nm]
	$A_{eff}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดสุทธิ [ $\mu m^2$ ]
	$P_0$	คือ	กำลังที่ส่งไปในเส้นใยแสง [mW]

คุณสมบัติของเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว ITU-T G.652.D สำหรับผลของความไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของเส้นใยแสงแบบโหมดเดียวชนิด G.652.D สำหรับความไม่เป็นเชิงเส้น

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

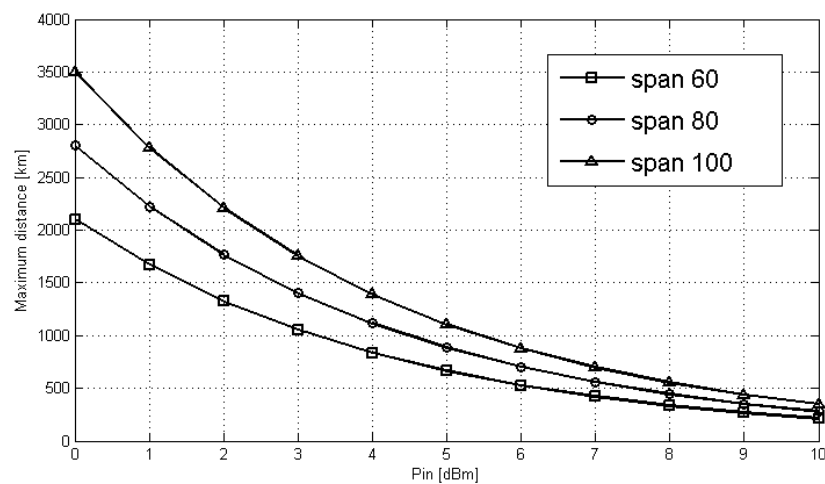
แทนค่าคุณสมบัติของเส้นใยแสงสำหรับความไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ 4.4 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ( $\gamma$ ) เท่ากับ  $1.3173 \times 10^{-3} W^{-1} \cdot km^{-1}$

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

สามารถหาลำดับที่ส่งไปในเส้นใยแสงได้จากสมการที่ 4.5 เมื่อ

$P_{in}$	คือ	กำลังในการส่งสัญญาณ [mW]
$\alpha$	คือ	ค่าลดทอนกำลังของสัญญาณ = $0.0461 \text{ [km}^{-1}\text{]}$
$L$	คือ	ระยะทางในการส่งสัญญาณ [km]

พิจารณาระยะทางในการส่งสัญญาณที่ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร ได้ความสัมพันธ์ของกำลังในการส่งสัญญาณกับระยะสูงสุดในการส่งสัญญาณดังกราฟแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้ระบบที่ใช้กำลังในการส่งสัญญาณมากจะส่งสัญญาณได้ระยะทางที่น้อยลง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังในการส่งสัญญาณกับระยะทางสูงสุดเนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น

#### 4.1.4 ผลของการกระจายโหมดโพลาริซ

การกระจายโหมดโพลาริซทำให้พัลส์ของสัญญาณมีการขยายตัวออก สามารถคำนวณหา ระยะทางสูงสุดที่ส่งสัญญาณได้เมื่อถูกจำกัดด้วยผลของการกระจายโหมดโพลาริซ ภายใต้อัตราบิด ผิดพลาดของระบบที่รับได้ดังสมการที่ 4.6 [31]

$$\Delta\tau_{pol} = D_{PMD}\sqrt{L} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $\Delta\tau_{pol}$  คือ การขยายออกของพัลส์เนื่องจากการกระจายโหมดโพลาริซ

$D_{PMD}$  คือ โหมดการกระจายตัวของดิสเพอร์ชัน

$L$  คือ ความยาวของสายส่งสัญญาณ

เมื่อระบบสื่อสารสัญญาณแสงส่งด้วยอัตราบิดเรตของข้อมูลสูงกว่า 40 Gb/s ระยะทางไกลกว่า 100 km จะเริ่มมีผลของการกระจายโหมดโพลาริซ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ส่งด้วยอัตราบิดเรต 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณดังนั้นผลของการกระจายโหมดโพลาริซมีผลต่อขีดจำกัดของระบบอย่างมีนัยสำคัญ



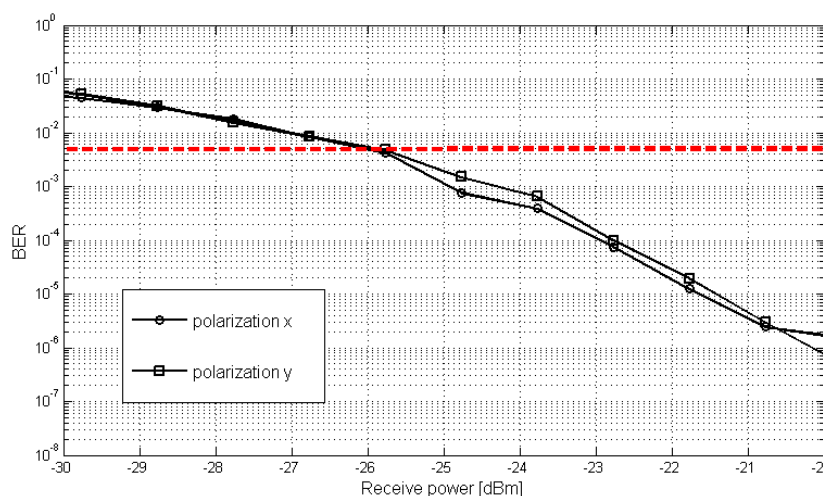
## 4.2 การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติ

การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติแบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 เมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสงโดยจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบและ แบบที่ 2 ระบบที่มีเส้นใยแสงซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบ

### 4.2.1 การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง

#### 4.2.1.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm

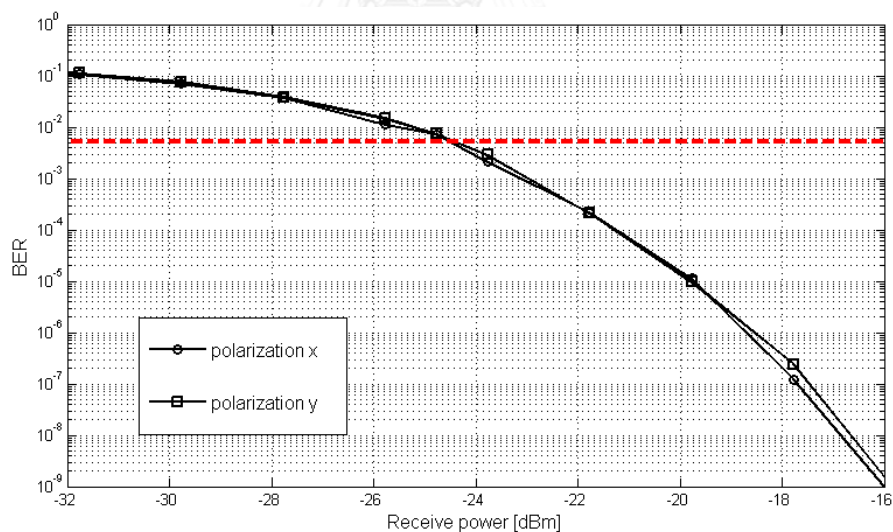
การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM 4QAM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 10 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาริซเซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจาก Local oscillator (LO) ที่กำลังสัญญาณ 10 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกราฟรูปที่ 4.3 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -25.77 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ btb ที่กำลังภาคส่ง 10

#### 4.2.1.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm

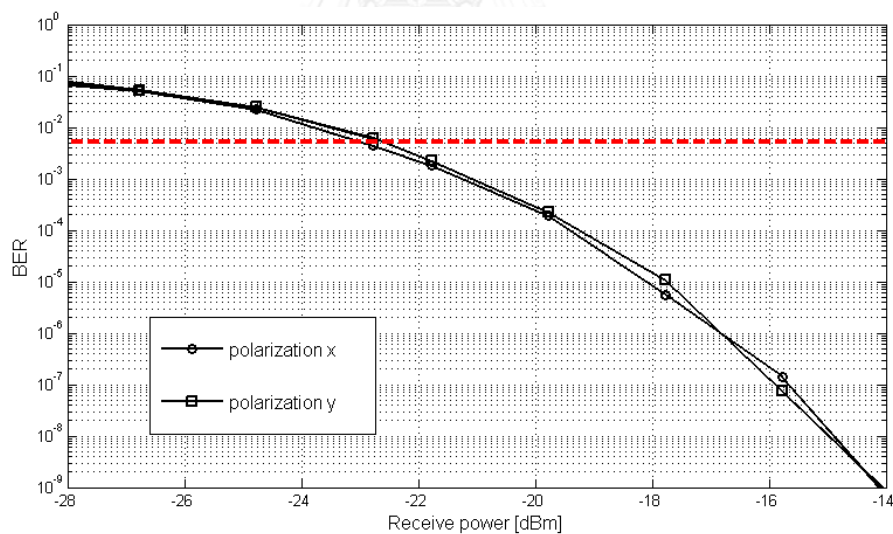
การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM 4QAM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 8 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจาก Local oscillator (LO) ที่กำลังสัญญาณ 8 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกล่าวรูปที่ 4.4 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -24.53 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm

#### 4.2.1.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm

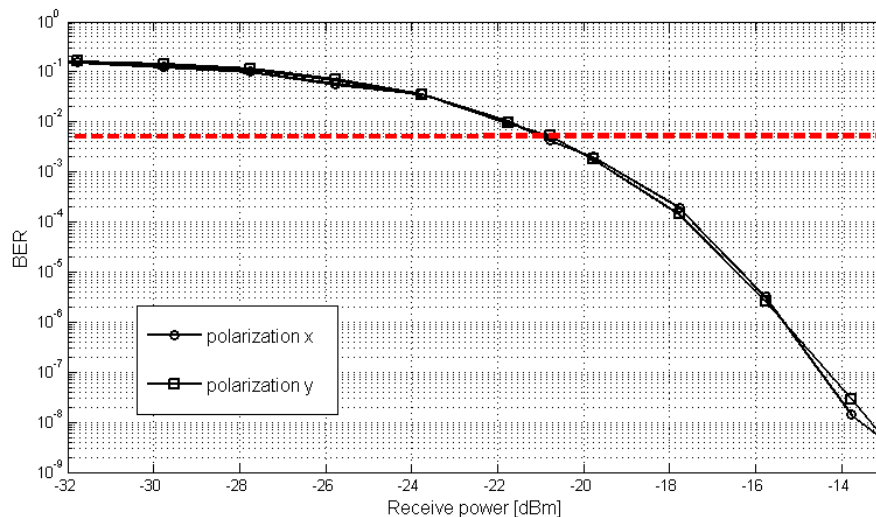
การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM 4QAM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 6 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 6 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกล่าวรูปที่ 4.5 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง  $-22.70$  dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm

#### 4.2.1.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm

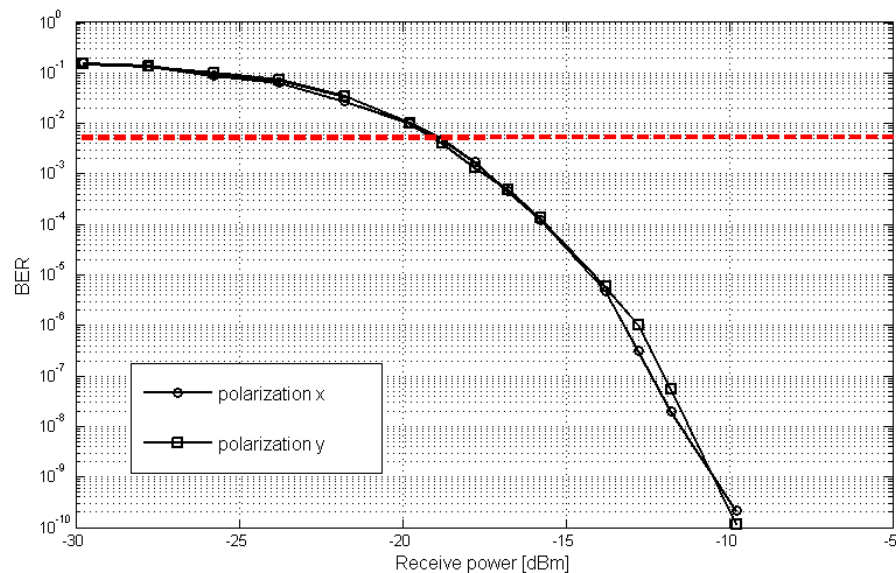
การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM 4QAM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 4 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 4 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกล่าวรูปที่ 4.6 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง  $-20.75$  dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm

#### 4.2.1.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm

การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM 4QAM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 2 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองไนคริสต์ที่มีค่าคงที่ไนคริสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 2 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกล่าวที่รูปที่ 4.7 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -18.77 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM 4-QAM btb ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm

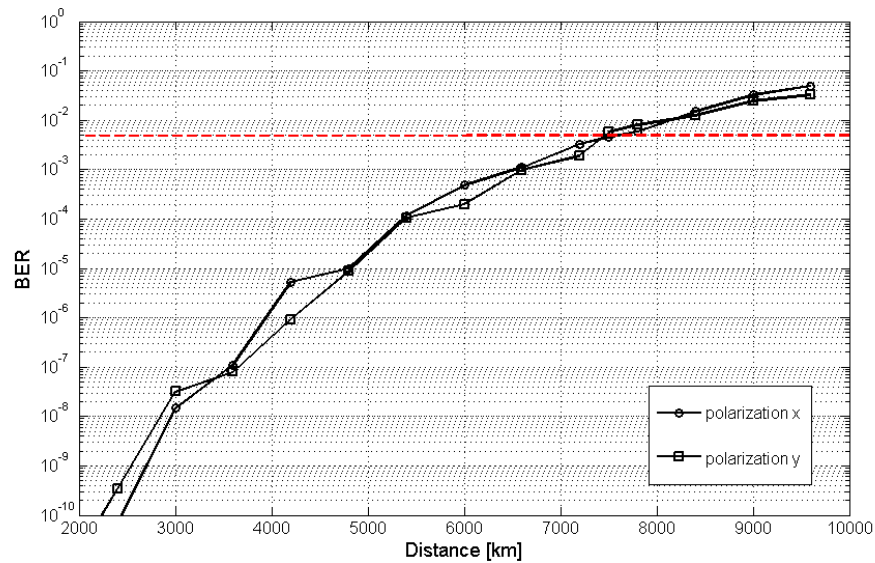
## 4.2.2 การวิเคราะห์ระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติเมื่อผ่านเส้นใยแสง

### 4.2.2.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm

การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติประกอบไปด้วยสามส่วนคือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 10 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาริซเซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองนั่นคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ ส่วนที่สามโครงสร้างภาครับของระบบสัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์กำลังสัญญาณ 10 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 10 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.343 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -1.778 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 7320 km

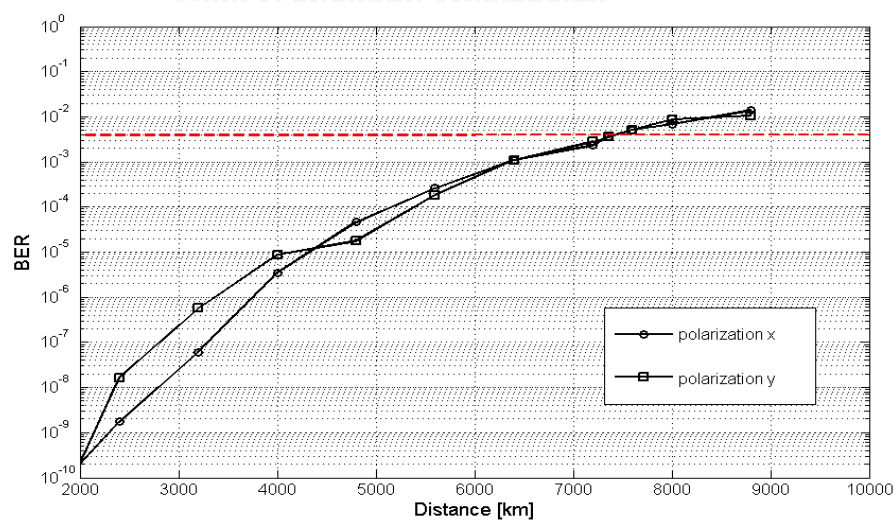


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ

ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 10 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -1.668 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 7520 km

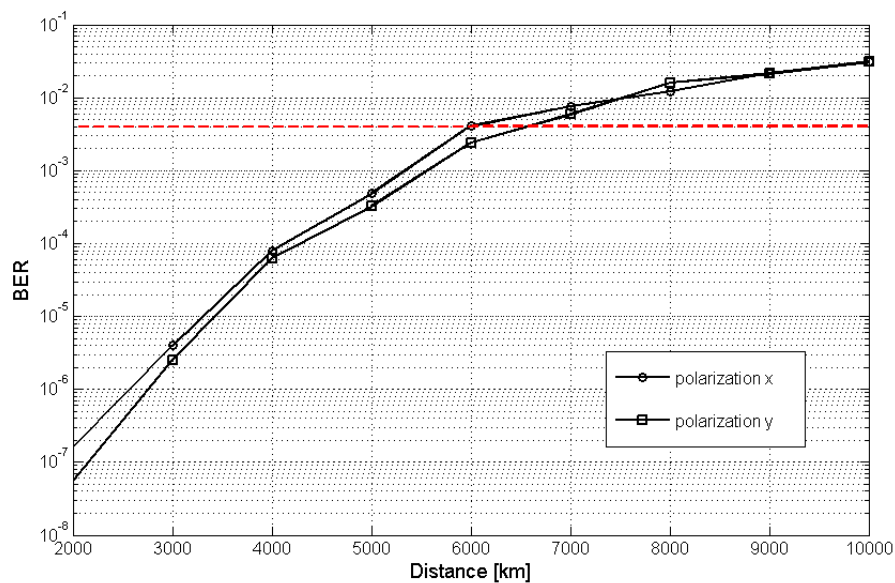


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ

ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 10 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.918 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -1.551 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาตประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 6000 km



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบช่องสัญญาณปกติ  
ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

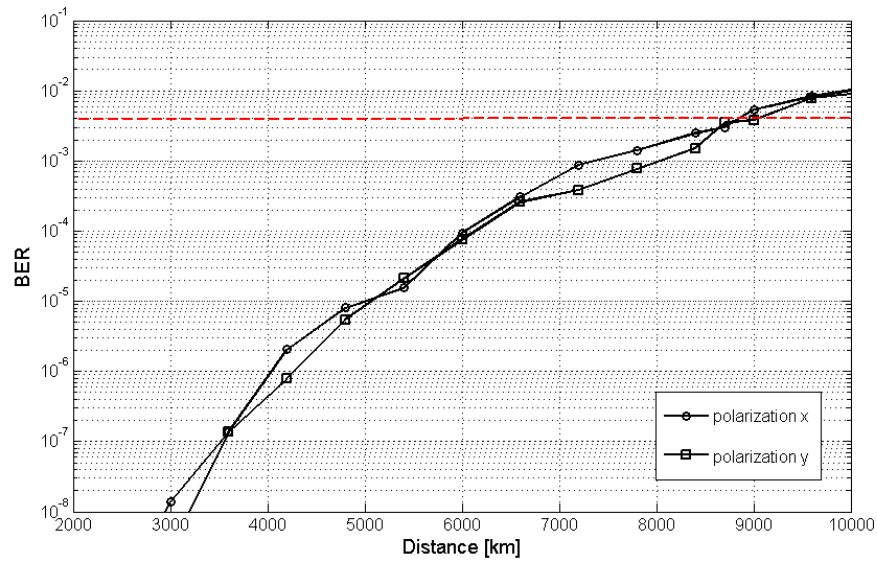


#### 4.2.2.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm

การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติประกอบไปด้วยสามส่วนคือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 8 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองนั่นคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ ส่วนที่สามโครงสร้างภาครับของระบบสัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 8 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -3.755 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 8700 km

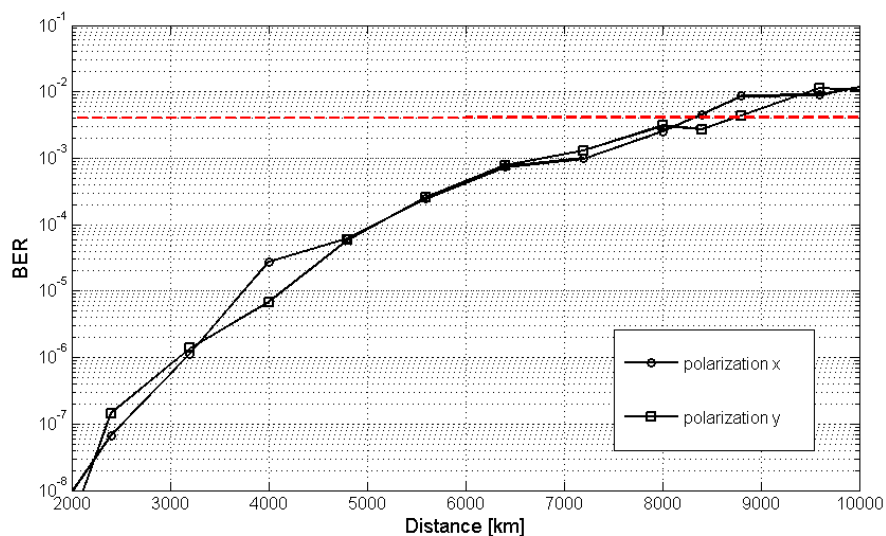


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ

ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -3.496 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 8320 km

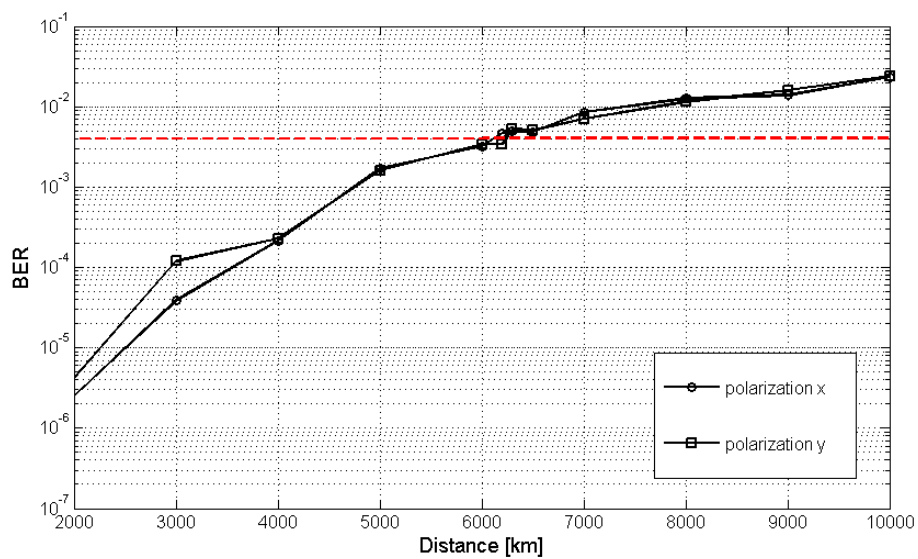


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ

ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.919 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -3.35 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิตพลาดของระบบดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิตพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 6100 km



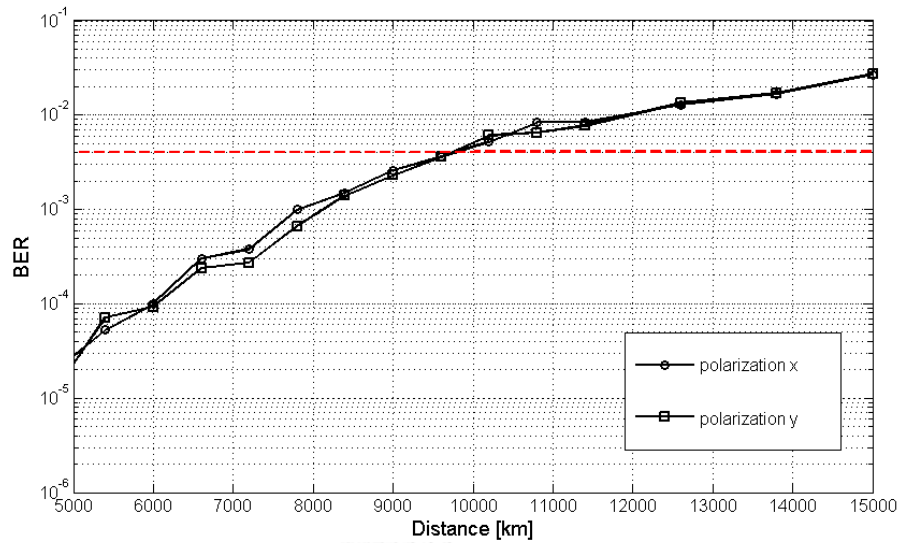
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิตพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

### 4.2.2.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm

การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติประกอบไปด้วยสามส่วนคือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 6 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองนั่นคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ ส่วนที่สามโครงสร้างภาครับของระบบสัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 6 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

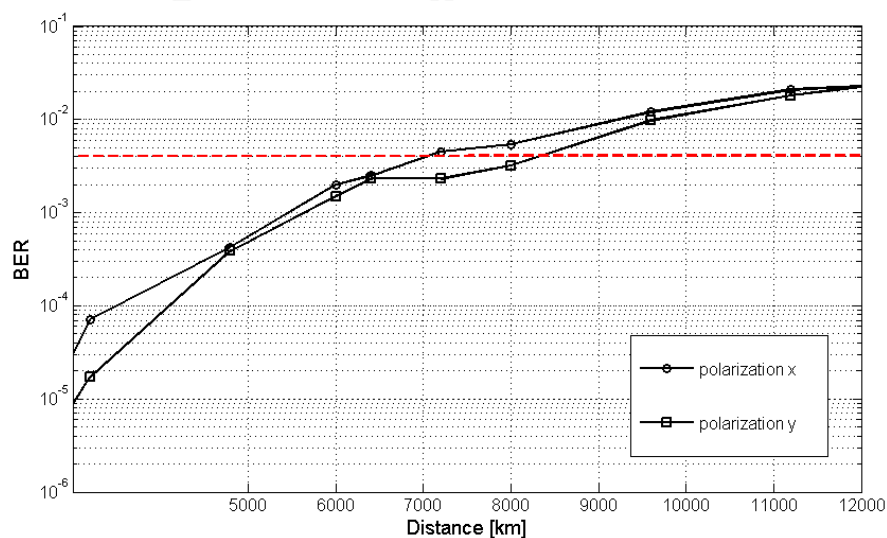
ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -5.634 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 9720 km



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ  
ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

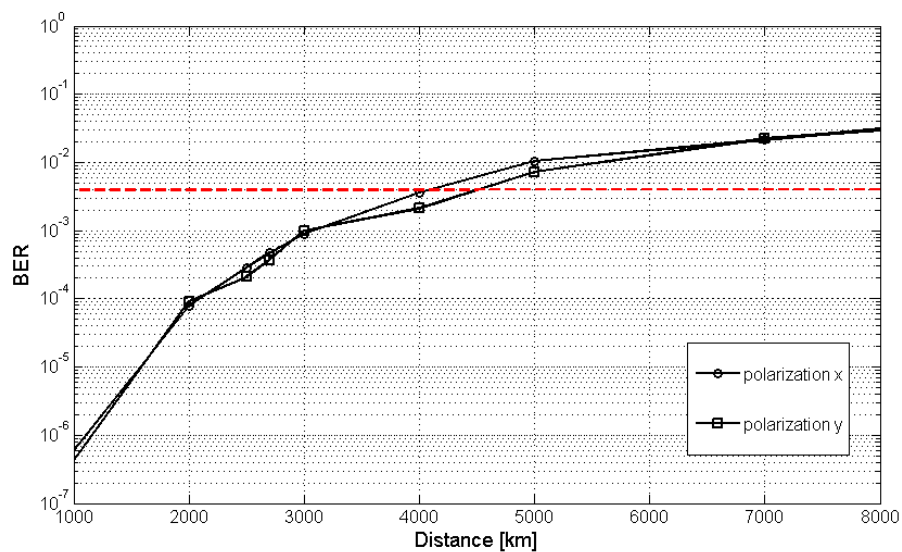
ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -5.375 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 7120 km



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ  
ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.901 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -5.649 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิตพลาดของระบบดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิตพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 4100 km



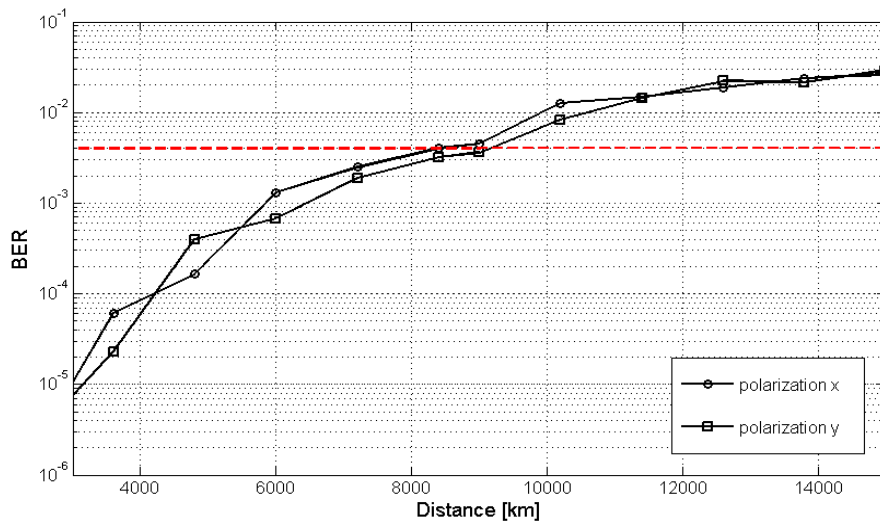
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิตพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

### 4.2.2.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm

การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติประกอบไปด้วยสามส่วน คือ ภาควัดส่ง เส้นใยแสง และภาควัดรับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาควัดส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 4 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองนั่นคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ ส่วนที่สามโครงสร้างภาควัดรับของระบบสัญญาณที่มาจากภาควัดส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 4 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาควัดส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาควัดส่ง 4 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาควัดรับคือ -7.448 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 8400 km

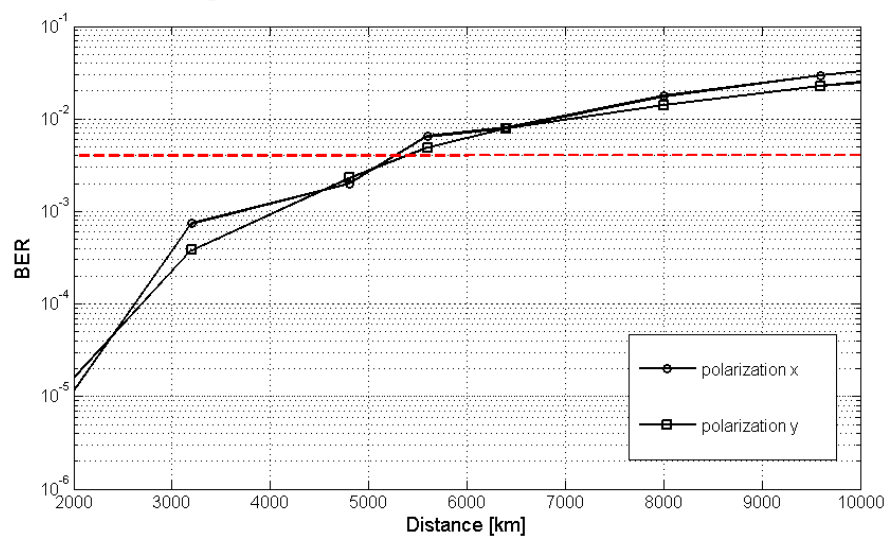


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ

ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 4 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -7.256 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 5200 km



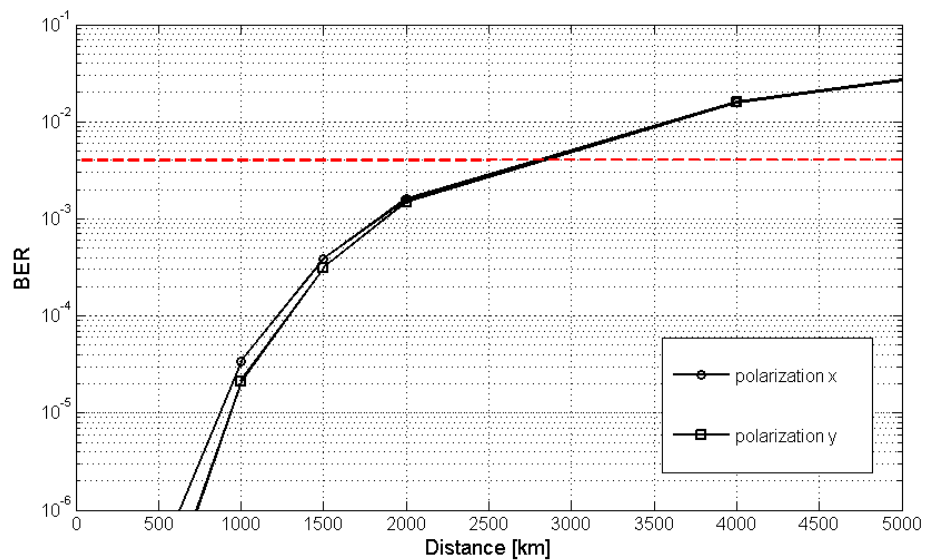
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ

ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km



### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 4 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.901 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -7.646 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาตประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2800 km



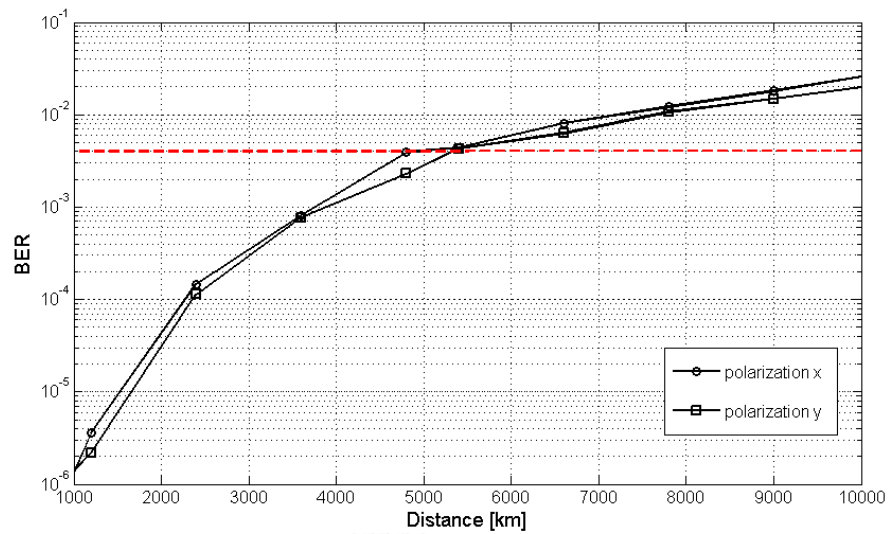
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

### 4.2.2.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm

การจำลองระบบ PDM 4-QAM สำหรับช่องสัญญาณปกติประกอบไปด้วยสามส่วนคือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 2 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร หรือที่ความถี่ 193.41 THz จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการมอดูเลต QAM ในแกนโพลาไรซ์เซชันทั้งสองแกนจะรวมกันแล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ถัดจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองนั่นคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ ส่วนที่สามโครงสร้างภาครับของระบบสัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกส่งไปตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่กำลังสัญญาณ 2 dBm ความถี่ 193.41 THz เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

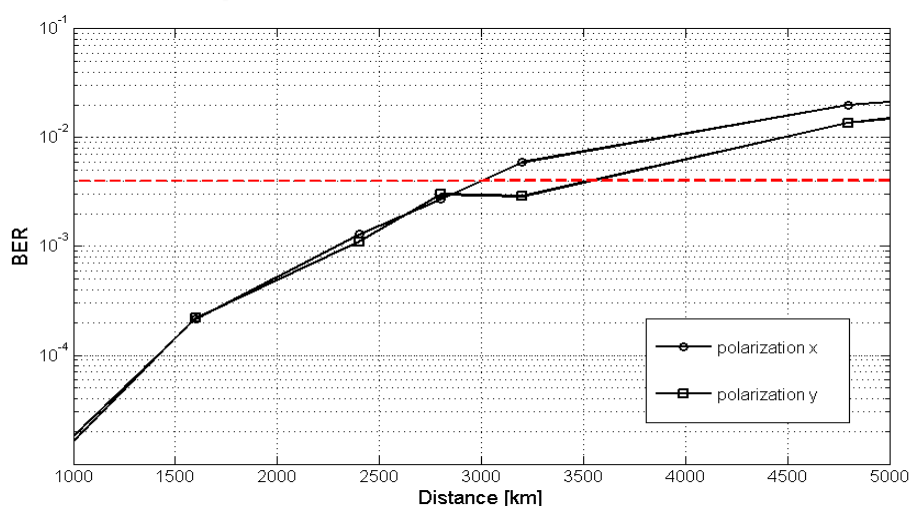
ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 2 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -9.394 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 4800 km



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ  
ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

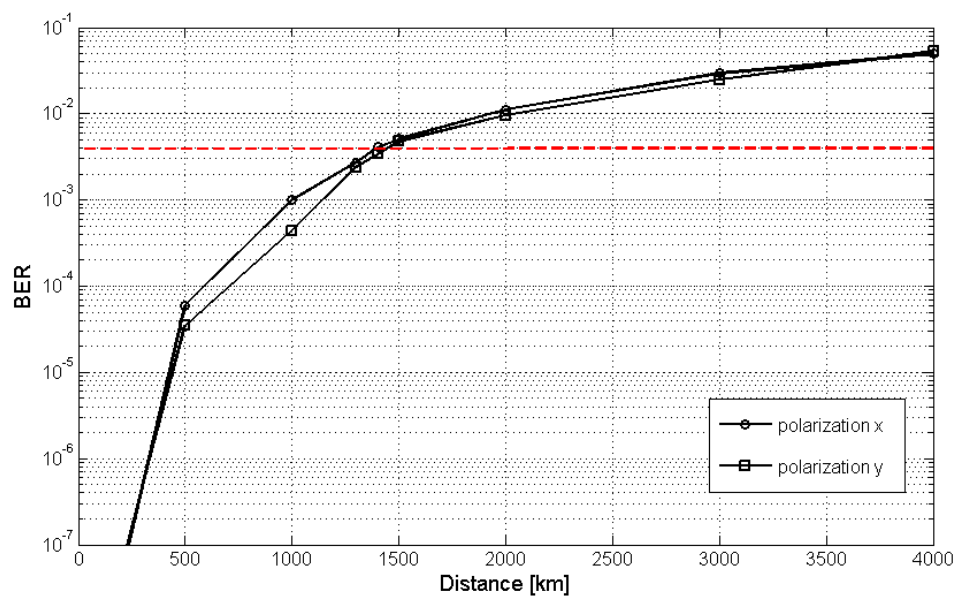
ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 2 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -9.255 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 3000 km



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณปกติ  
ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณปกติที่กำลังภาคส่ง 2 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.886 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับคือ -9.699 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบดังรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาตประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1400 km



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบช่องสัญญาณปกติ  
ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

### 4.3 การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel

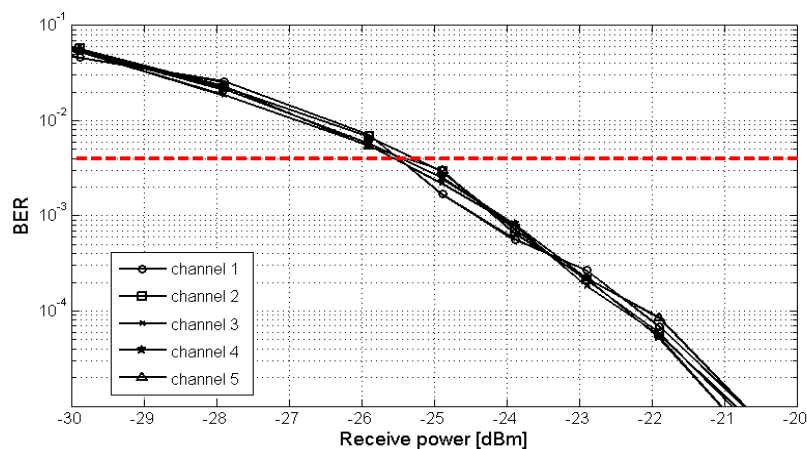
การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 เมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสงโดยจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ภาครับกับ อัตราบิดผิดพลาดของระบบและ แบบที่ 2 ระบบที่มีเส้นใยแสงซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะ สูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบ

#### 4.3.1 การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel

##### เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง

##### 4.3.1.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 10 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน 5 สัญญาณดังตารางที่ 3.3 จากนั้นสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 10 dBm นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกราฟรูปที่ 4.23 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราบิดผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -25.25 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้

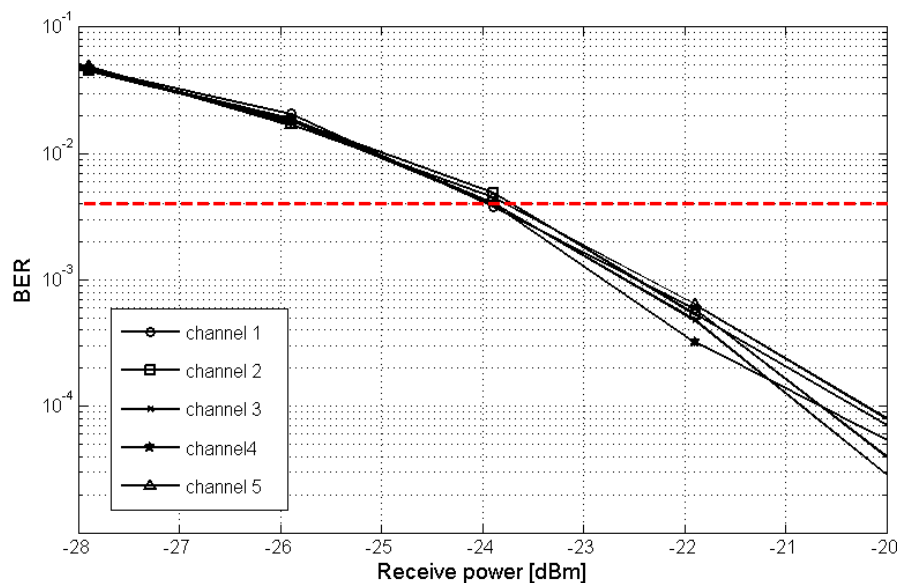


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM-N-WDM btb

ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm

#### 4.3.1.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm

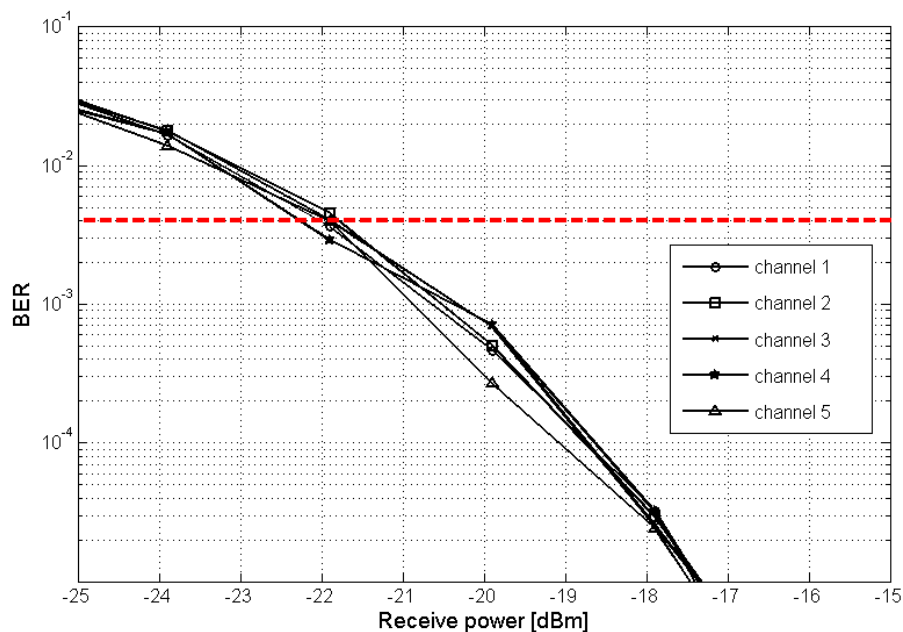
การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 10 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างกัน 5 สัญญาณดังตารางที่ 3.3 จากนั้นสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 8 dBm นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกล่าวรูปที่ 4.24 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราบิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -23.80 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM-N-WDM btb ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm

#### 4.3.1.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm

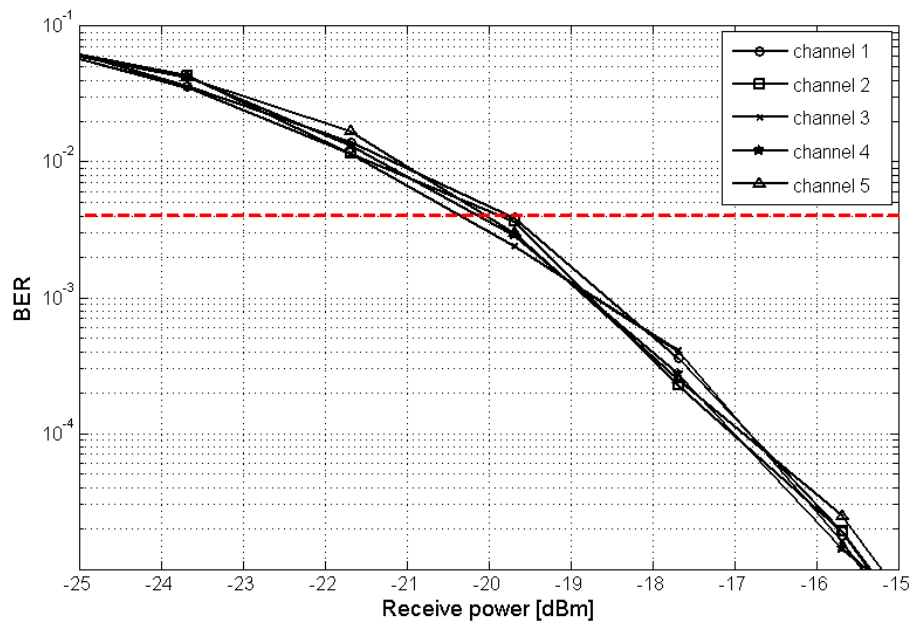
การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 6 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างกัน 5 สัญญาณดังตารางที่ 3.3 จากนั้นสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 6 dBm นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกล่าวรูปที่ 4.25 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราบิดผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -21.89 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM-N-WDM btb ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm

#### 4.3.1.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 4 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน 5 สัญญาณดังตารางที่ 3.3 จากนั้นสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 4 dBm นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกราฟรูปที่ 4.26 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราบิดผิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -19.68 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้

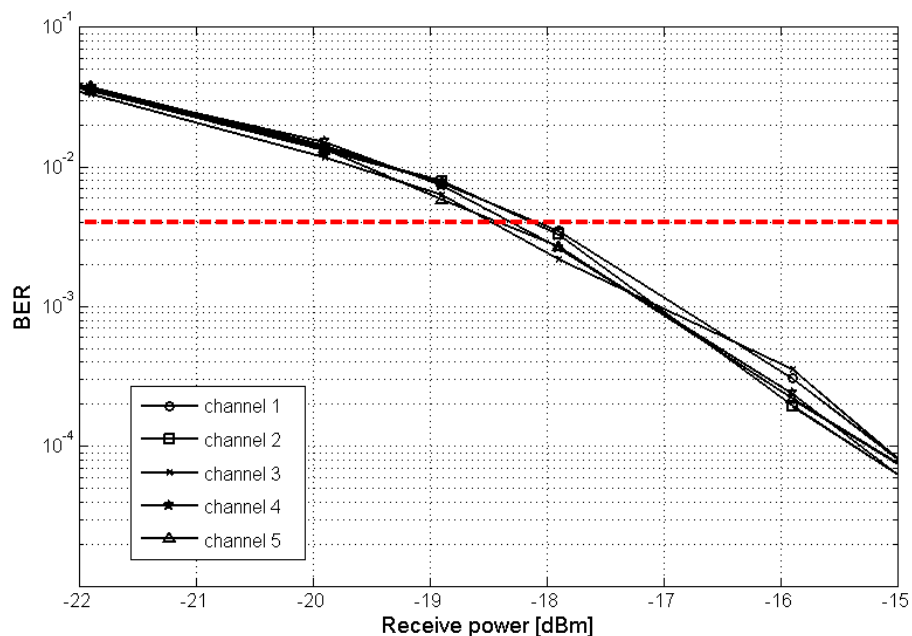


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM-N-WDM btb ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm



#### 4.3.1.5 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back-to-back : btb) ประกอบไปด้วยสองส่วนคือภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 2 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน 5 สัญญาณดังตารางที่ 3.3 จากนั้นสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองไนควิสต์ที่มีค่าคงที่ไนควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM ถัดจากนั้นส่วนที่สองโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณที่มาจากภาคส่งจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 2 dBm นอกจากนี้มีการเปลี่ยนกำลังสัญญาณจนกระทั่งกำลังที่ภาครับสัญญาณจนกระทั่งมีอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ จะได้ผลการจำลองระบบดังกราฟรูปที่ 4.27 เมื่อกำลังที่ภาครับลดลงอัตราบิดพลาดของระบบจะเพิ่มมากขึ้นจนภาครับมีกำลัง -18.24 dBm เป็นกำลังภาครับต่ำสุดที่ระบบยอมรับได้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดที่ระบบ PDM-N-WDM btb ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm

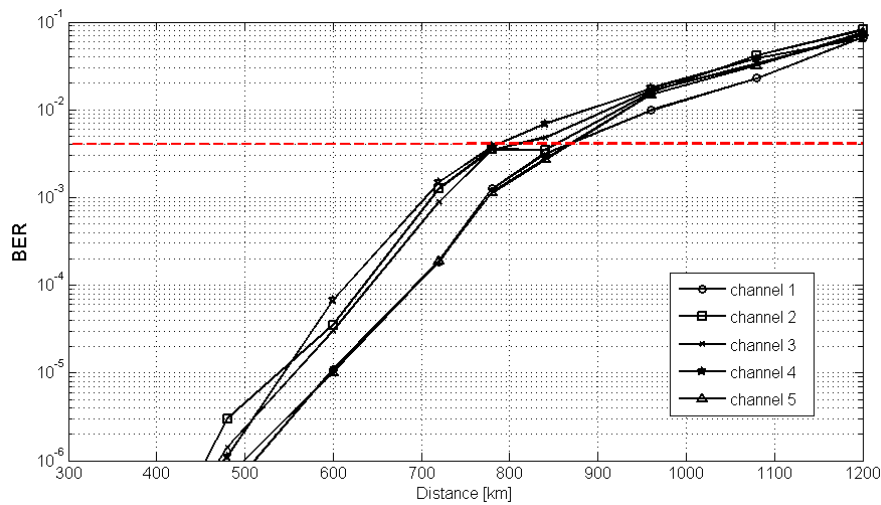
### 4.3.2 การวิเคราะห์ระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel เมื่อผ่านเส้นใยแสง

#### 4.3.2.1 ที่กำลังส่งสัญญาณ 10 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel ประกอบไปด้วยสามส่วน คือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 10 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณต่างกัน 5 สัญญาณคือ 193.4145 THz, 193.5145 THz, 193.6145 THz, 193.7145 THz และ 193.8145 THz ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และส่วนสุดท้ายโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 10 dBm เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาตของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาตประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -1.848 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาตของระบบดังรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาตประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 780 km

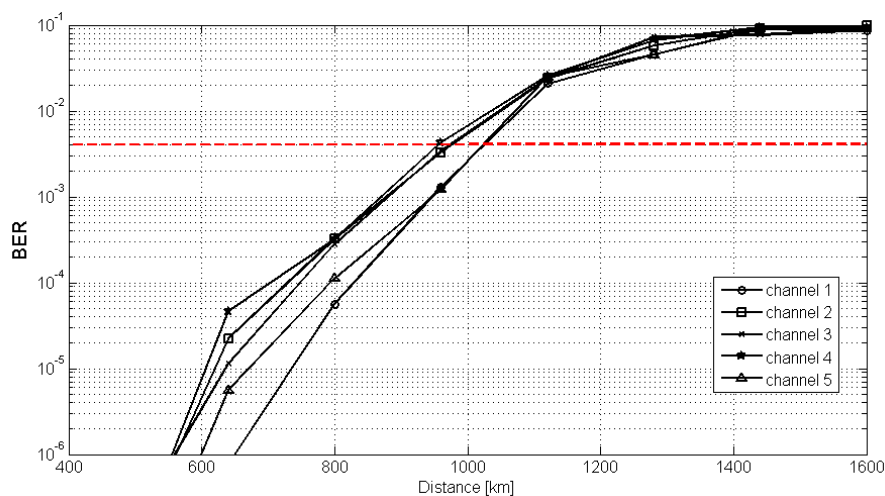


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel

ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -1.897 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 960 km

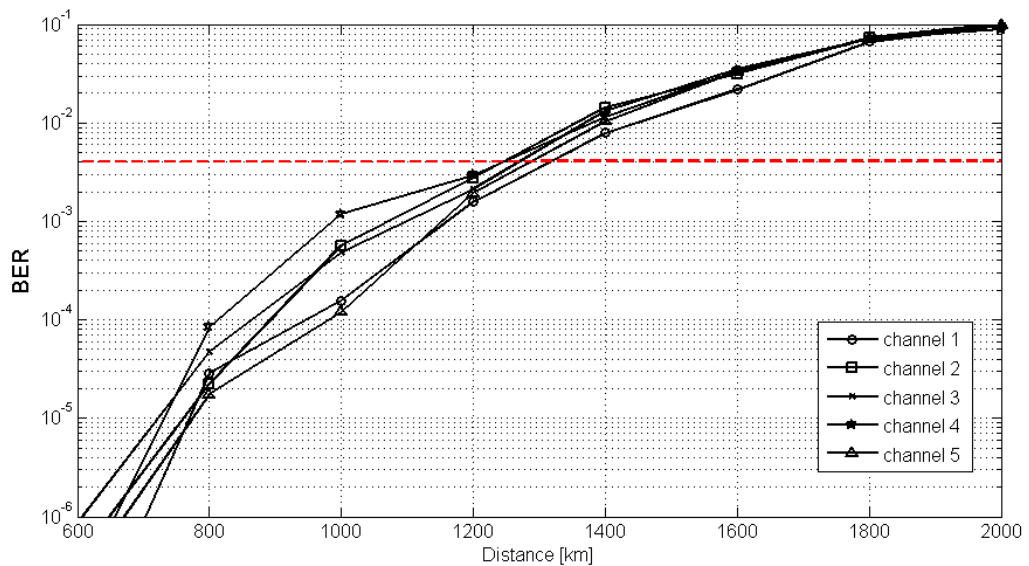


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel

ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะทางอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm มีการวางระยะทางอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.919 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -1.826 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1200 km



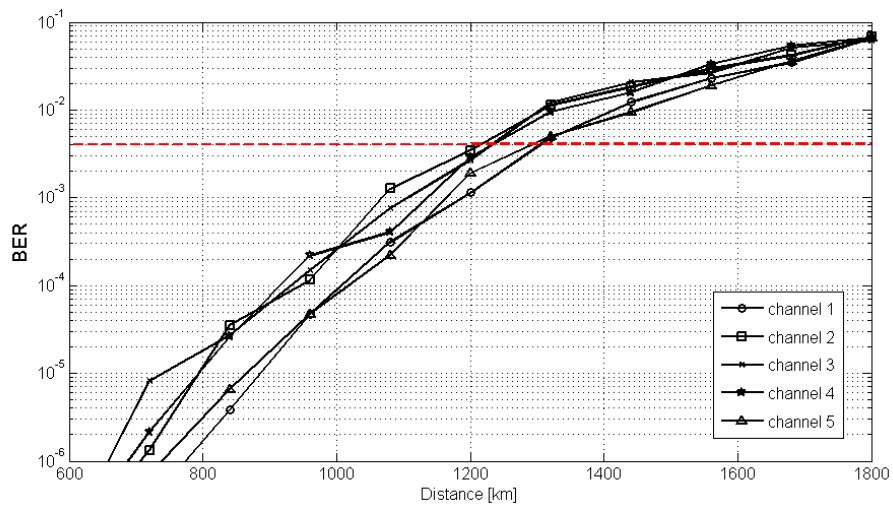
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 10 dBm ระยะทางอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

#### 4.3.2.2 ที่กำลังส่งสัญญาณ 8 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel ประกอบไปด้วยสามส่วน คือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 8 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณต่างกัน 5 สัญญาณคือ 193.4145 THz, 193.5145 THz, 193.6145 THz, 193.7145 THz และ 193.8145 THz ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และส่วนสุดท้ายโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 8 dBm เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

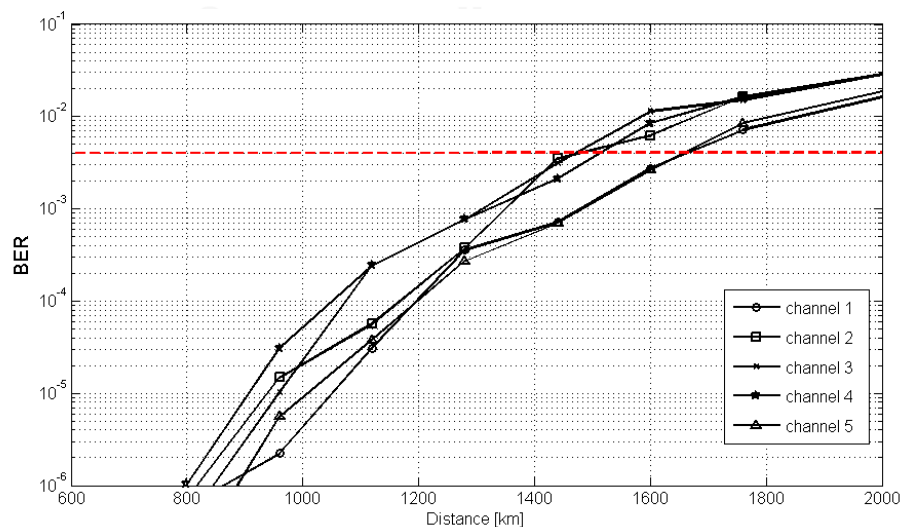
ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.36 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -3.718 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1200 km



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

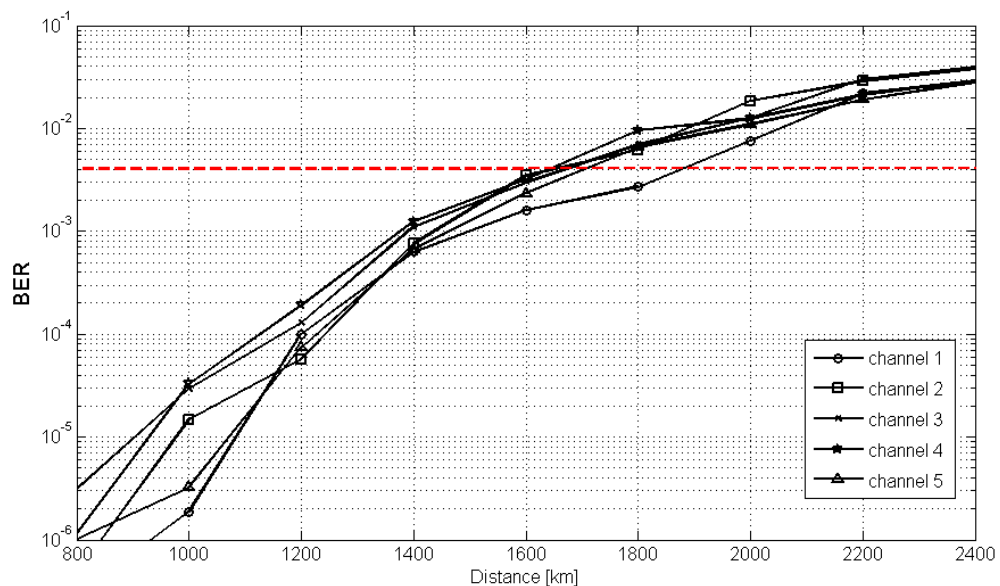
ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -3.807 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1440 km



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.919 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -3.789 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1600 km



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 8 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

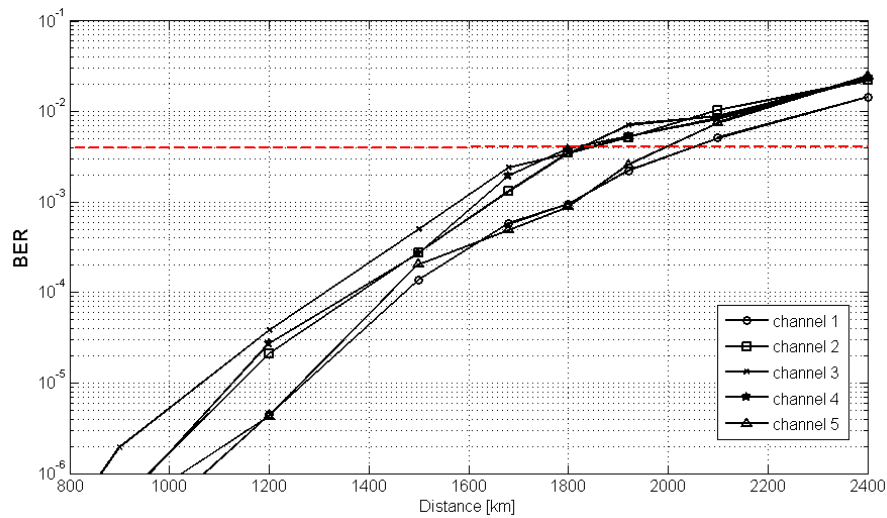
### 4.3.2.3 ที่กำลังส่งสัญญาณ 6 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel ประกอบไปด้วยสามส่วน คือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 6 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณต่างกัน 5 สัญญาณคือ 193.4145 THz, 193.5145 THz, 193.6145 THz, 193.7145 THz และ 193.8145 THz ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และส่วนสุดท้ายโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 6 dBm เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -5.909 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1800 km

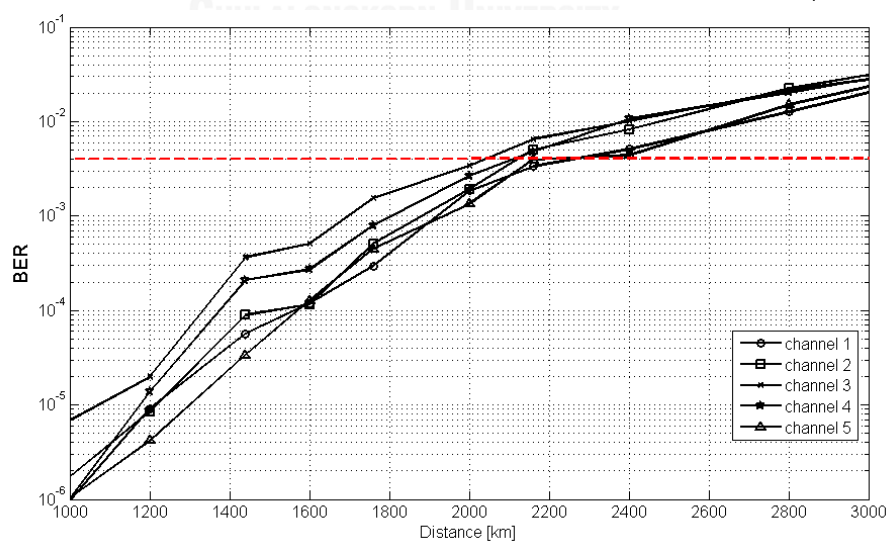




รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

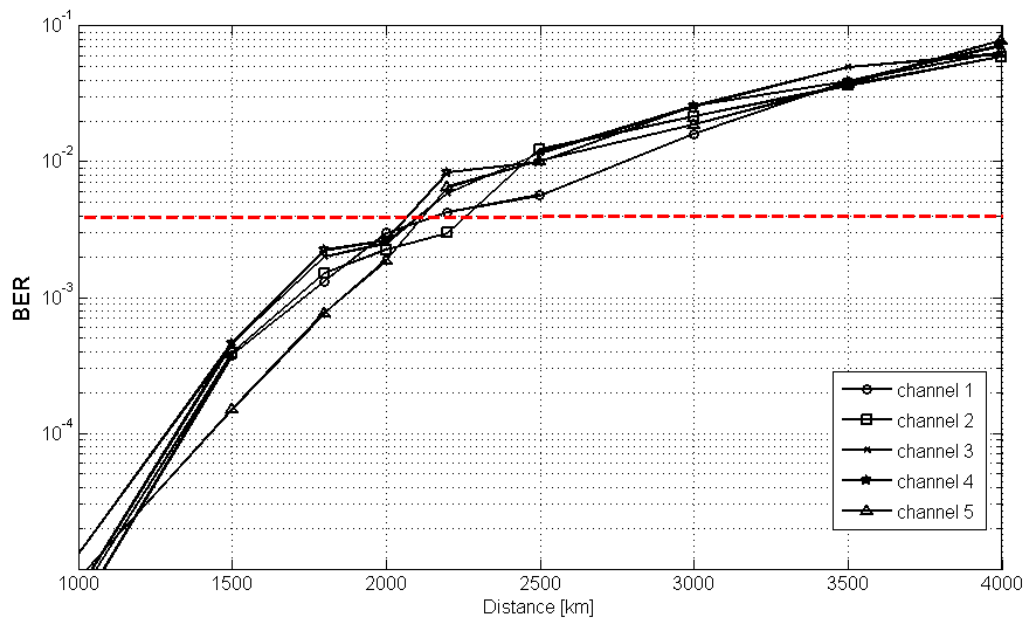
ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -5.811 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2000 km



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.919 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -5.681 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2100 km



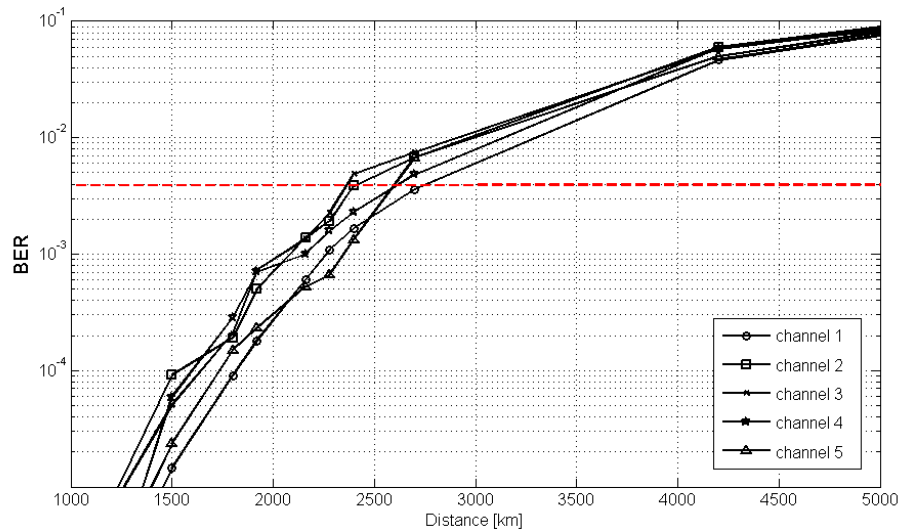
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

#### 4.3.2.4 ที่กำลังส่งสัญญาณ 4 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel ประกอบไปด้วยสามส่วน คือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 4 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณต่างกัน 5 สัญญาณคือ 193.4145 THz, 193.5145 THz, 193.6145 THz, 193.7145 THz และ 193.8145 THz ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองในควิสต์ที่มีค่าคงที่ในควิสต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และส่วนสุดท้ายโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 4 dBm เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -7.831 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2400 km

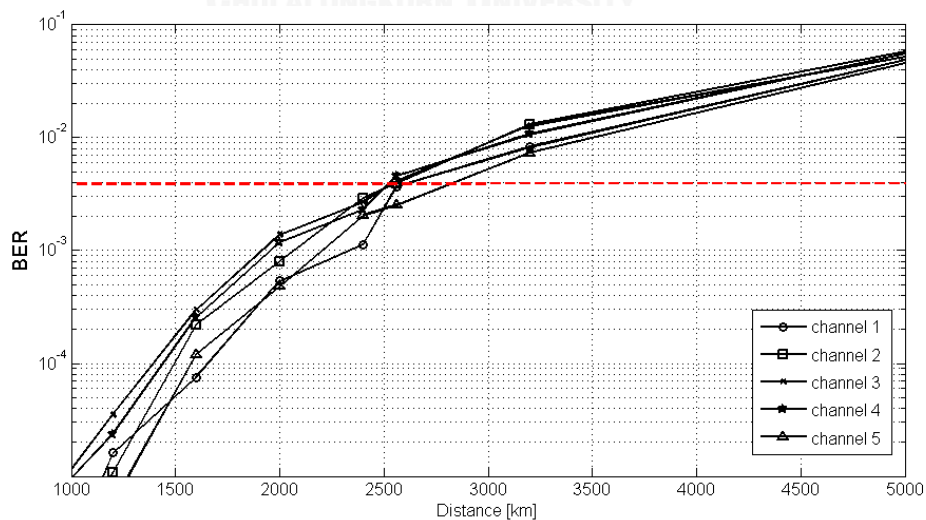


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel

ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -7.661 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2560 km

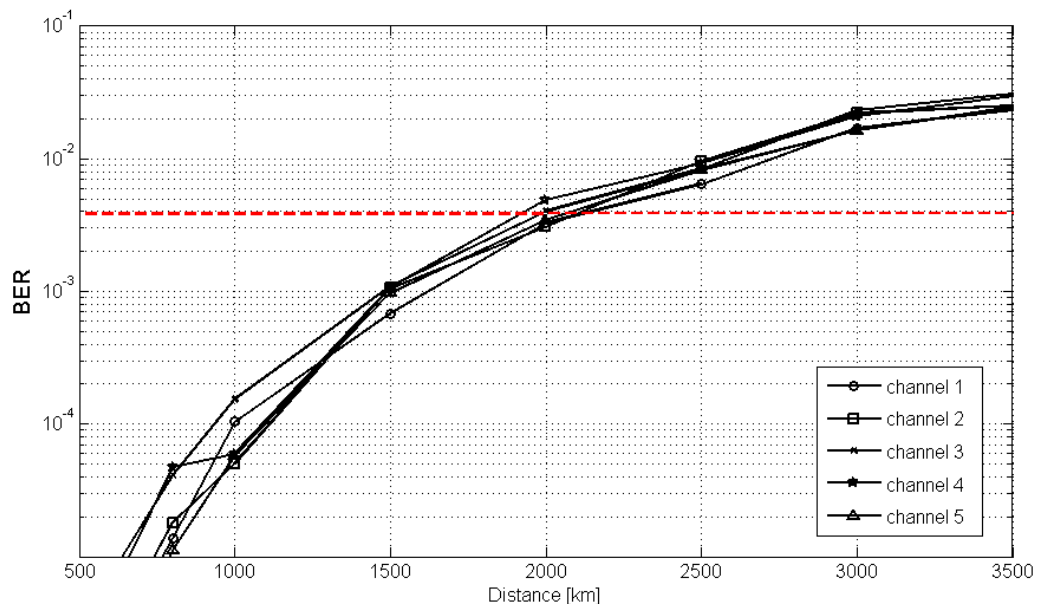


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel

ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 18.901 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -7.807 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1900 km



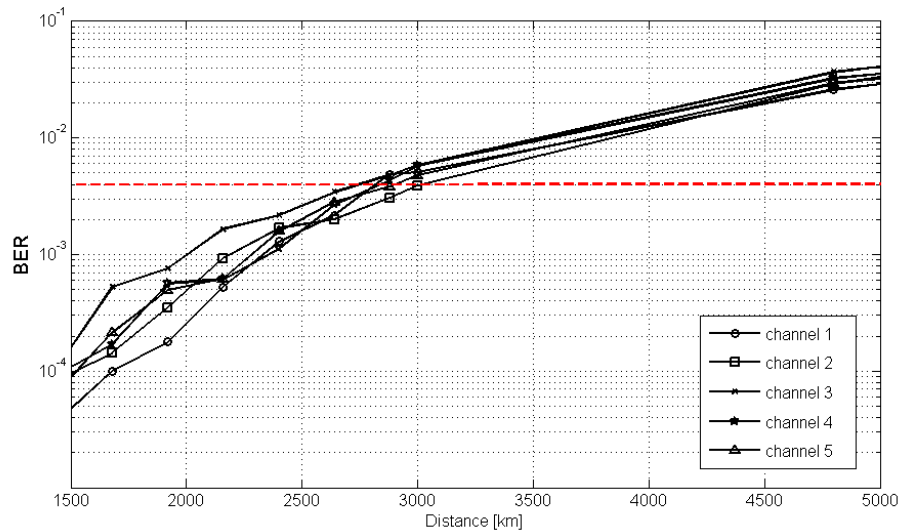
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

#### 4.3.2.5 ที่กำลังส่งสัญญาณ 2 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM สำหรับช่องสัญญาณแบบ Superchannel ประกอบไปด้วยสามส่วน คือภาคส่ง เส้นใยแสง และภาครับ ในส่วนแรกโครงสร้างภาคส่งของ PDM N-WDM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงคือ CW laser ส่งด้วยกำลังสัญญาณ 2 dBm ที่อัตราข้อมูล 200 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณโดยส่งสัญญาณต่างกัน 5 สัญญาณคือ 193.4145 THz, 193.5145 THz, 193.6145 THz, 193.7145 THz และ 193.8145 THz ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณถูกมอดูเลตแบบ QAM แล้วผ่านตัวกรองในควิส์ต์ที่มีค่าคงที่ในควิส์ต์เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสเปกตรัมของสัญญาณให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วถูกมัลติเพล็กซ์แบบ N-WDM จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่สองคือเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังของสัญญาณทำให้สูญเสียกำลังของสัญญาณในสายส่ง ค่าดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีระยะห่างทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังของสัญญาณ และส่วนสุดท้ายโครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM สัญญาณจะถูกตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ซึ่งมีการสร้างสัญญาณจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่ตรงกันกับช่องสัญญาณนั้นๆที่กำลังสัญญาณ 2 dBm เนื่องจากระบบมีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากค่าดิสเพอร์ชันด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นจะวิเคราะห์ระบบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดที่ระบบส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาอัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้ดังนี้

#### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

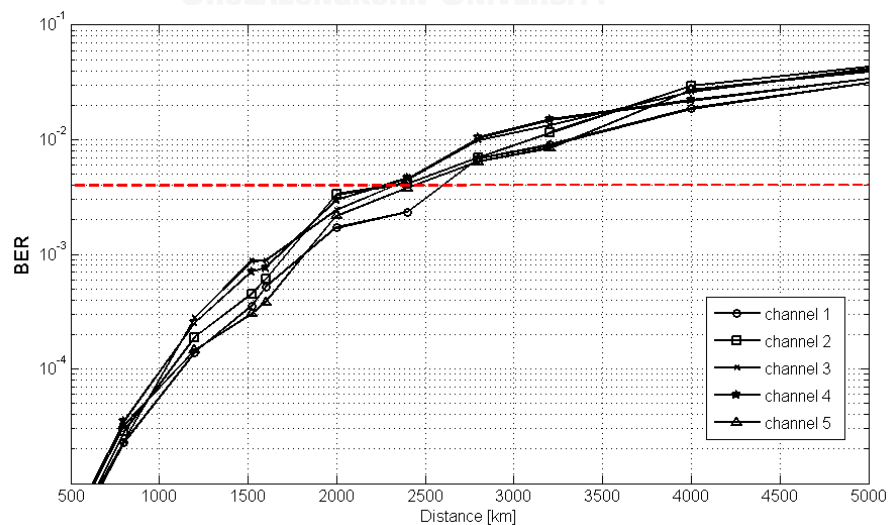
ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 11.35 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -9.772 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2700 km



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

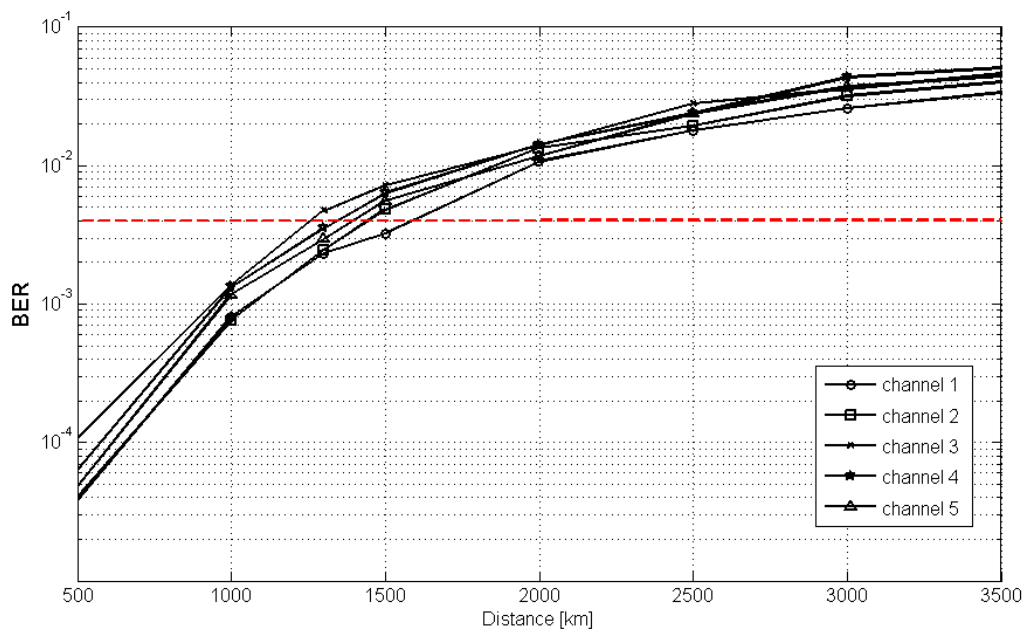
ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 80 km ดังนั้นใช้อัตราการขยายสัญญาณ 15.136 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -9.539 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.41 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2320 km



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 km

### ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km

ระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm มีการวางระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 100 km ดังนั้นใช้อัตราขยายสัญญาณ 18.89 dB มีพารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงดังตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระบบพบว่ากำลังที่ภาครับของทุกช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน กำลังภาครับต่ำสุดคือ -9.789 dBm พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบดังรูปที่ 4.42 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราบิดผิดพลาดประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้โดยระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1300 km



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel ที่กำลังภาคส่ง 2 dBm ระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 100 km



#### 4.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ PDM 4-QAM และ PDM N-WDM

##### 4.4.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง

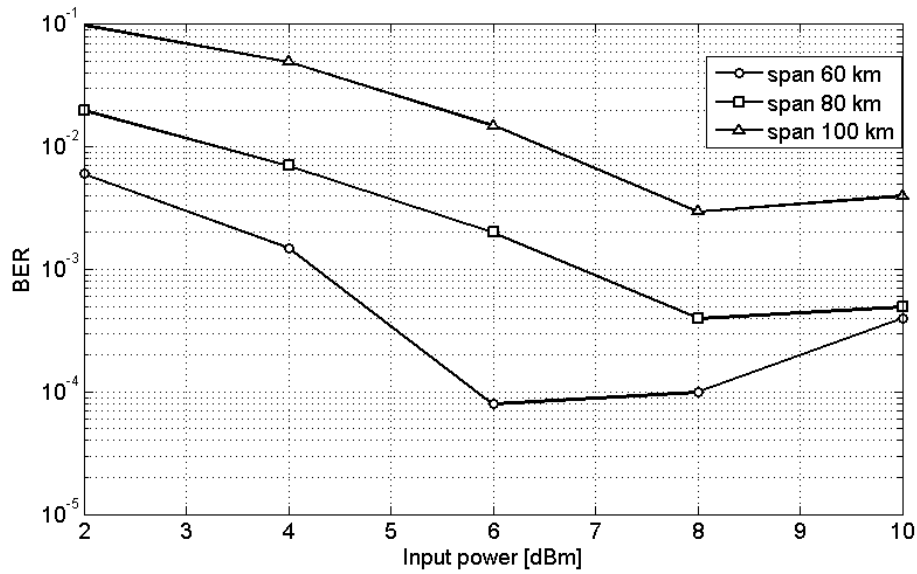
การจำลองระบบแบบไม่ผ่านเส้นใยแสงทั้งแบบช่องสัญญาณปกติและแบบ Superchannel ให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาคส่งกับกำลังภาครับที่อัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลที่  $4 \times 10^{-3}$  ดังตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากำลังภาครับของช่องสัญญาณแบบ Superchannel มีค่าสูงกว่าช่องสัญญาณแบบปกติเพราะโครงสร้างของระบบช่องสัญญาณแบบ Superchannel จะมีอุปกรณ์ในระบบมากกว่าระบบแบบช่องสัญญาณปกติดังนั้นจึงมีการสูญเสียกำลังมากกว่าทำให้ระบบมีอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลที่ขีดจำกัดของระบบในขณะที่มีกำลังของภาครับสูงกว่า นอกจากนี้การที่กำลังภาครับของระบบทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าสมรรถนะของระบบจะไม่ขึ้นกับความแตกต่างของภาคส่งกับภาครับของช่องสัญญาณปกติและSuperchannel

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาคส่งกับภาครับของช่องสัญญาณปกติและSuperchannel

กำลังภาคส่ง [dBm]	กำลังภาครับ btb PDM 4-QAM [dBm]	กำลังภาครับ btb PDM N-WDM [dBm]
10	-25.77	-25.25
8	-24.53	-23.80
6	-22.70	-21.89
4	-20.75	-19.68
2	-18.77	-18.24

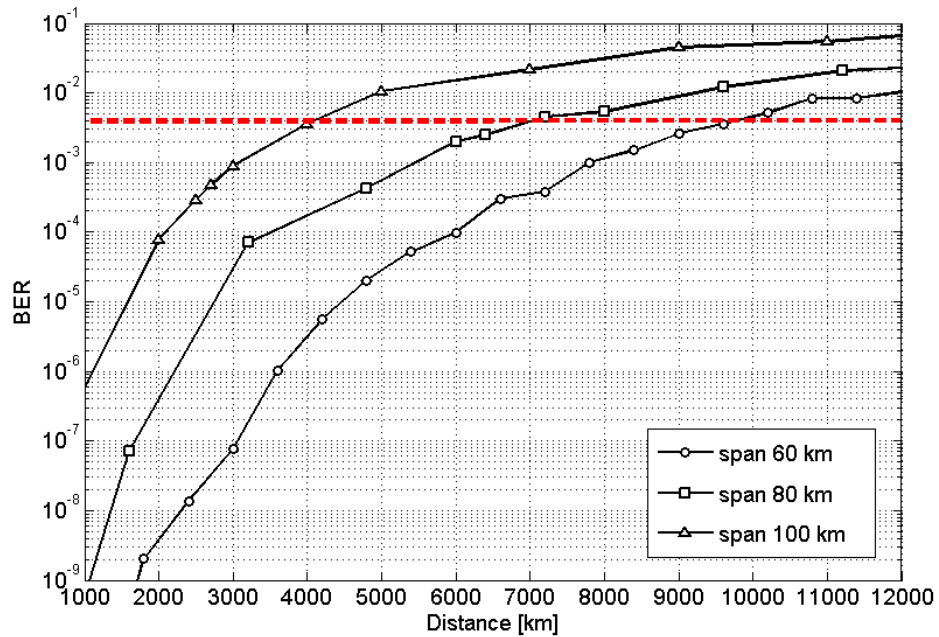
##### 4.4.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อผ่านเส้นใยแสง

การจำลองระบบ PDM 4-QAM ผ่านเส้นใยแสงระยะ 1200 กิโลเมตร ซึ่งมีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 3 แบบคือ 60 กิโลเมตร 80 กิโลเมตร และ 100 กิโลเมตร มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลดังภาพที่ 4.43 จะเห็นได้ว่ามีกำลังภาคส่ง 6 dBm มีอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลต่ำที่สุดคือ  $8 \times 10^{-5}$  แสดงว่าที่กำลังภาคส่งนี้จะสามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุด



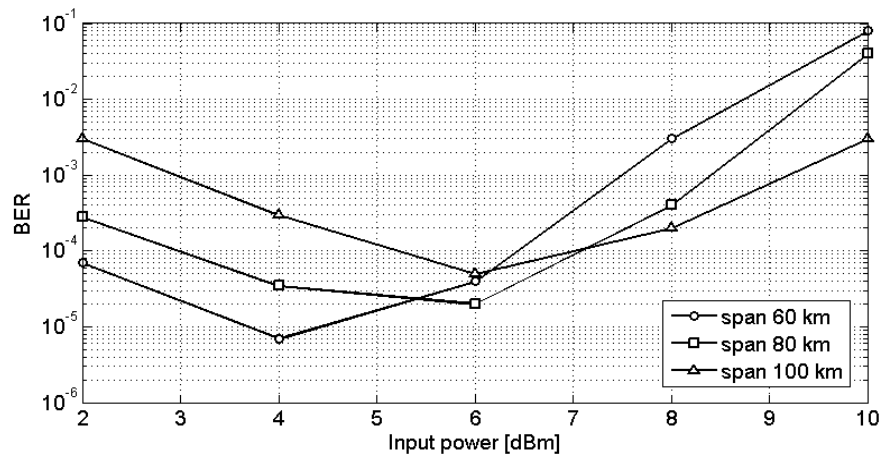
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูล  
ที่ระยะทางของระบบ PDM 4-QAM ผ่านเส้นใยแสง 1200 km

เมื่อพิจารณาระบบ PDM 4-QAM ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm ผ่านเส้นใยแสง ความสัมพันธ์ระหว่างระยะที่สัญญาณแสงส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลที่ระยะทางอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 กิโลเมตร 80 กิโลเมตร และ 100 กิโลเมตรดังรูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นว่าที่ระยะทางของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 กิโลเมตร ระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 9720 กิโลเมตร



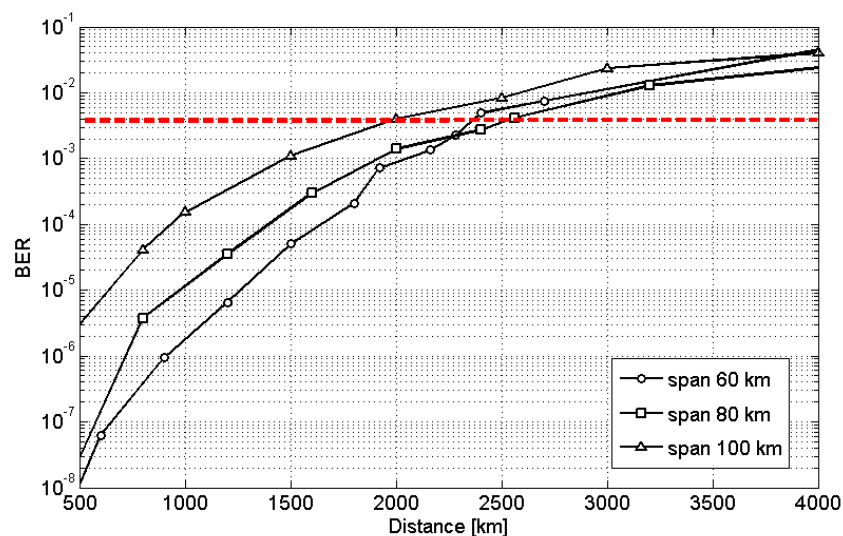
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลของระบบ PDM 4-QAM  
ที่กำลังภาคส่ง 6 dBm

การจำลองระบบ PDM N-WDM ผ่านเส้นใยแสงระยะ 6000 กิโลเมตร ซึ่งมีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 3 แบบคือ 60 กิโลเมตร 80 กิโลเมตร และ 100 กิโลเมตร มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลดังภาพที่ 4.45 จะเห็นได้ว่ามีกำลังภาคส่ง 4 dBm มีอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลต่ำที่สุดคือ  $7 \times 10^{-6}$  แสดงว่าที่กำลังภาคส่งนี้จะสามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุด



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังภาครับกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลทีระยะห่างของระบบ PDM N-WDM ผ่านเส้นใยแสง 6000 km

เมื่อพิจารณาระบบ PDM N-WDM ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm ผ่านเส้นใยแสง ความสัมพันธ์ระหว่างระยะที่สัญญาณแสงส่งได้กับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลทีระยะห่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 60 กิโลเมตร 80 กิโลเมตร และ 100 กิโลเมตรดังรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นว่าทีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง 80 กิโลเมตร ระบบสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2560 กิโลเมตร



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูลของระบบ PDM N-WDM ที่กำลังภาคส่ง 4 dBm

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการสร้างสัญญาณในคริสต การออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ช่องสัญญาณปกติและ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ช่องสัญญาณแบบ Superchannel ด้วยอัตราการรับส่งข้อมูล 200 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ นอกจากนี้ ยังวิเคราะห์ผลกระทบของการลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมดโพลาริซ และความเป็นเชิงเส้น ต่อการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบให้ มีสมรรถนะสูงสุดและหาระยะทางไกลสุดที่ระบบส่งได้

การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการสร้างตัวกรองในคริสต พิจารณาจากการจำลองระบบ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติด้วยอัตรารับส่งข้อมูล ของระบบ 200 Gb/s ได้วิเคราะห์ลักษณะของตัวกรองในคริสตที่มีค่าคงที่ในคริสตทั้งหมด 5 ค่า คือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 พบว่าที่ค่าคงที่ในคริสต เท่ากับ 0.4 ( $k=0.4$ ) ให้รูปแบบของสเปกตรัม มีลักษณะใกล้เคียงสี่เหลี่ยมมากที่สุดและให้อัตราข้อผิดพลาดบิตผิดพลาด (BER) ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ค่าคงที่ในคริสตเท่ากับ 0.4 สำหรับการจำลองระบบทั้งแบบช่องสัญญาณ ปกติและแบบ Superchannel

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของเส้นใยแสงโดยวิเคราะห์ทั้งสองระบบคือ ระบบสื่อ สัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติและ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel โดยผลกระทบจากการลดทอนกำลังของสัญญาณสามารถแก้ไขได้ด้วยอุปกรณ์ขยาย สัญญาณแสงซึ่งออกแบบให้ระบบมีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60, 80 และ 100 กิโลเมตร ดังนั้นต้องใช้ใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีอัตราขยายสัญญาณ 11.54, 15.12, 18.9 dB ตามลำดับ ในส่วนของผลกระทบจากดิสเพอร์ชันสามารถชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ด้วย การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ส่วนความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากการกระจายโหมดโพลาริซ พบว่ามีน้อยมากจึงไม่พิจารณาการชดเชยปัญหาในส่วนนี้ อย่างไรก็ตามยังมีผลจากความไม่เป็นเชิง เส้นที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขีดจำกัดของระบบ

การจำลองระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ช่องสัญญาณปกติที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรหรือความถี่ 193.4145 THz เมื่อไม่ผ่านเส้นใย แสง สำหรับการส่งสัญญาณด้วยกำลังภาคส่ง 10, 8, 6, 4 และ 2 dBm จะได้กำลังที่ภาครับ -25.77,

-24.53, -22.70, -20.75 และ -18.77 dBmตามลำดับที่อัตราบิดผิดพลาดของข้อมูล  $4 \times 10^{-3}$  เมื่อผ่านเส้นใยแสงโดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงโหมตเดี่ยวตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D พบว่าระบบที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 9720 กิโลเมตรโดยส่งที่กำลังภาคส่ง 6 dBm มีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ 60 กิโลเมตร ส่วนของการจำลองระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel 5 ช่องสัญญาณที่ความถี่ช่องสัญญาณ 193.4145, 193.5145, 193.6145, 193.7145 และ 193.8145 THz เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสงสำหรับการส่งสัญญาณด้วยกำลังภาคส่ง 10, 8, 6, 4 และ 2 dBm จะได้กำลังที่ภาครับ -25.25, -23.80, -21.89, -19.68 และ -18.24 dBmตามลำดับที่อัตราบิดผิดพลาดของข้อมูล  $4 \times 10^{-3}$  เมื่อผ่านเส้นใยแสงพบว่าระบบที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 2560 กิโลเมตรโดยส่งที่กำลังภาคส่ง 4 dBm มีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุก ๆ 80 กิโลเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบอัลกอริทึมของตัวกรองในคริสต์สามารถนำไปพัฒนาใช้กับการมอดูเลตแบบอื่นๆ เช่น 16-QAM 64-QAM เพื่อพัฒนาให้มีการส่งในรูปแบบที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น
2. การออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel อาจมีการออกแบบมากกว่า 5 ช่องสัญญาณเพื่อศึกษาผลกระทบต่อขีดจำกัดของระบบและออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราการรับส่งที่มากขึ้น

## รายการอ้างอิง

1. Yozzo. สถิติผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตของประเทศไทยปี 2016. [Online]; Available from: <http://www.veedvil.com/news/internet-users-and-usage-in-thailand-2016/>.
2. NECTEC. สรุปสถิติเครือข่ายอินเทอร์เน็ตประจำเดือนพฤษภาคม 2016. [online]; Available from: <http://internet.nectec.or.th/webstats/home.iir>.
3. Infinera. *Coherent DWDM technologies*. [online]; Available from: [https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera\\_Coherent\\_Tech.pdf](https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera_Coherent_Tech.pdf).
4. Bayvel, P., S. Kilmurray, and R.I. Killey. *Nonlinear transmission performance of digital Nyquist WDM and optical OFDM*. in *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2012. IEEE.
5. Bosco, G., et al., *Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems*. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010. 22(15): p. 1129-1131.
6. Dong, Z., et al., *6x144-Gb/s Nyquist-WDM PDM-64QAM Generation and Transmission on a 12-GHz WDM Grid Equipped With Nyquist-Band Pre-Equalization*. *Journal of Lightwave Technology*, 2012. 30(23): p. 3687-3692.
7. Jia, Z., et al., *Field Transmission of 100 G and Beyond: Multiple Baud Rates and Mixed Line Rates Using Nyquist-WDM Technology*. *Journal of Lightwave Technology*, 2012. 30(24): p. 3793-3804.
8. Wang, J., C. Xie, and Z. Pan, *Optimization of DSP to Generate Spectrally Efficient 16QAM Nyquist-WDM Signals*. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013. 25(8): p. 772-775.
9. Hillerkuss, D., et al., *Single-laser 32.5 Tbit/s Nyquist WDM transmission*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2012. 4(10): p. 715-723.
10. Dong, Z., et al., *6x128-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*, 2012. 30(24): p. 4000-4005.

11. Winzer, P.J., *High-Spectral-Efficiency Optical Modulation Formats*. Journal of Lightwave Technology, 2012. 30(24): p. 3824-3835.
12. Bosco, G., et al., *On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers*. Journal of Lightwave Technology, 2011. 29(1): p. 53-61.
13. Fischer, J.K., et al. *Beyond 100G - high-capacity transport technologies for next generation optical core networks*. in *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, 2012. 2012.
14. Igarashi, K., et al. *1.03-Exabit/skm Super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km seven-core fiber*. in *Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition on*. 2013.
15. Palkopoulou, E., et al., *Nyquist-WDM-Based Flexible Optical Networks: Exploring Physical Layer Design Parameters*. Journal of Lightwave Technology, 2013. 31(14): p. 2332-2339.
16. วุฒิสัทธาภิบาลกิจ, ล., *หลักการไฟฟ้าสื่อสาร*. 2546, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
17. Agrawal, G.P., *Nonlinear fiber optics*. 2007: Academic press.
18. Kinh, P., et al., *Impact of noise and nonlinear distortion due to clipping on the BER performance of a 64-QAM signal in hybrid AM-VSB/QAM optical fiber transmission system*. Journal of Lightwave Technology, 1995. 13(11): p. 2197-2201.
19. Chomycz, B., *Fiber optic installer's field manual*. 2000: McGraw-Hill, Inc.
20. ITU. *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. [online] 2009; Available from: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>.
21. ยุพาพิน, ป., *เครือข่ายใยแก้วนำแสง*. 2541, กรุงเทพมหานคร: ดวงกลมสมัย.
22. ภิรมย์, บ., *การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางเฟสของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแสงในการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง*, in *ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2552*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
23. Keiser, G., *Optical fiber communications*. 2003: Wiley Online Library.

24. Vljajic, N. *Analog Transmission of Digital Data: ASK, FSK, PSK, QAM*. [online] 2010; Available from: [http://www.eecs.yorku.ca/course\\_archive/2010-11/F/3213/CSE3213\\_07\\_ShiftKeying\\_F2010.pdf](http://www.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/F/3213/CSE3213_07_ShiftKeying_F2010.pdf).
25. Ip, E., et al., *Coherent detection in optical fiber systems*. Optics express, 2008. 16(2): p. 753-791.
26. Nakazawa, M., K. Kikuchi, and T. Miyazaki, *High spectral density optical communication technologies*. Vol. 6. 2010: Springer Science & Business Media.
27. Gavioli, G., et al. *Investigation of the impact of ultra-narrow carrier spacing on the transmission of a 10-carrier 1Tb/s superchannel*. in *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*. 2010.
28. Shieh, W., Q. Yang, and Y. Ma, *107 Gb/s coherent optical OFDM transmission over 1000-km SSMF fiber using orthogonal band multiplexing*. Optics express, 2008. 16(9): p. 6378-6386.
29. Curri, V., et al. *Optimization of DSP-based Nyquist-WDM PM-16QAM Transmitter*. in *European Conference and Exhibition on Optical Communication*. 2012. Optical Society of America.
30. Zhang, J., et al. *Adaptive PMD compensation based on DSP in optical transmission systems*. in *Industrial Electronics & Applications, 2009. ISIEA 2009. IEEE Symposium on*. 2009. IEEE.
31. ชลอคคุณวัฒน์, น., การศึกษาทางทฤษฎีเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบโอโอเค ดีพีเอสเค ดีควีพีเอสเค และเอ็นควีเอเอ็ม, in *ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2012, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.
32. Bononi, A., P. Serena, and N. Rossi. *Nonlinear limits in single- and dual-polarization transmission*. in *Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2010 IEEE*. 2010.
33. Chien, H.C., et al., *Performance Assessment of Noise-Suppressed Nyquist-WDM for Terabit Superchannel Transmission*. Journal of Lightwave Technology, 2012. 30(24): p. 3965-3971.



34. Ekanayake, N. and H. Herath. *Performance of QAM signals in optical fiber links in the presence of nonlinear phase noise*. in *2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems*. 2013. IEEE.





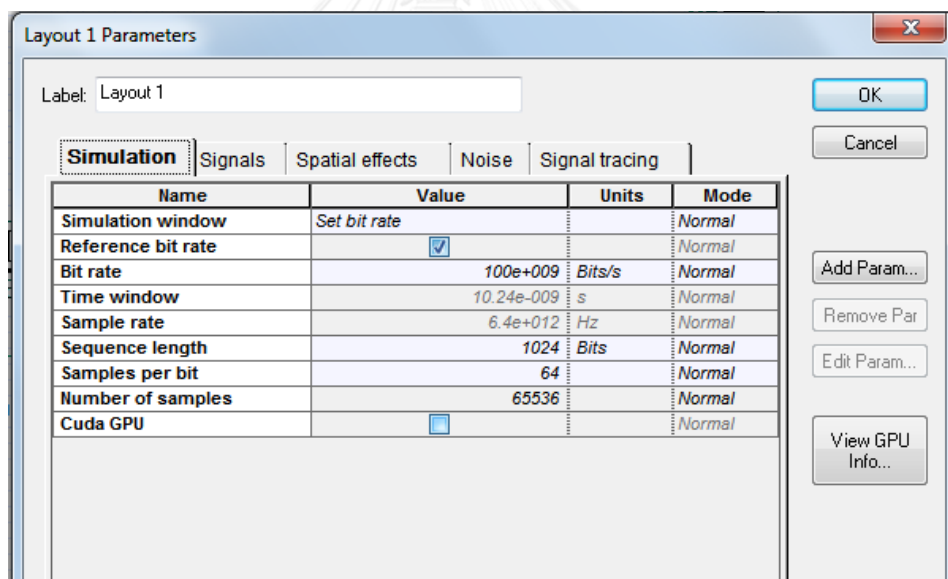
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โครงสร้างการออกแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณ PDM 4-QAM ร่วมกับการตรวจสอบสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติและ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจสอบสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel ด้วยโปรแกรม optisystem software แสดงการกำหนดค่าตัวแปรของอุปกรณ์แบ่งเป็นสี่ส่วน ส่วนแรกกล่าวถึง global parameter ของระบบ ส่วนที่ 2 อธิบายโครงสร้างภาคส่งและภาครับของระบบ PDM 4-QAM ร่วมกับการใช้การตรวจสอบสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณปกติ ส่วนที่ 3 คือโครงสร้างภาคส่งและภาครับของระบบ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจสอบสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ช่องสัญญาณแบบ Superchannel และส่วนสุดท้ายอธิบายลักษณะของเส้นใยแสงที่ใช้กับทั้งสองระบบ

### global parameter

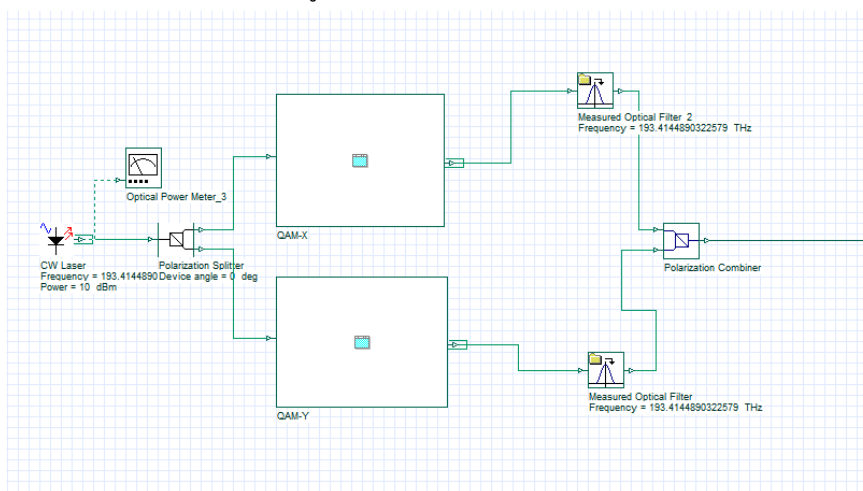
การกำหนดค่า global parameter ของระบบได้แก่ อัตราข้อมูลของระบบ (bit rate) เท่ากับ 100 Gb/s ต่อ 1 แคนโพลาริเซชัน จำนวนบิตที่ส่งสัญญาณ (sequence length) เท่ากับ 1024 บิต และอัตราการสุ่มสัญญาณช่วงเวลา 1 คาบ (sample per bit) เท่ากับ 64 แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ค่า global parameter ของระบบ

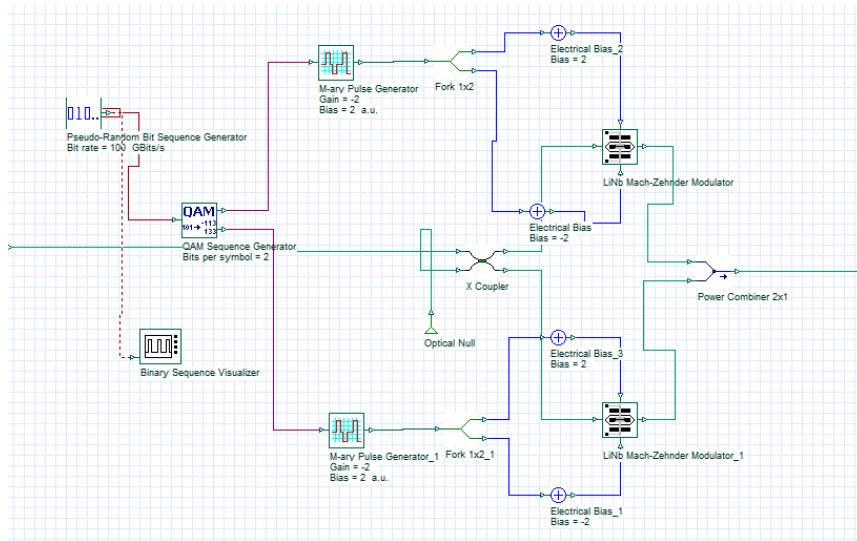
## ระบบ PDM 4-QAM ร่วมกับใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ของสัญญาณปกติ

ภาคส่งของระบบประกอบด้วย CW laser ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแสงโดยกำหนดให้ใช้ความยาวคลื่นบนช่วง c band นำไปต่อกับตัวแยกสัญญาณโพลาไรซ์เพื่อส่งสัญญาณใช้ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร กำหนดให้ใช้ในย่านความถี่เท่ากับ 193.4145 THz ส่งสัญญาณไปยังภาคส่งแกนโพลาไรซ์ทั้งสองแกนจากนั้นสัญญาณจะผ่านตัวกรองไนควิสต์ก่อนที่สัญญาณทั้งสองแกนจะรวมกันโดยตัวรวมสัญญาณโพลาไรซ์ดังรูปที่ ก.2

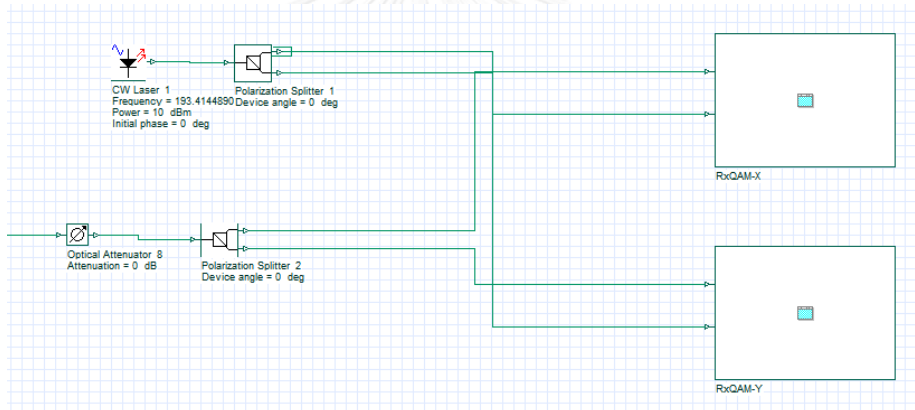


รูปที่ ก.2 โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM 4-QAM

โครงสร้าง QAM-X และ QAM-Y ของระบบ PDM 4-QAM แสดงดังรูปที่ ก.3 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า PRBS generator ส่งข้อมูลบิต 0 และ 1 ไปยัง QAM sequence generator โดยกำหนดจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์เท่ากับ 2 สำหรับการส่งสัญญาณแบบ 4-QAM จากนั้นสัญญาณจะถูกแบ่งไปยัง M-ary pulse generator เข้าสู่ electrical gain และ electrical bias โดย coupler รับสัญญาณแสงจาก CW laser เพื่อมอดูเลตสัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้าที่ LinbMZ จะได้สัญญาณ I และ Q ซึ่งถูกส่งไปยังตัวกรองไนควิสต์ก่อนที่จะส่งไปเส้นใยแสงเป็นลำดับต่อไป



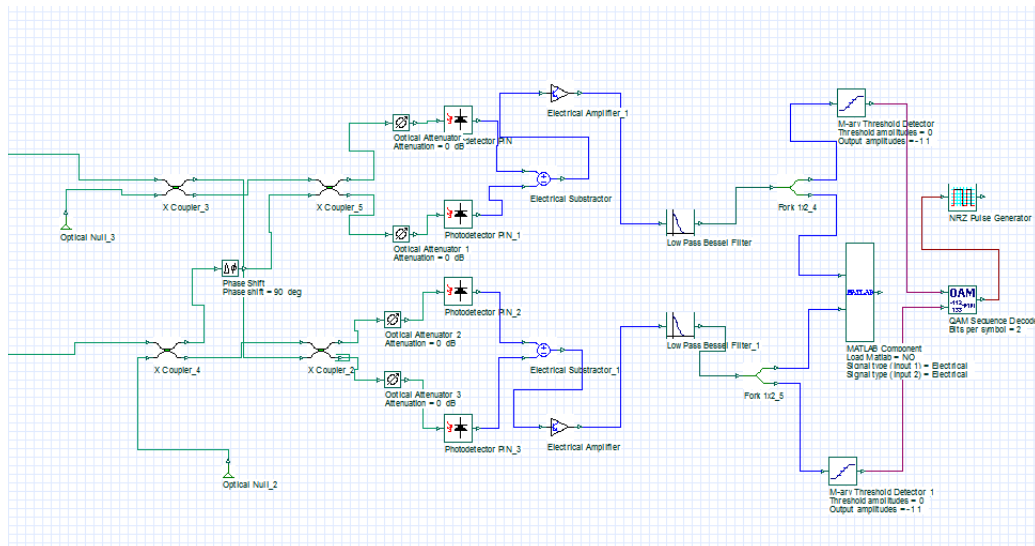
รูปที่ ก.3 ภาคส่ง QAM-X และ QAM-Y ของระบบ PDM 4-QAM



รูปที่ ก.4 โครงสร้างภาครับของระบบ PDM 4-QAM

ภาครับของระบบ PDM 4-QAM สัญญาณที่มาจากเส้นใยแสงจะถูกแยกออกเป็นสองแกนด้วยตัวแยกสัญญาณโพลาไรซ์ จากนั้นส่งไปยังภาครับของแกนโพลาไรซ์เซชันแต่ละแกนและมีโคคอลลอสซิลเลเตอร์สร้างสัญญาณที่มีความถี่ตรงกันกับสัญญาณข้อมูลมาแยกสัญญาณด้วยตัวแยกสัญญาณโพลาไรซ์จากนั้นส่งไปยังภาครับของแกนโพลาไรซ์เซชันแต่ละแกนเช่นกันดังรูปที่ ก.4 ต่อจากนั้นสัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกคูณกับสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันที่สร้างมาจากโคคอลลอสซิลเลเตอร์เพื่อตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ทำให้สัญญาณแสงที่เข้ามาถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วผ่านตัวกรองความถี่ต่ำเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกถัดจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณและวัดอัตราบิดผิดพลาดของระบบที่ matlab component และไปยัง M-ary threshold- detector

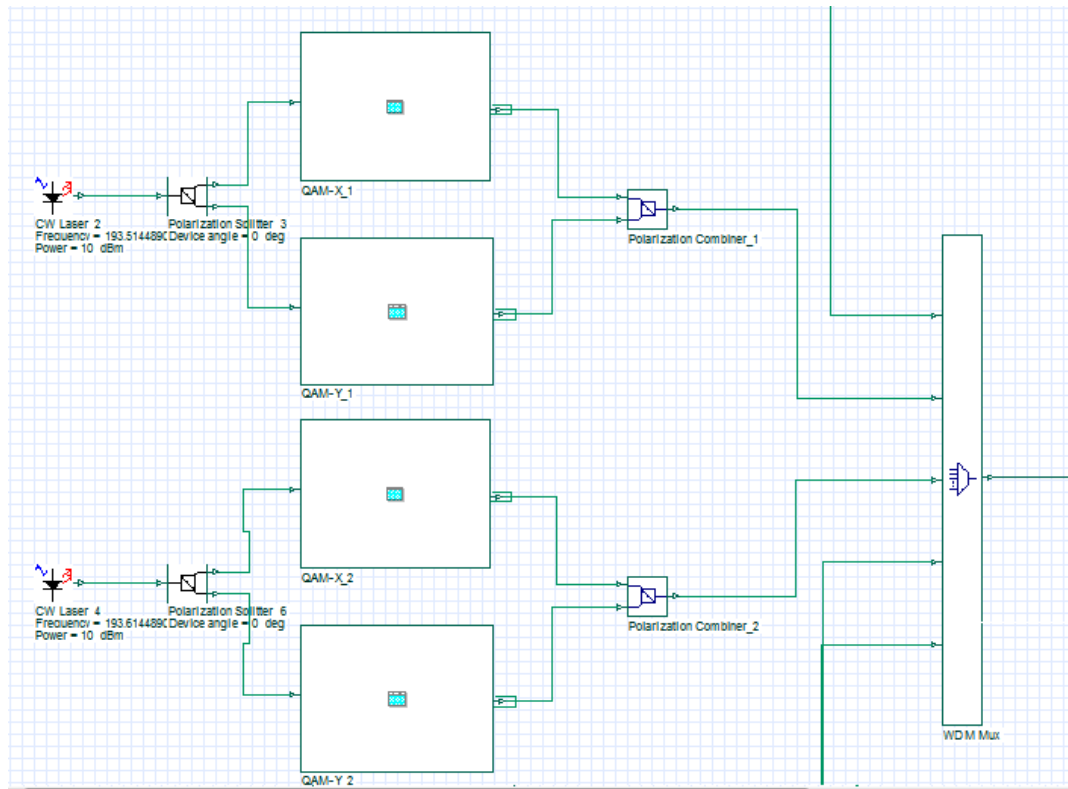
ที่ทำหน้าที่ถอดรหัสของพัลส์สัญญาณหลายระดับ สัญญาณ I และ Q จะรวมกันที่ QAM sequence decoder ถอดรหัสได้ข้อมูลออกมา ดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 ภาครับ QAM-X และ QAM-Y ของระบบ PDM 4-QAM

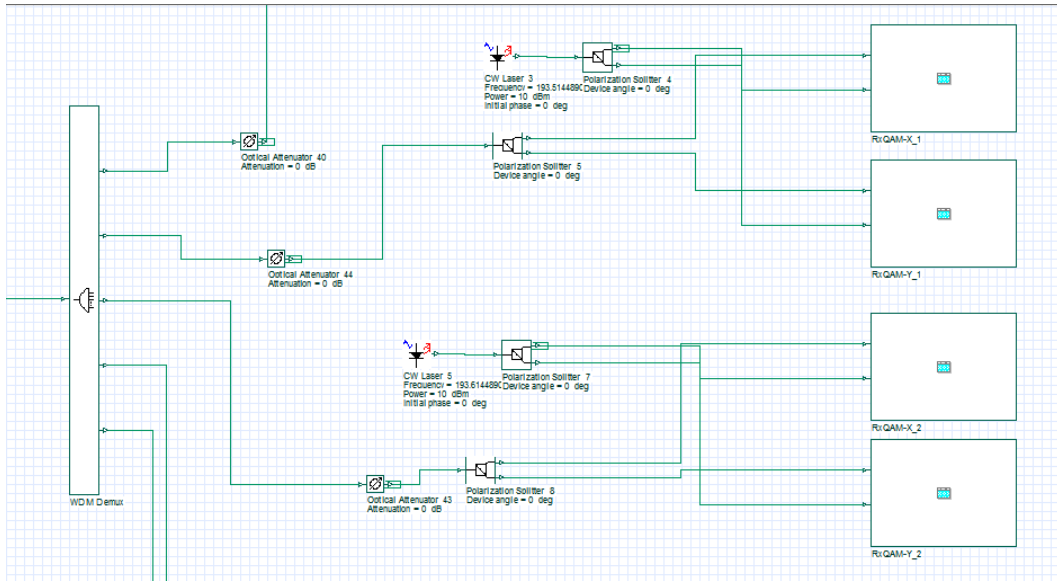
ระบบ PDM 4-QAM บน N-WDM ร่วมกับการใช้การตรวจจับสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ ช่องสัญญาณแบบ Superchannel

ภาคส่งสัญญาณของระบบประกอบด้วย CW laser ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแสงโดยกำหนดให้ใช้ความยาวคลื่นบนช่วง c band นำไปต่อกับตัวส่งสัญญาณมีลักษณะโครงสร้างเหมือนระบบ PDM 4-QAM แล้วรวมสัญญาณจาก 5 ช่องสัญญาณที่อุปกรณ์ WDM multiplexing มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 100 GHz เพื่อส่งไปยังเส้นใยแสงใช้ความยาวคลื่น 1550, 1549.199, 1548.398, 1547.599 และ 1546.801 นาโนเมตร กำหนดให้ใช้ในย่านความถี่เท่ากับ 193.4145, 193.5145, 193.6145, 193.7145 และ 193.8145 THz ตามลำดับแสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 โครงสร้างภาคส่งของระบบ PDM N-WDM

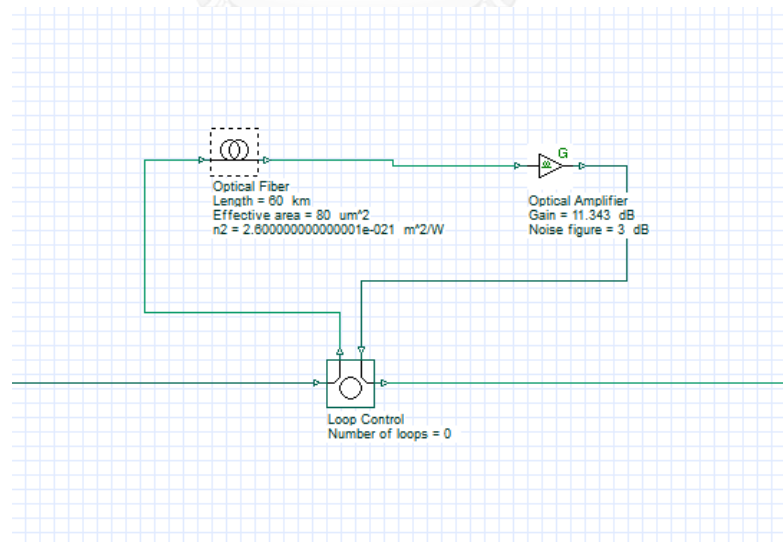
โครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM ประกอบด้วย WDM DEMUX ซึ่งรับสัญญาณแสงมาจากเส้นใยแสงทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกันมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 100 GHz จากนั้นแสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกแยกออกเป็นสองแกนที่ภาครับของแต่ละแกนมีโครงสร้างเหมือนระบบ PDM 4-QAM แสดงดังรูป ก.7



รูปที่ ก.7 โครงสร้างภาครับของระบบ PDM N-WDM

**เส้นใยแสง**

เส้นใยแสงเป็นปัจจัยหลักในการจำกัดขีดความสามารถของระบบเพราะมีผลจากการลดทอนกำลังของสัญญาณซึ่งใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณในการชดเชยดังรูปที่ ก.8 นอกจากนี้ยังมีผลของดิสเพอร์ชัน การกระจายโหมดโพลาริซ และความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงตามมาตรฐานเส้นใยแสงโหมดเดียว ITU-T G.652.D



รูปที่ ก.8 เส้นใยแสง



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรวิมล เพ็ญศรี เกิดวันอังคารที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 1 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 Superchannel N-WDM Signal Transmission