

การศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสมรรถนะของวิธีสังยุคเฟสทางแสงสำหรับการสื่อสารสัญญาณแสง
ดีพีเอสเคระยะทางไกลยิ่ง



นายณัฐ สารพา

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THEORETICAL STUDY ON THE PERFORMANCE OF OPTICAL PHASE CONJUGATION
FOR ULTRA LONG-HAUL DPSK TRANSMISSION



Mr.Nat Sarapa

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Academic Year 2006


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาดุษฎีเกี่ยวกับสมรรถนะของวิธีสังยุคเฟลททางแสง ดีทีเอสเคระยะไกลยิ่ง
โดย	นายณัฐ สารพา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ทิเรก ลาวันยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลุ แก้วปลั่ง)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสิริพิบูลกิจ)

สถาบันวิจัยนวัตกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#4870281321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTICAL PHASE CONJUGATION / NONLINEAR PHASE NOISE / DPSK TRANSMISSION / KERR EFFECT / ACCUMULATED NOISE

NAT SARAPA : THEORETICAL STUDY ON THE PERFORMANCE OF OPTICAL PHASE CONJUGATION FOR ULTRA LONG-HAUL DPSK TRANSMISSION.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 87 pp.

This thesis studies the nonlinear phase error caused by the accumulation of noise generated by the Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) through Kerr effect in optical transmission using optical phase conjugation. The thesis also presents the important factors affecting the performance of optical phase conjugation for ultra long-haul DPSK transmission in both single-channel and wavelength-division-multiplexed (WDM) transmission in comparison with the dispersion-compensated system. The numerical simulation of optical DPSK transmission is performed for proving the analytical study result.

According to the results of thesis study, optical phase conjugation (OPC) system can significantly reduce the effect of self-phase modulation (SPM) in both normal dispersion region, and anomalous dispersion region, in which the OPC system can clearly reduce modulation instability. For both single-channel and WDM transmission, the studied results and the simulation results show that, for relatively low data rate such as 5 Gbps, the dispersion-compensated system yields the greater performance than the optical phase conjugation system. However, for high data rate such as 40 Gbps, the optical phase conjugation system gives in better performance than the dispersion-compensated system. This is because the nonlinear enhancement of noise is greatly reduces in OPC system since the relatively high dispersion is accumulated to the system midpoint without compensation. We demonstrated that the suitable channel spacing for long-haul WDM transmission is 100 GHz for the data rate of 40 Gbps.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....

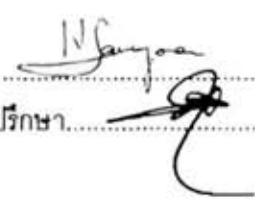
Academic year2006.....

ณัฐ สารพา : การศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสมรรถนะของวิธีสังยุคเฟสทางแสงสำหรับการสื่อสารสัญญาณแสงดิฟเฟอเรนเชียลแบบไกลยิ่ง. (THEORETICAL STUDY ON THE PERFORMANCE OF OPTICAL PHASE CONJUGATION FOR ULTRA LONG-HAUL DPSK TRANSMISSION)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. พลุ แก้วปลั่ง, 87 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาความผิดปกติที่เกิดจากการสะสมแบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) ของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณทางแสงแบบ Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) ในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงในเชิงทฤษฎี และนำเสนอปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงสำหรับการสื่อสารสัญญาณทางแสงดิฟเฟอเรนเชียลแบบไกลยิ่งทั้งรูปแบบการส่งช่องสัญญาณเดียวและการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นนำมาเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้การชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion) เป็นรายคาบ ในการตรวจสอบผลการศึกษาในเชิงทฤษฎีทำโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเดินทางของสัญญาณทางแสงแบบดิฟเฟอเรนเชียลในระบบที่ทำการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบสามารถลดผลกระทบจาก Self-phase modulation (SPM) ในกรณี Normal dispersion ส่วนกรณี Anomalous dispersion สามารถลดผล Modulation Instability (MI) ได้อย่างเห็นได้ชัด ผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งการศึกษาในทางทฤษฎีและการสร้างแบบจำลองแสดงถึงว่าในระบบการส่งสัญญาณแบบช่องสัญญาณเดียวและแบบมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่อัตราบิตต่ำเช่น 5 Gbps ระบบชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ แต่ในการส่งอัตราบิตสูงเช่น 40 Gbps ระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ เพราะว่าในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงสามารถลดผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณรบกวนได้อย่างมาก เนื่องจากผลของการไม่ชดเชยการสะสมของ Dispersion ถึงกึ่งกลางระบบ นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่เหมาะสมในการส่งสัญญาณแบบมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นอยู่ที่ 100 GHz ที่อัตราส่งข้อมูล 40 Gbps

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา2549.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....


กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง ซึ่งมีส่วนช่วยในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงหลักการคิดเชิงวิเคราะห์และเชิงวิพากษ์ ตลอดจนคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์เปรียบเสมือนรากฐานและแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา (Cooperation Project between department of electrical engineering and private sector research and development) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 1 ปี

สิ่งดีๆ ที่ได้รับจากทุกคนล้วนเป็นส่วนสำคัญในการรังสรรค์ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบผลสำเร็จ ดังนั้นจึงไม่มีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	6
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	7
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน	7
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	10
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	10
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง.....	12
2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation loss).....	13
2.2.2 Group velocity dispersion (GVD).....	14
2.2.3 Kerr effect.....	15
2.3 การมอดูเลตสัญญาณทางแสง (Optical modulation).....	18
2.3.1 การมอดูเลตทางความเข้มแสง	18
2.3.2 การมอดูเลตแบบ DPSK	18
2.3.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างการมอดูเลตความเข้มแสงและการมอดูเลต DPSK	19
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ (Optical Phase Conjugation for long-haul Transmission)	20
3 การวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับคลื่นพาห้ความถี่เดียว.....	22

บทที่	หน้า
3.1 การหาผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion.....	22
3.2 การหาผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion.....	24
3.3 การหาผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ.....	25
3.4 การหาผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ.....	27
3.5 การหาผลตอบสนองของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ใช้วิธีชดเชยค่า Dispersion แบบเป็นรายคาบ.....	31
4 แบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยว.....	36
4.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวที่ใช้วิธีการสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ.....	36
4.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงและการวิเคราะห์ผลลัพธ์.....	38
4.3 แบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion.....	39
4.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion และการวิเคราะห์ผลลัพธ์.....	40
4.5 แบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบโดยปรับเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณทางแสง.....	44
5 การวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับสองความถี่ต่างกัน.....	46

บทที่	หน้า
5.1 การหาความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับสองคลื่นพาห้ความถี่ต่างกันในระบบที่ไม่มี การชดเชย Dispersion	46
5.2 การหาความผิดพลาดเฟสของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ	54
5.3 การหาความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้สองความถี่ต่างกันในระบบที่ชดเชย Dispersion เป็นรายคาบ.....	59
5.4 การเปรียบเทียบความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้สองความถี่ต่างกันในระบบที่มีและไม่มี การชดเชย Dispersion เป็นรายคาบ กับระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ	63
6 แบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณ.....	67
6.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ	67
6.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์	68
6.3 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ...	74
6.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ และการวิเคราะห์ผลลัพธ์.....	75
6.5 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK แบบมัลติเพลกซ์มากกว่า 2 ช่องสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์	77
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	82
7.1 บทสรุป	82

7.2	ข้อเสนอแนะ	83
	รายการอ้างอิง.....	84
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	87



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่า Q-Factor ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion	40
ตารางที่ 4.2 ค่า Q-Factor ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเปรียบเทียบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ที่อัตราบิต 5 Gbps	42
ตารางที่ 6.1 ค่า Q-Factor ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ที่อัตราบิต 5 Gbps	76



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง	11
รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล.....	12
รูปที่ 2.3 Optical fiber attenuation vs. wavelength	13
รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น	14
รูปที่ 2.5 การแสดงการเกิด Inter-symbol interference	15
รูปที่ 2.6 การขยายออกสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก SPM ในเส้นใยแสงที่มี สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมาก	16
รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณสังยุคเฟสโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium.....	21
รูปที่ 3.1 การวางตำแหน่งของเครื่องขยายสัญญาณในระบบ	24
รูปที่ 3.2 การเดินทางของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบที่ใช้ เครื่องสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ	25
รูปที่ 3.3 การเดินทางของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในแต่ละตัวใน ระบบที่ใช้เครื่องสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ.....	26
รูปที่ 3.4 ระบบที่สมมูลกับระบบในรูปที่ 3.3	26
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $-0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$	28
รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $-5 \text{ ps}^2/\text{km}$	28
รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$	29
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$	29
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $5 \text{ ps}^2/\text{km}$	30
รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $20 \text{ ps}^2/\text{km}$	30
รูปที่ 3.11 Dispersion management technique.....	32

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 1 mW.....	33
รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 3 mW.....	33
รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 5 mW.....	34
รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้ และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 7 mW.....	34
รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลต DPSK Return-to-Zero (RZ-DPSK) ช่องสัญญาณเดียวที่ใช้วิธีสังยุคเฟส ทางแสงที่กึ่งกลางระบบ.....	37
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งขาเข้ากับ Q-Factor.....	38
รูปที่ 4.3 Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ มีระยะห่างเครื่อง ขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ระยะทาง 5000 km แต่ละกำลังส่งขาเข้า (ก) 1 mW (ข) 3 mW (ค) 5 mW (ง) 7 mW.....	39
รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลต DPSK Return-to-Zero (RZ-DPSK) ช่องสัญญาณเดียวที่ใช้วิธีชดเชย Dispersion.....	40
รูปที่ 4.5 Eye Pattern ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion มีระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณ เท่ากับ 50 km ระยะทาง 5000 km แต่ละกำลังส่งขาเข้า (ก) 1 mW (ข) 3 mW (ค) 5 mW (ง) 7 mW.....	41
รูปที่ 4.6 Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเปรียบเทียบกับ ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ การส่งข้อมูลที่อัตราบิต 5 Gbps.....	43
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่ง กลางระบบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ.....	44

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้น
ใยแสงที่มีค่า $GVD = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุค
เฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 mW 58

รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้น
ใยแสงที่มีค่า $GVD = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุค
เฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 mW 59

รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการ
ชดเชย Dispersion ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ Channel Spacing 25 GHz 61

รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการ
ชดเชย Dispersion ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ Channel Spacing 50 GHz 61

รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการ
ชดเชย Dispersion ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ Channel Spacing 100 GHz 62

รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และ
ไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นราย
คาบ 63

รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และ
ไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นราย
คาบ 64

รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และ
ไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นราย
คาบ 64

รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และ
ไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นราย
คาบ 65

รูปที่ 6.1 แผนภาพบล็อกระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น
ด้วยการมอดูเลต DPSK ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ 68

รูปที่ 6.2 Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบแบบมัลติเพลกซ์ 2
ช่องสัญญาณ ระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ระยะทาง 5000 km มี
กำลังสัญญาณขาเข้า (ก) 1 mW (ข) 3 mW (ค) 5 mW (ง) 7 mW 70

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้า = 1, 3, 5 และ 7 mW กรณีมีมัลติเพลกซ์แบบ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz.....	71
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้า = 1 mW กรณีมีมัลติเพลกซ์แบบ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50, 75, 100 และ 125 GHz.....	72
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้า = 3 mW กรณีมีมัลติเพลกซ์แบบ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50, 75, 100 และ 125 GHz.....	72
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบแบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz ในเส้นใยแสงชนิด SMF, NZDSF- และ NZDSF+	73
รูปที่ 6.7 แผนภาพบล็อกระบบสี่สัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่นด้วยการมอดูเลต DPSK ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ	75
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเปรียบเทียบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz มีกำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW	76
รูปที่ 6.9 ช่องสัญญาณที่ใช้วัดค่า Q-factor	78
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz โดยจำนวนช่องสัญญาณ 2 3 และ 5	78
รูปที่ 6.11 การแสดงลักษณะการซ้อนทับของสัญญาณพัลส์ที่ให้ค่ามากที่สุดและน้อยสุดของสหสัมพันธ์กำลังงาน	80

บทที่ 1

บทนำ

การสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ดังนั้นการพัฒนา ศักยภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารจึงได้รับความสนใจทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจาก นักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญมากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางในการ พัฒนารูปแบบ และวิธีการซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยเนื้อหาในบท นี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของ วิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการ ดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การติดต่อสื่อสารของมนุษย์มีมาช้านานนับแต่มีการก่อกำเนิดของมนุษยชาติ การสื่อสาร ในยุคแรกๆ มีรูปแบบแตกต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็นการใช้ภาษา การแสดงอากัปกิริยา ท่าทาง รูปภาพ สัญลักษณ์ควีน และวิธีการอื่นๆ ในอดีตการสื่อสารเกิดขึ้นได้เฉพาะในขอบเขตที่จำกัด กล่าวคือ การสื่อสารของคนสองคนจะมีประสิทธิภาพได้จะต้องอยู่ในระยะที่สามารถมองเห็นกัน หรืออยู่ในระยะ ใกล้กันเท่านั้น หากบุคคลทั้งสองอยู่ห่างกันไกลการสื่อสารก็จะยากลำบากมากขึ้น

ต่อมาในราวปี ค.ศ. 1837 การติดต่อสื่อสารของมนุษย์ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมาก นับแต่ การคิดค้นระบบโทรเลข (Telegraph) [1] ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Samuel Morse การคิดค้นนี้ช่วยให้ มนุษย์สามารถส่งสัญญาณไฟฟ้ารูปพัลส์ผ่านสายนำสัญญาณทองแดง (Copper wire) ระยะ ทางไกลได้ การส่งข้อมูลในเวลานั้นอาศัยพัลส์เพียง 2 ขนาดคือ ขนาดสั้นและยาว หรือที่เรียกว่า จุด (dot) และขีด (dash) เพื่อใช้ในการเข้ารหัสแทนอักขระแต่ละตัว ในการส่งสัญญาณระยะ ทางไกลนั้นจะต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) วางอยู่ในระบบเป็นคาบ

ต่อมาในปี ค.ศ. 1876 Alexander Graham Bell ได้คิดค้นระบบโทรศัพท์ (telephone) ขึ้น เป็นครั้งแรก การค้นพบครั้งนั้นทำให้มนุษย์สามารถติดต่อสนทนากันแม้จะอยู่ห่างกันในระยะ ทางไกลได้ หลักการของระบบโทรศัพท์อาศัยการแปลงสัญญาณเสียงให้อยู่ในรูปของ สัญญาณไฟฟ้าและส่งสัญญาณไฟฟ้านั้นผ่านสายนำสัญญาณเสียงอีกครั้ง และในปี ค.ศ. 1880 Alexander Graham Bell ได้ประดิษฐ์เครื่องโฟโตโฟน (Photophone) [2] เป็นโทรศัพท์ที่ใช้แสง

เป็นคลื่นพาห้ (carrier wave) และใช้อากาศเป็นสื่อกลางในการติดต่อสื่อสารสามารถติดต่อได้ในระยะทางประมาณ 200 เมตร แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในระบบการสื่อสารจริงๆได้ เพราะฉะนั้นการสื่อสารในช่วงก่อนเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 จะเป็นการสื่อสารผ่านสัญญาณไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เมื่อมนุษย์มีความต้องการในการสื่อสารมากขึ้นการสื่อสารผ่านตัวกลางสายนำสัญญาณทองแดงไม่สามารถรองรับได้ความต้องการได้เพียงพอ เนื่องจากการส่งสัญญาณในความถี่สูงๆในสายนำสัญญาณทองแดงจะทำให้ส่งได้ไม่ไกลมากนัก ด้วยสาเหตุนี้ได้มีการคิดเปลี่ยนตัวกลางในการส่งสัญญาณจากสายนำสัญญาณทองแดงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟ ทำให้สามารถเพิ่มระยะทางในการส่งสัญญาณให้ไกลได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตามตามความต้องการใช้การสื่อสารของมนุษย์มากขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุด สายนำสัญญาณทองแดงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ของไมโครเวฟไม่สามารถรองรับได้อย่างพอเพียง ในปี ค.ศ. 1960 เส้นใยแสงได้ถูกนำเสนอเป็นหนึ่งในทางเลือกในการสื่อสารแทนการสายนำสัญญาณทองแดง แต่ยังไม่สามารถใช้ในการสื่อสารได้เนื่องจากการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแสงสูงมากประมาณ 1000 dB/km การสูญเสียนี้เกิดเนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุของเส้นใยแสง จึงได้มีแนวที่จะพัฒนารวมวิธีในการผลิตเส้นใยแสงเพื่อที่จะลดค่าการสูญเสียให้น้อยลง ในปี ค.ศ. 1970 Drs. Robert Maurer, Donald Keck and Peter Schultz ของบริษัท Corning Inc. ได้พัฒนาเส้นใยแสงที่ใช้ fused silica มาเป็นวัตถุดิบ [2] มีค่าการสูญเสียประมาณ 20 dB/km ด้วยเหตุนี้ในปี ค.ศ. 1970 ได้มีการพัฒนาระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงในงานวิจัยเป็นอย่างมากและนำมาใช้จริงในระบบเชิงธุรกิจ ในปี ค.ศ. 1977 มีการนำเส้นใยแสงมาใช้ในระบบโทรศัพท์ ซึ่งถือเป็นยุคแรกของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง ความยาวคลื่นที่ใช้ประมาณ 850 นาโนเมตรที่มาจากรีเอเซอร์สัญญาณแบบเลเซอร์ไดโอดที่อัตราข้อมูลอยู่ที่ 50 - 100 Mbit/s มีค่าการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงประมาณ 2 dB/km ดังนั้นต้องวางอุปกรณ์ทวนสัญญาณในระบบมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 10 km ซึ่งระยะห่างนี้ยังมากกว่าระบบที่ใช้สายนำสัญญาณทองแดงในการสื่อสาร เพื่อที่จะเพิ่มระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณในยุคที่สองได้เปลี่ยนความยาวคลื่นในการส่งสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 1300 นาโนเมตร มีค่าการสูญเสียประมาณ 0.5 dB/km และมีค่าดิสเพอชัน (dispersion) ต่ำที่สุด อัตราข้อมูลอยู่ที่ 100 Mbit/s ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณประมาณ 20 km ด้วยอัตราในการส่งข้อมูลและระยะทางที่ไกลจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นสายเชื่อม (trunk) ต่อระหว่างตึก แต่ยังไม่เหมาะสำหรับการส่งสัญญาณในระยะทางไกลมากเช่นการส่งสัญญาณใต้ทะเลระหว่างทวีป เนื่องจากผลมาจากค่า Dispersion ในเส้นใยแสงยังมีค่ามากเป็นผลทำให้ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณค่อนข้างสั้น ด้วยสาเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเส้นใยแสงแบบโหมดเดี่ยว (Single Mode Fiber) ที่ให้ค่า Dispersion เท่ากับศูนย์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1310 นาโนเมตร ในปีค.ศ. 1988 Bell Lab

ทำการวิจัยส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกเป็นครั้งแรกที่อัตราข้อมูล 565 Mbit/s โดยมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณวางเป็นรายคาบ ประมาณเดือนธันวาคมในปีเดียวกันได้ประกาศมาตรฐานในการส่งสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในเส้นใยแสงแบบโหมดเดียวที่ความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร ในยุคที่สามประมาณปี ค.ศ. 1990 บริษัท Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาเส้นใยแสงที่มีค่าการสูญเสียประมาณ 0.2 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรเพื่อที่จะเพิ่มระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณให้มากขึ้นที่เกิดมาจากการสูญเสียในเส้นใยแสง แต่มีผลกระทบของ Dispersion ค่อนข้างมาก ต่อมาบริษัท Corning Inc. ได้ผลิตเส้นใยแสงแบบ Dispersion Shifted Fiber (DSF) มีค่าการสูญเสียเท่ากับ 0.2 dB/km และให้ค่า Dispersion เท่ากับศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรทำให้ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณระยะห่างที่มากขึ้น ถึงอย่างนั้นอัตราข้อมูลที่ส่งอยู่ที่ประมาณ 10 Gbit/s ปัจจุบันที่ทำให้ระบบสื่อสารทางแสงระยะไกลไม่สามารถส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูลสูงมากไปกว่านี้ได้เนื่องจากเกิดปัญหาคอขวดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องอาศัยการเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นไฟฟ้าและเป็นแสงอีกครั้ง (Optical-to-electrical-to-optical: OEO) ในยุคที่สี่เครื่องขยายสัญญาณทางแสงแบบอีดีเอฟเอ (EDFA) ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย Dave Payne [3] เป็นผู้ค้นคิด โดยเครื่องขยายสัญญาณนี้สามารถขยายสัญญาณทางแสงโดยไม่ต้องแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน และคุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องขยายสัญญาณนี้คือสามารถขยายสัญญาณทางแสงได้พร้อมกันหลายความยาวคลื่นโดยไม่คำนึงถึงอัตราข้อมูลที่ส่ง ทำให้ข้อจำกัดของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลในยุคก่อนๆหมดไป

ในยุคที่ห้า ระบบสื่อสารทางแสงระยะทางไกลต้องมีเครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอวางเป็นรายคาบเพื่อที่จะชดเชยการสูญเสียกำลังของสัญญาณที่เกิดมาจากการสูญเสียในเส้นใยแสง เมื่อมีการใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอแทนอุปกรณ์ทวนสัญญาณ ส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ภาครับมากขึ้นเป็นผลกระทบจาก Dispersion และปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) ปรากฏการณ์เคอร์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสง เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของกำลังสัญญาณที่เกิดมาจากเครื่องขยายสัญญาณส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงเปลี่ยนแปลงตามปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ Self-Phase Modulation (SPM) ของสัญญาณพัลส์ SPM กับ Dispersion จะส่งผลซึ่งกันและกันเป็นผลให้สัญญาณที่ส่งผิดเพี้ยนไป เพราะฉะนั้นในการส่งสัญญาณทางไกลจะต้องทำการลดผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจาก Kerr Effect กับ Dispersion เป็นหลัก

มีหลายงานวิจัยที่ทำการลดผลความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล วิธีที่ถูกนำเสนอออกมา มี 3 วิธีหลักๆ คือ 1. การจัดการผลกระทบของ Dispersion (Dispersion Management) [4] 2. การลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยใช้ผลกระทบของ Dispersion หักล้างผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง (Soliton Transmission) [5] 3. การใช้วิธีสังยุคเฟสแสง (Optical phase conjugation, OPC) วิธีที่นิยมใช้กับระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงในปัจจุบันคือวิธีการจัดการผลกระทบของ Dispersion ในระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงระยะทางไกลมากผลของ Kerr Effect มีผลมากขึ้นซึ่งวิธีนี้ไม่ได้ลดผลความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจาก Kerr Effect วิธีที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงหรือวิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเป็นวิธีที่สามารถลดผลของ Dispersion และผลของ Kerr Effect โดยการนำอุปกรณ์สังยุคเฟสทางแสงวางไว้ที่กึ่งกลางระบบ การใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1979 โดย Yariv A. ได้เสนอว่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นสามารถที่จะชดเชยได้โดยการใช้เครื่องสังยุคเฟสทางแสงทางแสงวางไว้ที่กึ่งกลางระบบและโดยมีเงื่อนไขที่ว่า ค่า Dispersion ของเส้นใยแสงในฝั่งครั้งแรกและครั้งที่สองของระบบจะต้องมีคุณสมบัติเหมือนกัน [6] ในปี ค.ศ. 1983 Fisher ได้นำเสนอว่าทั้งค่า Dispersion และความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสงสามารถชดเชยได้โดยวิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในเส้นใยแสงที่ไม่มีการสูญเสีย [7] แต่วิธีการนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในระบบจริงได้เนื่องจากมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่วางอยู่ในระบบทำหน้าที่สร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่วิธีการนี้จึงไม่มีความจำเป็นจนกระทั่งมีการค้นคิดเครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอวิธีการคอนจูเกตทางแสงได้ถูกนำกลับมาพิจารณาอีกครั้ง ในปี ค.ศ. 1993 Kikuchi ได้ทำการจำลองส่งสัญญาณในระบบระยะทางไกลที่มีเครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอวางเป็นรายคาบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ สามารถลดผลของ Dispersion ได้หมดแต่ไม่สามารถผลของปรากฏการณ์เคอร์รี่ได้สมบูรณ์ [8] แสดงให้เห็นว่าในระบบที่มีระยะทางสั้น วิธีสังยุคเฟสทางแสงสามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการกระจายออกของสัญญาณและความไม่เป็นเชิงเส้นได้เกือบสมบูรณ์ แต่ในระยะทางไกลไม่สามารถลดได้สมบูรณ์เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณเป็นรายคาบและการเปลี่ยนแปลงไปมาของค่า Dispersion [9]

ในช่วงประมาณ 1-2 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอกฎที่เพิ่มสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงในระยะทางไกลอย่างมากมาย หนึ่งในวิธีการเพิ่มสมรรถนะของระบบคือการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตของสัญญาณแสง ตั้งแต่มีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงรูปแบบการมอดูเลตที่ใช้เป็นการมอดูเลตสัญญาณแบบเปิดปิด (On-off keying, OOK) อยู่ทั้งในแบบกลับสู่ศูนย์ (RZ) และ แบบไม่กลับสู่ศูนย์ (NRZ) ซึ่งการใช้รูปแบบสัญญาณดังกล่าวยังไม่สามารถดึงเอาศักยภาพที่แท้จริงของระบบมาใช้ได้ ดังนั้นการเปลี่ยนไปใช้การมอดูเลตสัญญาณขั้นสูง

(Advanced Modulation Format) เช่น ดูโอไบนารี (Duobinary), แอลเทิร์นมาร์คอินเวอร์ชัน (AMI), ซีเอสอาร์แซด (Carrier-suppressed return-to-zero, CSRZ) และ ฟีสเชค (Phase-shift keying, PSK) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้การมอดูเลตแบบ DPSK (DPSK) [10] ซึ่งมีข้อดีกว่า OOK คือ มีความต้องการอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนทางแสง (OSNR) เพียงครึ่งหนึ่งของ OOK เพื่อให้ได้อัตราความผิดพลาดบิต (BER) ที่เท่ากันเมื่อใช้กับเครื่องรับสัญญาณแบบสมดุล (Balanced Detector) [10] - [11] และยังมีความทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity) สูง เนื่องจากมีกำลังสัญญาณที่คงและมีกำลังค่ายอดที่ต่ำกว่า OOK เมื่อใช้กำลังงานเฉลี่ยที่เท่ากัน

อันที่จริงแล้ว DPSK มีใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980-1990 เนื่องจากสามารถส่งไปได้ไกลกว่า OOK เมื่อใช้กำลังงานที่เท่ากัน แต่เมื่อมีการค้นพบอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบอดีเฟพเอนทำให้ความนิยมใน DPSK ลดลง เพราะกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณไม่ได้เป็นข้อจำกัดอีกต่อไป ทั้งการใช้ DPSK ยังมีความยุ่งยากในการรับสัญญาณที่ต้องใช้อุปกรณ์แบบอาพันธ์ (Coherent) อีกด้วย แต่ในปัจจุบันงานวิจัยที่ใช้ OOK ในการส่งสัญญาณได้มาถึงข้อจำกัดแล้ว ดังนั้นงานวิจัยสมัยใหม่จึงเริ่มกลับมาสนใจการใช้ DPSK อีกครั้งหนึ่ง โดยงานวิจัยเหล่านี้ได้นำเสนอถึงสมรรถนะของการมอดูเลต DPSK เทียบกับการมอดูเลตความเข้มแสง [12]-[13] และยังมีงานวิจัยซึ่งได้กล่าวถึงการลดผลกระทบของ Kerr Effect ที่มีความเกี่ยวเนื่องกับ Dispersion ของการมอดูเลต DPSK เทียบกับการมอดูเลตความเข้มแสง [14]-[15] การมอดูเลต DPSK ได้มีการทดลองส่งสัญญาณในเส้นใยแสงอยู่หลากหลายรูปแบบเช่น การส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นขนาด 38×43 Gbit/s ด้วยความห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็น 50 GHz บนระยะทาง 300 km ทำให้ได้ค่า Q ของแต่ละช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นไม่ต่ำกว่า 11 dB [16] การส่งสัญญาณที่ใช้การมอดูเลต DPSK ด้วยอัตราบิต 2.5 Tbit/s (64×42.7) ในระบบการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น เป็นระยะทาง 4,000 km [17] การทดลองเพื่อหาข้อจำกัดของการมอดูเลต DPSK เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางเฟสเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง [18] และการทดลองเพื่อที่จะหาผลกระทบของความห่างระหว่างช่องสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนทางเฟสในระบบแบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น (WDM) [19] เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2006 ได้มีงานวิจัยทำการเพิ่มสมรรถนะในระบบสี่ช่องสัญญาณทางแสงระยะทางไกลมากในรูปแบบการมอดูเลตดีเฟสโดยใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ [20] ผลปรากฏว่าการส่งสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบส่งระยะทางได้ไกลกว่าระบบที่มีการชดเชยค่า Dispersion ประมาณร้อยละ 44 และค่า Q-factor เพิ่มขึ้นถึง 4 dB และการลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดมาจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบด้วยวิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบสามารถลดได้เกือบสมบูรณ์ในระบบการมอดูเลตทางความเข้มแสง แต่ยังมี

ไม่มีการวิจัยใดที่วิเคราะห์สมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ DPSK โดยใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในช่องสัญญาณเดี่ยวและหลายช่องสัญญาณในเชิงทฤษฎี คำนี้ความผิดพลาดทางเฟสที่เกิดมาจากการสะสมของสัญญาณรบกวนในเครื่องขยายสัญญาณแบบอดีเอฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้นำเสนอปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ DPSK ที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความผิดพลาดทางเฟสในทางทฤษฎีซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนที่สะสมแบบไม่เป็นเชิงเส้นอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ ในระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ DPSK ที่ไม่มีการชดเชย Dispersion, ระบบที่มีการชดเชย Dispersion แบบเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในช่องสัญญาณเดี่ยวและหลายช่องสัญญาณ

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

การออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณให้ได้อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดในระยะทางที่กำหนดเป็นเป้าหมายที่ทุกองค์กรคาดหวัง ดังนั้นการนำวิธีการมอดูเลต DPSK มาใช้ในการสื่อสารสัญญาณจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนรูปแบบมอดูเลตเป็นแบบ DPSK นั้นยังไม่เพียงพอต่อการรักษาคุณภาพสัญญาณที่ภาครับในระบบการสื่อสารสัญญาณระยะทางไกลมาก สาเหตุเกิดเนื่องมาจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณที่วางอยู่เป็นรายคาบ สัญญาณรบกวนเหล่านี้จะถูกขยายโดยปรากฏการณ์ Kerr และ Dispersion การใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเป็นวิธีที่สามารถลดผลของ Dispersion และ Kerr Effect พร้อมกันได้ทำให้สามารถเพิ่มระยะทางในการส่งสัญญาณได้ไกลมากขึ้นในอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ที่เท่ากัน ผลกระทบของการสะสมสัญญาณรบกวนจึงเป็นปัจจัยหลักต่อคุณภาพของสัญญาณที่ภาครับ ดังนั้นการวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณเปรียบได้กับการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบการส่งสัญญาณระยะทางไกลแบบ DPSK จึงเป็นจุดเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

การวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสจะเริ่มจากการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ว่าการสะสมของสัญญาณรบกวนทางเฟสที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณแบบอดีเอฟจะส่งผลให้มีความผิดพลาดเฟสมากหรือน้อยเพียงใด เราแบ่งการวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสในทางทฤษฎีที่จะทำการวิจัยค้นคว้าออกเป็นสามส่วนคือ ระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion (Dispersion compensation) ระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ (Optical Phase Conjugation)

และระบบที่ทำการชดเชย Dispersion รวมไปถึงการวิเคราะห์ถึงความสำคัญของแต่ละตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความผิดพลาดเฟส นอกจากนี้การวิเคราะห์ความผิดพลาดทางเฟสยังสามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบที่มีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นเพื่อให้ได้ความห่างระหว่างช่องสัญญาณน้อยที่สุด

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. วิเคราะห์และเปรียบเทียบความผิดพลาดทางเฟส เนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายโดยปรากฏการณ์เคอร์รี่ในระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้การมอดูเลตแบบ DPSK ในระบบปกติและระบบที่ใช้การชดเชย Dispersion โดยการวาง Dispersion Compensation Unit แบบเป็นรายคาบ ทั้งในระบบช่องสัญญาณเดี่ยวและในระบบที่ใช้การมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (WDM) พร้อมทั้งทำการจำลองการสื่อสารสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยแสงเพื่อทดสอบทฤษฎีที่น่าเสนอ
2. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่ใช้การมอดูเลตแบบ DPSK ที่ใช้วิธีคอนจูเกตทางแสงลดผลความผิดพลาดของสัญญาณที่เกิดจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายโดยปรากฏการณ์เคอร์รี่ในระบบช่องสัญญาณเดี่ยวและระบบ WDM

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
2. ศึกษาถึงวิธีการมอดูเลตสัญญาณ DPSK ในการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
3. ศึกษาเกี่ยวกับระบบส่งยุคเฟสทางแสงในช่องสัญญาณเดี่ยวและหลายช่องสัญญาณในระบบที่มีการมอดูเลตแบบความเข้มแสง
4. วิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากเครื่องขยายสัญญาณ ในทางทฤษฎีสำหรับระบบที่ไม่มีและไม่มีชดเชย Dispersion และระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบช่องสัญญาณเดี่ยว
5. สรุปผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีว่าตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DPSK ในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางในระบบช่องสัญญาณเดี่ยว
6. สร้างแบบจำลองการส่งข้อมูลช่องสัญญาณเดี่ยวเพื่อที่จะทดสอบทฤษฎีข้างต้น

7. วิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณ ในทางทฤษฎีสำหรับระบบที่ไม่มีและไม่มีการชดเชย Dispersion และระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบการมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น
8. สรุปผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีว่าตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ DPSK ในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางในระบบการมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น
9. สร้างแบบจำลองการส่งข้อมูลแบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น เพื่อที่จะทดสอบทฤษฎีข้างต้น
10. วิเคราะห์ผลจากแบบจำลองและผลในทางทฤษฎีว่าสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร และถ้าไม่สอดคล้องจะมีการอธิบายอย่างสมเหตุสมผลว่าสาเหตุใดผลลัพธ์ที่ออกมาจึงไม่สอดคล้องกับทฤษฎี
11. เรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการส่งสัญญาณที่ใช้การมอดูเลต DPSK ผ่านเส้นใยแสงโดยใช้ระเบียบวิธี Split-step Fourier ในการแก้สมการ Nonlinear Schrödinger (NLS) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Optisystem 5 ในการจำลองการสื่อสารสัญญาณ เพื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์ทฤษฎีว่าสอดคล้องกันหรือไม่
2. ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสงที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นปรากฏการณ์ของ Kerr เท่านั้น
3. ในแบบจำลองระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เครื่องสังยุคเฟสทางแสงจะเป็นแบบอุดมคติเท่านั้น
4. ในแบบจำลองระบบจะเป็นระบบที่มีการชดเชย Dispersion ที่มีความเป็นอุดมคติของการชดเชยสัญญาณใน DCU ซึ่งจะไม่มีความยาวของเส้นใยแสงและการลดทอนสัญญาณใน DCU
5. อุปกรณ์ภาครับของแบบจำลองมีความเป็นอุดมคติโดยมิได้นำผลของสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์ภาครับมาคำนวณเพราะว่าเพื่อจะดูผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างที่สัญญาณเดินทางในเส้นใยแสงเท่านั้น

6. อัตราบิตที่ใช้ในแบบจำลองเป็น 40 Gbit/s ในการส่งสัญญาณช่องสัญญาณเดี่ยวและหลายช่องสัญญาณ
7. รอบทำงาน (Duty cycle) ในแบบจำลองเป็น 66%-Return-to-Zero (RZ)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระบบการมอดูเลตสัญญาณ DPSK
2. ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณแสงระยะทางไกลแบบ DPSK ที่ใช้วิธีการสังยุคเฟสทางแสง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงพื้นฐาน

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงขั้นพื้นฐาน การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะไกล รวมไปถึงการแนะนำให้รู้จักว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงอย่างคร่าวๆ สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง การกล่าวถึงผลกระทบต่างๆที่มีต่อสัญญาณในการเดินทางผ่านเส้นใยแสงซึ่งได้แก่ Kerr effect และ Dispersion สำหรับในส่วนที่ 3 เป็นการแนะนำให้รู้จักวิธีการมอดูเลตสัญญาณทางแสงซึ่งประกอบด้วย การมอดูเลตความเข้มแสงและการมอดูเลต DPSK รวมไปถึงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างการมอดูเลตของสองประเภทนี้อีกด้วย

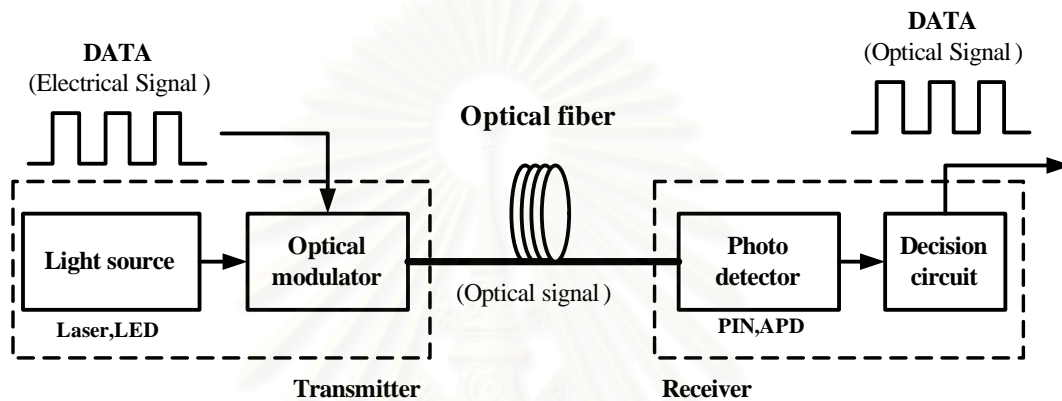
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (Optical transmitter) เส้นใยแสง (Optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (Optical receiver)

การมอดูเลตสัญญาณแสงมีอยู่ สองประเภทหลักๆ คือ การมอดูเลตภายนอก (External modulation) [21] ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) และ อุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (Modulator) แยกออกจากกัน ส่วนอีกประเภทจะเป็นการมอดูเลตโดยตรง (Direct modulation) [21] ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์เพียงชุดเดียว

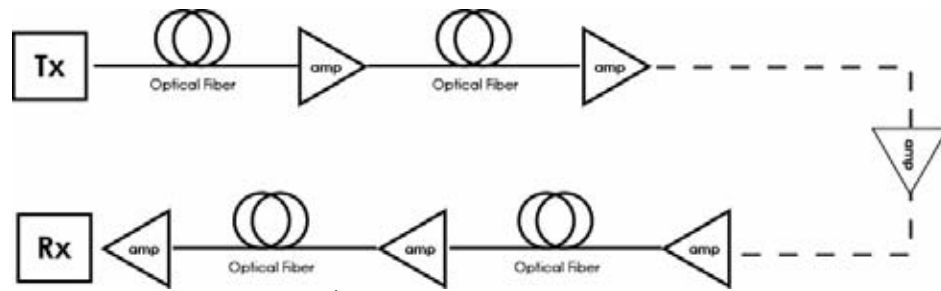
เส้นใยแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสงจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงที่ใช้งานอยู่จะเป็นแบบ Single mode fiber (SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (Attenuation coefficient) แบบ Multi-mode fiber (MMF) ซึ่งมีราคาถูกกว่า SMF แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสูงกว่า SMF แบบ Dispersion-shifted fiber (DSF) ซึ่งจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ ผน ความยาวคลื่น zero dispersion จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด (1550 nm) และ Non-zero Dispersion-shifted fiber (NZDSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

อุปกรณ์รับสัญญาณแสง ประกอบด้วยอุปกรณ์สองชนิดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น PIN (Positive, intrinsic, negative junctions) และ APD (Avalanche photodiode) ส่วนองค์ประกอบที่สองของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงคือ วงจรตัดสินใจ (Decision circuit) ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Decision threshold ภายในวงจรตัดสินใจ



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

สำหรับระบบการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล (Long-haul transmission system) แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Optical amplifier) หรือ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) วางคั่นระหว่างทางเป็นช่วงๆ เนื่องจากการสูญเสียกำลังงานที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงโดยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณทางแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่น (Optical attenuation coefficient: α dB/km) ทำให้กำลังงานสัญญาณแสงลดลง และอาจจะเป็นผลให้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Optical detector) ไม่สามารถตรวจจับกำลังงานแสงได้ สำหรับค่ากำลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจะสามารถแปลงกำลังงานแสงเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้คือค่าความไว (Sensitivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของ Maxwell โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนทำได้ดีที่สุด จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Nonlinear Schrödinger equation (NLSE) [22],[23]

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

โดยที่ A เป็น Envelope ของสัญญาณ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน β_2 เป็นค่า Group-velocity dispersion (GVD) γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient) z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง และ T เป็นกรอบเวลาที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งสามารถแสดงดังในสมการ (2.2)

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

โดยที่ t เป็นเวลา ในพจน์ทางขวามือของสมการ (2.1) แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อสัญญาณ A ซึ่งประกอบด้วย การลดทอนสัญญาณ (α) เมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงานของสัญญาณแสงลดต่ำลงและเราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สองทางขวามือของสมการ (2.1) คือ GVD (β_2) เป็นผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก สำหรับพจน์สุดท้ายทางขวามือของสมการ (2.1) คือ ผลของปรากฏการณ์ Kerr ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงซึ่งจะทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออก ความรุนแรงของปรากฏการณ์ Kerr ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (Peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง เพื่อที่จะดูผลกระทบแต่ละปัจจัยในสมการ (2.1) ต่อสัญญาณ เราสามารถแยกคิดผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัญญาณได้ในหัวข้อถัดไป ดังนี้

2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation loss)

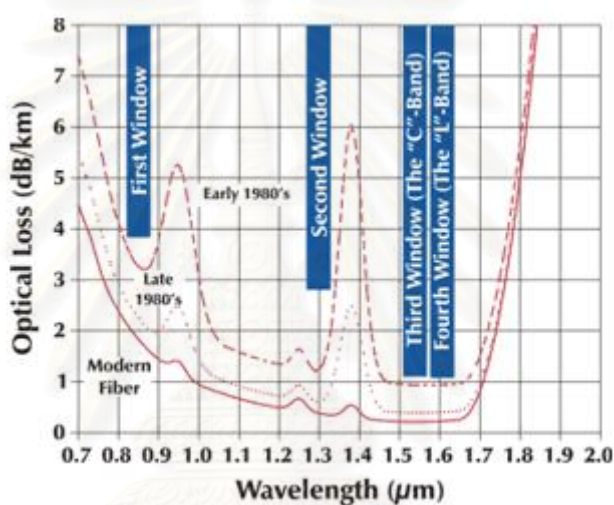
เป็นการสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณดังนี้

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

โดยที่ $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

α คือ ค่าคงตัวของ การลดทอน [dB/km]



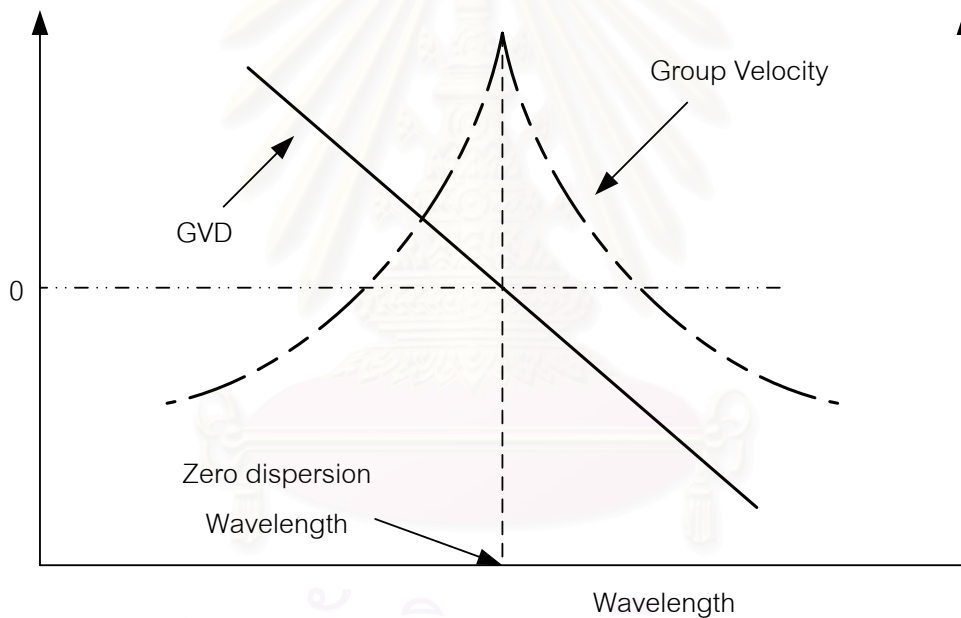
รูปที่ 2.3 Optical fiber attenuation vs. wavelength

สำหรับค่าคงตัวการลดทอน α นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 3 เส้นโดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเส้นที่บซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกาและจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้นและผลของ Rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราการสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูปที่ 2.3 หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการ

สูญเสียสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm

1.1.1 Group velocity dispersion (GVD)

โดยทั่วไป Dispersion ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกัน คือ Inter-modal dispersion สำหรับ MMF และ Chromatic dispersion สำหรับ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล เราจะเลือกใช้ SMF เพราะ SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงอัตราการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้น Dispersion ที่ส่งผลกระทบต่อระบบจะเป็นแบบ Chromatic dispersion



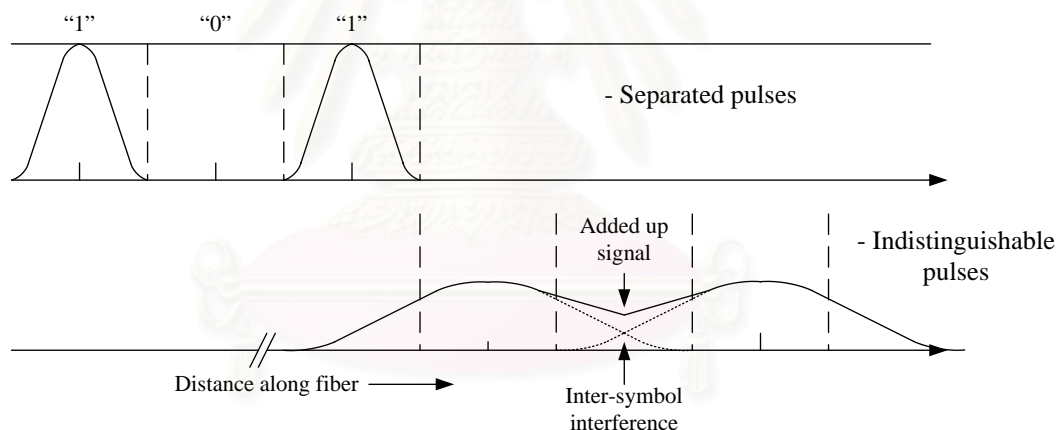
รูปที่ 1 ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร.1 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น

Chromatic dispersion เกิดจากคุณสมบัติของความเร็วกลุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก **รูปที่ 1 ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร.1** แสดงถึงตัวอย่างการแจกแจงความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น ซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ Zero-dispersion wavelength

เราสามารถแบ่งช่วงของ Dispersion ในรูปที่ 2.4 ออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ Normal dispersion ($\beta_2 > 0$) Anomalous dispersion ($\beta_2 < 0$) และ Zero dispersion ($\beta_2 = 0$) [22]

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

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



รูปที่ 2.5 การแสดงการเกิด Inter-symbol interference

2.2.3 Kerr effect

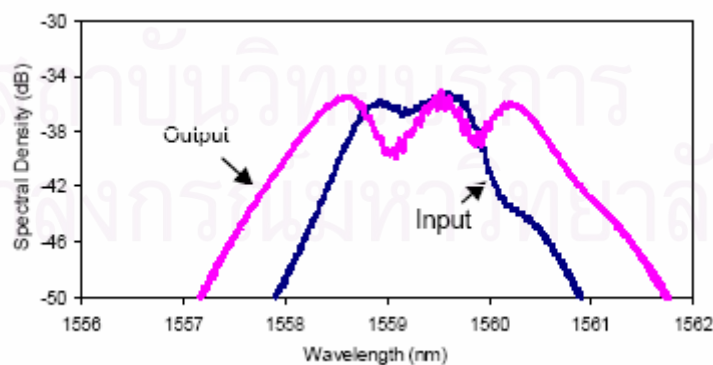
Kerr effect เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเห เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงาน ทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับกำลังงานของสัญญาณ เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์ Kerr effect ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทหลักคือ Self-phase modulation (SPM) Cross-phase modulation (XPM) และ Four-wave mixing (FWM)

2.2.3.1 SPM

SPM เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่เป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Kerr กำหนดให้ $\phi_{NL}(z, T)$ เป็นเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับ SPM นั้น เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับกำลังงานแสงในตัวสัญญาณ เมื่อ $\phi_{NL}(z, T)$ เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับหน่วยเวลา ทำให้เกิดเป็น Frequency chirp ขึ้นมา $\left(\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z, T)}{\partial T} \right)$ ซึ่งเป็นผลทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหวี่ยงน้อมมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุด

$$\phi_{NL, \max} = z_{\text{eff}} P_0 \gamma \quad (2.4)$$

โดยที่ P_0 เป็นกำลังงานของสัญญาณพัลส์ $\phi_{NL, \max}$ เป็นเฟสที่เลื่อนออกไปมากที่สุด ณ บริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ และ $z_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha z)}{\alpha}$ เป็นความยาวประสิทธิผลเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแสง รูปที่ 2.6 แสดงถึงการขยายออกสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก SPM เห็นได้ว่าสเปกตรัมสัญญาณจะแตกออกในส่วนบนและขยายออกทางด้านข้าง การที่สเปกตรัมสัญญาณขยายออกมากกว่า 1 nm (มากกว่า 100 GHz ที่ 1550 nm) เพราะว่กำลังงานสัญญาณที่เลือกใช้สูงมากรวมไปถึงเส้นใยแสงมีค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมากด้วยเช่นกันจึงส่งผลให้ SPM ส่งผลต่อสเปกตรัมสัญญาณอย่างรุนแรง ส่งผลต่อความถี่รอบข้างทำให้เกิดความผิดพลาดต่อสัญญาณของข้อมูลที่ภาครับ



รูปที่ 2.6 การขยายออกสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก SPM ในเส้นใยแสงที่มีสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมาก

2.2.3.2 XPM

Cross-Phase Modulation (XPM) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไปเหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม

ปกติแล้วเมื่อ 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง นอกจากทั้ง 2 สัญญาณแสงจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของทั้ง 2 สัญญาณแสงในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์ นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลของมันจะมีความมากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.5)$$

เมื่อ $|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1

$|E_1|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2

2.2.3.3 FWM

Four Wave Mixing (FWM) เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไข การจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังข้ามให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆกันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1, f_2, f_3 ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.6)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.6)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.7)$$

โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n ดังนั้นประสิทธิภาพของ FWM ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดียว เรียกว่า Intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิด Ghost pulse ขึ้นมาในสัญญาณที่มีมอดูเลตแบบ On-Off Keying (OOK) สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมี

สัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่า เลื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

2.3 การมอดูเลตสัญญาณทางแสง (Optical modulation)

ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับโดยตรงกับหลักการมอดูเลตสัญญาณแสง 2 วิธีคือ การมอดูเลตความเข้มแสง (หรือ On-off keying: OOK) และการมอดูเลตแบบ DPSK ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมากโดยเฉพาะความยุ่งยากซับซ้อนและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ โดยพื้นฐานแล้วการมอดูเลตความเข้มแสงนิยมใช้กันมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเพราะว่าความไม่ยุ่งยากซับซ้อนทั้งอุปกรณ์ทางด้านส่งและทางด้านรับ แต่เมื่อไม่นานนี้ ได้มีงานวิจัยอย่างหลากหลาย [12]-[15] ที่กล่าวถึงข้อดีของการมอดูเลต DPSK ทางแสงเมื่อเทียบกับการมอดูเลตความเข้มแสง อาทิเช่น ความทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง กำลังงานในการส่งสัญญาณที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วของบิตข้อมูลทำให้ผลของสัญญาณรบกวนทางเฟสที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากันทุกบิต [10],[11] เป็นต้น

2.3.1 การมอดูเลตทางความเข้มแสง

ในการมอดูเลตความเข้มแสง สัญญาณข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานทางแสง สัญญาณดิจิทัล (Digital signal) ที่เป็น '1' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานค่าหนึ่ง และสัญญาณดิจิทัลที่เป็น '0' ก็จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานอีกค่าหนึ่ง โดยทั่วไปสัญญาณดิจิทัลที่เป็น '0' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานศูนย์หรืออาจเรียกว่าไม่ได้ส่งสัญญาณออกไปในช่วงเวลาที่มีสัญญาณขาเข้า (Input signal) เป็นสัญญาณดิจิทัล '0'

2.3.2 การมอดูเลตแบบ DPSK

กำลังงานของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบ DPSK จะมีปริมาณเท่ากันหมดไม่ว่าจะเป็นบิต '0' หรือบิต '1' และการมอดูเลตสัญญาณทางภาคส่งจะมีการป้อนสัญญาณดิจิทัลผลต่างทางเฟสเข้าสู่อุปกรณ์มอดูเลตเฟสทำให้เฟสของสัญญาณขาออกต่างกัน π เมื่อมีการเปลี่ยนของระหว่าง

บิต '0' กับ บิต '1' [10],[11] สำหรับทางภาครับจะใช้วิธีการเปรียบเทียบความต่างเฟสระหว่างสัญญาณบิตที่อยู่ติดกัน จึงเป็นข้อดีของการมอดูเลต DPSK ที่ไม่จำเป็นต้องมีการอ้างอิงเฟสระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณและอุปกรณ์ทางภาครับ ซึ่งการมอดูเลต DPSK นี้จำเป็นต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ในการประวิงเวลาสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งบิต (1-bit delay) เพื่อทำหน้าที่ในส่วนของการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณบิตที่อยู่ติดกัน [10],[11]

สัญญาณบิตข้อมูลของการมอดูเลต DPSK จะอยู่ที่เฟสของสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณรบกวนทางเฟสจึงเป็นส่วนสำคัญในการทำให้คุณภาพของสัญญาณข้อมูลเสื่อมลง โดยทฤษฎีแล้วสัญญาณรบกวนทางแอมพลิจูดจะไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณที่มอดูเลต DPSK แต่เพราะว่า Kerr effect ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงจะเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนทางแอมพลิจูดให้กลายเป็นสัญญาณรบกวนทางเฟส โดยทั่วไปแล้วสัญญาณรบกวนทางแอมพลิจูดนั้นอาจเกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง อุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสง หรือแม้แต่ภายในของเส้นใยแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากเมื่อสัญญาณในแต่ละบิตที่เดินทางในเส้นใยแสงจะมีขนาดของแอมพลิจูดหรือกำลังที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ความผิดพลาดทางเฟสที่แตกต่างกันในแต่ละบิตเนื่องจากความไม่เท่ากันของแอมพลิจูดจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK

2.3.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างการมอดูเลตความเข้มแสงและการมอดูเลต DPSK

ความแตกต่างขั้นพื้นฐานระหว่างการมอดูเลตความเข้มแสงและการมอดูเลต DPSK มีดังนี้คือ

1. การมอดูเลต DPSK จะมีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่ภาครับได้ดีกว่าการมอดูเลตความเข้มแสงอยู่ประมาณ 3 dB ในกรณีกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณแต่ละบิตมีค่าเท่ากัน [10],[11]
2. การมอดูเลต DPSK จะมีความทนทานต่อการกระเพื่อมของกำลังสัญญาณที่ภาครับ แต่ในทางกลับกันการกระเพื่อมของกำลังสัญญาณที่ภาครับจะมีอิทธิพลต่อการมอดูเลตความเข้มแสง [10],[11],[24]-[25]
3. สัญญาณรบกวนทางเฟส จะมีอิทธิพลต่อการมอดูเลต DPSK แต่จะไม่มีผลกระทบต่อ การมอดูเลตความเข้มแสง

ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล สาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพสัญญาณเสื่อมลงคือ Dispersion และ Kerr effect ในเส้นใยแสง การที่จะระบุว่าการมอดูเลตแบบไหนให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ากัน เราต้องพิจารณาว่าการมอดูเลตแบบไหนให้ความทนทานต่อ Dispersion และ Kerr effect มากกว่ากัน

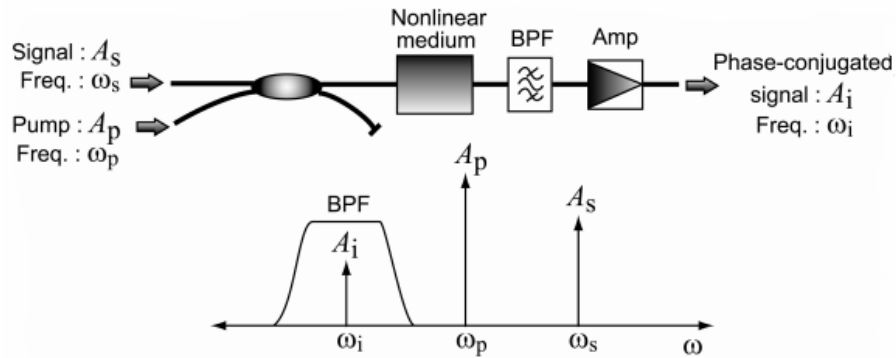
ในกรณีของ Dispersion การมอดูเลตทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันมากเพราะว่า Dispersion จะทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออกโดยไม่ขึ้นกับรูปแบบการมอดูเลต ส่วนกรณีของ Kerr effect ในเส้นใยแสง การมอดูเลต DPSK จะมีความทนทานต่อ Kerr effect ในเส้นใยแสงมากกว่าการมอดูเลตความเข้มแสงเพราะว่ากำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูลบิต '0' และบิต '1' มีปริมาณเท่ากันดังนั้นผลของความผิดพลาดที่เกิดจาก Kerr effect ในเส้นใยแสงแต่ละบิตมีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุนี้การมอดูเลต DPSK จึงไม่มีผลต่อการตีมอดูเลตด้วยความต่างเฟสที่ภาครับ

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ (Optical Phase Conjugation for long-haul Transmission)

วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถชดเชยรูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดความเพี้ยนขึ้น โดยการวางเครื่องสังยุคเฟสทางแสง (optical phase conjugator) ไว้ที่กึ่งกลางระบบ เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งให้เดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความเพี้ยนขึ้นในฝั่งครึ่งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า คุณสมบัติย่อยในสายส่งของทั้งสองฝั่งของระบบจะต้องมีความสมมาตรเมื่อมองจากจุดกึ่งกลางของระบบ เครื่องสังยุคเฟสทางแสงนั้นสามารถสร้างสัญญาณคอนจูเกตได้โดยใช้หลักการจากกระบวนการ Four-Wave Mixing (FWM) ในตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่สาม (third-order nonlinear medium) ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างรุนแรง โดยเมื่อสัญญาณเข้าทำปฏิกิริยากับสัญญาณจากภายนอกที่ใส่เข้าไปที่เรียกว่าสัญญาณปั๊ม (Pump) ที่มีกำลังสูง ใน third-order nonlinear medium แล้วจะเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่า idler wave โดยกระบวนการ FWM ซึ่ง idler wave เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณเข้า ดังรูปที่ 2.7 สมการ (2.8)

$$2h\omega_p = h\omega_s + h\omega_i \quad (2.8)$$

โดยสมการ (2.8) หมายถึงพลังงานโฟตอนของสัญญาณปั๊มถูกแยกออกมาเพื่อเสริมสัญญาณที่ส่งเข้าและสร้าง idle wave ที่เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณที่ส่งเข้า



รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณสังยุคเฟสโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium

ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะถือว่าเครื่องสังยุคเฟสทางแสงเป็นแบบอุดมคติคือ ไม่มีเกิดสูญเสียขึ้นในเครื่องคอนจูเกต สัญญาณที่ออกมาจากเครื่องคอนจูเกตจะมีความถี่เดียวกับสัญญาณที่ก่อนจะเข้าเครื่อง คือไม่มีการเลื่อนทางความถี่เกิดขึ้นและเครื่องคอนจูเกตนี้สามารถสร้างสัญญาณคอนจูเกตได้อย่างสมบูรณ์

ในสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบนั้นสามารถชดเชยผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นและ dispersion ในระบบที่มีระยะสั้นได้ดี แต่ในระบบที่มีระยะยาวจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบของสัญญาณกำลัง (periodic power variation) และการแกว่งไป-มาของค่า dispersion ตลอดทั้งระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณที่เพิ่มขึ้นที่เครื่องรับ [6],[8]

เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบเพื่อให้คุณสมบัติของสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบนั้นมีประสิทธิภาพสูงคือ

1. ระยะระหว่างเครื่องขยายสัญญาณ ต้องสั้นกว่าระยะที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity length)
2. ค่า dispersion นั้นต้องอยู่ในบริเวณ normal dispersion (สองเงื่อนไขนี้ใช้กำจัดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบของสัญญาณกำลัง)
3. ในส่วนต่างๆของเส้นใยแก้วนำแสงจะต้องมีค่าคงที่เฉลี่ยทั้งระบบของค่า dispersion ยาวกว่าระยะที่มีผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้น (เงื่อนไขนี้ใช้กำจัดผลกระทบของการแกว่งไป-มาของค่า dispersion)

บทที่ 3

การวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับคลื่นพาห้ความถี่เดียว

หากจะกล่าวถึงการมอดูเลตสัญญาณเชิงเลขเฟสผลต่างนั้น สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญมากเป็นพิเศษก็คือ สัญญาณรบกวนทางเฟส (Phase noise) ที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละบิตข้อมูลซึ่งทำให้คุณภาพของสัญญาณที่มอดูเลตแบบ DPSK เสื่อมค่าลง ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแหล่งที่มาของสัญญาณรบกวนทางเฟสที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ยังได้กล่าวไปถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Kerr effect และ Dispersion ว่ามีผลต่อสัญญาณรบกวนทางเฟสมากหรือน้อยเพียงใด

3.1 การหาผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion

เนื่องจากว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางเฟสในเส้นใยแก้วนั้น มิได้เกิดขึ้นโดยตรงจากเส้นใยแสง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดมาจากเครื่องขยายสัญญาณ เมื่อสัญญาณรบกวนนั้นเดินทางผ่านเส้นใยแสง จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก Kerr Effect ดังนั้นในการหาความผิดพลาดเฟสจะเริ่มจากการหาผลเฉลยการเดินทางในเส้นใยแสงของสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Small signal, $a(z, T)$) ที่มอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude modulation) ไปกับคลื่นพาห้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.1) และผลเฉลยสภาวะอยู่ตัวของคลื่นพาห้ (Steady state solution, A_{ss}) ในสมการ (2.1) สามารถแสดงได้ในสมการ (3.1)

$$A_{ss} = \sqrt{P} \exp(i\gamma \bar{P}z) \quad (3.1)$$

โดยที่ \bar{P} คือ กำลังงานเฉลี่ยสัญญาณตามระยะทาง หลังจากนั้นเราทำการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กเข้าไปในผลเฉลยสภาวะอยู่ตัว ทำให้ได้ดังสมการ (3.2)

$$A = \left\{ \left(\sqrt{P} + a(z, T) \right) \exp(i\gamma \bar{P}z) \right\} \quad (3.2)$$

โดยที่ สัญญาณเล็ก $a(z, T)$ ซึ่งอาจจะหมายถึงสัญญาณรบกวนที่ก่อกำเนิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง สามารถเขียนรูปแบบทั่วไปในสมการ (3.3)

$$a(z, T) = (a_m(z) + ib_m(z)) \cos(\omega_m T) \quad (3.3)$$

โดยที่ $a_m(z)$ แสดงถึงส่วนประกอบ In-phase และ $b_m(z)$ แสดงถึงส่วนประกอบ Quadrature-phase ของสัญญาณรบกวนขนาดเล็กโดยทั้ง $a_m(z)$ และ $b_m(z)$ ต่างเป็นฟังก์ชันค่าจริงของ z สำหรับ ω_m แสดงถึงความถี่เชิงมุมของสัญญาณเล็กที่ถูกมอดูเลตเข้าไปกับคลื่นพาห์ ดังนั้นเมื่อเรานำสมการ (3.2) และ (3.3) แทนลงในสมการ (3.4) ซึ่งเป็นการดัดแปลงจากสมการ (2.1) โดยมิได้คำนึงผลของอัตราการลดทอนกำลังงานในเส้นใยแก้ว ทำให้เราได้สมการ (3.5)

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = i\gamma \bar{P} A \quad (3.4)$$

$$\left(\sqrt{\bar{P}} + a\right) + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} = i\gamma \left(\left(\sqrt{\bar{P}} + \text{Re}\{a\}\right)^2 + \left(\text{Im}\{a\}\right)^2 \right) \left(\sqrt{\bar{P}} + a\right) \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.5) เราจะทำการประมาณโดยมีเงื่อนไขว่าสัญญาณ a มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ $\sqrt{\bar{P}}$ ซึ่ง $\left(2\sqrt{\bar{P}} \text{Re}\{a\} + |a|^2\right) \left(\sqrt{\bar{P}} + a\right) \approx 2\bar{P} \text{Re}\{a\}$ ทำให้ได้ผลการประมาณเป็นไปตามสมการ (3.6)

$$\frac{\partial a}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} = i\gamma \bar{P} (a + a^*) \quad (3.6)$$

โดย a^* หมายถึงคอนจูเกตของ a เมื่อแทน a จากสมการ (3.3) ลงในสมการ (3.6) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ในสมการ (3.7)

$$\frac{da_m}{dz} + i \frac{db_m}{dz} - \frac{i\beta_2 \omega_m^2}{2} (a_m + ib_m) = i2\gamma \bar{P} a_m \quad (3.7)$$

เพื่อจะหาผลเฉลยในสมการ (3.7) จึงจำเป็นต้องแยกส่วนจริง (Real part) และส่วนจินตภาพ (Imaginary part) ออกจากกัน ทำให้ได้สมการ (3.8) และ (3.9)

$$\frac{da_m}{dz} = -\frac{\beta_2 \omega_m^2}{2} b_m \quad (3.8)$$

$$\frac{db_m}{dz} = 2\gamma \bar{P} a_m + \frac{\beta_2 \omega_m^2}{2} a_m \quad (3.9)$$

นอกจากนี้เราสามารถนำสมการ (3.8) และ (3.9) มาเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ (3.10)

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} \beta_2 \omega_m^2 \\ \frac{1}{2} \beta_2 \omega_m^2 + 2\gamma \bar{P} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ดังนั้นผลเฉลยของสมการ (3.10) สามารถแสดงได้ในสมการ (3.11) ซึ่งเป็นผลเฉลยของสัญญาณขนาดเล็กเมื่อเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง z โดยขึ้นอยู่กับค่าเริ่มแรก (Initial value) ของสัญญาณขนาดเล็กที่ระยะทาง $z = 0$

$$\begin{bmatrix} a_m(z) \\ b_m(z) \end{bmatrix} = M(\omega_m, z) \begin{bmatrix} a_m(0) \\ b_m(0) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่ $M(\omega_m, z)$ แสดงเป็นเมตริกซ์ดังแสดงในสมการ (3.12)

$$M(\omega_m, z) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa z) & -\Gamma \sin(\kappa z) \\ \Gamma^{-1} \sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\Gamma = \sqrt{\frac{\beta_2 \omega_m^2}{(\beta_2 \omega_m^2 + 4\gamma \bar{P})}} \quad (3.13)$$

$$\kappa = \frac{1}{2} \sqrt{\beta_2 \omega_m^2 (\beta_2 \omega_m^2 + 4\gamma \bar{P})} \quad (3.14)$$

3.2 การผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion

จากหัวข้อ 3.1 เราสามารถหาผลเฉลยของสัญญาณรบกวนของเครื่องขยายสัญญาณเครื่องเดียว แต่ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงจะพบว่าเครื่องขยายสัญญาณเป็นจำนวนมากและเครื่องขยายสัญญาณจะสร้างสัญญาณรบกวนขึ้นมา ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการรวมสัญญาณรบกวนที่เกิดมาจากการขยายสัญญาณ โดยเราทราบว่าผลเฉลยของสัญญาณรบกวนของเครื่องขยายสัญญาณเครื่องเดียวเป็นไปตามสมการ (3.11) ในการหาผลรวมของสัญญาณรบกวนนั้นสามารถทำได้โดยการนำกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณทั้งหมดมารวมกัน ณ ที่ภาครับ โดยในแต่ละสัญญาณรบกวนจะเดินทางในเส้นใยแสงในระยะทางที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเครื่องขยายสัญญาณนั้นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การวางตำแหน่งของเครื่องขยายสัญญาณในระบบ

ให้ระยะทางระหว่างเครื่องขยายสัญญาณกับเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ L_a โดยสมมุติให้สัญญาณรบกวนมีการแจกแจงแบบ Gaussian และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 ดังสมการ (3.15)

$$[a_m(\omega_m) \quad b_m(\omega_m)]^T \quad (3.15)$$

มีค่าความแปรปรวนร่วม (covariance) เท่ากับ

$$B_0 = \begin{bmatrix} \frac{S_0}{2} & 0 \\ 0 & \frac{S_0}{2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

โดยที่ S_0 เป็นกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณตามสมการ (3.17)

$$S_0 = hf_0(G-1)n_{sp} \quad (3.17)$$

ซึ่ง hf_0 คือ พลังงานของโฟตอน, n_{sp} คือ spontaneous emission factor, และ G คืออัตราขยาย ดังนั้นเราสามารถหาค่ากำลังของสัญญาณรบกวน ณ ระยะทางเท่ากับ z ได้ดังนี้

$$B(\omega_m, z) = M(\omega_m, z)B_0M^T(\omega_m, z) \tag{3.18}$$

ที่ภาครับจะได้กำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณที่วางอยู่ในระบบรวมกันตามสมการ (3.19)

$$B_N(\omega_m) = \frac{S_0}{2} \sum_{k=1}^N [M(\omega_m, l_A)]^{N-k} [M^T(\omega_m, l_A)]^{N-k} \tag{3.19}$$

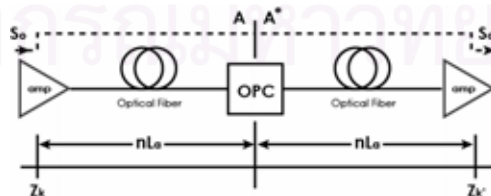
โดยที่ N คือจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ -1 ดังนั้นในการหาความผิดพลาดเฟส ($\Delta\phi_{sm}$) ที่ภาครับ ซึ่งเกิดจากผลรวมของสัญญาณรบกวนจากเครื่องขยายสัญญาณได้ดังนี้

$$\Delta\phi_{sm} = \tan^{-1} \left(\frac{b_m(\omega_n)}{\sqrt{P} + a_m(\omega_n)} \right) \tag{3.20}$$

โดยที่ $a_m(\omega_m) = \sqrt{B_{N(1,1)}(\omega_n)}$ และ $b_m(\omega_m) = \sqrt{B_{N(2,2)}(\omega_n)}$ สามารถหาได้จากสมการ (3.20) เราได้กำหนดค่าเริ่มแรกให้กับกำลังของสัญญาณ a_m กับ b_m ในสมการ (3.16)

3.3 การผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

จากหัวข้อที่ 3.1 เราสามารถหาผลเฉลยของสัญญาณรบกวนจากเครื่องขยายสัญญาณเครื่องเดียว และในหัวข้อ 3.2 เราสามารถหาความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบที่ไม่มีการชดเชย ในหัวข้อนี้จะหาความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสัญญาณรบกวนที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและการรวมสัญญาณรบกวนเหล่านั้นที่ภาครับ



รูปที่ 3.2 การเดินทางของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีเราจะพิจารณาในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะพิจารณาการเดินทางของสัญญาณรบกวนจากเครื่องขยายสัญญาณ ณ ตำแหน่ง Z_k เดินทางผ่านไประยะทางจำนวน n ของ Fiber span ไปถึง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระบบซึ่งเป็นตำแหน่ง Z_m เราจะได้ค่า covariance matrix ได้ดังนี้

$$B_m(\omega_m) = \frac{S_0}{2} [M(\omega_m, l_A)]^n [M^T(\omega_m, l_A)]^n \quad (3.21)$$

เมื่อสัญญาณรบกวนนี้ผ่านเครื่องส่งยุคเฟสทางแสงจะได้ covariance matrix ดังนี้

$$B_m^c(\omega_m) = \hat{F} B_m(\omega_m) \quad (3.22)$$

โดยตัวดำเนินการ \hat{F} เป็นฟังก์ชันตามสมการ (3.23)

$$\hat{F} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & -b \\ -c & d \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

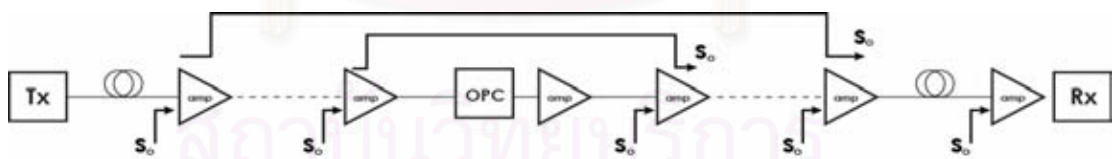
เมื่อสัญญาณรบกวนเดินทางไปในเส้นใยแสงครึ่งหลังจนไปถึงเครื่องขยายสัญญาณ ณ ตำแหน่ง Z_k เราจะได้ covariance matrix ดังสมการ (3.24)

$$B_k^c(\omega_m) = [M(\omega_m, l_A)]^n \{ \hat{F} B_m(\omega_m) \} [M^T(\omega_m, l_A)]^n \quad (3.24)$$

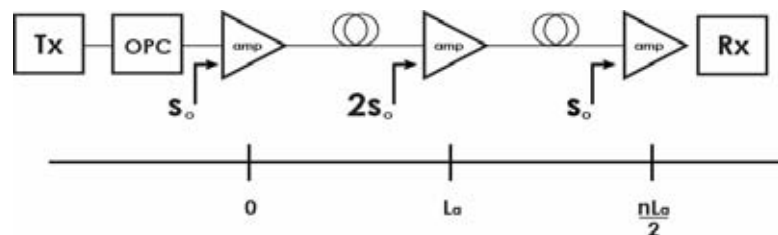
เมื่อเราแทนสมการ (3.12) กับสมการ (3.21) ลงในสมการ (3.24) จะได้

$$B_k^c(\omega_m) = \begin{bmatrix} \frac{S_0}{2} & 0 \\ 0 & \frac{S_0}{2} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในครั้งแรกของระบบ สามารถชดเชยได้ด้วยเครื่องส่งยุคเฟสทางแสงในครึ่งหลังของระบบ ในการชดเชยสัญญาณรบกวนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเดินทางของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในแต่ละตัวในระบบที่ใช้เครื่องส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ



รูปที่ 3.4 ระบบที่สมมูลกับระบบในรูปที่ 3.3

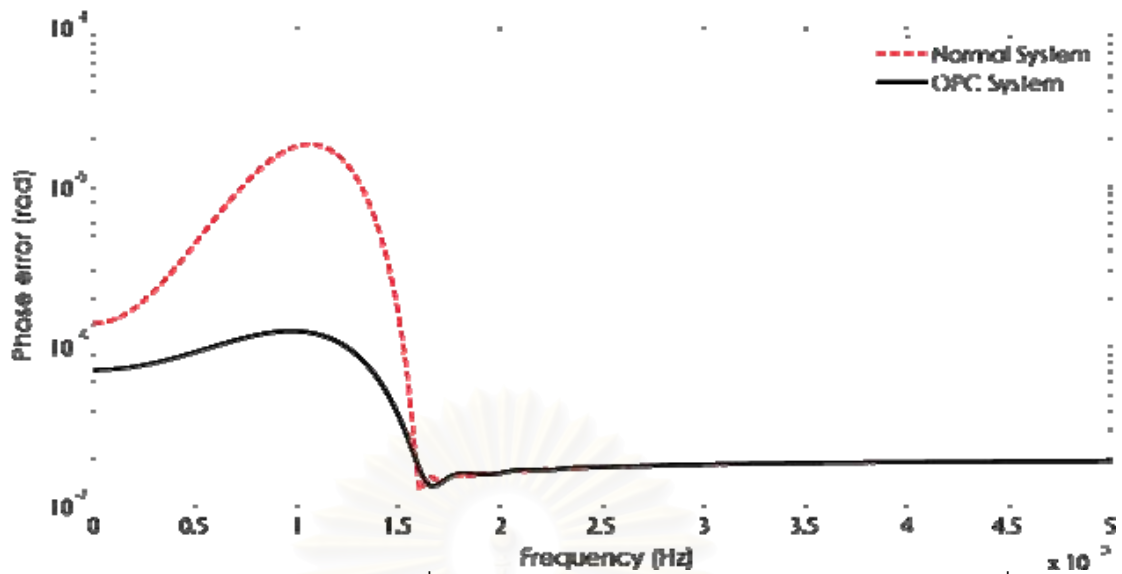
เพราะฉะนั้นผลรวมของสัญญาณรบกวนทั้งหมดในรูปที่ 3.3 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.4 ซึ่งกำลังของสัญญาณรบกวนในแต่ละเครื่องขยายสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และเดินทางในครึ่งหลังของระบบ ดังนั้นเราสามารถหา covariance matrix ในรูปที่ 3.4 ได้ดังนี้

$$B_{OPC}(\omega_m) = \left(S_0 \sum_{k=1}^{N/2} [M(\omega_m, l_A)]^{\frac{N-k}{2}} [M^T(\omega_m, l_A)]^{\frac{N-k}{2}} \right) + \left(\frac{S_0}{2} [M(\omega_m, l_A)]^{\frac{N}{2}} [M^T(\omega_m, l_A)]^{\frac{N}{2}} \right) - \frac{S_0}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

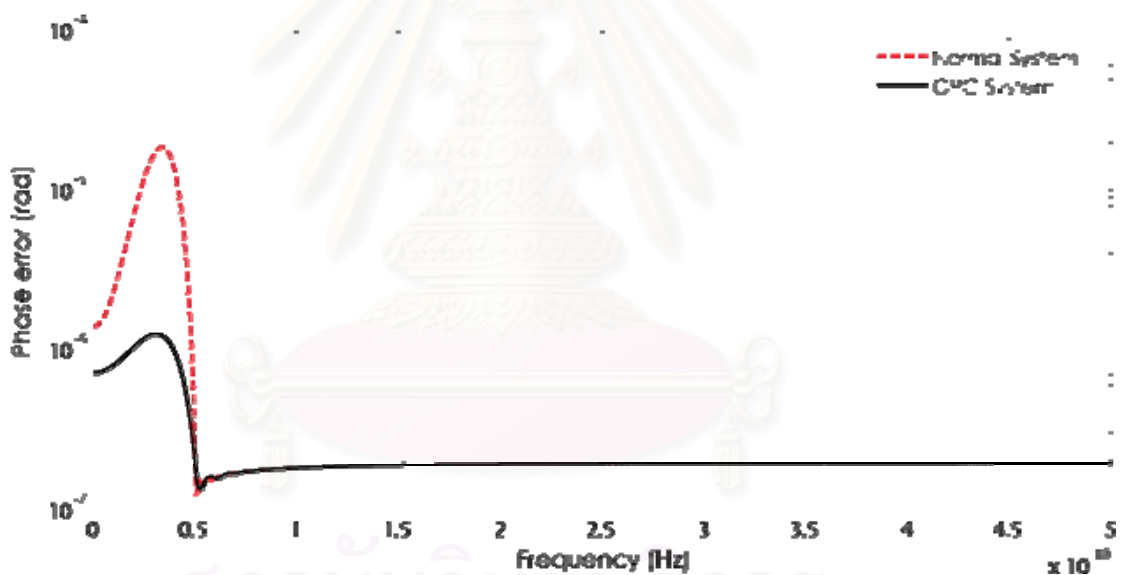
3.4 การหาผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

จากหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 เราสามารถหาความผิดพลาดของเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของเฟสในสมการ (3.20) กับความถี่ของสัญญาณรบกวนในระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้เครื่องคอนจูเกต ซึ่งความผิดพลาดของเฟสนี้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการส่งข้อมูลในรูปแบบ DPSK เปรียบเทียบกันระหว่างสองระบบนี้

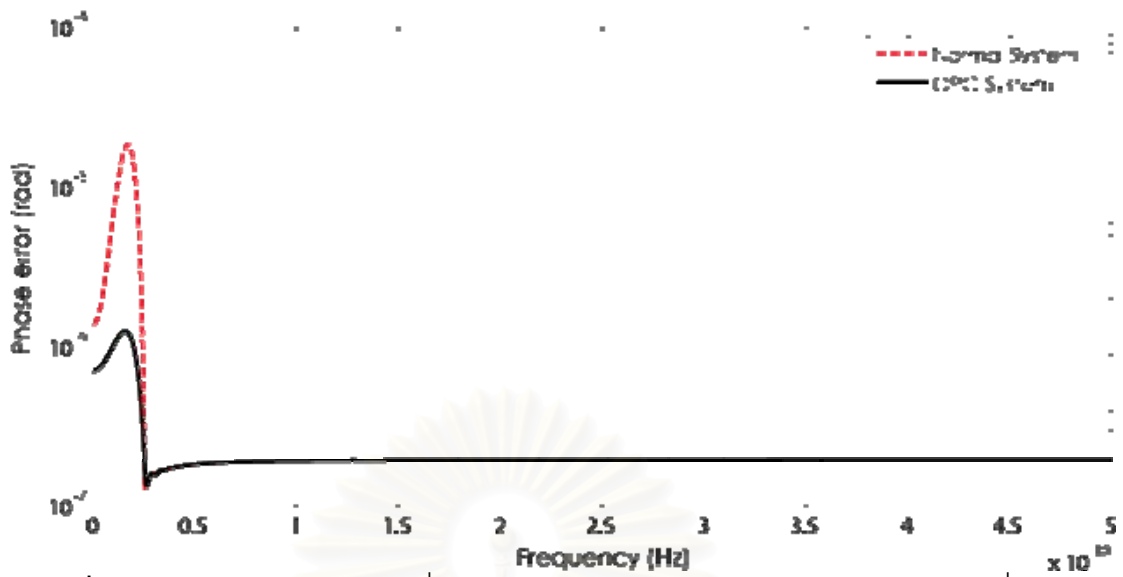
ในการหาผลตอบสนองนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ขนาดของค่า GVD ($|\beta_2|$) = 0.5 ps²/km, 5 ps²/km และ 20 ps²/km กำลังส่งขาเข้าของคลื่นพาห้ (P_0) = 3 mw สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (γ) = 1.06 w⁻¹km⁻¹ เครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) เท่ากับ 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณกับเครื่องขยายสัญญาณ = 50 km และระยะทางที่ใช้ในการคำนวณ = 5000 km



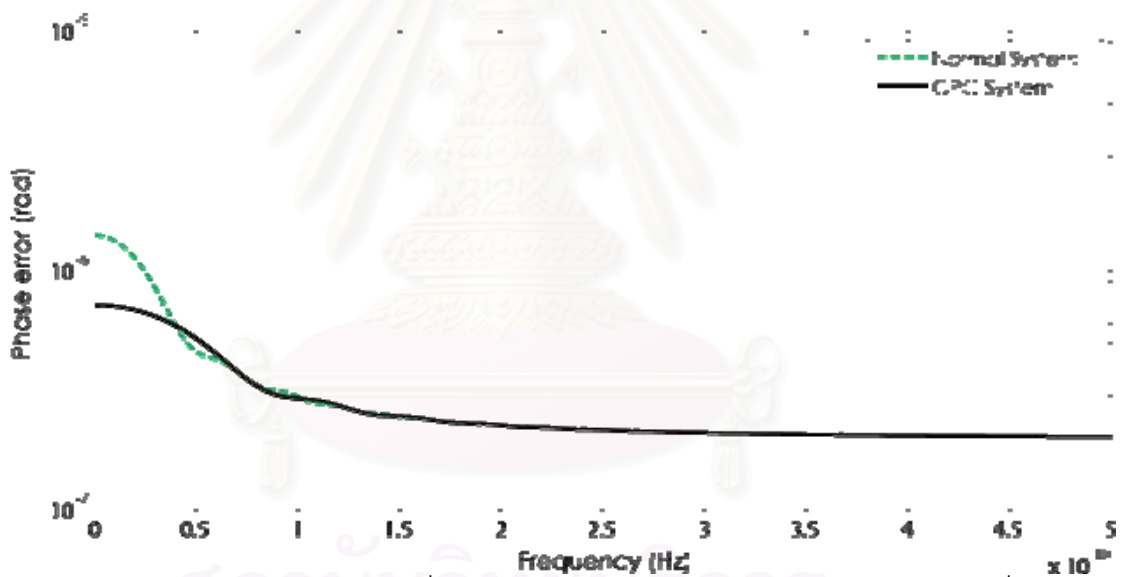
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $-0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$



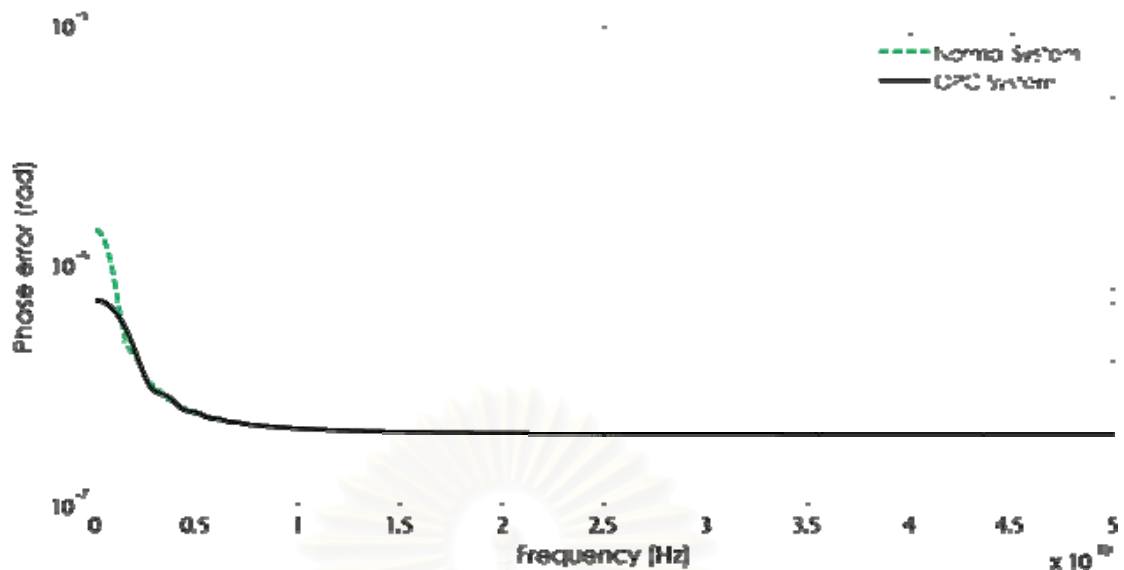
รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $-5 \text{ ps}^2/\text{km}$



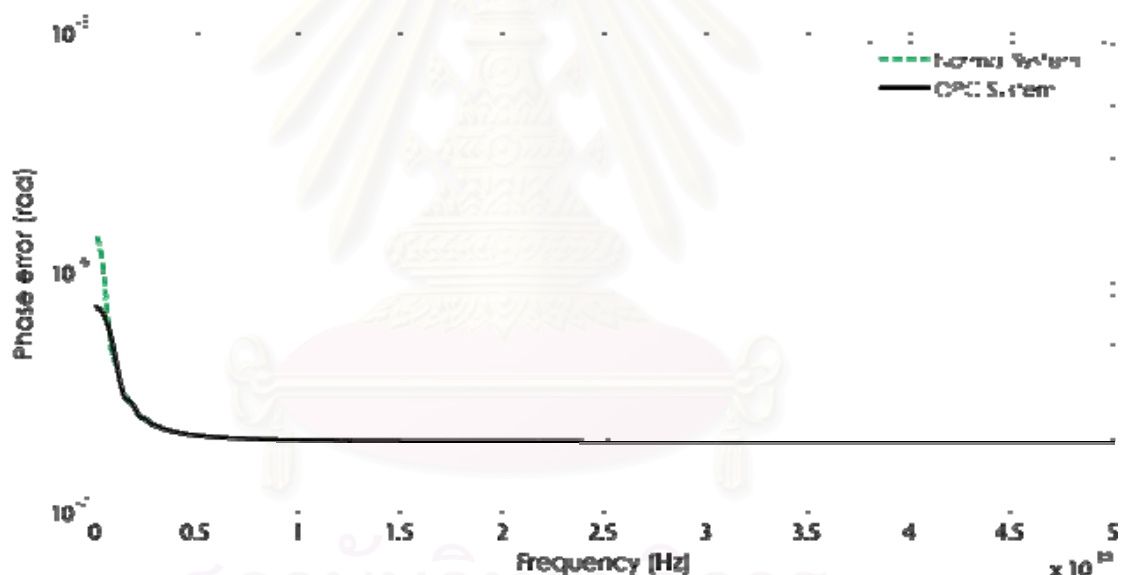
รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$



รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $5 \text{ ps}^2/\text{km}$



รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ที่ค่า GVD เป็น $20 \text{ ps}^2/\text{km}$

รูปที่ 3.5 -รูปที่ 3.10 แสดงถึงผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 50 GHz ทั้งในกรณีของ Normal dispersion ($+\beta_2$) และ Anomalous dispersion ($-\beta_2$) ในระบบปกติกับระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสง ในทั้งสองระบบถ้าเราพิจารณาจะเห็นความแตกต่างลักษณะเฉพาะของความผิดพลาดเฟส (Phase error characteristic) ระหว่างกรณี Normal dispersion และ Anomalous dispersion การพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสเพียงแค่ช่วง 50 GHz จากรูปที่ 3.5 -รูปที่ 3.10 ทั้งสองกรณีของ Dispersion เมื่อ

ความถี่ของการมอดูเลตมีค่าเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดเฟสจะมีค่าลดน้อยลงอย่างมากซึ่งในช่วงนี้จะเรียกว่าสถานะปกติ (Normal state) [22] หากพิจารณาแต่ละกรณีของ Dispersion เมื่อความถี่การมอดูเลตมีค่าไม่มากพอที่จะเข้าสู่สถานะปกติ (0.1 – 10 GHz) ในกรณีของ Normal dispersion จะทำให้เกิดความผิดพลาดเฟสอย่างค่อนข้างรุนแรงในช่วงก่อนเข้าสู่สถานะปกติ ซึ่งในช่วงนี้จะเรียกว่า สถานะการรบกวนทางเฟส (Phase noise state) [22] สำหรับในกรณีของ Anomalous dispersion จะทำให้เกิดความผิดพลาดเฟสอย่างมากและมีส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) เกิดขึ้นที่ตำแหน่งก่อนที่จะเข้าสู่สถานะปกติซึ่งในช่วงนี้จะเรียกว่า สถานะความไม่เสถียรของการมอดูเลต (Modulation instability state) [22] และเมื่อความถี่การมอดูเลตมีค่าน้อยมากจะทำให้ค่าความผิดพลาดเฟสมีค่าคงตัวค่าหนึ่งของทั้งสองกรณี Dispersion โดยในช่วงนี้จะเรียกว่า สถานะการคงตัวของเฟส (Phase constant state) [22]

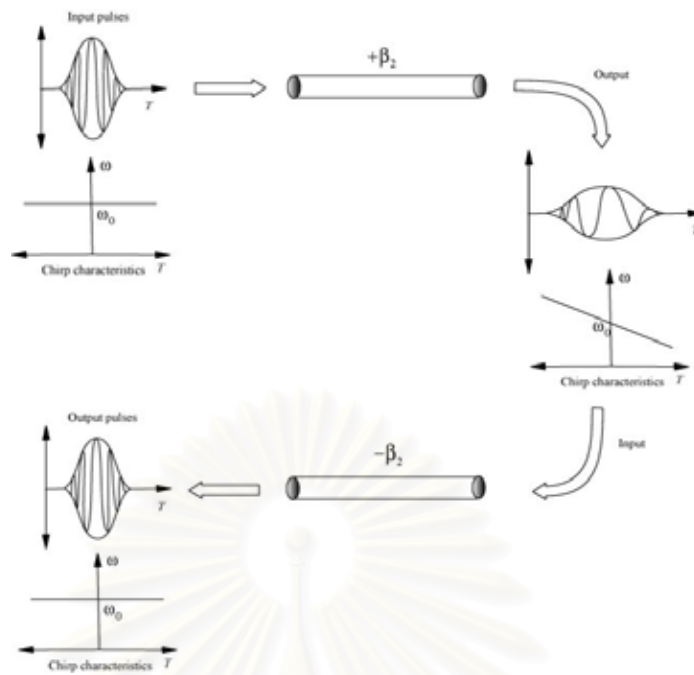
จากรูปที่ 3.5 -รูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้วิธีการส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบนั้นสามารถความผิดพลาดของเฟสที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ ในทั้งกรณี Normal dispersion และ Anomalous dispersion แต่ในกรณี Anomalous dispersion นั้นเครื่องคอนจูเกตไม่สามารถลดผลของ Modulation Instability ได้อย่างสมบูรณ์ และ จากรูปดังกล่าวเมื่อค่า GVD เพิ่มมากขึ้น ความผิดพลาดของเฟสกรณี Normal dispersion และ Anomalous dispersion ของทั้งสองระบบ จะเข้าสู่สถานะคงตัวเร็วขึ้น เฉพาะนั้นในกรณี Anomalous dispersion เมื่อเพิ่มค่า GVD แล้วช่วงความถี่ที่เกิด Modulation Instability ก็น้อยลงตาม

3.5 การหาผลตอบสนองของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ใช้วิธีชดเชยค่า Dispersion แบบเป็นรายคาบ

ในระบบที่ทำการชดเชย Dispersion เป็นระบบที่นำเอาเส้นใยแสงที่มีค่า Dispersion ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยและทำให้ Dispersion เหลือมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการ (3.27)

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \quad (3.27)$$

โดย D_1 คือ ค่า Dispersion ของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/km/nm]
 D_2 คือ ค่า Dispersion ของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าการกระจายตามความถี่ [ps/km/nm]
 L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]
 L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าการกระจายตามความถี่ [km]



รูปที่ 3.11 Dispersion management technique

รูปที่ 3.11 แสดงถึงการขจัดความเพี้ยนที่เกิดจาก Dispersion ด้วยเทคนิคการจัดการค่า Dispersion ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD (β_2) ที่มีค่าเป็นบวก จะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการการกระจายตามความถี่ด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า GVD (β_2) ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการหดเซยการกระจายตามความถี่ ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ เราสามารถแปลงค่าการกระจายตามความถี่กับ GVD ได้ดังสมการ (3.28)

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3.28)$$

โดยที่ D คือ ค่าการกระจายตามความถี่ [ps/km/nm]

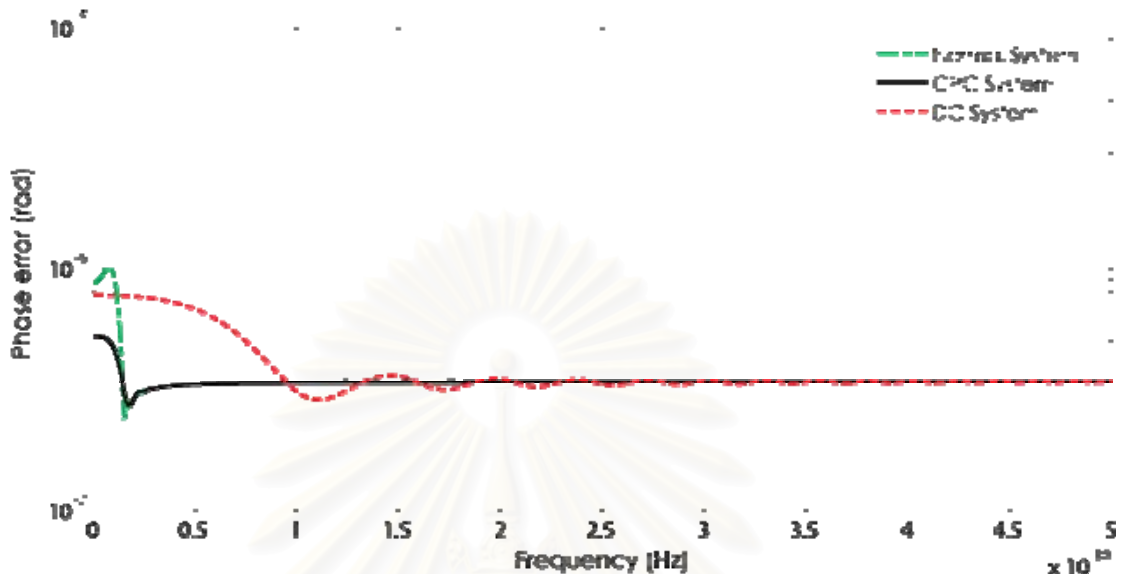
c คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 2.99739×10^8 m/s

λ คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]

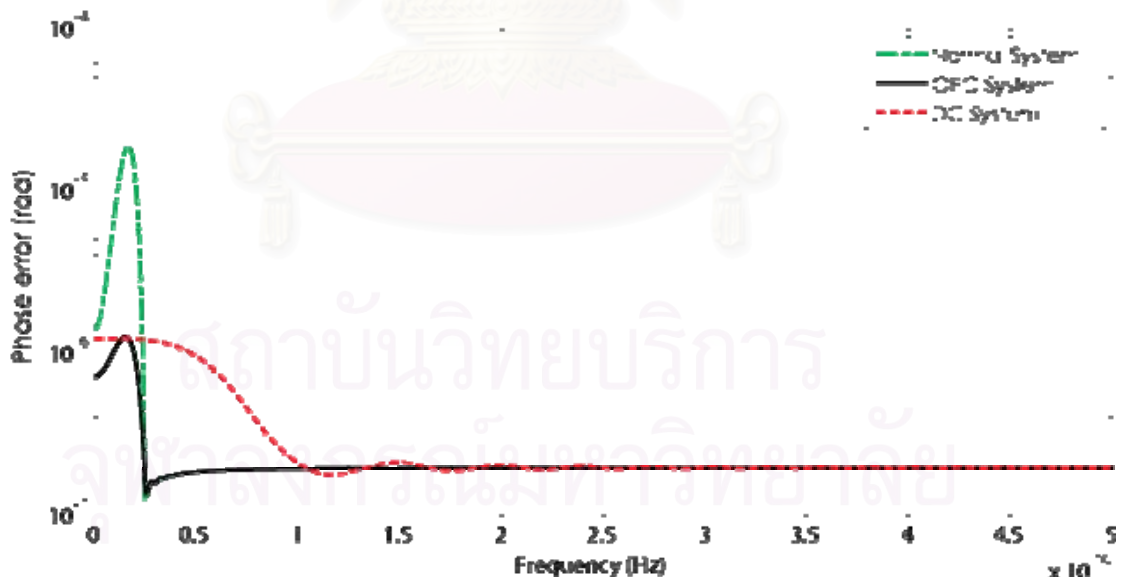
β_2 คือ ค่า GVD [ps^2/km]

ในการหาผลตอบสนองนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ การลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km ขนาดของค่า Dispersion ของ SMF = 16.3 ps/(km-nm) [26] และค่า Dispersion ของ DCF = -109.1 ps/(km-nm) [12] กำลังงานขาเข้าของคลื่นพาห์ (P_0) = 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของ SMF (γ) = $1.06 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ [26] ในกรณีของ DCF เราจะคิดเป็นอุดมคติคือไม่มีค่าของความไม่เป็นเชิงเส้น เครื่องขยายสัญญาณทาง

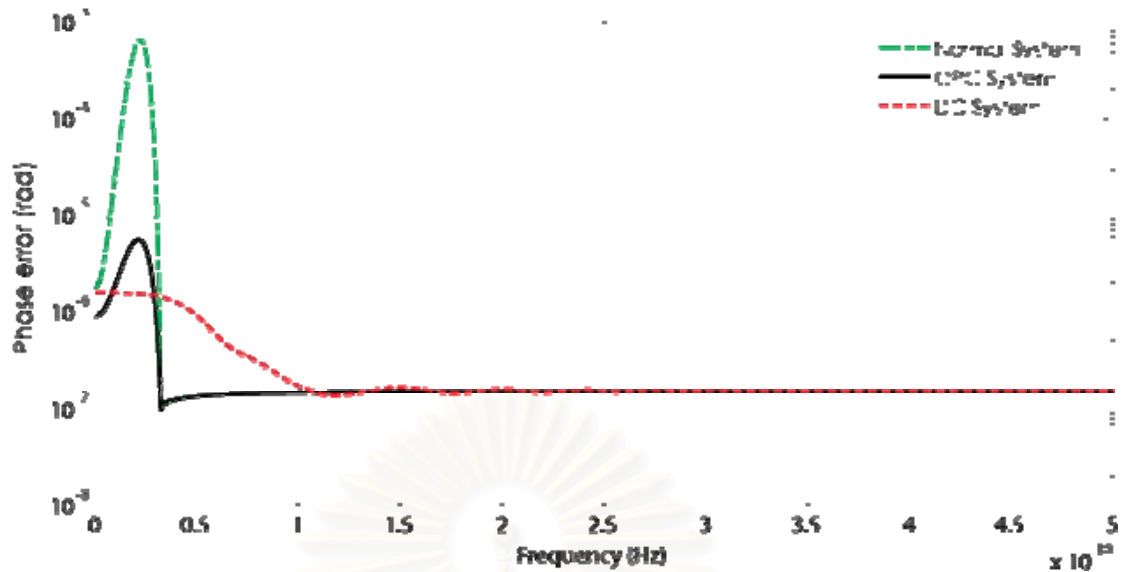
แสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) เท่ากับ 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณกับเครื่องขยายสัญญาณ = 50 km และระยะทางที่ใช้ในการคำนวณ = 5000 km



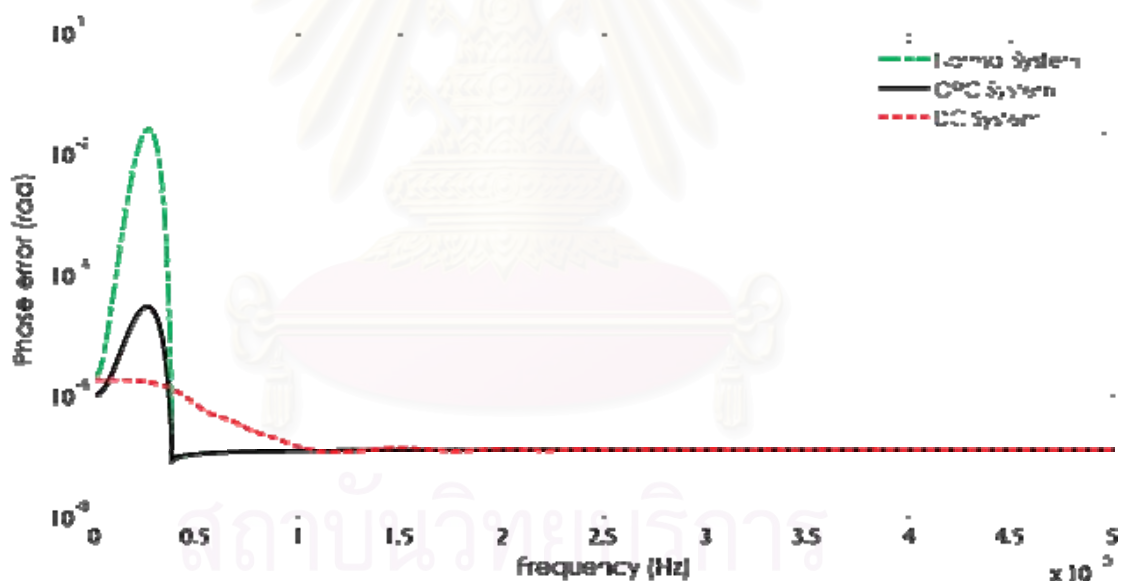
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 1 mW



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 3 mW



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 5 mW



รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสในช่วง 20 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 7 mW

ในรูปที่ 3.12 – รูปที่ 3.15 ความผิดพลาดทางเฟสในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ในช่วงก่อนที่เข้า Steady State มีแบนด์วิดท์มากกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ส่วนในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบมีความผิดพลาดทางเฟสช่วงก่อนเข้าสู่ Steady State มากกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เนื่องจากผลของ Modulation Instability แต่

ถ้าทำการส่งสัญญาณในอัตราบิตที่ต่ำเช่น 2 Gb/s เป็นต้นคุณภาพสัญญาณที่ภาครับของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion จะให้ผลที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เนื่องจากความผิดพลาดทางเฟสในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ของบิต 1 และบิต 0 เกิดในปริมาณที่คงที่ ผลทำให้ความต่างเฟสระหว่างบิต 1 และบิต 0 แตกต่างอย่างคงที่ ทำให้ภาครับสามารถตรวจสอบสัญญาณได้อย่างแม่นยำ

เพราะฉะนั้นเมื่อเราส่งข้อมูลในอัตราบิตต่ำ ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion จะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ แต่ถ้าเราส่งข้อมูลในอัตราบิตสูง ระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบจะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

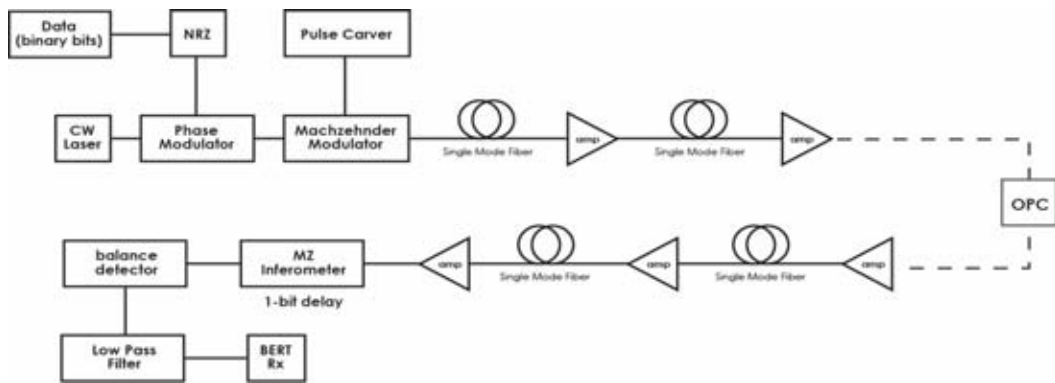
บทที่ 4

แบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดียว

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์เฟสในคลื่นพาห้ความถี่เดียวเมื่อมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กเข้าไปกับคลื่นพาห้ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์เฟสเช่น Dispersion และกำลังงานคลื่นพาห้ สำหรับเนื้อหาในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK เพื่อเป็นการพิสูจน์ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 เนื้อหาที่นำเสนอในหัวข้อนี้จะแยกออกเป็นสองส่วนคือ คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณช่องสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดียวในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ใช้วิธีชดเชยค่า Dispersion และผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณช่องสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ช่องสัญญาณเดียวทั้งสองระบบเปรียบเทียบกัน

4.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ช่องสัญญาณเดียวที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

การสร้างแบบจำลองการเดินทางสัญญาณแสงในเส้นใยแสงจะใช้ระเบียบวิธี Split-step-Fourier [23],[27] ซึ่งเป็นการแยกส่วนของ Dispersion และความไม่เป็นเชิงเส้นออกจากกันในแต่ละช่วงสั้นๆ (Step) ที่กำหนดไว้ ดังนั้นความถูกต้องหรือความแม่นยำในการใช้ระเบียบวิธี Split-step-Fourier จึงขึ้นอยู่กับข้อกำหนดช่วงการคำนวณ เมื่อช่วงการคำนวณมีค่าลดลงมากเท่าไรก็จะมีถึงความถูกต้องของสัญญาณมากขึ้นด้วยและย่อมจะใช้เวลาในการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์นานขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลต DPSK Return-to-Zero (RZ-DPSK) ช่องสัญญาณเดี่ยวที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

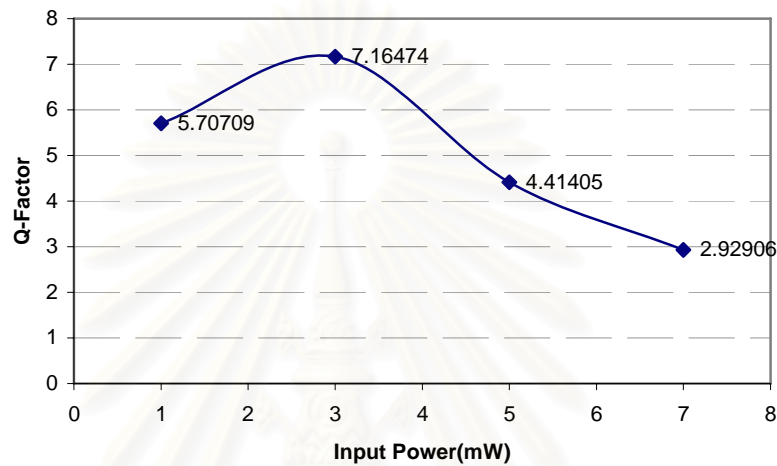
รูปที่ 4.1 แสดงถึงแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ในระบบนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวด้วยกำลังงานต่างกัน สัญญาณข้อมูล pseudo random จำนวน 1024 บิตที่มีอัตราบิต 40 Gbps อุปกรณ์มอดูเลตเฟส อุปกรณ์เกลาสัญญาณ 40 Gbps เพื่อแปลงสัญญาณขาเข้า Non-Return-to-Zero (NRZ) ให้กลายเป็นสัญญาณ 66%-RZ เส้นใยแสงแบบ SMF ที่มีการลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละเส้นใยแสง $\gamma_{SMF} = 1.06 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ [26] ณ ตำแหน่งที่กึ่งกลางระบบมีเครื่องคอนจูเกตที่เป็นแบบอุดมคติ ไม่ได้คำนึงถึงผลของการลดทอนและ Kerr effect มีการวางตำแหน่งของเครื่องขยายสัญญาณทางแสงทุกๆ 50 km โดยเครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) เท่ากับ 5 dB วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ เพื่อที่จะเลือกเอาแต่สัญญาณข้อมูลที่ต้องการ และอุปกรณ์ดีมอดูเลตสัญญาณ RZ-DPSK ที่มีวงจรมีเวลา 1 บิตของ 40 Gbps รวมอยู่ด้วย ส่วนการวัดคุณภาพสัญญาณ เราจะใช้ปริมาณ Q-factor เป็นตัววัดคุณภาพของสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.1)$$

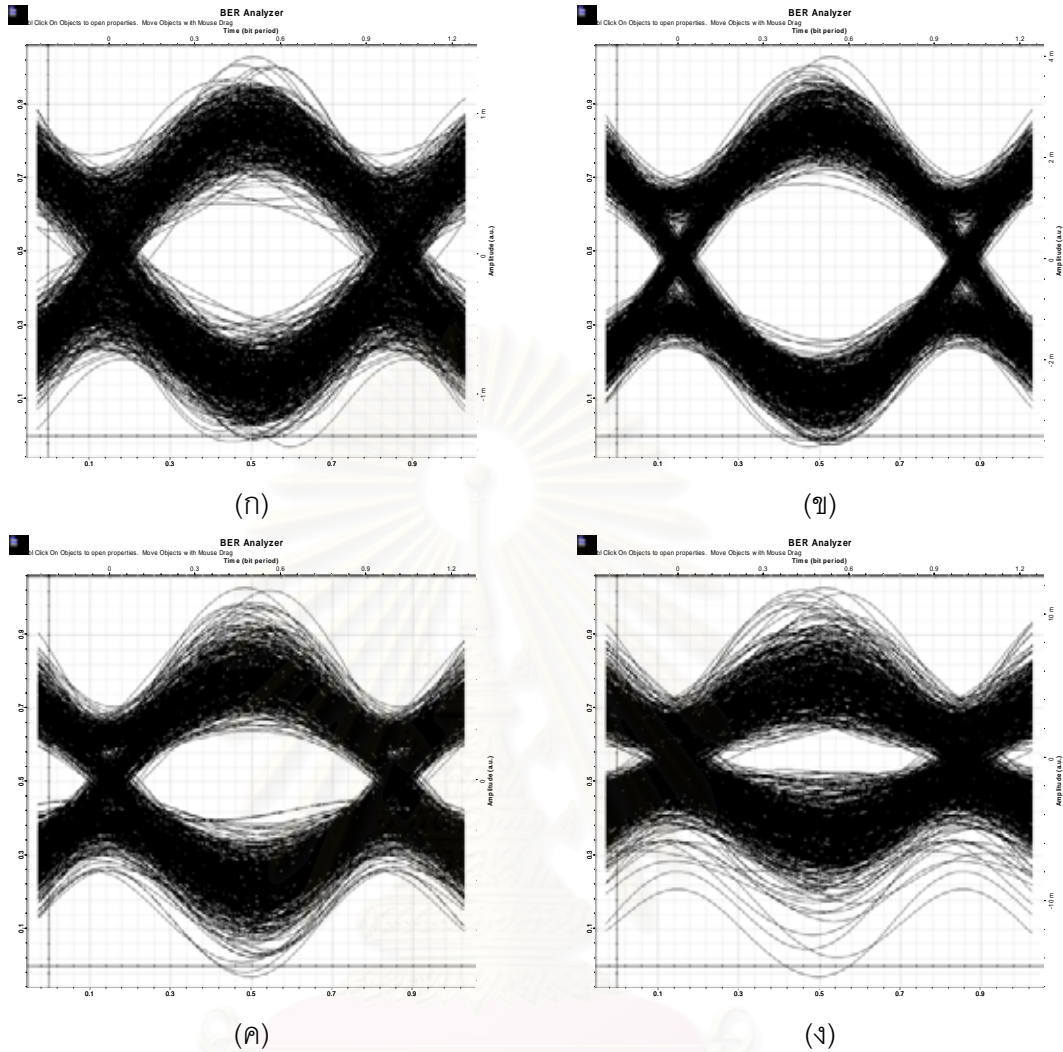
โดยที่ μ_1 และ σ_1 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณบิต '1' และ โดยที่ μ_0 และ σ_0 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณบิต '0' ซึ่งทำการวัดที่ตรงกลางบิต '0' และ '1' ณ มาตรฐานที่ $Q = 6.9$ จะได้อัตราผิดพลาดบิต (Bit-error rate) ประมาณ 10^{-12}

4.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

จากรูปที่ 4.2 -รูปที่ 4.3 เราจะเห็นได้ว่ากำลังขาเข้าเท่ากับ 3 mW จะให้ค่า Q-factor มากที่สุดแสดงถึงคุณภาพสัญญาณที่ภาครับดีที่สุด เนื่องจากว่าเมื่อกำลังของสัญญาณขาเข้ามีค่าน้อยจะทำให้กำลังของสัญญาณรบกวนมีผลค่อนข้างมากมีค่า OSNR ต่ำ แต่ถ้าเพิ่มกำลังขาเข้ามากขึ้นเรื่อยๆผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสงจะมีผลมากขึ้นเนื่องจากกำลังเฉลี่ยในระบบมีค่ามากขึ้น จึงเป็นผลให้ค่า Q-Factor มีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งขาเข้ากับ Q-Factor

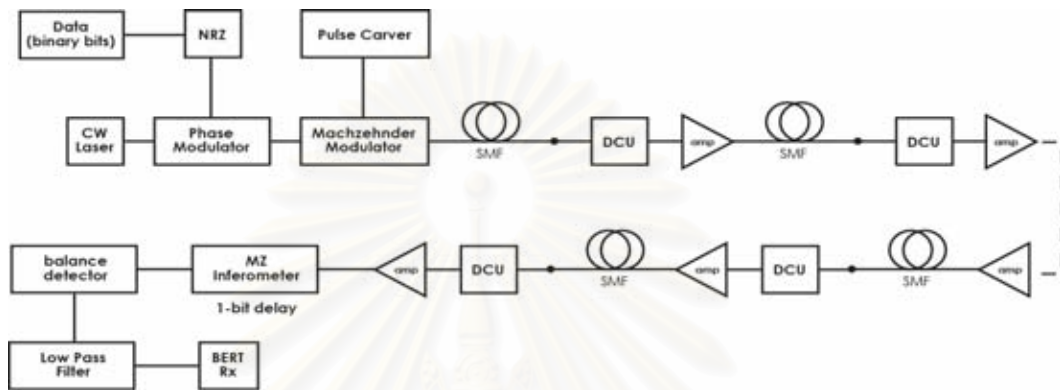


รูปที่ 4.3 Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ มีระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ระยะทาง 5000 km แต่ละกำลังส่งขาเข้า (ก) 1 mW (ข) 3 mW (ค) 5 mW (ง) 7 mW

4.3 แบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion

ในรูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ที่ชดเชยค่า Dispersion ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวด้วยกำลังงานต่างๆกัน สัญญาณข้อมูล pseudo random จำนวน 1024 บิตที่มีอัตราบิต 40 Gbps อุปกรณ์มอดูเลตเฟส อุปกรณ์เกลาสัญญาณ 40 Gbps เพื่อแปลงสัญญาณขาเข้า Non-Return-to-Zero (NRZ) ให้กลายเป็นสัญญาณ 66%-RZ เส้นใยแสงแบบ SMF และ DCF ที่มีการ

ลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km มีค่า Dispersion เป็น 16.3 กับ -109.1 ps/(km-nm) ตามลำดับ และมีสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละเส้นใยแสง $\gamma_{SMF} = 1.06 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ [26] มีการวางตำแหน่งของเครื่องขยายสัญญาณทางแสงทุกๆ 50 km พร้อมกับเครื่องชดเชย Dispersion (DCU) ที่เป็นอุดมคติ เครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) เท่ากับ 5 dB เป็นระยะทาง 5000 km



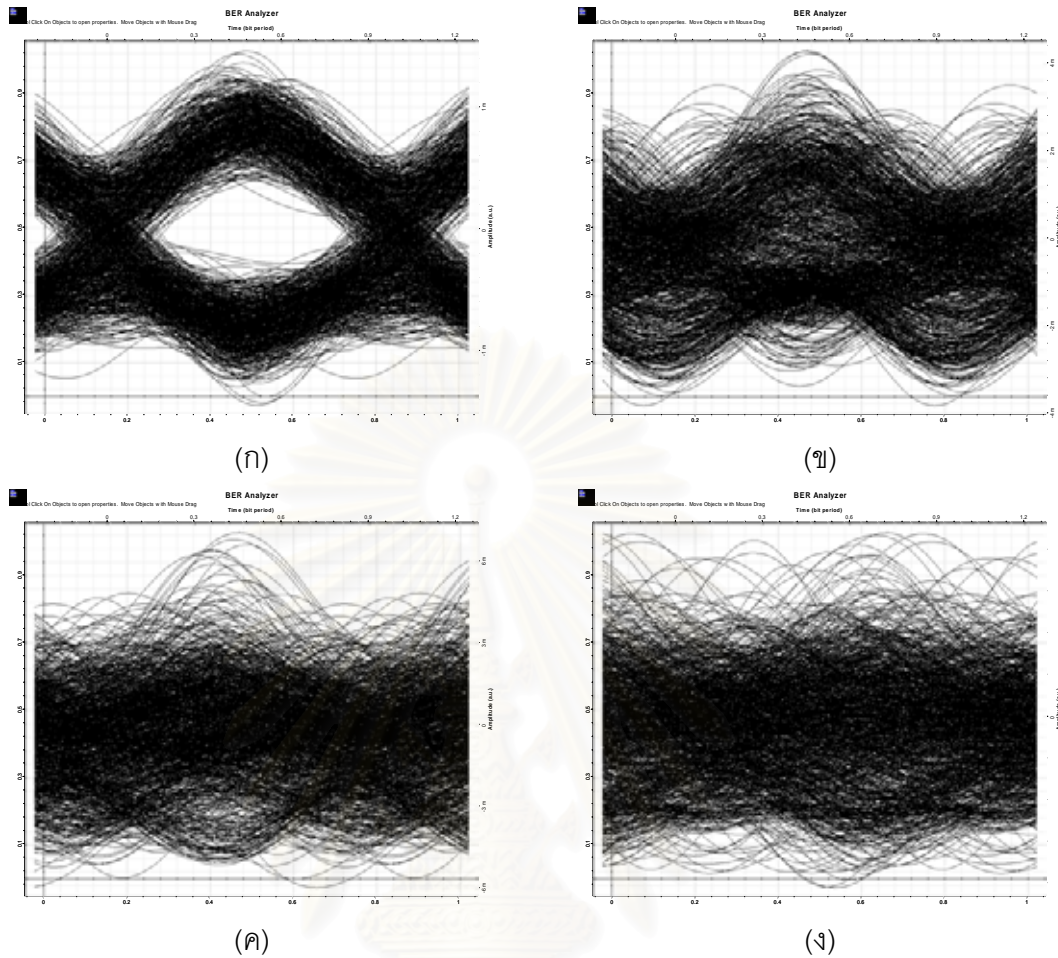
รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลต DPSK Return-to-Zero (RZ-DPSK) ช่องสัญญาณเดียวที่ใช้วิธีชดเชย Dispersion

4.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดียวของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion และการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ตารางที่ 4.1 ค่า Q-Factor ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion

กำลังสัญญาณขาเข้า (mW)	Q-Factor
1	4.35543
3	-
5	-
7	-

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังขาเข้าเท่ากับ 1 mW จะสามารถวัดค่า Q-Factor ออกมาได้แต่เมื่อเพิ่มกำลังขาเข้ามากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากระบบที่ชดเชย Dispersion นั้นไม่ได้ทำการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวสัญญาณที่ส่ง เมื่อเพิ่มกำลังส่งเข้าไปในระบบจะทำให้กำลังเฉลี่ยในระบบมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นแปรผันโดยตรงกับกำลังที่ส่ง



รูปที่ 4.5 Eye Pattern ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion มีระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ระยะทาง 5000 km แต่ละกำลังส่งขาเข้า (ก) 1 mW (ข) 3 mW (ค) 5 mW (ง) 7 mW

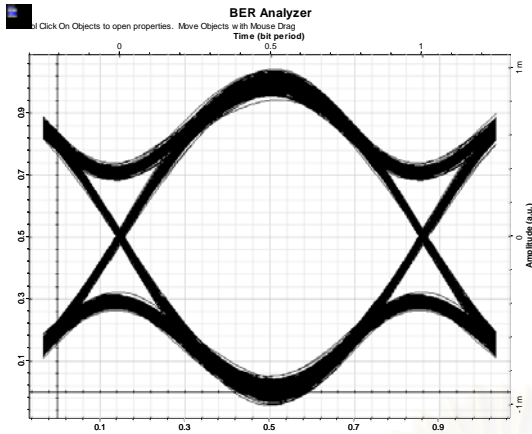
จากผลลัพธ์ของทั้งสองระบบนั้นเมื่อเราพิจารณาเชิงทฤษฎีตามรูปที่ 3.12 - รูปที่ 3.15 ระบบที่มีกำลังส่งเท่ากับ 1 mW ในรูปที่ 3.12 ความผิดพลาดของเฟสที่เกิดจากการสะสมของสัญญาณรบกวนในระบบที่ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบจะดีกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เพราะวาระบบที่ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบสามารถลดผลของ Modulation Instability ได้อย่างชัดเจน แต่ในระบบที่มีกำลังส่งเท่ากับ 3 mW, 5 mW และ 7 mW นั้นระบบที่ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบไม่สามารถลดผลของ Modulation Instability ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ในผลลัพธ์ของการจำลองระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เปรียบเทียบกับระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เห็นได้ว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ให้ผลของค่า Q-Factor ที่แยกวาระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบทุกค่าของกำลังส่งขาเข้า เนื่องจากว่าผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion รุนแรงกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เนื่องจาก

ในระบบ Dispersion ไม่มีการลดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสงเหมือนระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบ

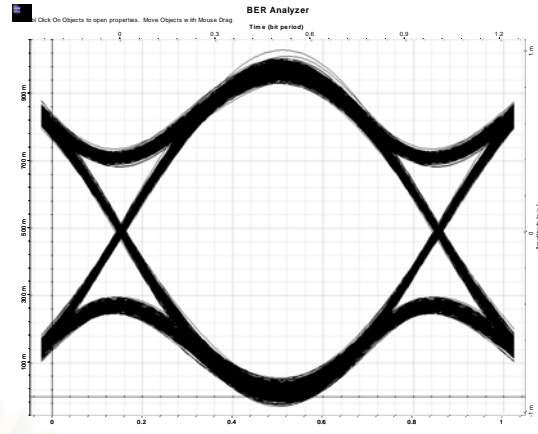
ตารางที่ 4.2 ค่า Q-Factor ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เปรียบเทียบระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ที่อัตราบิต 5 Gbps

ระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ	ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ
30.53057	31.97351
46.22925	52.68903
11.22095	67.48872

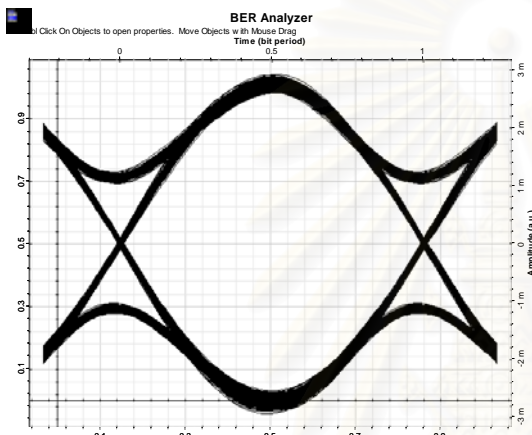
รูปที่ 4.6 แสดง Eye Pattern ของสัญญาณที่ภาครับระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบที่อัตราบิตเท่ากับ 2.5 Gbps โดยเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 1, 3 และ 5 mW ผลลัพธ์คุณภาพสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบเป็นดังตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าคุณภาพสัญญาณที่อัตราบิต 5 Gbps ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบทุกกำลังสัญญาณขาเข้า ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในรูปที่ 3.12 – รูปที่ 3.15



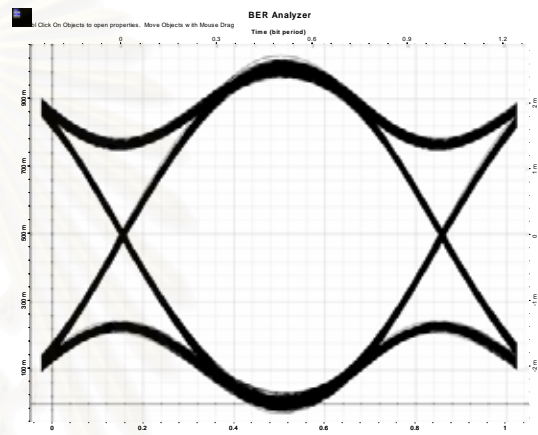
(ก)



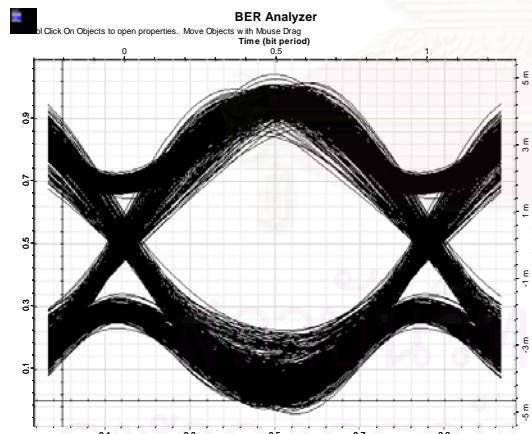
(ข)



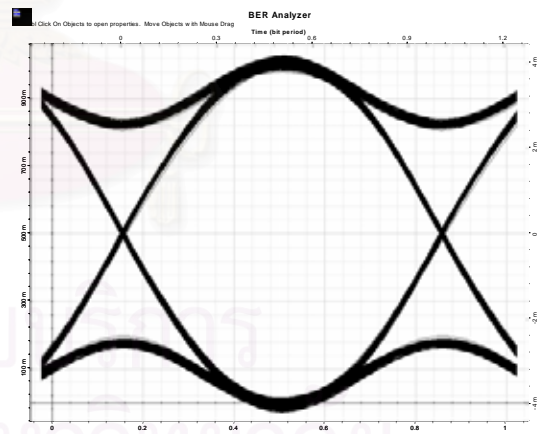
(ค)



(ง)

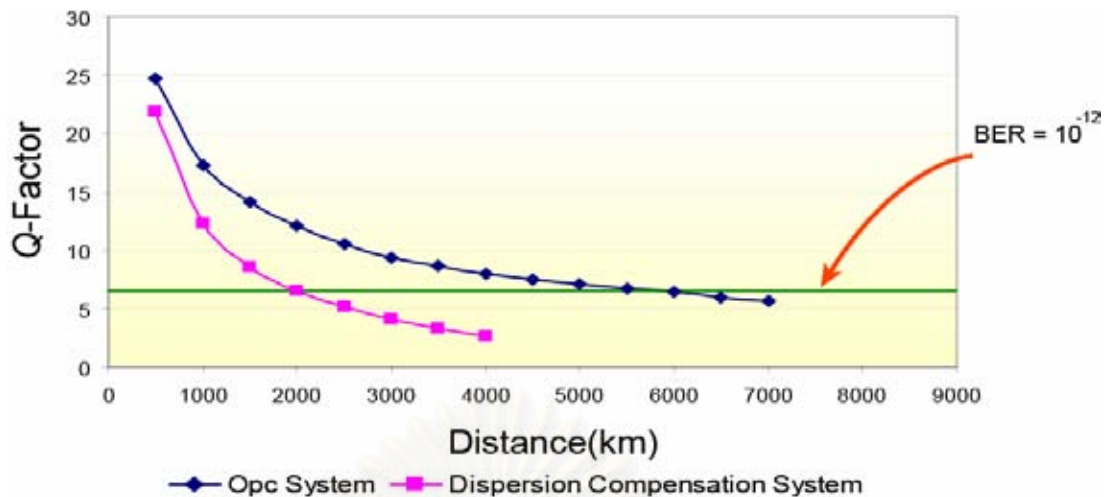


(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.6 Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเปรียบเทียบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ การส่งข้อมูลที่อัตราบิต 5 Gbps กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1, 3 และ 5 mW ระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ กำลังสัญญาณขาเข้า (ก) 1 mW (ค) 3 mW (จ) 5 mW ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ (ข) 1 mW (ง) 3 mW (ฉ) 5 mW

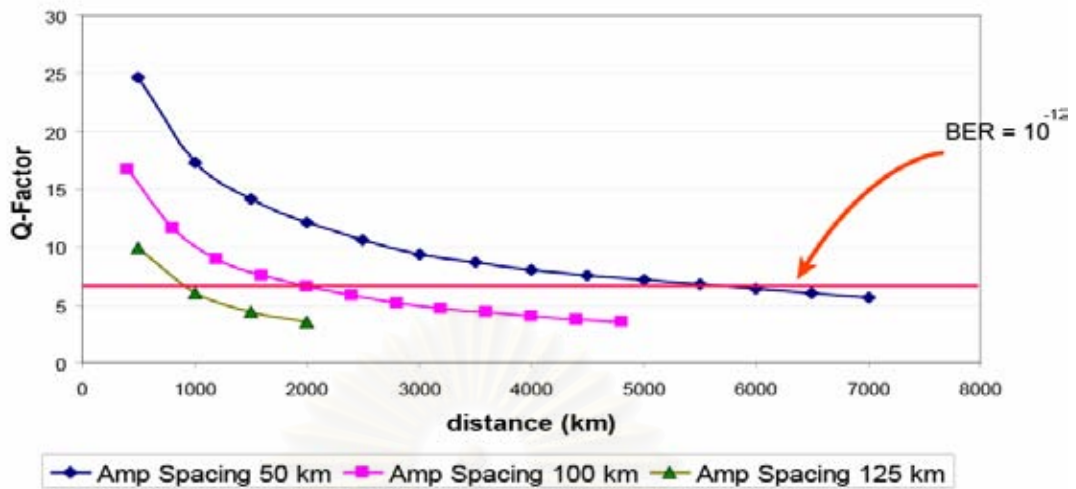


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการส่งสัญญาณในระยะทางไม่ไกลระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ให้คุณภาพสัญญาณที่ภาครับแยกว่าระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบไม่มากนัก (ระยะทาง 500 km ให้ผลแตกต่างค่า Q-Factor ประมาณ 2.8155) เหมือนทำการเพิ่มระยะในการส่งสัญญาณให้ไกลมากขึ้นระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ให้คุณภาพสัญญาณที่แยกว่าระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณที่เกิดการสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ทำให้ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ส่งได้ในระยะทางประมาณ 2000 km ที่ให้ค่า Q-Factor เท่ากับ 6.9 ส่วนในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบส่งได้ระยะทางประมาณ 6000 km ในค่า Q-Factor ที่เท่ากัน

4.5 แบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ช่องสัญญาณเดี่ยวของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบโดยปรับเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณทางแสง

ในแบบจำลองที่ผ่านมาเราได้ทำการให้ค่าระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณมีค่าคงที่เท่ากับ 50 km โดยเปลี่ยนค่ากำลังส่งขาเข้าเป็นค่าต่างๆแล้วดูผลลัพธ์ แต่ในหัวข้อนี้เราจะทำการเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณเป็นค่า 50 km, 100 km และ 125 km โดยกำหนดกำลังส่งขาเข้าเท่ากับ 3 mW เพื่อที่จะได้เห็นผลของ Modulation Instability ได้โดยกำหนดพารามิเตอร์อื่นๆเหมือนกับในหัวข้อที่ 4.1



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ค่า Q กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบที่แปรเปลี่ยนระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณทำให้ส่งสัญญาณในระยะทางไกลได้มากขึ้น เนื่องจากเพราะว่าการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังของสัญญาณในระบบที่มีระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณน้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าระบบที่มีระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณมาก ผลให้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงลดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีกว่า ทำให้ระบบที่มีระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณที่น้อยส่งสัญญาณได้ไกลกว่าระบบที่มีระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณที่มาก ณ ที่ให้ค่า Q-Factor เท่ากับ 6.9 ระบบที่มีระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ 100 km และ 125 km ได้ระยะทางในการส่งประมาณ 1000 km กับ 2000 km ซึ่งน้อยกว่าระบบที่มีระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ที่ส่งได้ระยะทางประมาณ 6000 km

บทที่ 5

การวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับสองคลื่นพาห้ความถี่ต่างกัน

ในบทที่ 3 ที่ผ่านมามีได้นำเสนอถึงวิธีการหาผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณพร้อมกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวรวมไปถึงการวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสทั้งในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ระบบที่มีและไม่มี การชดเชย Dispersion สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาผลเฉลยของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณไปกับสองคลื่นพาห้ที่มีความถี่ต่างกันโดยใช้หลักการคล้ายคลึงกับวิธีการหาผลเฉลยในบทที่ 3 รวมไปถึงการวิเคราะห์ความผิดพลาดเฟสที่เกิดขึ้น

5.1 การหาความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปกับสองคลื่นพาห้ความถี่ต่างกันในระบบที่ไม่มี การชดเชย Dispersion

สมมติว่าในระบบประกอบด้วยคลื่นพาห้สองความถี่หรือความยาวคลื่นเดินทางไปด้วยกันในเส้นใยแสง สำหรับการหาความผิดพลาดเฟสจะเริ่มต้นจาก NLSE ของสองความยาวคลื่น โดยรวมผลของ XPM เข้าไปด้วยและไม่ได้คำนึงผลของการลดทอนกำลังงานสัญญาณมาร่วมคิดคำนวณซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการ (5.1) และ (5.2)

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + i \frac{\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} = i \gamma_1 A_1 (\bar{P}_1 + 2\bar{P}_2) \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + d \frac{\partial A_2}{\partial T} + i \frac{\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} = i \gamma_2 A_2 (\bar{P}_2 + 2\bar{P}_1) \quad (5.2)$$

โดยที่

- A_1 เป็นสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่หลัก
- A_2 เป็นสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่ที่สองซึ่งเดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน
- β_{21} เป็นค่า GVD ณ ตำแหน่งของคลื่นพาห้ความถี่หลัก
- β_{22} เป็นค่า GVD ณ ตำแหน่งของคลื่นพาห้ความถี่ที่สอง
- T เป็นกรอบเวลา (Time frame) เทียบกับคลื่นพาห้ความถี่หลัก
- \bar{P}_1 เป็นกำลังงานเฉลี่ยตามระยะทางของสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่หลัก

\bar{P}_2 เป็นกำลังงานเฉลี่ยตามระยะทางของสัญญาณของคลื่นพาห้ความถี่ที่สอง

γ_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ความถี่ไม่เป็นเชิงเส้นของคลื่นพาห้ความถี่หลัก

γ_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ความถี่ไม่เป็นเชิงเส้นของคลื่นพาห้ความถี่ที่สอง

$d = \text{Group velocity mismatch} = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1}v_{g2}}$ แสดงถึงความห่างของสองคลื่นพาห้

v_{g1} เป็นค่าความเร็วกลุ่ม ณ ตำแหน่งของคลื่นพาห้ความถี่หลัก

v_{g2} เป็นค่าความเร็วกลุ่ม ณ ตำแหน่งของคลื่นพาห้ความถี่ที่สอง

ผลเฉลยสมการจะอยู่ตัวของคลื่นพาห้ (Steady state solution, $A_{1,ss}, A_{2,ss}$) แสดงได้เป็น

$$A_{1,ss} = \sqrt{\bar{P}_1} \exp\{i\gamma_1 z (\bar{P}_1 + 2\bar{P}_2)\} \quad (5.3)$$

$$A_{2,ss} = \sqrt{\bar{P}_2} \exp\{i\gamma_2 z (\bar{P}_2 + 2\bar{P}_1)\} \quad (5.4)$$

จากนั้น เราทำการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กเข้าไปในผลเฉลยภาวะอยู่ตัวทำให้ได้สมการ (5.5)

และ (5.6) ออกมา

$$A_1 = \left\{ \left(\sqrt{\bar{P}_1} + a_{m1}(z, T) \right) \exp\left(i\gamma_1 z (\bar{P}_1 + 2\bar{P}_2) \right) \right\} \quad (5.5)$$

$$A_2 = \left\{ \left(\sqrt{\bar{P}_2} + a_{m2}(z, T) \right) \exp\left(i\gamma_2 z (\bar{P}_2 + 2\bar{P}_1) \right) \right\} \quad (5.6)$$

โดยที่สัญญาณขนาดเล็ก $a_{m1}(z, T)$ และ $a_{m2}(z, T)$ อาจหมายถึงสัญญาณรบกวนที่ก่อกำเนิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยสามารถแสดงสัญญาณขนาดเล็กในรูปแบบทั่วไปได้ดังสมการ (5.7) และ (5.8)

$$a_{m1}(z, T) = (a_1(z) + ib_1(z)) \exp(i\omega_m T) \quad (5.7)$$

$$a_{m2}(z, T) = (a_2(z) + ib_2(z)) \exp(i\omega_m T) \quad (5.8)$$

โดยที่ $a_1(z)$ แสดงถึงส่วนประกอบ In-phase และ $b_1(z)$ แสดงถึงส่วนประกอบ Quadrature-phase ของสัญญาณขนาดเล็กที่มอดูเลตอยู่ในคลื่นพาห้ความถี่หลัก $a_2(z)$ แสดงถึงส่วนประกอบ In-phase และ $b_2(z)$ แสดงถึงส่วนประกอบ Quadrature-phase ของสัญญาณขนาดเล็กที่มอดูเลตอยู่ในคลื่นพาห้ความถี่ที่สอง โดยทั้ง $a_1(z)$, $b_1(z)$, $a_2(z)$ และ $b_2(z)$ เป็นฟังก์ชันค่าจริงของ z สำหรับ ω_m แสดงถึงความถี่เชิงมุมของสัญญาณขนาดเล็กที่ถูกมอดูเลต ดังนั้นเมื่อนำสมการ (5.5)-(5.8) แทนลงในสมการ (5.1) และ (5.2) ทำให้เราได้สมการ (5.9) และ (5.10)

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{m1}}{\partial z} + i\gamma_1 (\bar{P}_1 + 2\bar{P}_2) \left(\sqrt{\bar{P}_1} + a_{m1} \right) + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 a_{m1}}{\partial T^2} = \\ i\gamma_1 \left(\left(\sqrt{\bar{P}_1} + \text{Re}\{a_{m1}\} \right)^2 + \left(\text{Im}\{a_{m1}\} \right)^2 + 2 \left(\left(\sqrt{\bar{P}_2} + \text{Re}\{a_{m2}\} \right)^2 + \left(\text{Im}\{a_{m2}\} \right)^2 \right) \right) \left(\sqrt{\bar{P}_1} + a_{m1} \right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial a_{m2}}{\partial z} + i\gamma_2 (\bar{P}_2 + 2\bar{P}_1) (\sqrt{\bar{P}_2} + a_{m2}) + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 a_{m2}}{\partial T^2} + d \frac{\partial a_{m2}}{\partial T} =$$

$$i\gamma_2 \left((\sqrt{\bar{P}_2} + \text{Re}\{a_{m2}\})^2 + (\text{Im}\{a_{m2}\})^2 + 2 \left((\sqrt{\bar{P}_1} + \text{Re}\{a_{m1}\})^2 + (\text{Im}\{a_{m1}\})^2 \right) \right) (\sqrt{\bar{P}_2} + a_{m2}) \quad (5.10)$$

เราจะทำการประมาณสมการ (5.9) และ (5.10) โดยมีเงื่อนไขที่ว่าสัญญาณ a_{m1}, a_{m2} มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ $\sqrt{\bar{P}_1}, \sqrt{\bar{P}_2}$ ตามลำดับซึ่ง

$$\left(2\sqrt{\bar{P}_1} \text{Re}\{a_{m1}\} + |a_{m1}|^2 + 4\sqrt{\bar{P}_2} \text{Re}\{a_{m2}\} + 2|a_{m2}|^2 \right) (\sqrt{\bar{P}_1} + a_{m1})$$

$$\approx 2\bar{P}_1 \text{Re}\{a_{m1}\} + 4\sqrt{\bar{P}_1\bar{P}_2} \text{Re}\{a_{m2}\} \quad (5.11)$$

และ

$$\left(2\sqrt{\bar{P}_2} \text{Re}\{a_{m2}\} + |a_{m2}|^2 + 4\sqrt{\bar{P}_1} \text{Re}\{a_{m1}\} + 2|a_{m1}|^2 \right) (\sqrt{\bar{P}_2} + a_{m2})$$

$$\approx 2\bar{P}_2 \text{Re}\{a_{m2}\} + 4\sqrt{\bar{P}_1\bar{P}_2} \text{Re}\{a_{m1}\} \quad (5.12)$$

ทำให้ได้ผลการประมาณเป็นดังสมการ (5.13) และ (5.14)

$$\frac{\partial a_{m1}}{\partial z} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 a_{m1}}{\partial T^2} = i\gamma_1 \left(\bar{P}_1 (a_{m1} + a_{m1}^*) + 2\bar{P}_2 (a_{m2} + a_{m2}^*) \right) \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial a_{m2}}{\partial z} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 a_{m2}}{\partial T^2} + d \frac{\partial a_{m2}}{\partial T} = i\gamma_2 \left(\bar{P}_2 (a_{m2} + a_{m2}^*) + 2\bar{P}_1 (a_{m1} + a_{m1}^*) \right) \quad (5.14)$$

เมื่อแทน a_{m1}, a_{m2} จากสมการ (5.7) และ (5.8) ลงในสมการ (5.13) และ (5.14) ตามลำดับ จะทำให้ได้ผลลัพธ์ในสมการ (5.15) และ (5.16)

$$\frac{da_1}{dz} + i \frac{db_1}{dz} - \frac{i\beta_{21}\omega_m^2}{2} (a_1 + ib_1) = i2\gamma_1 \left(\bar{P}_1 a_1 + 2\sqrt{\bar{P}_1\bar{P}_2} a_2 \right) \quad (5.15)$$

$$\frac{da_2}{dz} + i \frac{db_2}{dz} - \frac{i\beta_{22}\omega_m^2}{2} (a_2 + ib_2) + i\omega_m d (a_2 + ib_2) = i2\gamma_2 \left(\bar{P}_2 a_2 + 2\sqrt{\bar{P}_1\bar{P}_2} a_1 \right) \quad (5.16)$$

เพื่อจะหาผลเฉลยในสมการ (5.15) และ (5.16) จึงจำเป็นต้องแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพออกจากกัน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (5.17) - (5.20)

$$\frac{da_1}{dz} = -\frac{1}{2} \beta_{21} \omega_m^2 b_1 \quad (5.17)$$

$$\frac{db_1}{dz} = \left(\frac{1}{2} \beta_{21} \omega_m^2 + 2\gamma P_1 \right) a_1 + 4\gamma \sqrt{P_1 P_2} a_2 \quad (5.18)$$

$$\frac{da_2}{dz} = \left(-\frac{1}{2} \beta_{22} \omega_m^2 + d\omega_m \right) b_2 \quad (5.19)$$

$$\frac{db_2}{dz} = \left(\frac{1}{2} \beta_{22} \omega_m^2 + 2\gamma P_2 - d\omega_m \right) a_2 + 4\gamma \sqrt{P_1 P_2} a_1 \quad (5.20)$$

เมื่อเรานำสมการ (5.17) - (5.20) มาเขียนในรูปเมตริกซ์ ทำให้ได้รูปแบบสมการเมตริกซ์ (5.21)

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}\beta_{21}\omega_m^2 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\beta_{21}\omega_m^2 + 2\gamma P_1 & 0 & 4\gamma\sqrt{P_1 P_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2}\beta_{22}\omega_m^2 + d\omega_m \\ 4\gamma\sqrt{P_1 P_2} & 0 & 2\gamma P_2 + \frac{1}{2}\beta_{22}\omega_m^2 - d\omega_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

ดังนั้นผลเฉลยของสมการ (5.21) สามารถแสดงได้ในสมการ (5.22) ซึ่งเป็นผลเฉลยของสัญญาณขนาดเล็กเมื่อเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทาง z โดยขึ้นอยู่กับค่าเริ่มแรก (Initial value) ของสัญญาณขนาดเล็กที่ระยะทาง $z = 0$

$$\begin{bmatrix} a_1(z=L) \\ b_1(z=L) \\ a_2(z=L) \\ b_2(z=L) \end{bmatrix} = \exp(\bar{A}L) \begin{bmatrix} a_1(z=0) \\ b_1(z=0) \\ a_2(z=0) \\ b_2(z=0) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

โดยที่ Eigen vector \bar{A} แสดงเป็นเมตริกซ์ดังแสดงในสมการ (5.23)

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}\beta_{21}\omega_m^2 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\beta_{21}\omega_m^2 + 2\gamma P_1 & 0 & 4\gamma\sqrt{P_1 P_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2}\beta_{22}\omega_m^2 + d\omega_m \\ 4\gamma\sqrt{P_1 P_2} & 0 & 2\gamma P_2 + \frac{1}{2}\beta_{22}\omega_m^2 - d\omega_m & 0 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

ต่อมาทำการหาผลเฉลยสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณไปกับคลื่นพาร์สองความถี่ รูปแบบในการหาจะคล้ายกับหัวข้อที่ 3.2 ในคลื่นพาร์ความถี่เดียว

เริ่มจากสมมุติให้สัญญาณรบกวนมีการแจกแจงแบบ Gaussian และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 ดังสมการ (5.24)

$$[a_1(\omega_m) \quad b_1(\omega_m) \quad a_2(\omega_m) \quad b_2(\omega_m)]^T \quad (5.24)$$

มีค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) เท่ากับ

$$B_0 = \begin{bmatrix} \frac{S_0}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_0}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_0}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S_0}{2} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

โดยที่ S_0 เป็นกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณตามสมการ (3.17) ดังนั้นเราสามารถหาลำดับของสัญญาณรบกวน ณ ระยะทางเท่ากับ z ในระบบคลื่นพาสสองความถี่ได้ดังนี้

$$B(\omega_m, z) = [\exp(\bar{A}l_A)] B_0 [\exp(\bar{A}l_A)]^T \quad (5.26)$$

ที่ภาครับจะได้กำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณที่วางอยู่ในระบบรวมกันตามสมการ (3.19)

$$B_N(\omega_m) = \frac{S_0}{2} \sum_{k=1}^N [\exp(\bar{A}l_A)]^{N-k} [\exp(\bar{A}l_A)]^T \quad (5.27)$$

โดยที่ N คือจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ -1 ดังนั้นในการหาความผิดพลาดเฟส ($\Delta\phi_{sm}$) ที่ภาครับ ซึ่งเกิดจากผลรวมของสัญญาณรบกวนจากเครื่องขยายสัญญาณได้ดังนี้

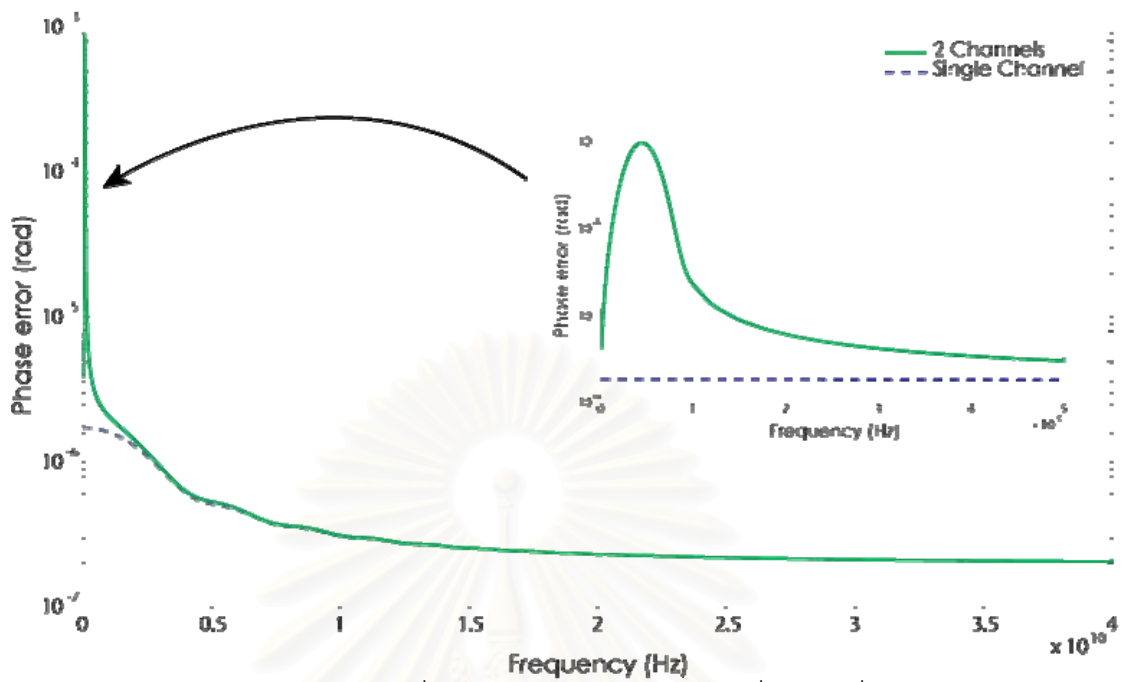
$$\Delta\phi_{sm} = \tan^{-1} \left(\frac{b_1(\omega_m)}{\sqrt{P_1} + a_1(\omega_m)} \right) \quad (5.28)$$

โดยที่ $a_1(\omega_m) = \sqrt{B_{N(1,1)}(\omega_m)}$ และ $b_1(\omega_m) = \sqrt{B_{N(2,2)}(\omega_m)}$ สามารถหาได้จากสมการ (3.19) เราได้กำหนดค่าเริ่มแรกให้กับกำลังของสัญญาณ a_m กับ b_m ในสมการ (5.25)

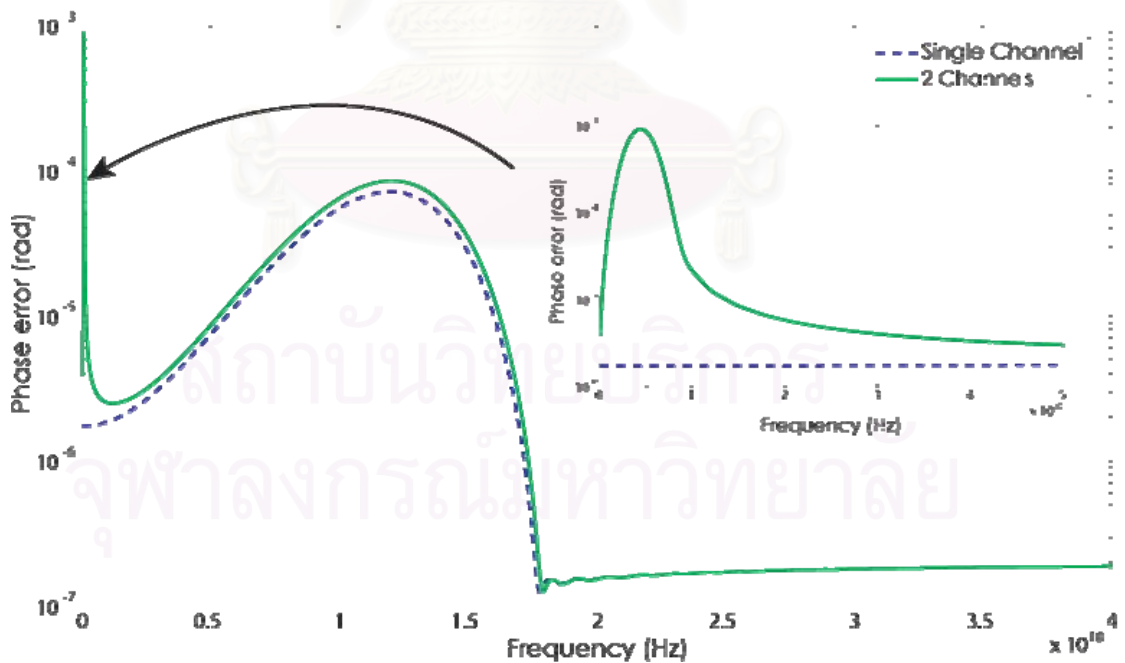
จากสมการ (5.28) ทำให้เราสามารถหาความผิดพลาดของเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion ไปกับคลื่นพาสสองความถี่ ดังนั้นเราสามารถหาความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของเฟสในสมการ (5.28) กับความถี่ของสัญญาณรบกวนในระบบที่ไม่มีการชดเชย Dispersion

ในการหาผลตอบสนองนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ขนาดของค่า GVD ($|\beta_2|$) = 0.5 ps²/km กำลังส่งขาเข้าของคลื่นพาส (P_0) = 3 mw สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (γ) = 1.3 w⁻¹km⁻¹ [28] เครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) เท่ากับ 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณกับเครื่องขยายสัญญาณ = 50 km และระยะทางที่ใช้ในการคำนวณ = 5000 km ดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

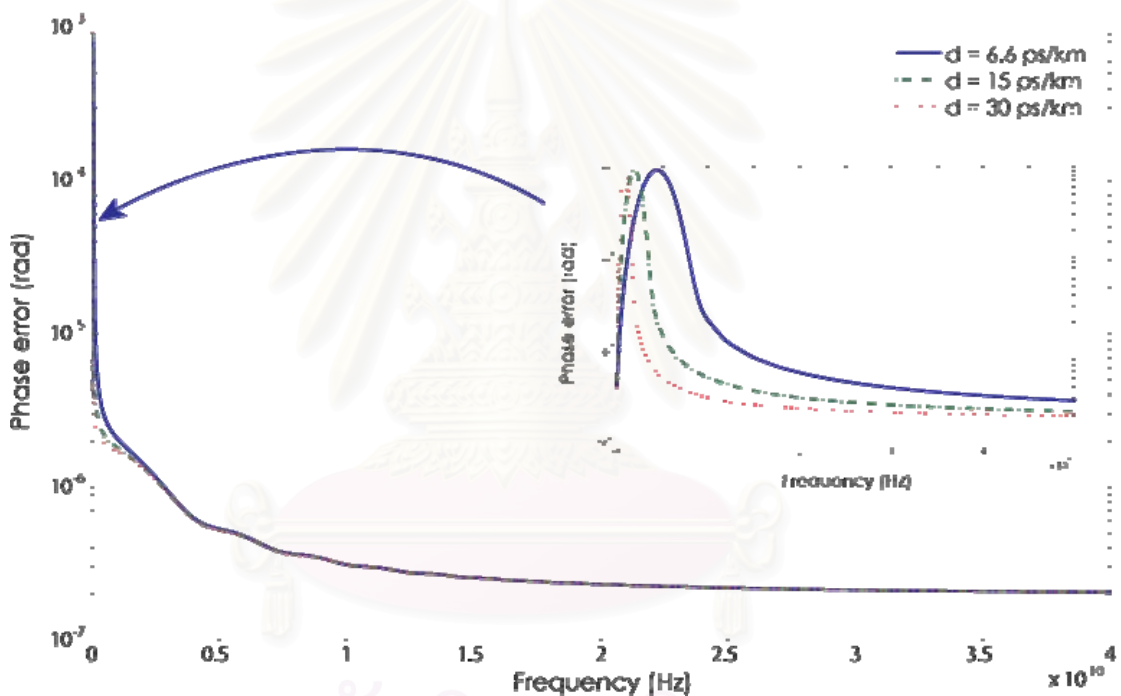


รูปที่ 5.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใย
แสงที่มีค่า $GVD = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง 40 GHz



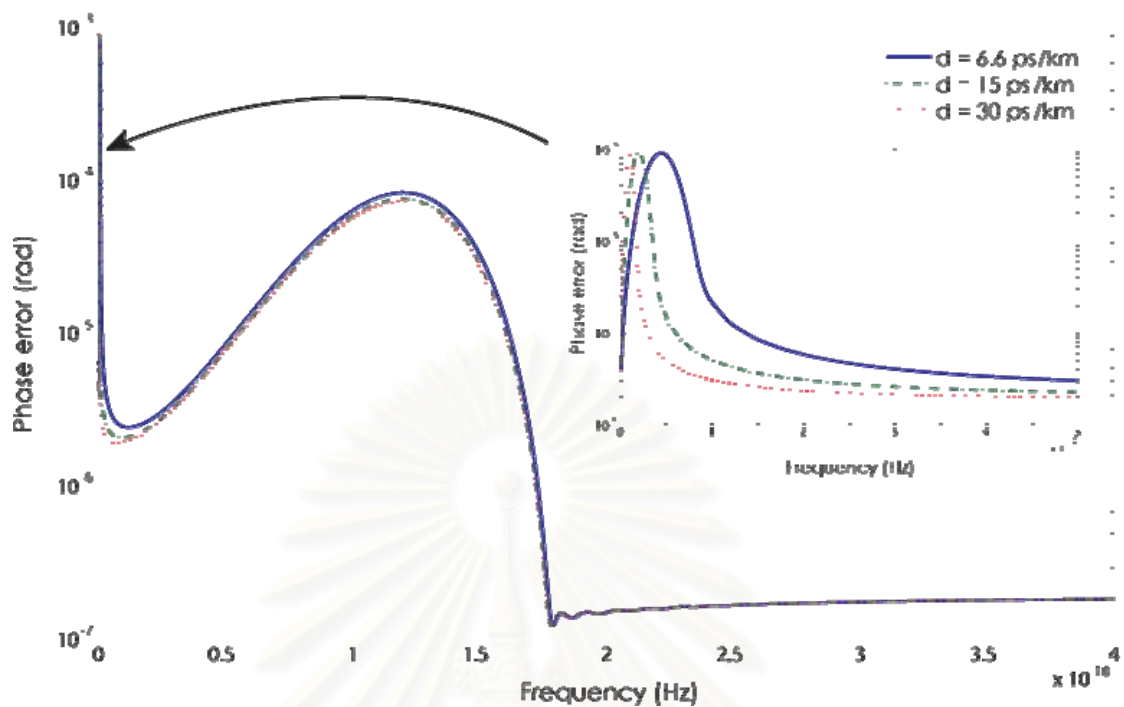
รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใย
แสงที่มีค่า $GVD = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง 40 GHz

ในรูปที่ 5.1 -รูปที่ 5.2 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสสำหรับการเดินทางในเส้นใยแสงของสองคลื่นพาร์กอร์ณี Normal และ Anomalous dispersion จากรูปที่ 5.1 -รูปที่ 5.2 เห็นได้ว่าทั้งกรณี Normal และ Anomalous dispersion บริเวณความถี่ใกล้กับความถี่ของคลื่นพาร์กอร์ณี มีลักษณะคล้ายกับ MI ขนาดเล็กๆของกรณี Anomalous dispersion (ดังที่แสดงในรูปเล็กของรูปที่ 5.1และรูปที่ 5.2) เกิดมาจากผลของ XPM ที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อความผิดพลาดเฟสในช่วงความถี่นั้นๆ และเมื่อความถี่สูงขึ้นความผิดพลาดเฟสมีค่าน้อยลง ส่วนในกรณี Anomalous dispersion ดังรูปที่ 5.2 จะมีผลของ modulation instability (MI) เกิดขึ้นเหมือนกับกรณีที่ส่งคลื่นพาร์กอร์ณีเดียว แต่จะมีความผิดพลาดเฟสมากกว่าเนื่องจากผลของ XPM ไปเสริม



รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาร์กอร์ณีเดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง 40 GHz และ $d = 6.6, 15$ และ 30 ps/km

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใย แสงที่มีค่า $GVD = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง 40 GHz และ $d = 6.6, 15$ และ 30 ps/km

เนื่องจากตัวแปร d แสดงถึงความห่างทางความถี่หรือความยาวคลื่นของสองช่องสัญญาณที่กำลังพิจารณา เมื่อ d มีค่าน้อยจะทำให้ผลของ XPM ที่มีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น เพราะว่าเมื่อความห่างทางความถี่ของสองคลื่นพาห์มีค่าน้อยลงจะส่งผลให้ความแตกต่างความเร็วกลุ่มของสองคลื่นพาห์มีค่าน้อยลงตามและทำให้คลื่นพาห์ความถี่ที่สองเดินทางไปพร้อมกับความถี่หลักมากขึ้น รูปที่ 5.3 รูปที่ 5.4 แสดงถึงผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของสองคลื่นพาห์ที่มีค่า d ต่างกันเดินทางในเส้นใยแสงกรณี Normal และ Anomalous dispersion ตามลำดับ ในรูปเล็กของรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ d มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ช่วงความถี่ที่มีความผิดพลาดเฟสที่เกิดเนื่องจาก XPM แคบลง ในบริเวณที่ XPM มีนัยสำคัญต่อความผิดพลาดเฟส ในกรณีของ Normal dispersion เมื่อทำการปรับค่า d และจะไม่ส่งผลกระทบต่อ SPM แต่ในกรณีของ Anomalous dispersion ผลกระทบของ XPM ส่งผลกระทบต่อ MI เมื่อทำการปรับค่า d จะมีผลกระทบต่อความผิดพลาดเฟสที่เกิดจากผลของ MI ดังในรูปที่ 5.4

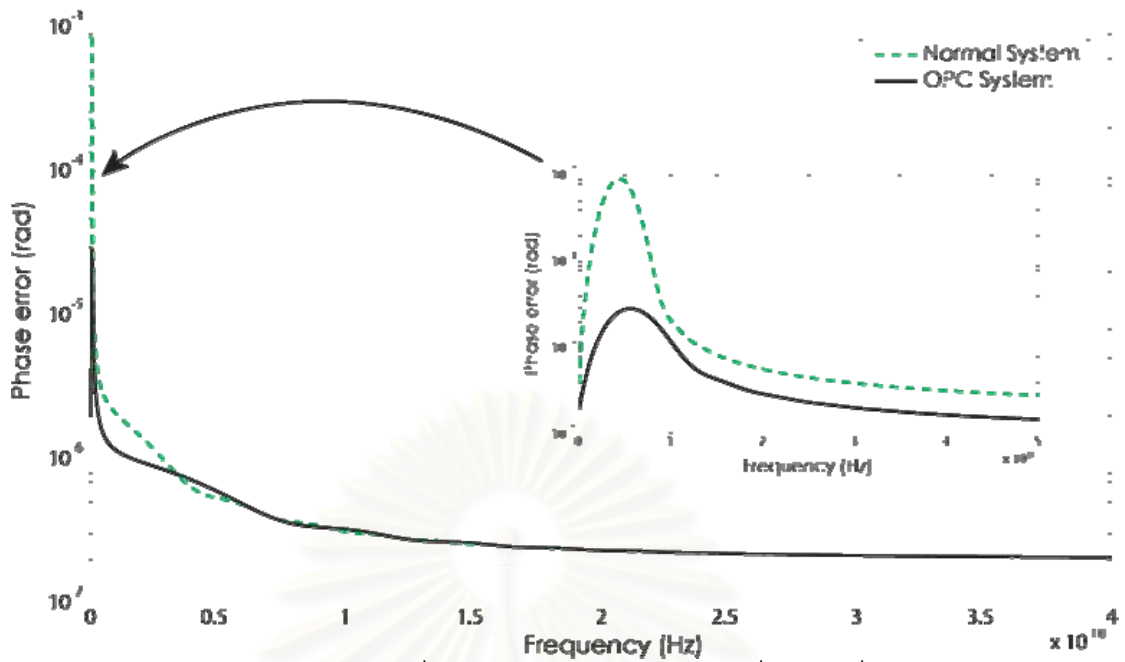
5.2 การความผิดพลาดเฟสของสัญญาณเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห้ความถี่เดียวในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

การหาความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบที่มีคลื่นพาห้สองความถี่ มีขั้นตอนในการหาใกล้เคียงกับการความผิดพลาดทางเฟสของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบไปกับคลื่นพาห้เดียว ในสมการ (3.26) ทำการเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอน ($M(\omega_m, l_A)$) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีผลกระทบของ XPM เป็น $\exp(\bar{A}l_A)$ ได้ดังสมการ (5.29)

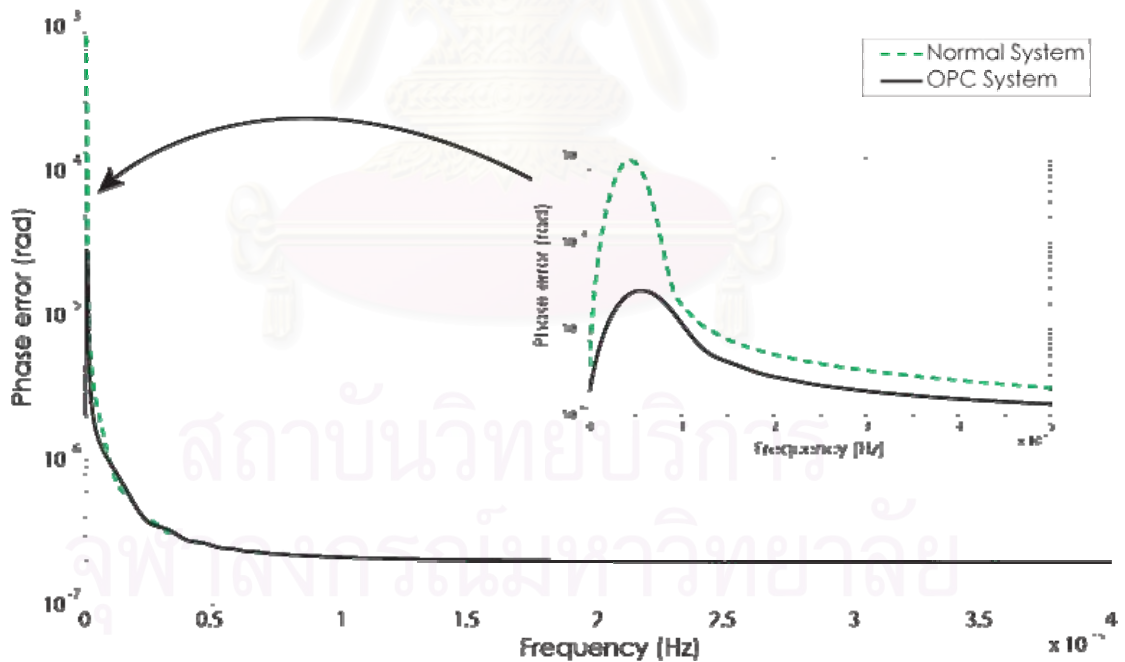
$$B_{OPC}(\omega_m) = \left(S_0 \sum_{k=1}^{N/2} [\exp(\bar{A}l_A)]^{\frac{N-k}{2}} \left[[\exp(\bar{A}l_A)]^T \right]^{\frac{N-k}{2}} \right) + \left(\frac{S_0}{2} [\exp(\bar{A}l_A)]^{\frac{N}{2}} [\exp(\bar{A}l_A)]^{\frac{N}{2}} \right) - \frac{S_0}{2} \quad (5.29)$$

ในหัวข้อที่ 5.3 และ 5.4 เราสามารถหาความผิดพลาดทางเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณในระบบคลื่นพาห้สองความถี่ที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดทางเฟสในสมการ (5.29) กับความถี่ของสัญญาณรบกวนในระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ซึ่งความผิดพลาดนี้แสดงให้ถึงสมรรถนะในการส่งข้อมูลในรูปแบบ DPSK เปรียบเทียบกันระหว่างสองระบบนี้

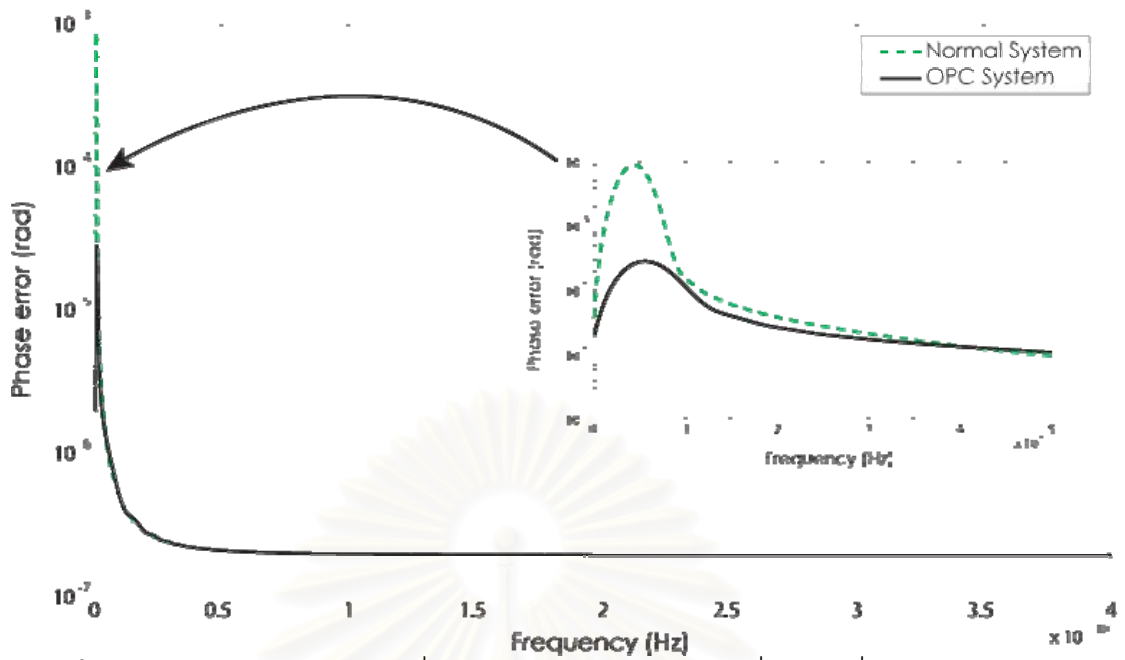
ในการหาผลตอบสนองนี้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ การลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) = 0.2 dB/km ขนาดค่า GVD ($|\beta_{21}|, |\beta_{22}|$) = 0.5, 5 และ 20 ps²/km กำลังงานขาเข้าของคลื่นพาห้ (P_1, P_2) = 3 mw สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง (γ) = 1.3 w⁻¹km⁻¹ เครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) เท่ากับ 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณ (l_A) เท่ากับ 50 km ระยะทางที่ใช้ในการคำนวณ (L) = 5,000 km



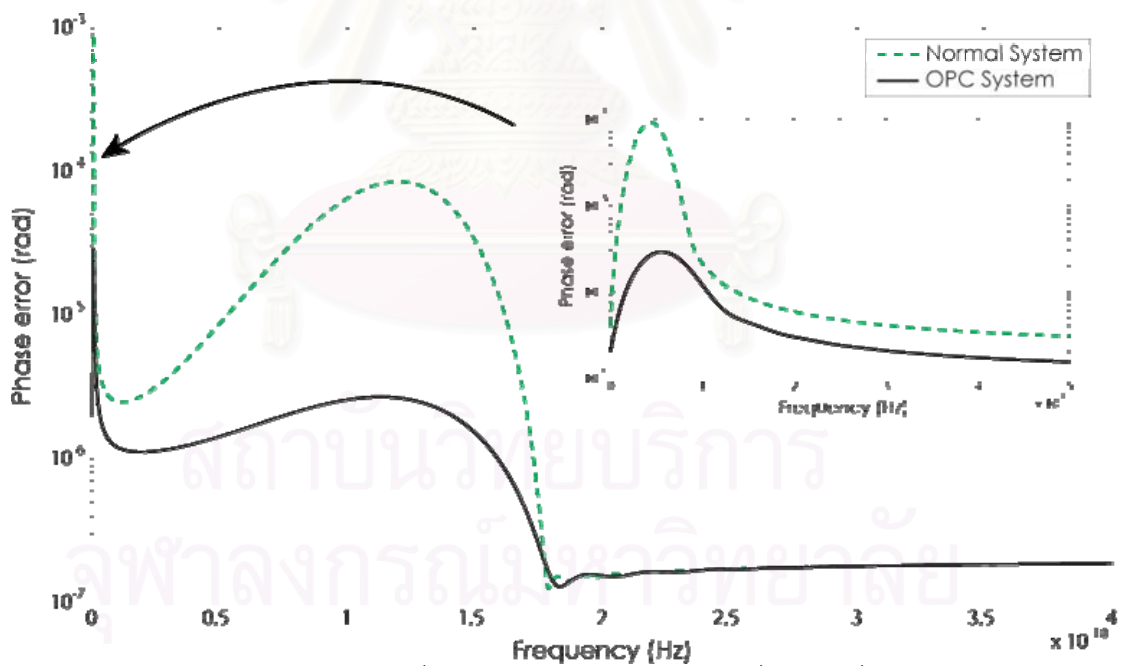
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบสองช่องสัญญาณ



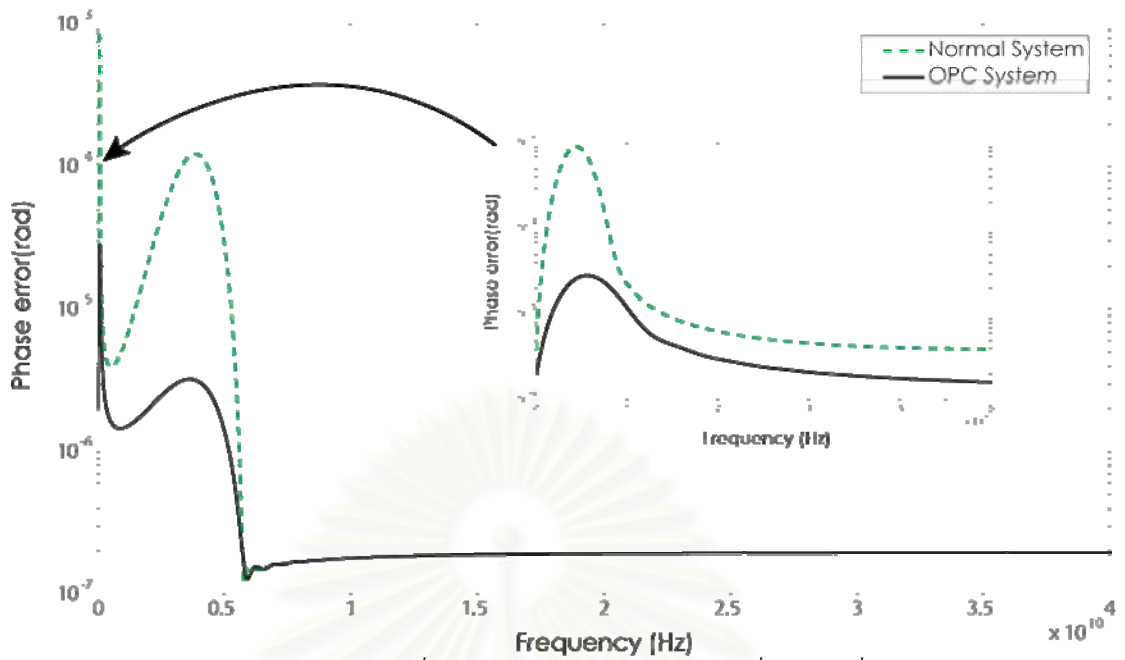
รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = 5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบสองช่องสัญญาณ



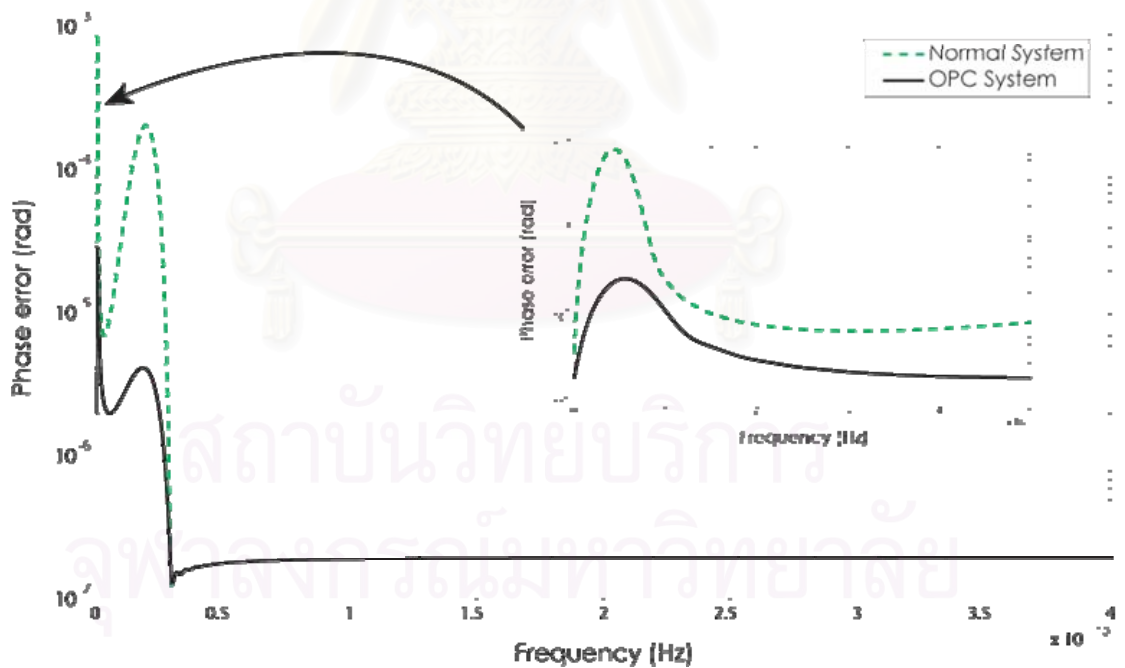
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบสองช่องสัญญาณ



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบสองช่องสัญญาณ

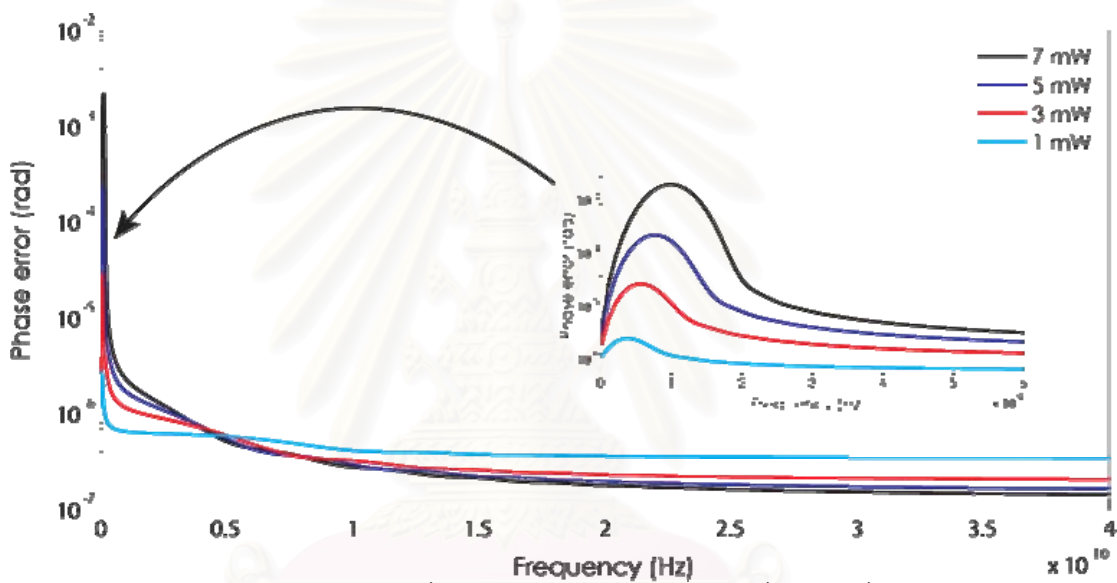


รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = -5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบสองช่องสัญญาณ



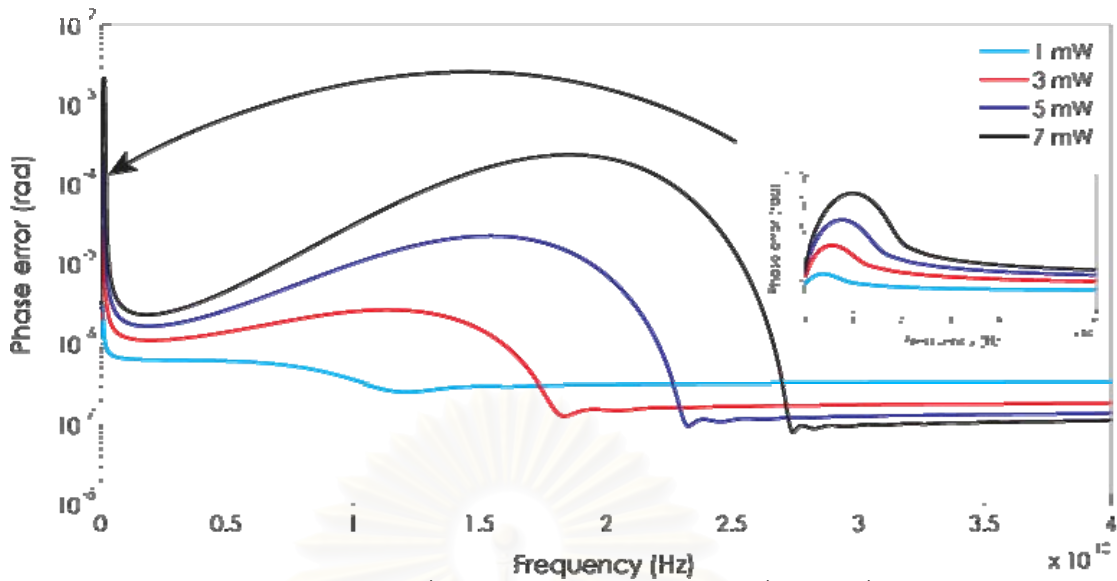
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบในระบบสองช่องสัญญาณ

รูปที่ 5.5 - รูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้วิธีการตอนจุดสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นสามารถผลความผิดพลาดเฟสที่เกิดผลกระทบจาก XPM ในทั้งกรณี Normal dispersion และ Anomalous dispersion ทุกค่า GVD (ดังรูปเล็กที่แสดงในรูปที่ 5.5 - รูปที่ 5.10) และกรณี Anomalous dispersion นั้นเครื่องคอนจูเกตไม่สามารถลดผลของ Modulation Instability ได้ อย่างสมบูรณ์ และ จากรูปที่ 5.5 - รูปที่ 5.10 เมื่อค่า GVD เพิ่มมากขึ้นความผิดพลาดของเฟสกรณี Normal dispersion และ Anomalous dispersion ของทั้งสองระบบจะลู่เข้าสถานะคงตัวเร็วขึ้น เฉพาะนั้นในกรณี Anomalous dispersion เมื่อเพิ่มค่า GVD แล้วช่วงความถี่ที่เกิด Modulation Instability ก็น้อยลงตาม



รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใยแสงที่มีค่า $GVD = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 mW

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสกรณีที่มีสองคลื่นพาห์เดินทางเส้นใย แสงที่มีค่า $GVD = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ในช่วง ในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่ กึ่งกลางระบบ กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 mW

รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 แสดงถึงความต่างของผลตอบสนองทางความถี่ต่อความ ผิดพลาดเฟสเมื่อกำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 mW ในกรณี Normal dispersion ใน รูปที่ 5.11 เมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณมากขึ้นเรื่อยๆส่งผลให้ความผิดพลาดเฟสลู่เข้าสู่สถานะคงตัวช้า ลง ส่วนในกรณี Anomalous dispersion ในรูปที่ 5.12 เมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณมากขึ้นเรื่อยๆส่งผล ให้เกิด MI มากขึ้น และในรูปเล็กของรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 แสดงความผิดพลาดเฟสที่เกิดใกล้ กับความถี่คลื่นพาห์ซึ่งเป็นผลมาจาก XPM เมื่อเราเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้าจะเห็นได้ว่าความ ผิดพลาดเฟสที่เกิดมาจากผลของ XPM มากขึ้นตามกำลังสัญญาณขาเข้า เนื่องจากเพราะว่า ผลกระทบของ XPM แปรผันโดยตรงกับกำลังสัญญาณขาเข้า เราสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลัง สัญญาณขาเข้าส่งผลทำให้สมรรถนะระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบแย่ลง เพราะมี ช่วงความถี่ก่อนที่จะลู่เข้าสู่สถานะคงตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้ามากขึ้น

5.3 การหาความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก เครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาห์สองความถี่ต่างกันในระบบที่ชดเชย Dispersion เป็น รายคาบ

ในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบของระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความ ยาวคลื่น เป็นระบบที่นำเส้นใยแสงที่มีค่า Dispersion ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยและทำให้ค่า Dispersion เฉลี่ยในช่วงสัญญาณหลักมีค่าเท่ากับศูนย์

ในการหาความผิดพลาดเฟสในระบบที่มีการชดเชย Dispersion นั้น เมื่อสัญญาณหรือคลื่นพาห์เดินทางมาถึง Dispersion compensated fiber (DCF) เราจะสมมติว่าไม่มีผลของ Kerr effect ภายใน DCF และสมมติว่าอัตราการชดเชย Dispersion อยู่ที่ 40 เท่า ดังนั้น เราสามารถหาผลเฉลยของสัญญาณขนาดเล็กที่ถูกมอดูเลตไปกับคลื่นพาห์ในระบบที่มีการชดเชย Dispersion ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_1(z=L) \\ b_1(z=L) \\ a_2(z=L) \\ b_2(z=L) \end{bmatrix} = \left(\exp(\bar{A}_{com} L_{com}) \exp(\bar{A} L_A) \right)^N \begin{bmatrix} a_1(z=0) \\ b_1(z=0) \\ a_2(z=0) \\ b_2(z=0) \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

โดยที่

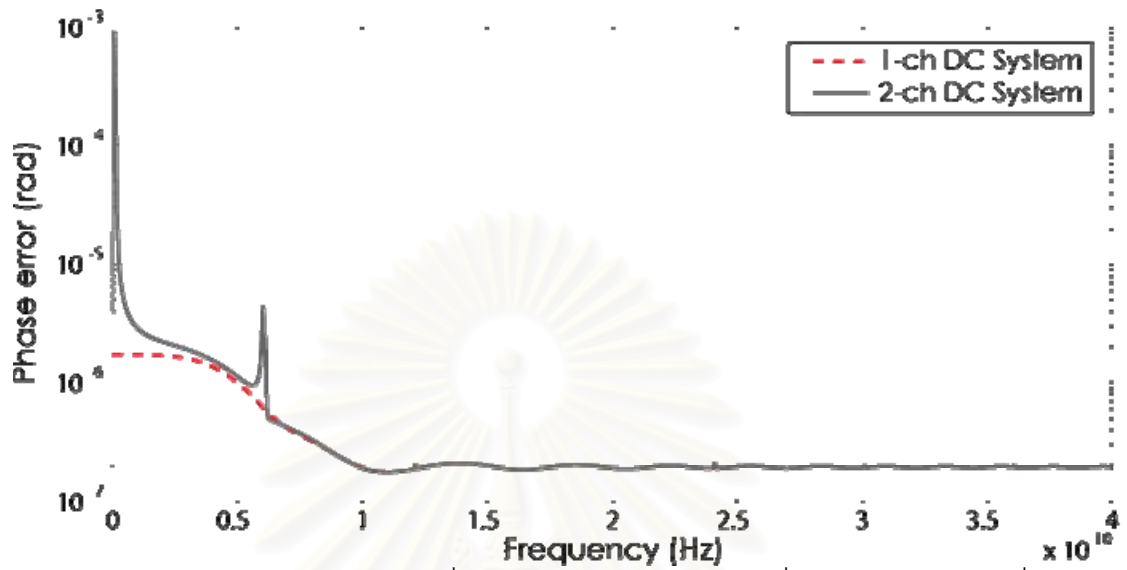
$$\bar{A}_{com} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}(-40\beta_{21})\omega_m^2 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(-40\beta_{21})\omega_m^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2}(-40\beta_{22})\omega_m^2 + d\omega_m \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(-40\beta_{22})\omega_m^2 - d\omega_m & 0 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

\bar{A}_{com} เป็น Eigen vector ในส่วนของ DCF ในกรณีสองคลื่นพาห์

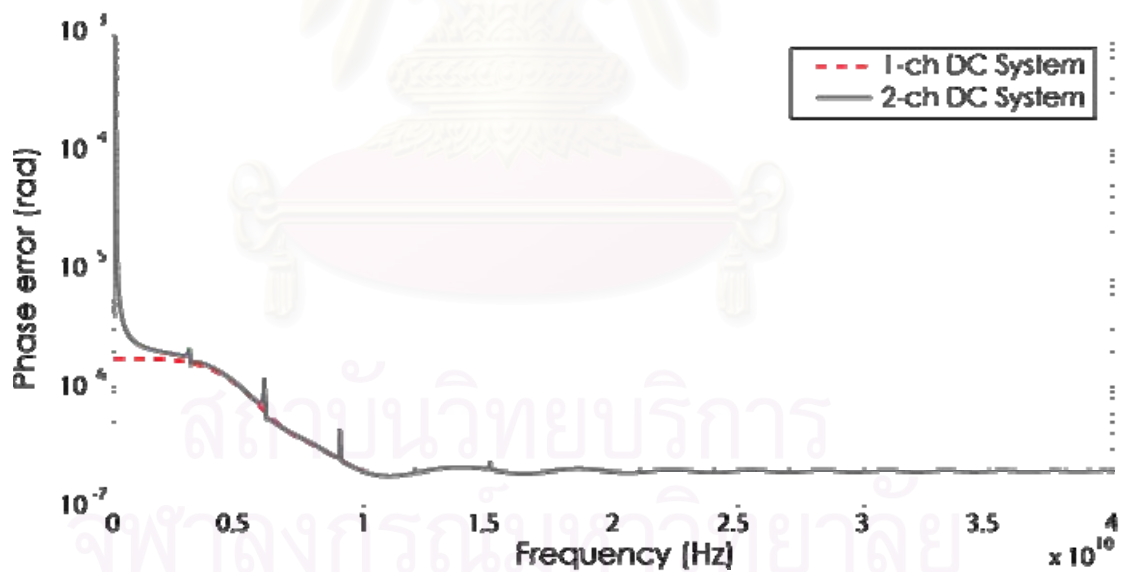
เมื่อเราสามารถหาค่า a_1 และ b_1 ได้แล้วดังนั้นความผิดพลาดเฟสที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สามารถหาได้จากสมการ (5.28)

เราสามารถหาความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็กไปพร้อมกับสองคลื่นพาห์ในระบบที่มีการชดเชย Dispersion ดังนั้นหากว่าเรานำผลเฉลยของสัญญาณขนาดเล็กในสมการ (5.30) มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดเฟสในสมการ (5.28) กับตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนค่าได้เช่น ความถี่เชิงมุมของสัญญาณขนาดเล็ก ค่า GVD และ ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ จากสมการ (5.28) และ (5.30) ทำให้เราสามารถหาความผิดพลาดเฟสที่เกิดขึ้นกับคลื่นพาห์ได้โดยกำหนดค่าตัวเริ่มต้นให้กับบางตัวแปรเพื่อดูแนวโน้มความผิดพลาดเฟสเทียบกับค่าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวแปรนั้น สำหรับค่าเริ่มต้นในการหาผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสจะเป็นดังนี้ ขนาดของค่า GVD (β_{21}, β_{22}) = -20 ps²/km กำลังงานขาเข้าของคลื่นพาห์ (P_1, P_2) = 3 mw สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง (γ) = 1.3 w⁻¹km⁻¹ [28] Group velocity mismatch (d) = 6.6 ps/km เครื่องขยายสัญญาณทางแสงมีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) เท่ากับ 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยาย

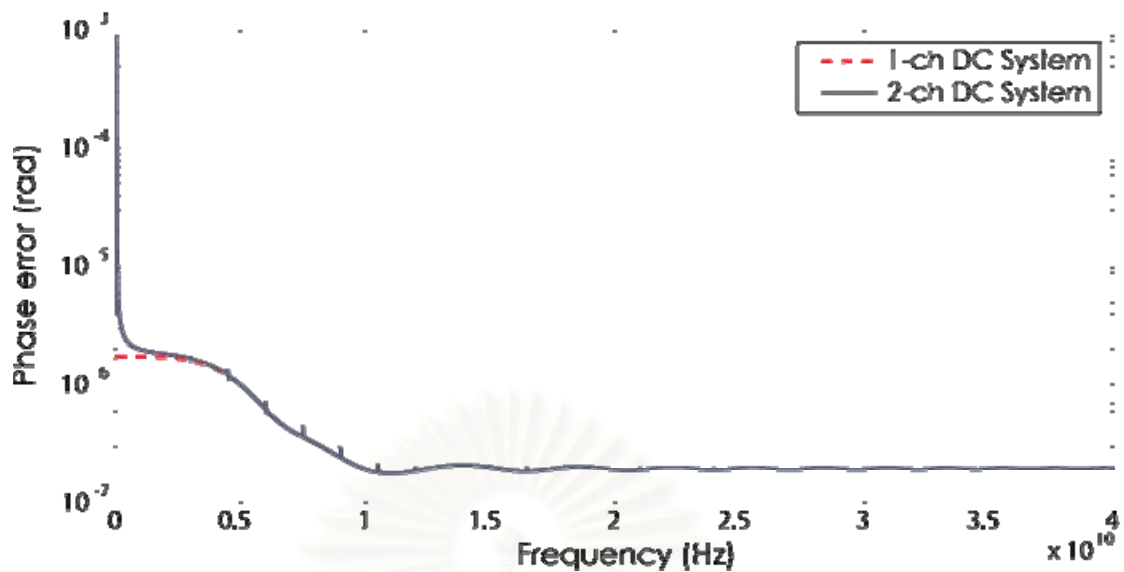
สัญญาณ (L_A) เท่ากับ 50 km ระยะทางที่ใช้ในการคำนวณ (L) = 5,000 km มีการชดเชย Dispersion ทุกๆ 40 km



รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการชดเชย Dispersion ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ Channel Spacing 25 GHz



รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการชดเชย Dispersion ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ Channel Spacing 50 GHz



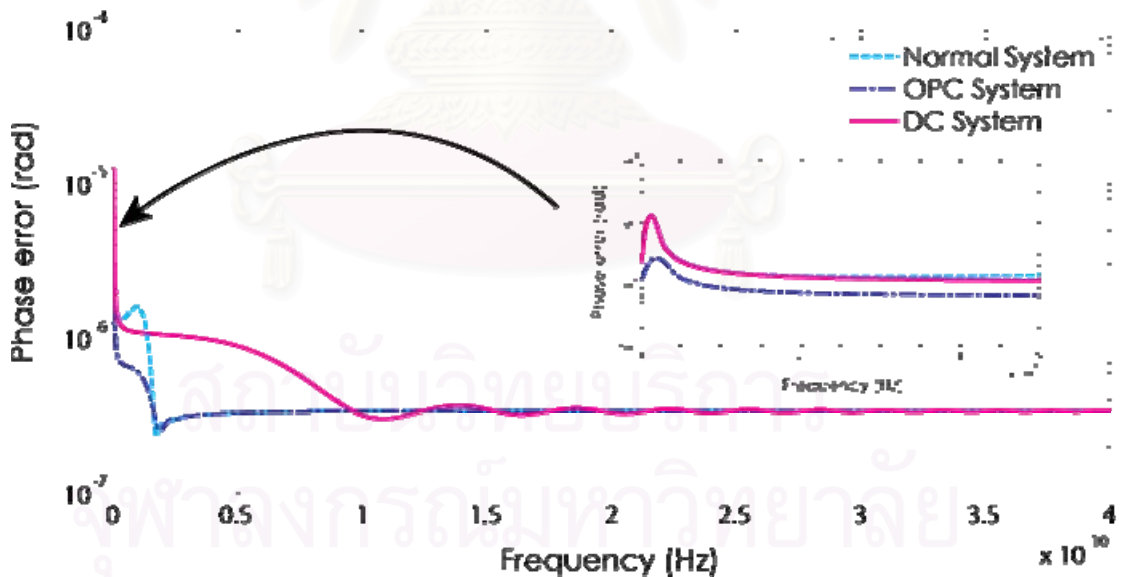
รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการชดเชย Dispersion ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ Channel Spacing 100 GHz

รูปที่ 5.13-รูปที่ 5.15 แสดงถึงผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสของคลื่นพาห์หลักในระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายคาบของคลื่นพาห์ความถี่เดียวและคลื่นพาห์สองความถี่ที่ $GVD = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ (Anomalous dispersion) และทำการเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing) มีค่าเท่ากับ 25, 50 และ 100 GHz จากการเปรียบเทียบทั้งสองระบบนี้ แสดงให้เห็นได้ชัดว่าระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายคาบไปกับคลื่นพาห์สองความถี่ไม่สามารถลดผลกระทบของ XPM ได้ ปรากฏเห็นได้ชัดที่ความถี่ใกล้กับความถี่คลื่นพาห์จะมีความผิดพลาดเฟสอย่างรุนแรง จากรูปที่ 5.13-รูปที่ 5.15 เห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ในระบบที่มีการชดเชย Dispersion ของสองคลื่นพาห์จะมีสัญญาณยอดแหลมรายคาบ (Periodic Spike) อาจจะมีเกิดมาจาก Sideband Instability (SI) [29] ที่เป็นอิทธิพลของ XPM ในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะส่งผลกับความถี่ที่เกิดสัญญาณยอดแหลมและขนาดความผิดพลาดเฟสของสัญญาณยอดแหลม เมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณทำให้ขนาดความผิดพลาดเฟสของสัญญาณยอดแหลมมีค่าน้อยลง แต่ความถี่ที่เกิดยอดแหลมจะเกิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเราลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณให้มีย่านความถี่ที่เกิดยอดแหลมจะเกิดขึ้นน้อยลง แต่ขนาดของความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณยอดแหลมมีค่ามากขึ้น

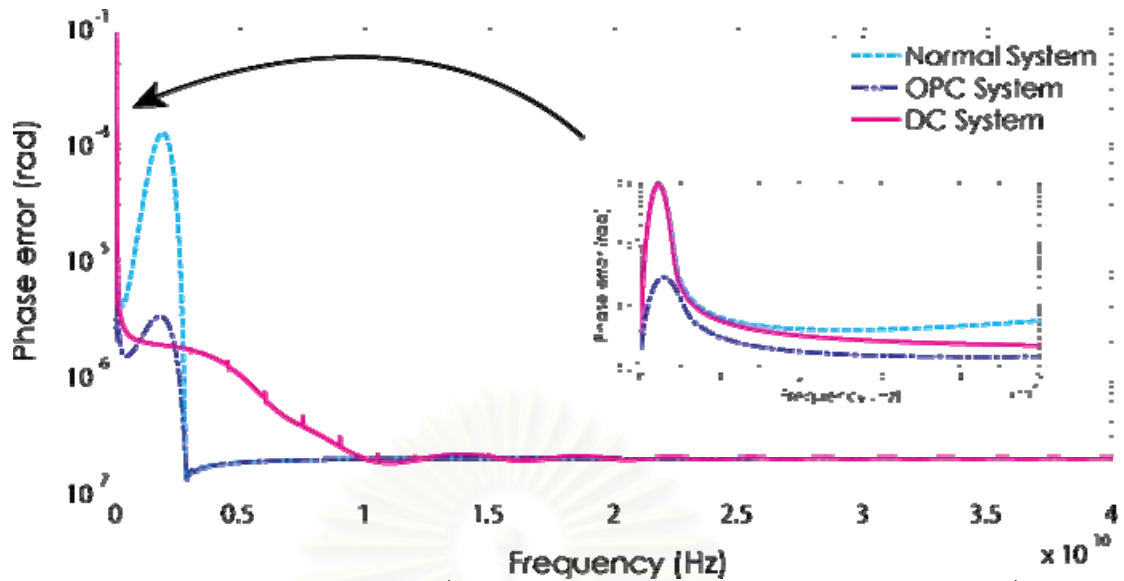
5.4 การเปรียบเทียบความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณกับคลื่นพาร์สองความถี่ต่างกันในระบบที่มีและไม่มี การชดเชย Dispersion เป็นรายคาบ กับระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

ในหัวข้อนี้ทำการเปรียบเทียบความผิดพลาดเฟสของทั้ง 3 ระบบคือ ระบบที่ไม่มี การชดเชย Dispersion (Normal System) ระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายคาบ (DC System) และระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ (OPC System) นำเสนอเป็น ผลตอบสนองทางความถี่ของทั้ง 3 ระบบ

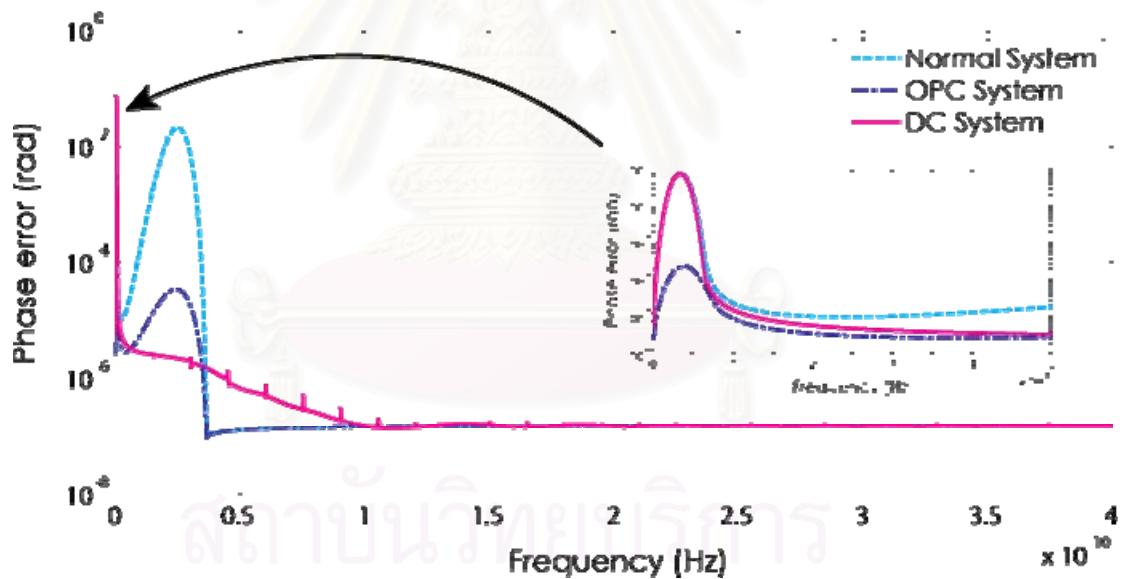
การหาผลตอบสนองนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ การลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) = 0.2 dB/km ขนาดของค่า GVD (β_{21}, β_{22}) = -20 ps²/km กำลังงานขาเข้าของ คลื่นพาร์ (P_1, P_2) = 1, 3, 5 และ 7 mw สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง (γ) = 1.3 w⁻¹km⁻¹ Group velocity mismatch (d) = 13.04 ps/km (ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz [30]) เครื่องขยายสัญญาณทางแสงมีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) เท่ากับ 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณ (L_A) เท่ากับ 50 km ระยะทางที่ใช้ในการ คำนวณ (L) = 5,000 km มีการชดเชย Dispersion ทุกๆ 40 km



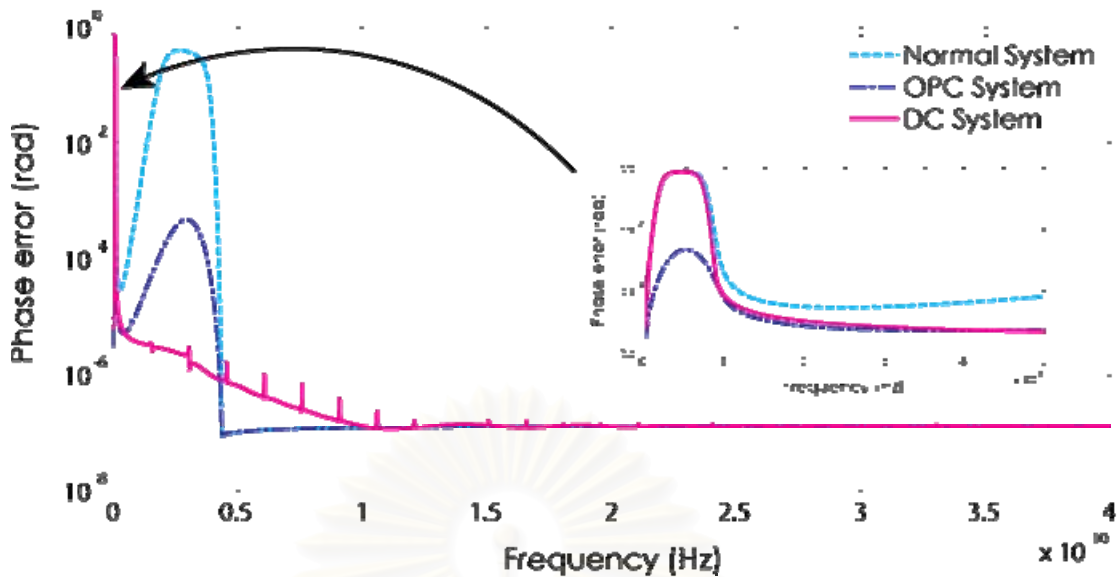
รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายคาบ ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 1 mW ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz



รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายการ ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 3 mW ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz



รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายการ ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 5 mW ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz



รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในช่วง 40 GHz ของระบบที่ใช้และไม่ได้ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่มีการชดเชย Dispersion เป็นรายการ ที่มีกำลังขาเข้าเท่ากับ 7 mW ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz

รูปที่ 5.16 - รูปที่ 5.19 ความผิดพลาดเฟสในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ในช่วงก่อนเข้า Steady State มีแบนด์วิดท์มากกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ส่วนในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบมีความผิดพลาดเฟสช่วงเข้าสู่ Steady State มากกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เนื่องจากผลของ MI แต่ในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ไม่สามารถลดผลกระทบของ XPM ได้เหมือนกับระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ นอกจากนี้ระบบที่ชดเชย Dispersion มีความผิดพลาดเฟสที่เป็นยอดแหลมรายการ (periodic spike) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับกำลังสัญญาณขาเข้า

จากรูปที่ 5.16 - รูปที่ 5.19 สามารถทำการวิเคราะห์ได้ว่าถ้าทำการส่งสัญญาณในอัตราบิตต่ำเช่น 5 Gb/s ที่กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW และ 3 mW ดังรูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 คุณภาพสัญญาณที่ภาครับของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion จะให้ผลที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เนื่องจากความผิดพลาดเฟสในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ของบิต 1 และบิต 0 เกิดในระดับที่คงที่บนแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมแถบความถี่ของสัญญาณความเร็วดังกล่าวได้ทั้งหมด ผลทำให้ความต่างเฟสระหว่างบิต 1 และบิต 0 แตกต่างอย่างคงที่ ทำให้ภาครับสามารถตรวจสอบสัญญาณได้อย่างแม่นยำ เมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้ามากขึ้นดังรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 ในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion จะเกิดความผิดพลาดเฟสที่เป็นยอดแหลมรายการเห็นชัดเจนมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อกำลังสัญญาณขาเข้ามีค่าสูงเช่นรูปที่ 5.19 และสถานะความผิดพลาดเฟสคงตัว (Phase Constant) [22] มีช่วงที่แคบลงทำให้การส่งที่กำลังสัญญาณ

สูงๆ เราไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างแน่ชัดว่าระบบไหนให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่ากัน เมื่อเราส่งสัญญาณในอัตราบิตสูงเช่น 40 Gb/s ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion จะมีช่วงความถี่ก่อนเข้าสู่สถานะคงตัวมากกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบทุกกำลังสัญญาณขาเข้า ส่งผลให้ความผิดพลาดเฟสโดยรวมของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบมีค่ามากกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยเหตุนี้คุณภาพสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบดีกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบในการส่งอัตราบิตสูง นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้คุณภาพสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชย Dispersion คือกำลังสัญญาณเฉลี่ยที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบมีค่าน้อยกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ เพราะว่าการชดเชยค่า Dispersion จะทำให้เพิ่มกำลังสัญญาณเฉลี่ยด้วย

เพราะฉะนั้นเมื่อเราส่งข้อมูลในอัตราบิตต่ำและกำลังสัญญาณขาเข้าต่ำ ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ จะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ แต่ถ้าเราส่งข้อมูลในอัตราบิตสูงระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบจะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

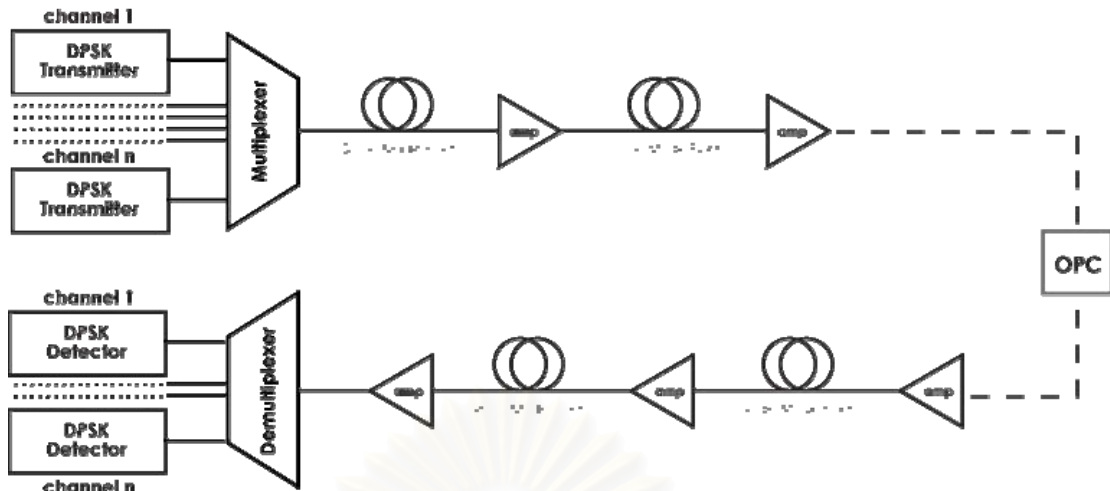
บทที่ 6

แบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณ

จากได้ที่นำเสนอถึงตัวแปรที่อิทธิพลต่อความผิดพลาดเฟสกรณีสองคลื่นพาห้ในบทที่ 5 สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเปรียบกับระบบที่ใช้วิธีการชดเชย Dispersion ว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องตามทฤษฎีเพราะเหตุใด เนื้อหาที่นำเสนอในบทนี้จะแยกออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือ คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณช่องสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณช่องสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณ และผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณช่องสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์มากกว่า 2 ช่องสัญญาณ

6.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

ในการสื่อสารสัญญาณแบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นจำเป็นต้องมีตัวมัลติเพลกซ์ (Multiplexer) เพื่อรวมหลายช่องสัญญาณเข้าด้วยกันในการส่งสัญญาณและตัวดีมัลติเพลกซ์ (Demultiplexer) เพื่อแยกสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณออกจากกันในการรับสัญญาณ รูปที่ 6.1 แสดงถึงแผนภาพบล็อกระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่นด้วยการมอดูเลต DPSK จะเห็นได้ว่าในส่วนที่แตกต่างจากการสื่อสารสัญญาณช่องสัญญาณเดียวคือทางด้านส่งจะมีตัวมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณเข้าด้วยกันและทางด้านรับจะมีตัวดีมัลติเพลกซ์แยกสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นออกไปยังตัวดีมอดูเลตสัญญาณ DPSK



รูปที่ 6.1 แผนภาพบล็อกของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่นด้วยการมอดูเลต DPSK ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ

คุณสมบัติแต่ละอุปกรณ์ในแบบจำลองที่ใช้ในการสื่อสารสัญญาณที่มีการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณโดยเบื้องต้นจะมีค่าเหมือนกับกรณีการสื่อสารสัญญาณแบบช่องสัญญาณเดี่ยวแต่จะมีตัวมัลติเพลกซ์และดีมัลติเพลกซ์สัญญาณเพิ่มเข้ามาโดยคิดว่าตัวมัลติเพลกซ์และดีมัลติเพลกซ์มีความเป็นอุดมคติและไม่มีการสูญเสียกำลังงานใดๆเกิดขึ้น

ในการจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงดังรูปที่ 6.1 ได้กำหนดพารามิเตอร์หลักๆ ดังนี้ การลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km ขนาดของค่า Dispersion ของ SMF = 16.3 ps/(km-nm) สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของ SMF (γ) = 1.3 w⁻¹km⁻¹ [28] เครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise Figure) = 5 dB ระยะห่างระหว่างเครื่องขยายสัญญาณ = 50 km และทำการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์เหล่านี้คือ กำลังสัญญาณขาเข้า (Input Power), ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ(Channel Spacing) และระยะทางที่ใช้ในการจำลอง (Distance) เพื่อดูผลกระทบเกิดต่อคุณภาพของสัญญาณ ณ ภาครับ

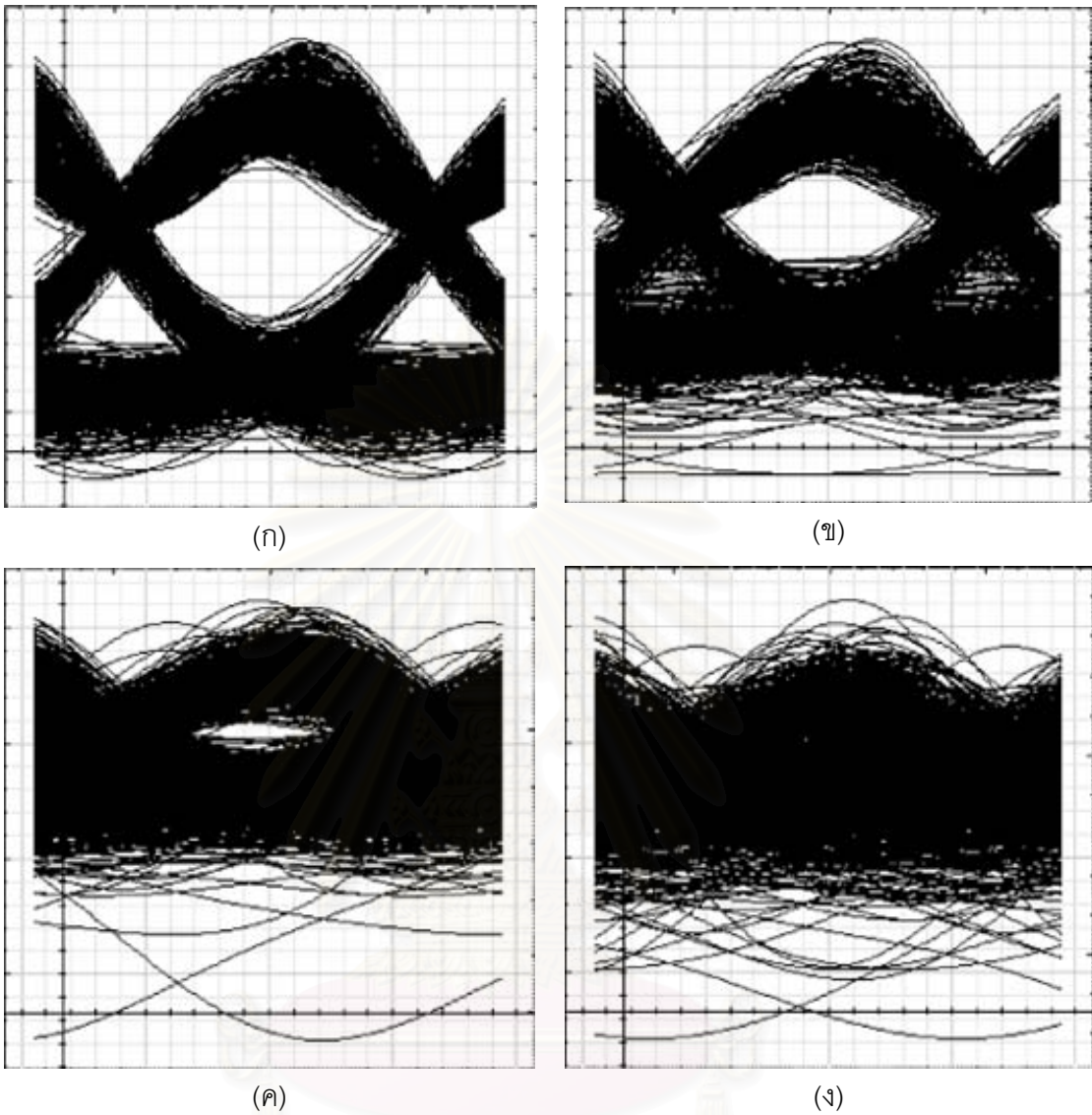
สำหรับผลลัพธ์ในการสร้างแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น จะทำการแบ่งออกเป็น 2 ช่องสัญญาณและมากกว่า 2 ช่องสัญญาณเพื่อดูผลว่าจำนวนช่องสัญญาณมีผลต่อคุณภาพสัญญาณมากน้อยเพียงใด

6.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

จากรูปที่ 5.5 - รูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีระหว่าง GVD และความผิดพลาดเฟสที่กล่าวไว้ในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เมื่อ GVD มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความผิดพลาดเฟสเข้าสู่ steady state เร็วมากขึ้นซึ่งหากทฤษฎีดังกล่าวสามารถนำมาใช้ได้จริงดังนั้นผลลัพธ์ในแบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงย่อมต้องสอดคล้องกับรูปที่ 5.5 - รูปที่ 5.10 ด้วย

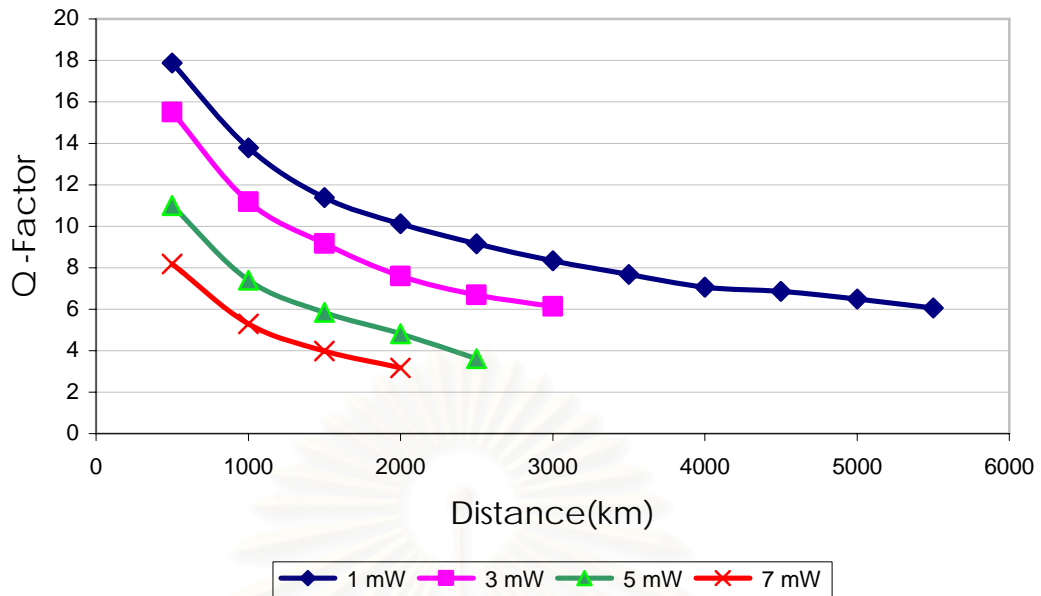
ในการวัดคุณภาพสัญญาณที่มอดูเลต DPSK แบบมัลติเพล็กซ์ 2 ช่องสัญญาณ จะทำการวัดคุณภาพสัญญาณ ณ ช่องสัญญาณหลัก เนื่องจาก XPM ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณทั้งสองปริมาณเท่ากัน ดังนั้นจึงใช้ช่องสัญญาณหลักตรงความถี่เท่ากับ 193.1 THz เป็นตัวแทนในการวัดคุณภาพของสัญญาณ ในรูปที่ 6.2 แสดงรูป Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ระยะทาง 5000 km เปลี่ยนกำลังสัญญาณขาเข้าเป็นค่าต่างๆ

จากรูปที่ 6.2 แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้าส่งผลให้คุณภาพสัญญาณที่ภาครับแยะลง เนื่องจากผลของ SPM และ XPM ที่แปรผันโดยตรงกับกำลังสัญญาณ โดยเฉพาะผลของ XPM จะส่งผลอย่างรุนแรงมากเมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณ ทำให้คุณภาพของสัญญาณแยะลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



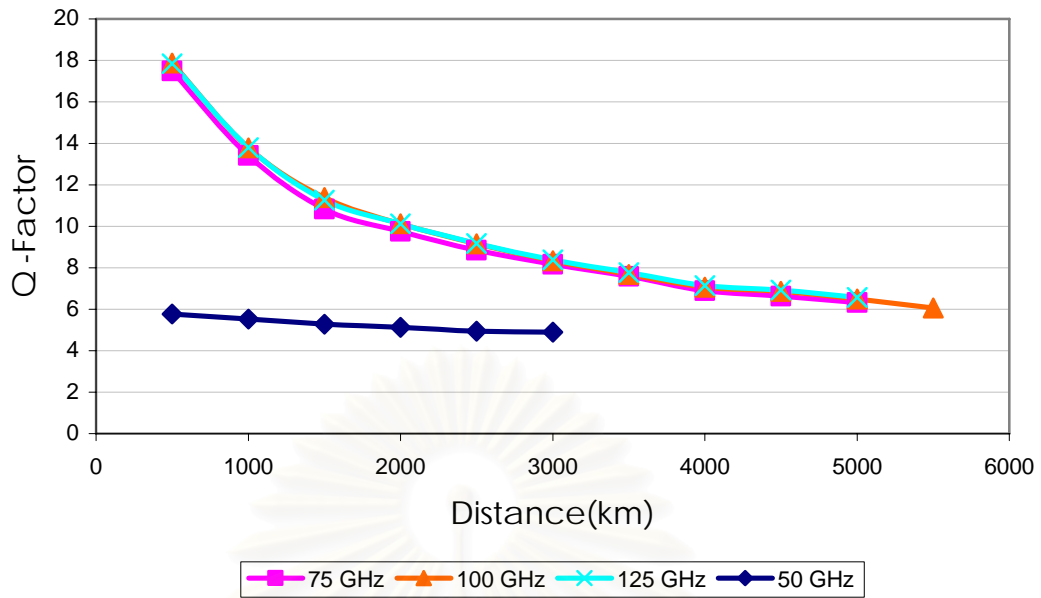
รูปที่ 6.2 Eye Pattern ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ช่องสัญญาณ ระยะห่างเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ระยะทาง 5000 km มีกำลังสัญญาณขาเข้า (ก) 1 mW (ข) 3 mW (ค) 5 mW (ง) 7 mW

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

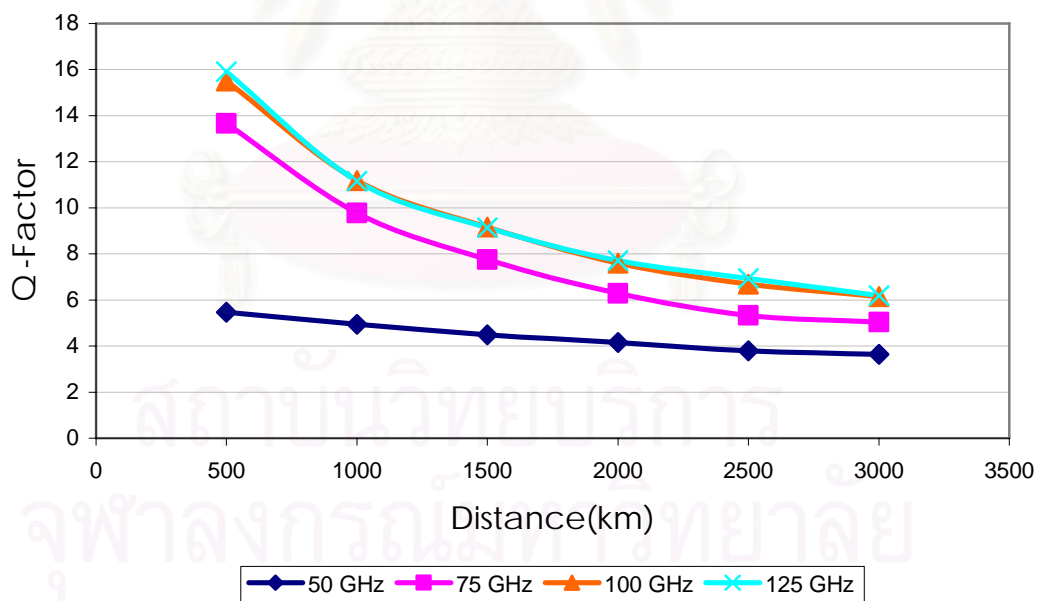


รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้า = 1, 3, 5 และ 7 mW กรณีมัลติเพลกซ์แบบ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz

รูปที่ 6.3 แสดงถึงความแตกต่างของคุณภาพสัญญาณที่ภาครับ (Q-Factor) ของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้าที่ต่างกัน (1, 3, 5 และ 7 mW) จากผลลัพธ์ดังรูปที่ 6.3 สังเกตได้ว่าเมื่อกำลังสัญญาณขาเข้ามีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Q-Factor ลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสรูปที่ 5.5 - รูปที่ 5.10 เมื่อเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้ามากขึ้น ผลจาก XPM ส่งผลกระทบรุนแรงต่อความผิดพลาดเฟสที่ความถี่ที่ใกล้กับความถี่ของคลื่นพาห้มากขึ้น ส่งผลให้คุณภาพสัญญาณที่ภาครับแยกลง จากรูปที่ 6.3 สังเกตได้ว่าทั้ง 4 ค่ากำลังสัญญาณขาเข้าที่ต่างกันพบว่ากำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW จะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีที่สุดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระยะทางในการสื่อสารสัญญาณมากขึ้น เนื่องจากว่าอิทธิพลของ Kerr Effect ที่แปรตามขนาดของกำลังสัญญาณจะค่อยสะสมเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่สื่อสารสัญญาณ

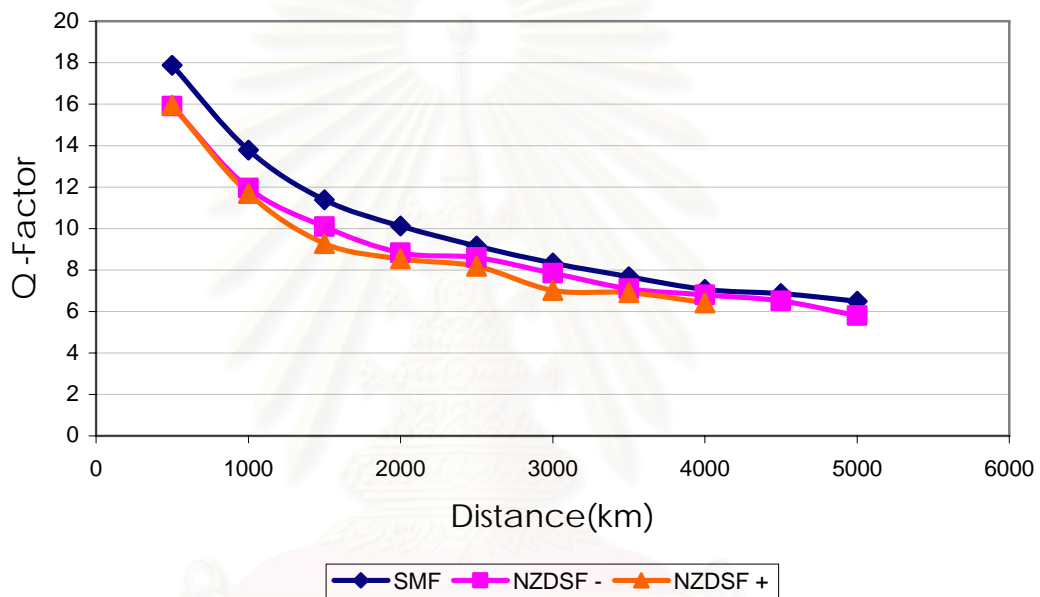


รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้า = 1 mW กรณีสัญญาณแบบ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50, 75, 100 และ 125 GHz



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ด้วยกำลังสัญญาณขาเข้า = 3 mW กรณีสัญญาณแบบ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50, 75, 100 และ 125 GHz

รูปที่ 6.4 และ รูปที่ 6.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ มีกำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW และ 3 mW มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่างกัน (50, 75, 100 และ 125 GHz) ในทฤษฎีบทที่ 5 กล่าวไว้ว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณส่งผลให้ช่วงความถี่ที่มีความผิดพลาดเฟสที่เกิดเนื่องจาก XPM แคลบลง จากรูปที่ 6.4 และ รูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจาก 50 GHz เป็น 75 GHz ทำให้คุณภาพสัญญาณ (ค่า Q-Factor) ดีขึ้น ณ ที่ระยะทางในการสื่อสารสัญญาณที่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎี



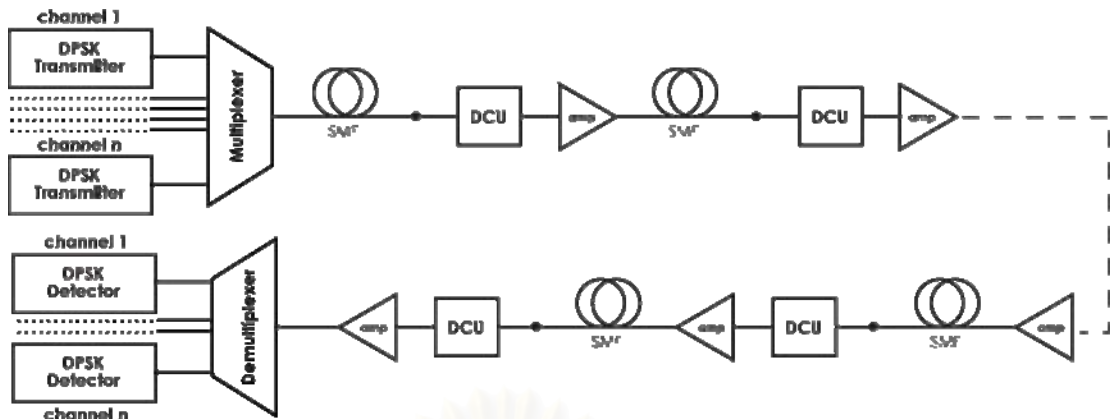
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz ในเส้นใยแสงชนิด SMF, NZDSF- และ NZDSF+

รูปที่ 6.6 แสดงถึงความแตกต่างของคุณภาพสัญญาณ ณ ภาครับที่เดินทางในเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK ซึ่งมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็น 100 GHz และมีกำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW โดยทำการแปรเปลี่ยนชนิดของเส้นใยแสงเป็น SMF, NZDSF- และ NZDSF+ ที่มีค่า Dispersion ที่ 1552.52 nm ต่างกัน โดยที่ SMF มีค่า Dispersion = 16.3 ps/nm/km เห็นได้ว่าเมื่อเราเลือกใช้เส้นใยแสงที่มีค่า D มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Q ของสัญญาณมากขึ้นหรือทำให้คุณภาพสัญญาณดีขึ้นเช่นที่ $Q = 6.9$ การเลือกใช้ Nonzero Dispersion-Shifted Fiber + (NZDSF+, $D = 3.3264$ ps/km/nm) [31] ทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลเพียงประมาณ 3000 km ส่วนการเลือกใช้เส้นใยแสงชนิด Nonzero Dispersion-Shifted Fiber - (NZDSF-, $D = -2.1336$

ps/km/nm) [31] จะทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลประมาณ 4000km แต่ในขณะที่เส้นใยแสงชนิด SMF ($D=16.3$ ps/km/nm) ทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลมากกว่า 4500 km ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ต่อความผิดพลาดเฟสในรูปที่ 5.5 รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.10 ได้อย่างเห็นได้ชัดว่าเมื่อ GVD มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความผิดพลาดเฟสโดยรวมลดลง จากผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นชัดได้ว่า ณ GVD หรือ D สูงๆ มีผลดีต่อการสื่อสารสัญญาณแบบมอดูเลต DPSK ในการลดความผิดพลาดทางเฟสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนของ Kerr effect ให้กลายเป็นสัญญาณรบกวนทางเฟส จากผลการจำลองระบบการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงทำให้เราเชื่อมั่นว่าค่า $D = 16.3$ ps/nm/km จะให้สมรรถนะที่ดีในการส่งสัญญาณการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพล็กซ์ 2 ช่องสัญญาณซึ่งตรงกับคำแนะนำในบทที่ 5 โดยสนับสนุนให้เลือกใช้ SMF ที่ความยาวคลื่น 1,552.52 nm มากกว่าที่จะเลือกใช้ NZDSF+ หรือ NZDSF-

6.3 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพล็กซ์ 2 ช่องสัญญาณของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ

ในรูปที่ 6.7 แสดงแบบภาพบล็อกการจำลองระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK ที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวด้วยกำลังงานต่างๆกัน สัญญาณข้อมูล pseudo random จำนวน 1024 บิตที่มีอัตราบิต 40 Gbps อุปกรณ์มอดูเลตเฟส อุปกรณ์เกลาสัญญาณ 40 Gbps เพื่อแปลงสัญญาณขาเข้า Non-Return-to-Zero (NRZ) ให้กลายเป็นสัญญาณ 66%-RZ มีเครื่องมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ เพื่อรวมสัญญาณเข้าด้วยกันและแยกสัญญาณออกจากกัน คุณสมบัติของเส้นใยแสงที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบ SMF ที่มีการลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km มีค่า Dispersion เป็น 16.3 ps/(km-nm) และมีสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละเส้นใยแสง $\gamma_{SMF} = 1.3 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ [28] เครื่องขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) เท่ากับ 5 dB การวางตำแหน่งของเครื่องขยายสัญญาณทางแสงทุกๆ 50 km พร้อมกับเครื่องชดเชย Dispersion (DCU) ที่เป็นอุดมคติ เป็นระยะทาง 5000 km



รูปที่ 6.7 แผนภาพบล็อกของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่นด้วยการมอดูเลต DPSK ของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ

สำหรับผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผลในการจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่นในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 6.4 ที่จะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

6.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต DPSK แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลลัพธ์และวิเคราะห์ผลของระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงของระบบที่ชดเชยค่า Dispersion แบบมัลติเพลกซ์ 2 ช่องสัญญาณที่มีการมอดูเลตแบบ DPSK เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่นำเสนอในหัวข้อที่ 5.4 เพื่อที่จะพิสูจน์ว่าทฤษฎีที่นำเสนอมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด

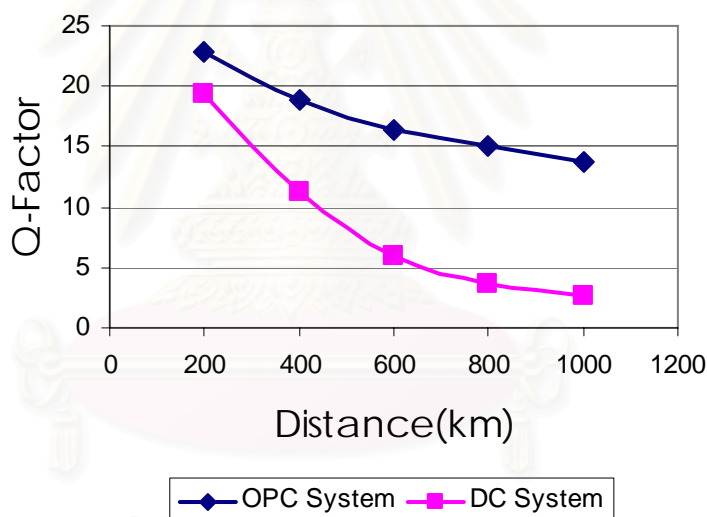
การจำลองระบบการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงดังรูปที่ 6.7 ในระยะทาง 5000 km ที่อัตราบิต 40 Gbps ตามทฤษฎีที่นำเสนอ ผลลัพธ์คือไม่สามารถวัดค่า Q-Factor ออกมาได้ทุกค่า กำลังขาเข้า เหตุที่ทำให้ไม่สามารถวัดค่า Q-Factor เนื่องจากสัญญาณมีความผิดเพี้ยนมากกว่าที่ภาครับสามารถรับได้ เพราะวาระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ไม่สามารถลดผลความผิดพลาดเฟสที่เกิดจากผลกระทบจาก XPM ที่เกิดใกล้กับความถี่พาหะ และความผิดพลาดเฟสโดยรวมมากกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลาง

ส่วนผลลัพธ์ของการจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระบบชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบและระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบที่อัตราบิต 5 Gbps ผลค่า Q-Factor แสดงในตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าคุณภาพสัญญาณของระบบที่ชดเชยค่า

Dispersion เป็นรายคาบดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบทุกกำลังสัญญาณ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่นำเสนอในหัวข้อ 5.4

ตารางที่ 6.1 ค่า Q-Factor ของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ที่อัตราบิต 5 Gbps

กำลังสัญญาณขาเข้า (mW)	OPC System	DC System
1	7.14176	7.06894
3	-	8.02063
5	-	12.48992
7	-	7.75126



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบเปรียบเทียบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ แบบมัลติเพล็กซ์ 2 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz มีกำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW

จากผลลัพธ์รูปที่ 6.8 แสดงถึงความแตกต่างของคุณภาพสัญญาณที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ จากรูปที่ 6.8 แสดงให้เห็นว่าการส่งสัญญาณในระยะทาง 500 km ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ให้คุณภาพสัญญาณที่ภาครับแ่ยกกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบไม่มากนัก เมื่อทำการเพิ่มระยะในการส่งสัญญาณให้ไกลมากขึ้นระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ให้

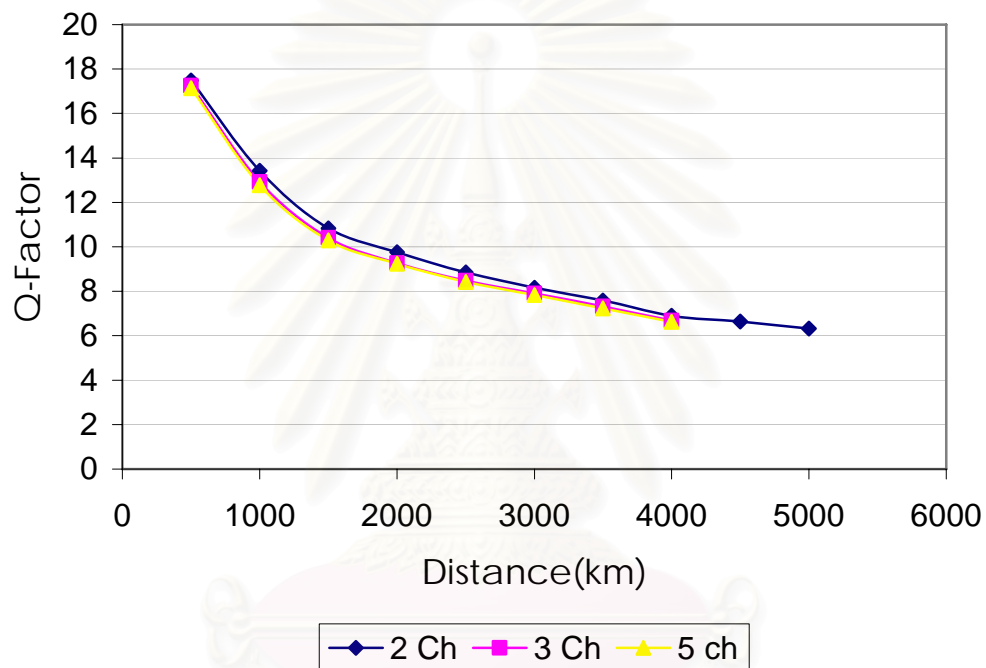
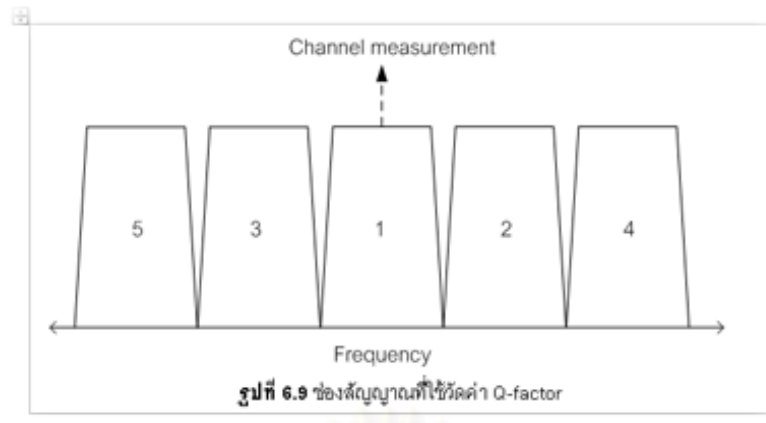
คุณภาพสัญญาณที่แย่กว่าระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลของ XPM ที่เกิดการสะสมมากขึ้นเรื่อยๆในระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ทำให้ระบบที่ชดเชยค่า Dispersion ส่งได้ไม่ไกลมากนัก

6.5 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ DPSK แบบมัลติเพล็กซ์มากกว่า 2 ช่องสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้กล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการเดินทางสัญญาณในเส้นใยแสงและการวิเคราะห์ผลลัพธ์ดังกล่าวอย่างเป็นขั้นตอน สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงการสื่อสารสัญญาณแบบมัลติเพล็กซ์มากกว่า 2 ช่องสัญญาณเพื่อดูแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรต่อคุณภาพของสัญญาณ โดยหัวข้อนี้จะนำเสนอการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ซึ่งให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีดังได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนๆ

ในการวัดคุณภาพสัญญาณที่มีการมอดูเลตแบบ DPSK แบบมัลติเพล็กซ์ 3 และ 5 ช่องสัญญาณ จะทำการวัดคุณภาพสัญญาณ ณ ช่องสัญญาณตรงกลางในการเปรียบเทียบเพื่อดูผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นกับสัญญาณที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เนื่องจากว่าช่องสัญญาณตรงกลางดังรูป รูปที่ 6.9 จะเกิดผลกระทบของ XPM จะมาจากช่องสัญญาณที่ 2, 3, 4 และ 5 ทำให้คุณภาพสัญญาณ (ค่า Q-Factor) ที่ช่องสัญญาณตรงกลางมีค่าแย่ที่สุด ดังนั้นจึงใช้คุณภาพสัญญาณของช่องสัญญาณตรงกลางเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



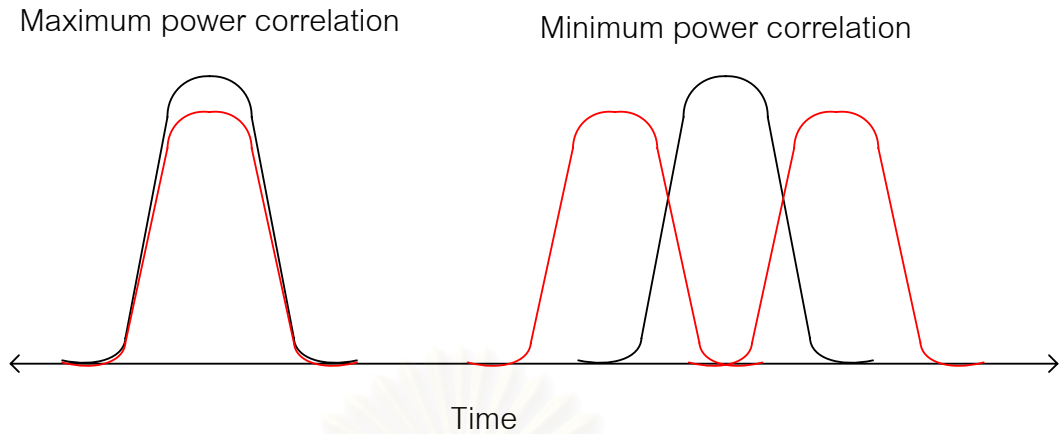
รูปที่ ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร.1 ความสัมพันธ์ค่า Q-Factor กับ ระยะทางของระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz โดยจำนวนช่องสัญญาณ 2 3 และ 5

รูปที่ ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร.1 แสดงถึงความแตกต่างคุณภาพของสัญญาณที่เดินทางผ่านเส้นใยแสง SMF ด้วยการมอดูเลต DPSK ในระบบที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็น 100 GHz สิ่งที่สังเกตได้จากผลลัพธ์ของทั้งสาม พบว่าค่า Q ของสัญญาณในการมัลติเพล็กซ์ 5 ช่องสัญญาณจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่า Q ของสัญญาณในการมัลติ

เพลทซ์ 3 ช่องสัญญาณ ดังนั้นการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง SMF เมื่อจำนวนช่องสัญญาณมากกว่า 3 ช่องสัญญาณโดยแม้ว่าจะมีความห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่าไรก็ตาม อิทธิพลของ XPM จะไม่มีผลต่อคุณภาพสัญญาณอีกต่อไปเพราะว่าความห่างระหว่างช่องสัญญาณอยู่ห่างไกลเกินกว่าที่ XPM จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสัญญาณรบกวนทางเฟสในแต่ละบิตซึ่งจะแสดงการอธิบายเหตุผลอย่างละเอียดดังนี้

เหตุผลที่ว่าทำไมผลของ XPM จะลดความสำคัญลงเมื่อความห่างระหว่างช่องสัญญาณยิ่งเพิ่มมากขึ้น โดยหลักการแล้วความแตกต่างของความเร็วกลุ่มในแต่ละช่องสัญญาณจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความห่างระหว่างช่องสัญญาณดังนั้นการกำหนดความห่างระหว่างช่องสัญญาณให้มีความมากขึ้นย่อมส่งผลให้ความเร็วกลุ่มของแต่ละช่องสัญญาณมีความแตกต่างกันมากขึ้นด้วยเช่นกัน ในการพิจารณาอิทธิพลของ XPM สำหรับการซ้อนทับของสัญญาณพบว่าผลของ XPM จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดก็ต่อเมื่อสองสัญญาณพัลส์ซ้อนทับกันอย่างพอดีตลอดการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสง แต่ในความเป็นจริงสองสัญญาณพัลส์ที่มีความยาวคลื่นพาห์ต่างกันไม่สามารถเดินทางไปด้วยกันได้ตลอดในเส้นใยแสง ในกรณีสัญญาณพัลส์เดี่ยว (Single pulse) ถ้าสองสัญญาณพัลส์ที่มีความยาวคลื่นต่างกันเดินทางไปด้วยกันในเส้นใยแสงผลของ XPM จะมีนัยสำคัญเมื่อสองสัญญาณพัลส์ซ้อนทับซึ่งกันและกัน แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อสองสัญญาณพัลส์เดินทางแยกออกจากกันผลของ XPM จะไร้ประสิทธิภาพ (Ineffective) อย่างทันทีทันใด ในกรณีของขบวนพัลส์ (Pulse train) ที่มีการมอดูเลต DPSK ผลของ XPM จะขึ้นอยู่กับอัตราการสแกนสัญญาณพัลส์ (Pulse-scanning rate) ของสองขบวนพัลส์ใดๆ ที่มีความยาวคลื่นต่างกันและอัตราการสแกนสัญญาณพัลส์จะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างความเร็วกลุ่ม ในการวิเคราะห์สัญญาณทางกายภาพเราจะกำหนดให้ขบวนพัลส์ในช่องสัญญาณที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยหลายบิตข้อมูลทำการสแกนบิตที่กำหนดไว้ในช่องสัญญาณที่ 1 การพิจารณาถึงสหสัมพันธ์กำลังงาน (Power correlation) ระหว่างสองสัญญาณพัลส์ในช่วงที่มีการซ้อนทับของสัญญาณบิต เราสามารถแสดงลักษณะการซ้อนทับของสัญญาณพัลส์ที่ให้ค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดของสหสัมพันธ์กำลังงานซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 6.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.11 การแสดงลักษณะการซ้อนทับของสัญญาณพัลส์ที่ให้ค่ามากที่สุดและน้อยสุดของ สหสัมพันธ์กำลังงาน

ผลของ XPM เนื่องจากการสแกนสัญญาณพัลส์จะขึ้นอยู่กับสหสัมพันธ์กำลังงานในช่วง การซ้อนทับของสัญญาณพัลส์ ภาพรวมของสหสัมพันธ์กำลังงานจะประกอบด้วยการผสมผสาน กันระหว่างค่ามากที่สุดและน้อยสุดของสหสัมพันธ์กำลังงาน เพื่อเป็นการง่ายในการพิจารณา เราจะ แบ่งช่วงระยะทางครั้งแรก (20 km) ของช่วงการชดเชย Dispersion ให้เป็นการซ้อนทับของ สัญญาณพัลส์ที่มีสหสัมพันธ์กำลังงานมากที่สุดและส่วนที่เหลือจะเป็นการซ้อนทับของสัญญาณ พัลส์ที่มีสหสัมพันธ์กำลังงานน้อยสุด สิ่งสำคัญที่สุดในการสื่อสารสัญญาณด้วยการมอดูเลต DPSK คือความไม่เท่ากันของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละบิตเนื่องจาก Kerr effect โดยหลักการแล้วหา กว่ากำลังงานของสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากันในแต่ละบิต Kerr effect จะไม่มีผลต่อการเสื่อมค่าลง ของคุณภาพสัญญาณในการมอดูเลต DPSK เลยแม้แต่น้อยแต่ในความเป็นจริงสัญญาณรบกวนที่ เกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณจะเป็นตัวกระตุ้นให้ Kerr effect เหนียวแน่นเฟสของสัญญาณในแต่ละ บิตอย่างไม่เท่ากัน เมื่อความเร็วกลุ่มของสองช่องสัญญาณแตกต่างกันมากขึ้นย่อมจะทำให้ จำนวนบิตที่ทำการสแกนสัญญาณพัลส์มีจำนวนมากขึ้นตามซึ่งจะส่งผลให้เฟสที่เปลี่ยนไป เนื่องจาก XPM มีความเสมอภาค (Uniform) มากขึ้น เนื่องจากว่าสัญญาณรบกวนที่ก่อกำเนิดจาก อุปกรณ์สัญญาณถือได้ว่าเป็นสัญญาณเชิงสุ่มที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์ (Zero-mean random signal) หากว่าเราพิจารณาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณพัลส์จำนวนมาก เราจะประมาณได้ว่า ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนจะมีค่าประมาณศูนย์โดยคุณสมบัติของสัญญาณเชิงสุ่มค่าเฉลี่ย ศูนย์ ดังนั้นยิ่งจำนวนบิตที่ทำการสแกนสัญญาณพัลส์มากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้ XPM ที่เกิดจากการ สแกนสัญญาณพัลส์มีความเสมอภาคมากยิ่งขึ้นและ Kerr effect ที่เกิดขึ้นในการสื่อสารสัญญาณที่ มอดูเลต DPSK แบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณสามารถประมาณได้ว่า $XPM + SPM \approx SPM$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าอิทธิพลของความห่างระหว่างช่องสัญญาณ

มิได้ทำให้เฟสของสัญญาณโดยเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปเนื่องจาก XPM แตกต่างกันในขบวนพัลส์หนึ่งๆ แต่จะมีผลโดยตรงกับความแปรปรวนเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปเนื่องจาก XPM โดยที่ยิ่งความห่างระหว่างช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความแปรปรวนเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจาก XPM ลดลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาความผิดพลาดเฟสที่เกิดจากการสะสมแบบไม่เชิงเส้นผ่าน Kerr Effect ของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องขยายสัญญาณแสงเชิงทฤษฎีของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและนำมาเปรียบเทียบกับระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ นำเสนอปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ DPSK ที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นกรณีของคลื่นพาห้ความถี่เดียวหรือการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงช่องสัญญาณเดียว และคลื่นพาห้สองความถี่หรือการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบมัลติเพลกซ์หลายช่องสัญญาณ

จากการศึกษาเชิงทฤษฎีพบว่าในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ อิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดเฟสเนื่องจากการสะสมแบบไม่เชิงเส้นของสัญญาณรบกวนทางเฟสผ่านทาง Kerr effect มีอยู่หลายปัจจัยด้วยกันเช่น ค่าของ Dispersion ในเส้นใยแสงที่เลือกใช้งาน เมื่อเลือกค่า Dispersion มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ความผิดพลาดเฟสโดยรวมมีค่าลดน้อยลงส่งผลให้คุณภาพสัญญาณดีขึ้น กำลังสัญญาณขาเข้า หากเรากำหนดค่ากำลังสัญญาณขาเข้าสูงเกินไป แทนที่จะเป็นผลดีทำให้ได้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนทางแสงเพิ่มขึ้นแต่ในทางกลับกันกลายเป็นการช่วยสนับสนุนให้ Kerr effect เหนียวนำสัญญาณรบกวนทางเฟสเพิ่มมากขึ้นและทำให้คุณภาพสัญญาณเสื่อมลง และการเลือกอัตราบิตในการสื่อสารสัญญาณส่งผลคุณภาพของสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ในการส่งอัตราบิตต่ำเช่น 5 Gbps คุณภาพของสัญญาณระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบดีกว่าระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ แต่ในการส่งอัตราบิตสูงเช่น 40 Gbps คุณภาพสัญญาณของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบให้คุณภาพที่ดีกว่าระบบที่ชดเชยค่า Dispersion เป็นรายคาบ ทั้งในกรณีการสื่อสารสัญญาณแบบช่องสัญญาณเดียวและแบบมัลติเพลกซ์หลายความยาวคลื่น นอกจากนี้ในกรณีการสื่อสารสัญญาณแบบมัลติเพลกซ์หลายความยาวคลื่น การกำหนดความห่างระหว่างช่องสัญญาณจะมีผลต่อคุณภาพสัญญาณ กล่าวคือในทางทฤษฎี ยิ่งระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ XPM มีนัยสำคัญลดน้อยลงต่อความผิดพลาดเฟส แต่ในความเป็นจริงการกำหนดความ

ห่างระหว่างช่องสัญญาณมากเกินไปจะส่งผลให้การใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ จากผลการสร้างแบบจำลองพบว่าระยะห่างที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถคงค่า Q ของสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบอยู่ที่ประมาณ 100 GHz ดังนั้นในการส่งสัญญาณควรจะให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณอยู่ที่ 100 GHz เพื่อที่จะใช้ประโยชน์ช่องสัญญาณได้ประสิทธิภาพสูงสุด

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. การขยายขอบเขตในการพิจารณาถึงการเพิ่มระดับชั้นการมอดูเลต เช่น DQPSK

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองเฉพาะการมอดูเลต DPSK เท่านั้น ซึ่งโดยหลักการแล้วทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 สามารถนำมาใช้ร่วมในการพิจารณาถึงการมอดูเลตแบบ DQPSK ดังนั้นงานวิจัยขั้นต่อไปควรจะขยายขอบเขตการวิเคราะห์ไปถึงการมอดูเลตแบบ DQPSK เนื่องจากว่าการมอดูเลตแบบ DQPSK มีประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์มากเป็น 2 เท่าเทียบกับ DPSK และแนวโน้มงานวิจัยในอนาคตน่าจะให้ความสนใจกับการมอดูเลตแบบ DQPSK มากขึ้น

2. การเลือกใช้ Distributed Raman Amplifier (DRA) แทนการใช้ EDFA

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองที่ใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณเป็นแบบ EDFA ดังนั้นการเลือกใช้ DRA แทน EDFA จึงถือได้ว่าเป็นการลดปริมาณสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณให้ไกลมากขึ้น และนอกจากนี้การใช้ DRA สามารถช่วยเพิ่มคุณภาพสัญญาณที่ภาครับของระบบที่ใช้วิธีสังยุคเฟสทางแสงที่กึ่งกลางระบบ เพราะว่าการใช้ DRA สามารถทำให้มีการกระจายกำลังสัญญาณในระบบก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสทางแสงและหลังผ่านเครื่องสังยุคเฟสทางแสงที่เป็นสมมาตรกัน ทำให้การลดผลของ Dispersion และ Kerr Effect ได้มากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] G. Keiser. Optical Fiber Communications. McGraw-Hill Higher Education. 2000.
- [2] J. Hecht. City of Light: The Story of Fiber Optics. Oxford University Press, USA. April 2004.
- [3] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne. Low noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm . Electron Letter 23 (1990): 1026.
- [4] D. S. Govan, W. Forysiak, and N. J. Doran. 40 Gbit/s RZ transmission over more than 2000 km of standard fibre with dispersion management. High Speed and Long Distance Transmission (Ref. No. 1999/022), IEE Colloquium on (Mar 1999): 3/1 - 3/6.
- [5] G. Agrawal. Applications of Nonlinear Fiber Optics (Optics and Photonics Series). Academic Press. 2001.
- [6] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation. Opt. Lett 4 (1979): 52-54.
- [7] R. A. Fisher, B. R. Suydam, and D. Yevick. Optical phase conjugation for time-domain undoing of dispersive self-phase-modulation effects. Opt. Lett 8 (1983): 611-613.
- [8] K. Kikuchi and C. Lorattanasane. Compensation for pulse waveform distortion in ultra-long distance optical communication system by using nonlinear optical phase conjugator. in Proceedings Optical Amplifier and their Applications (July 1993): SuC1.
- [9] C. Lorattanasane and K. Kikuchi. Design Theory of Long-Distance Optical Transmission Systems Using Midway Optical Phase Conjugation. J. Lightwave Technology 15 (June 1997): 948-955.
- [10] A. H. Gnauck and P. J. Winzer. Optical Phase-Shift-Keyed Transmission. J. Lightwave Technology 23 (January 2005): 115-130.
- [11] A. H. Gnauck and P. J. Winzer. Phase-Shift-Keyed Transmission. in Proceedings Optical Fiber Communication Conference 5 (February 2004): TuF5.

- [12] W. Idller. System Performance and Tolerances of 43-Gb/s ASK and DPSK Modulation Formats. in Proceedings European Conference and Exhibition on Optical Communication (2003): Th2.6.3.
- [13] C. Xu. Comparison of Return-to-Zero Phase Shift Keying and On-Off Keying in Long Haul Dispersion Managed Transmission. in Proceedings Optical Fiber Communication Conference 4 (2003): ThE3.
- [14] T. Miyana. Suppression of Degradation Induced by SPM/XPM+GVD in WDM Transmission Using a Bit-Synchronous Intensity Modulated DPSK signal. in Proceedings OptoElectronics and Communications Conference (2000): 14D3-3.
- [15] C. Wree. RZ-DQPSK Format with High Spectral Efficiency and High Robustness Towards Fiber Nonlinearities. in Proceedings European Conference and Exhibition on Optical Communication (2002): 9.6.6.
- [16] A. Sano, T. Kawasaki, T. Kataoka, and S. Matsuoka. 50 GHz Spaced 38x43 Gbit/s Transmission Experiment Over 300 km of Dispersion-Shifted Fiber using DPSK Direct Detection. in Proceedings OptoElectronics and Communications Conference (2005): PDP-04.
- [17] A. H. Gnauck. 2.5 Tb/s (64x42.7 Gb/s) Transmission Over 40x100 km NZDSF Using RZ-DPSK Format and All-Raman-Amplified Spans. in Proceedings Optical Fiber Communication Conference (2002): 875-877.
- [18] H. Kim. Experimental Investigation of The Performance Limitation of DPSK Systems Due to Nonlinear Phase Noise. IEEE Photonics Technology Letters 2 (2003)
- [19] H. Kim. Cross-Phase-Modulation-Induced Nonlinear Phase Noise in WDM Direct-Detection DPSK System. J. Lightwave Technology 8 (2003)
- [20] S. L. Jansen, D. v. d. Borne, B. Spinnler, S. Calabro, H. Suche, P. M. Krummrich, W. Sohler, G.-D. Khoe, and H. d. Waardt. Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission. J. Lightwave Technology 24 (2006): 54-64.
- [21] A. Wonfor. Uncooled 40 Gbit/s Transmission Over 40 km Single Mode Fiber Using Multi-Level Modulation of a Highly Linear Laser. in Proceedings Optical Fiber Communication Conference (2004): MF60.

- [22] C. Lorattanasane and K. Kikuchi. Parametric Instability of Optical Amplifier Noise in Long-Distance Optical Transmission Systems. J. Quantum Electronics 33 (July 1997): 1068-1074.
- [23] G. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics (Optics and Photonics). Academic Press. 2001.
- [24] P. J. Winzer. Impact of Pulse Carver Chirp on RZ-DPSK Receiver Performance. in Proceedings European Conference and Exhibition on Optical Communication (2003): We3.5.6.
- [25] G. Bosco. The Effect of Receiver Imperfections on The Performance of Direct-Detection Optical Systems Using DPSK Modulation. In Proceedings Optical Fiber Communication Conference (2003): ThE6.
- [26] Y.Namihira, K. Miyagi, K. Kaneshima, M. Tadakuma, C. Vinegoni, G.Pietra, and K. Kawanami. A Comparison of six techniques for nonlinear coefficient measurements of various single mode optical fibers.
- [27] C. J. Rasmussen. Simple and Fast Method for Step Size Determination in Computers of Signal Propagation Through Nonlinear Fibers. In Proceedings Optical Fiber Communication Conference (2001): WDD29-1.
- [28] L. Grüner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C. Jørgensen, L. V. Jørgensen, B. Edvold, B. Pálsdóttir, and D. Jakobsen. Dispersion-Compensating Fibers. J. Lightwave Technology 23 (November 2005): 3566-3579.
- [29] P. Kaewplung, T. Angkaew, and K. Kikuchi. Complete Analysis of Sideband Instability in Chain of Periodic Dispersion-Managed Fiber Link and Its Effect on Higher Order Dispersion-Managed Long-Haul Wavelength-Division Multiplexed Systems. J. Lightwave Technology 20 (November 2002): 1895-1907.
- [30] T.-K. Chiang, N. Kagi, M. E. Marhic, and L. G. Kazovsky. Cross-Phase Modulation in Fiber Links with Multiple Optical Amplifiers and Dispersion Compensators. J. Lightwave Technology 14 (March 1996): 249-260.
- [31] A. Bertaina, S. Bigo, and M. W. Chbat. INVESTIGATION OF THE LIMITATIONS OF WDM TYPICAL TERRESTRIAL TRANSMISSIONS OVER NZDSF AND SMF. European Conference on Optical Communication (Sep 1998): 279-280.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐ สารพา เกิดวันที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2526 เขตบางแค จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย