

การศึกษาผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ในระบบ
สื่อสารสัญญาณ DWDM โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ
STUDY OF FOUR-WAVE MIXING EFFECT IN DWDM
TRANSMISSION SYSTEM BY ADJUSTING CHANNEL SPACE

สมบัติ เหมอานนาค
SOMBAT MUEANNAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-010-009

การศึกษาผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ในระบบ
สื่อสารสัญญาณ DWDM โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ

STUDY OF FOUR-WAVE MIXING EFFECT IN DWDM
TRANSMISSION SYSTEM BY ADJUSTING CHANNEL SPACE

สมบัติ เหมือนนาค

SOMBAT MUEANNAK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74877
วัน,เดือน,ปี..... 15 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-010-009

**STUDY OF FOUR-WAVE MIXING EFFECT IN DWDM
TRANSMISSION SYSTEM BY ADJUSTING CHANNEL SPACE**

SOMBAT MUEANNAK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

KMITL-2007-EN-M-010-009

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ในระบบ สื่อสัญญาณ DWDM โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ
นักศึกษา	นายสมบัติ เหมือนนาค
รหัสนักศึกษา	46064114
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสัญญาณ DWDM สำหรับเครือข่ายสื่อสัญญาณแสงที่มีการเพิ่มแบนด์วิธของเครือข่ายด้วยการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณ โดยการลดระยะห่างของช่องสัญญาณ เมื่อผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING มีสาเหตุมาจากผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง โดยนำเสนอในรูปแบบของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่แสดงกำลังของสัญญาณจาก FOUR-WAVE MIXING และความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FOUR-WAVE MIXING เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ด้วยการปรับระยะห่างของช่องสัญญาณ นอกจากนั้นยังนำเสนอการลดผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ ทำให้ได้ระบบที่มีสมรรถนะสูงขึ้นคือสามารถส่งกำลังของสัญญาณอินพุตได้สูงขึ้น ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FOUR-WAVE MIXING ลดลงและมีระยะทางระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ไกลมากขึ้น

Thesis Title	Study of Four-Wave Mixing Effect in DWDM Transmission System by Adjusting Channel Space
Student	Mr. Sombat Mueannak
Student ID.	46064114
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suthichai Noppanakeepong

ABSTRACT

This thesis discusses the study of four-wave mixing effect in DWDM transmission system for long distance optical network. This network requires an increasing system capacity. The method of increasing bandwidth is increase number of channels by reduce spacing between channels. These requirements induce channel interference cause by four-wave mixing due to the fiber nonlinearity. Numerical results of four-wave mixing effect in DWDM transmission system are present in term of four-wave mixing power and probability of error. These results compare by adjusting channel space. Reductions of four-wave mixing effect in DWDM transmission system by using channels grouping separation technique are also present. These results show the performance improvement such as decreasing probability of error, increasing input light power and distance between optical amplifiers.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าในช่วงที่ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ ไปปฏิบัติราชการที่ประเทศลาวเป็นระยะเวลา 1 ปี

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและ โครงร่างวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พิเชฐ ม่วงนวลและ ผศ.เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

สมบัติ เหมือนนาค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 รายละเอียดและเนื้อหาในบทต่างๆ.....	4
บทที่ 2 ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 Stimulated Brillouin Scattering.....	10
2.3 Stimulated Raman Scattering.....	12
2.4 Self-Phase Modulation.....	16
2.5 Cross-Phase Modulation.....	20
2.6 Four-Wave Mixing.....	22
บทที่ 3 ผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	31
3.1 ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	31
3.1.1 กล่าวนำ.....	31
3.1.2 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ส่วนประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM	35
3.2.1 อุปกรณ์รับ/ส่งสัญญาณแสง	36
3.2.2 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง.....	36
3.2.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง.....	38
3.2.4 Optical Add/Drop Multiplexer (OADM).....	39
3.2.5 Optical Cross Connect (OXC).....	40
3.3 การจัดการแถบความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management).....	41
3.3.1 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing).....	43
3.3.2 แถบความยาวคลื่นแสงสีแดงและสีน้ำเงิน.....	44
3.4 ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	45
3.5 การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	47
3.5.1 การใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ.....	47
3.5.2 การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากัน.....	48
3.5.3 เทคนิคการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ	49
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	50
4.1 กล่าวนำ.....	50
4.2 การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ..	50
4.2.1 สมการและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	50
4.2.2 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing	52
4.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing เมื่อค่าดีสเพอร์ชันเปลี่ยนแปลง.....	55
4.2.4 เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing กับกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสง.....	56
4.2.5 เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในช่วงความยาวคลื่นย่าน C-Band.....	57
4.2.6 เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในช่วงความยาวคลื่นย่าน C-Band หลังจากการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการพัฒนาต่อไป.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	68
ก. ความยาวคลื่นของช่องสัญญาณในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5, 25, 50, 100 และ 200 GHz.....	69
ข. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	76
ค. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ช่องว่างของช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU สำหรับระบบ ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50GHz แล100GHz.....	42

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (L) กับระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (l).....	7
2.2 กำลังของสัญญาณเปรียบเทียบกับระยะทางของระบบสื่อสารสัญญาณ	7
2.3 ระยะทางประสิทธิผลของระบบสื่อสารสัญญาณเปรียบเทียบกับแต่ละช่วงระยะทาง.....	7
2.4 การเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณและระยะทางประสิทธิผล (PL_e) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ.....	8
2.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มของแสงกับพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยแก้วนำแสง.....	9
2.6 ผลกระทบของ SRS เมื่อกำลังของสัญญาณจากช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำถูกถ่ายเทไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า.....	13
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ.....	13
2.8 กำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก Stimulated Raman Scattering เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm และระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่ากับ 80 กิโลเมตร.....	15
2.9 การเกิดขึ้นของ Four-Wave Mixing ที่มีสาเหตุมาจากการเหนี่ยวนำของ 3 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากันที่ความถี่เชิงมุม $\omega_i, \omega_j, \omega_k$	23
2.10 ค่ากำลังของสัญญาณสูงสุดต่อช่องสัญญาณเมื่อได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing บนเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Standard Single-Mode และ Dispersion Shifted Fiber โดยมีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร.....	28
3.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสง.....	31
3.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อมีจำนวนของอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น.....	32
3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายด้วยระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM	32
3.4 ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น.....	34
3.5 ส่วนประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	35
3.6 Bragg Grating.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 เส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่น.....	38
3.8 เส้นใยแก้วชนิด Erbium-Doped Fiber Amplifiers.....	38
3.8 โครงสร้างพื้นฐานของ OADM.....	38
3.9 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ OADM ที่ใช้หลักการของ Fiber Bragg Gratings.....	40
3.10 ตัวอย่างคุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	41
3.11 สเปกตรัมของอุปกรณ์คิมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm	44
3.12 รูปแบบการกระจายตัวของความถี่ของแสงจากผลของ Four-Wave Mixing.....	45
3.13 รูปแบบการชดเชยค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันด้วย Dispersion Compensating Fiber.....	47
3.14 รูปแบบการจัดช่องสัญญาณใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก FWM.....	49
4.1 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5 GHz.....	52
4.2 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 25 GHz.....	53
4.3 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz.....	53
4.4 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz.....	54
4.5 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 200 GHz.....	54
4.6 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM เปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชัน เมื่อระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่างกัน.....	56
4.7 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave mixing เปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณอินพุต ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber.....	57
4.8 กำลังของสัญญาณ จาก Four-Wave Mixing ของเส้นใยแก้วนำแสง ชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber.....	58
4.9 ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ของ เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	
กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ของระบบสี่สัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz หลังการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่.....	61
4.11	
ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ของระบบสี่สัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz หลังจากการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่.....	61
4.12	
กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ของระบบสี่สัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz ที่ประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณต่างกัน.....	62
4.13	
กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่มีประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณ 80% เปรียบเทียบวิธีการจัดช่องสัญญาณที่ต่างกัน.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงโดยใช้ระบบสื่อสารด้วยแสง DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจากผลของการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เรียกว่า Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงนี้ทำให้ระบบสื่อสารด้วยแสง DWDM สามารถส่งสัญญาณแสงหลายช่องสัญญาณพร้อมกันได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความจุของการส่งข้อมูลทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากแถบความยาวคลื่นของการขยายสัญญาณแสงที่กว้าง โดยปกติมีแถบความยาวคลื่นในช่วง 1530 nm – 1560 nm ทำให้สามารถส่งความยาวคลื่นหลายค่าได้พร้อมกัน แต่กำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงรวมทั้งการส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นพร้อมกัน ทำให้เกิดการตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Response) ของเส้นใยแก้วนำแสงขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จะจำกัดความจุการส่งข้อมูลของเส้นใยแก้วนำแสง สำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวนมากจะพบว่าผลกระทบจาก Four-Wave Mixing (FWM) เป็นผลกระทบที่สำคัญเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณหลายๆสัญญาณแพร่กระจายไปในเส้นทางเดียวกันและเกิดการร่วมเข้าด้วยกันทำให้เกิดช่องสัญญาณใหม่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งอาจจะไปรบกวนหรือดึงเอากำลังงานจากสัญญาณเดิมออกมา เป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังของสัญญาณลดลง และเมื่อนำสัญญาณข้อมูลส่งเข้าไปในช่องสัญญาณของระบบสื่อสารด้วยแสง DWDM ที่มีผลกระทบจาก Four-Wave Mixing จะทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมลงของคุณภาพของสัญญาณในเครือข่ายได้

ดังนั้นหากระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแคบลงจากเดิมเพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในระบบและทำให้แบนด์วิธของเครือข่ายสูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงให้สูงขึ้นเพื่อส่งสัญญาณในระยะทางที่ไกลขึ้น จะทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing นั้นสูงขึ้น ยิ่งถ้าระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมากขึ้นเท่าใด ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนมากเท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาถึงผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นกับเครือข่ายและหาแนวทางที่จะลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นให้น้อยลงเพื่อทำให้เครือข่ายมีสมรรถนะที่สูงขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารด้วยแสง DWDM ที่มีการเพิ่มแบนด์วิธของเครือข่ายด้วยการลดระยะห่างของช่องสัญญาณและเพิ่มกำลังของสัญญาณด้าน

อินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อส่งสัญญาณในระยะทางที่ไกลขึ้น โดยการเปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นด้วยการปรับระยะห่างของช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน และพิจารณาแนวทางในการเลือกใช้ระยะห่างของช่องสัญญาณแต่ละช่วง นอกจากนั้นยังศึกษาวิธีการลดผลกระทบของ Four Wave Mixing ที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงแล้วส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณเสื่อมลง ซึ่งแนวทางที่เลือกใช้ต้องสามารถทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ข้อดีของระบบสื่อสารแบบหลายช่องสัญญาณ (Multi-Channel) ก็คือช่องสัญญาณที่อยู่ข้างเคียงกันจะเกิดการแทรกสอดระหว่างกัน ถ้าระบบสื่อสารสัญญาณได้รับผลกระทบจากองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะทำให้ค่าสมรรถนะของระบบต่ำลง แต่เครือข่ายมีแนวโน้มความต้องการแบนด์วิธที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ก็ต้องการช่องสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้น จึงใช้แนวทางการลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณลงเพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในเครือข่าย ทำให้โอกาสที่จะเกิดการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณมีเพิ่มมากขึ้นไปอีก แต่การลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณก็ต้องมีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่เครือข่ายต้องการและข้อจำกัดของเครือข่ายด้วย จึงต้องทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเพื่อได้ค่าที่เหมาะสมกับความต้องการของเครือข่ายมากที่สุด โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาความเหมาะสม

1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การเพิ่มแบนด์วิธให้กับเครือข่ายด้วยการลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ส่งผลทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing จากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระบบมีจำนวนของช่องสัญญาณมากขึ้นจากการลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะทำให้เทอมของ Four-Wave Mixing เพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปถึงเอากำลังงานจากสัญญาณเดิมออกมาเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพของสัญญาณเสื่อมลง ดังนั้นถ้าสามารถลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ให้น้อยลงและมีความสอดคล้องกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ก็จะทำได้เครือข่ายที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ในการวิจัยนี้จะทำการศึกษารูปแบบระยะห่างของช่องสัญญาณซึ่งมีอิทธิพลทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing สูงขึ้น และแนวทางการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ด้วยวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณที่เหมาะสม

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจาก Four-Wave Mixing เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ความยาวคลื่นย่านซีแบนด์ (C-Band) ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz) และพิจารณาเปรียบเทียบระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz โดยแสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในรูปของกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing และความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing รวมถึงการลดผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ด้วยวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ (Channel Grouping Separation)

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การวิจัยนำเสนอในรูปของผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ช่วงความถี่ 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz) และมีระยะห่างของช่องสัญญาณ 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ดังนี้

1. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก Four-Wave Mixing สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shifted Fiber (DSF) และ Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZ-DSF)
2. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก Four-Wave Mixing เมื่อค่าคิสเปอร์ชันเปลี่ยนแปลง
3. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงค่าต่าง ๆ ว่าส่งผลกระทบต่อทำให้ Four-Wave Mixing Power เปลี่ยนแปลงอย่างไร
4. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังของสัญญาณจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing และความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing เมื่อระบบมีระยะห่างของช่องสัญญาณแตกต่างกัน
5. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังของสัญญาณจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing และความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing หลังจากการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ด้วยวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันภายในกลุ่มเดียวกันแต่ระหว่างกลุ่มมีระยะห่างที่มากขึ้นเพื่อสามารถลดผลกระทบจากการแทรกสอดข้ามกลุ่ม
6. เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz เมื่อมีประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณต่างกัน

7. เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณเท่ากัน แต่มีรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแตกต่างกันคือแบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันตลอดช่วงของแถบความถี่และแบบการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ

1.7 รายละเอียดและเนื้อหาในบทต่างๆ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดขึ้นกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ประกอบด้วย Stimulated Brillouin Scattering, Stimulated Raman Scattering, Self-Phase Modulation, Cross-Phase Modulation และ Four-Wave Mixing

บทที่ 3 กล่าวถึงองค์ประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM และผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM รวมถึงการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ด้วยวิธีการต่างๆเช่นการใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันและการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ ซึ่งแสดงในรูปของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz รวมถึงการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ด้วยวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง

2.1 กล่าวนำ

เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงมีความเข้มของแสงที่เหมาะสม ค่าดัชนีการหักเหของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงก็จะเป็นอิสระกับกำลังของสัญญาณแสง ทำให้โพลาไรเซชันของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงให้ผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้น แต่เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงมีความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับการส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นพร้อมกันในระบบสื่อสารสัญญาณระยะทางไกลๆ โดยผลกระทบที่เกิดจากความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้นคือค่าดัชนีการหักเหของแสงเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นส่งผลทำให้โพลาไรเซชันของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งผลจากปฏิกิริยาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงนี้สามารถเปลี่ยนข้อจำกัดที่สำคัญในระบบสื่อสารสัญญาณที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ ได้

ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 เกิดขึ้นจากผลกระทบของการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงในตัวกลางเนื่องจากปฏิกิริยาของคลื่นแสงกับตัวกลางของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งผลกระทบที่สำคัญ 2 ชนิดของความไม่เป็นเชิงเส้นประเภทที่ 1 นี้ได้แก่ Stimulated Brillouin Scattering (SBS) และ Stimulated Raman Scattering (SRS) ส่วนประเภทที่ 2 เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความไม่เป็นอิสระของดัชนีการหักเหของแสงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังของแสงทำให้ดัชนีการหักเหของแสงเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังของสัญญาณแสงที่เพิ่มขึ้น ความไม่เป็นเชิงเส้นประเภทที่ 2 นี้ได้แก่ Four-Wave Mixing (FWM) , Self-Phase Modulation (SPM) และ Cross-Phase Modulation (CPM) โดยผลกระทบจาก Stimulated Brillouin Scattering, Stimulated Raman Scattering และ Four-Wave Mixing จะทำให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณสำหรับแต่ละช่องสัญญาณในระบบ หรือกำลังของสัญญาณถูกลดทอนลงนั่นเอง ส่วน Self-Phase Modulation และ Cross-Phase Modulation จะทำให้เฟสของสัญญาณเปลี่ยนแปลงและทำให้แถบของสเปกตรัมกว้างขึ้นนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าdispersion (Dispersion) เมื่อพัลส์ของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการกว้างออกและซ้อนทับกับพัลส์ข้างเคียงจะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างกัน

การเกิดขึ้นของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโนดในเครือข่ายและพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง ยิ่งระยะทางระหว่างโนดในเครือข่ายมีระยะทางห่างกันมากๆ ก็ยิ่งทำให้ผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงมีความรุนแรงขึ้น ถึงแม้ว่าจะสามารถส่งสัญญาณได้ตลอดทั้งเครือข่ายแต่คุณภาพของสัญญาณก็จะลดลงเนื่องจากการลดทอนจากการสูญเสียภายในเส้นใยแก้วนำแสง แบบจำลองอย่าง

ง่ายในการพิจารณาผลกระทบนี้ กำหนดให้กำลังของสัญญาณมีค่าคงที่ตลอดระยะทางประสิทธิผล (Effective Length: L_e) เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจกับผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงได้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.2

เมื่อกำหนดให้ P แทนกำลังของสัญญาณแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงและ $P(z) = Pe^{-\alpha z}$ แทนกำลังของสัญญาณแสงที่ระยะทาง z ใดๆระหว่างโนดในเครือข่าย เมื่อ α แทนค่าการลดทอนเนื่องจากจากสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสงและ L แทนระยะทางจริงระหว่างโนดในเครือข่าย จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ [1]

$$PL_e = \int_{z=0}^L P(z) dz \quad (2.1)$$

ซึ่งจะได้ระยะทางประสิทธิผลคือ

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (2.2)$$

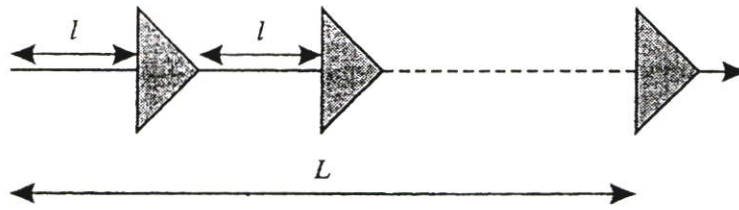
ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้ $\alpha = 0.22$ dB/km ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$

และเส้นใยแก้วนำแสงมีความยาวระหว่างโนด $L \gg \frac{1}{\alpha}$

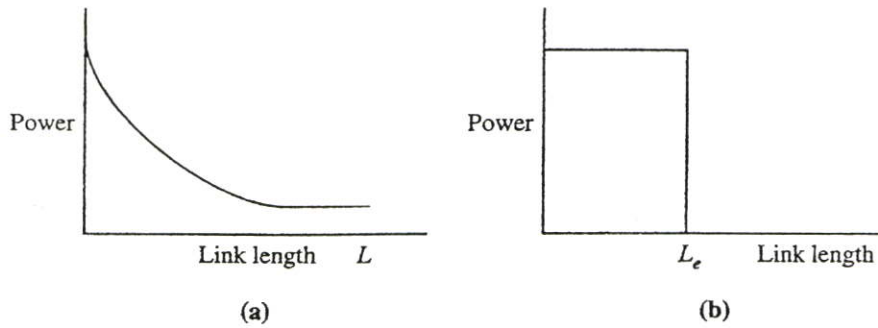
เราจะได้ว่า $L_e \approx 20.7$ km

ในระบบที่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงด้วย สัญญาณที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในแต่ละจุดขยายสัญญาณจะไม่มีผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจากช่วงที่ผ่านมา ดังนั้นระยะทางประสิทธิผลของเครือข่ายจะเป็นผลรวมของระยะทางประสิทธิผลแต่ละช่วง เช่นในเครือข่ายที่มีระยะทาง L และมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆระยะ l จะสามารถประมาณความยาวประสิทธิผลได้ดังนี้ [1]

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha l}}{\alpha} \cdot \frac{L}{l} \quad (2.3)$$

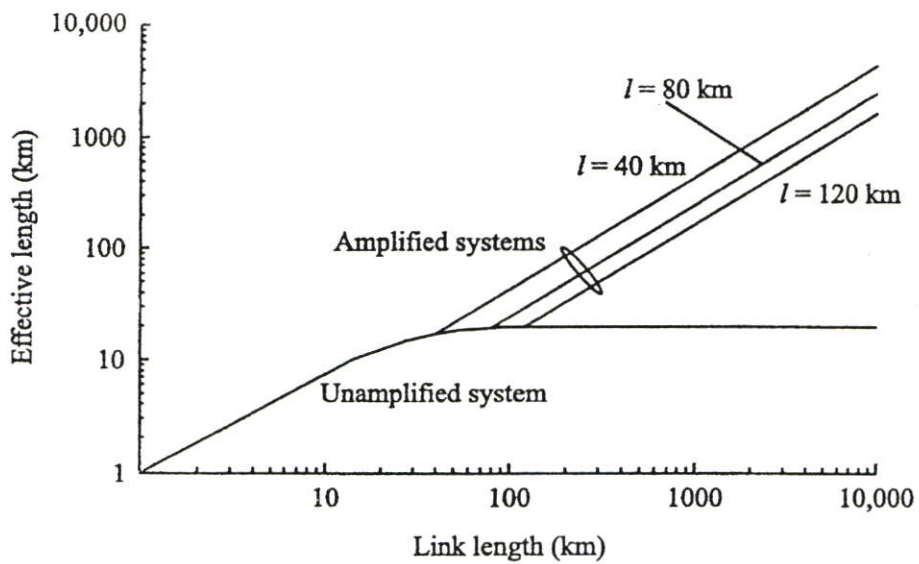


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (L) กับระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (l)



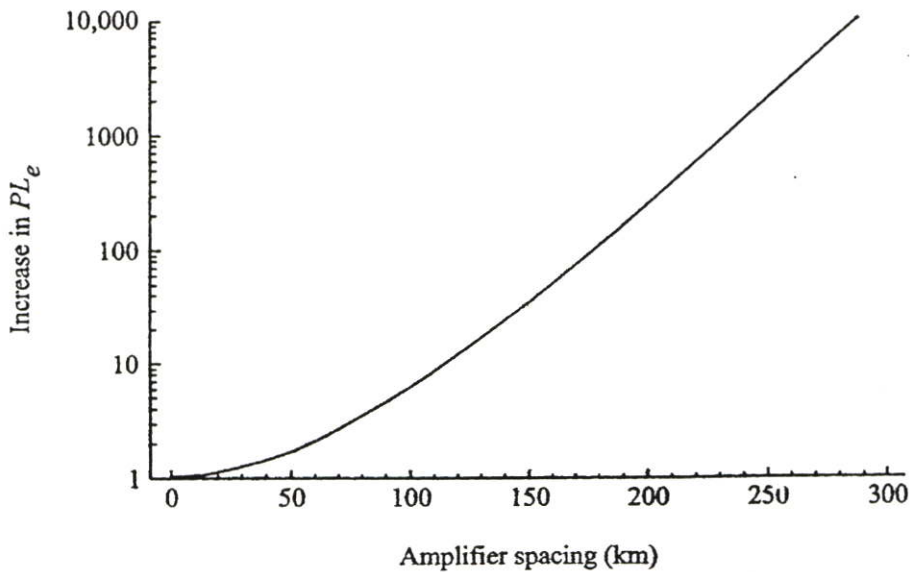
รูปที่ 2.2 กำลังของสัญญาณเปรียบเทียบกับระยะทางของระบบสื่อสารสัญญาณ

(a) ระยะทางจริง (L) (b) ระยะทางประสิทธิผลจากการคำนวณ (L_e)



รูปที่ 2.3 ระยะทางประสิทธิผลของระบบสื่อสารสัญญาณเปรียบเทียบในแต่ละช่วงระยะทาง

จากรูปที่ 2.3 แสดงระยะทางประสิทธิผลเปรียบเทียบกับระยะทางจริงของระบบสื่อสารสัญญาณสำหรับระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและระบบที่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ในรูปแสดงให้เห็นว่าระยะทางประสิทธิผลจะดีขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างโหนดในเครือข่ายลดลงจากการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณทำการขยายสัญญาณเป็นช่วงๆ แต่อย่างไรก็ตามในสถานะที่เครือข่ายได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะไม่สามารถกำหนดระยะทางประสิทธิผลที่แน่นอนได้ โดยปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณในขณะนั้น (P) และระยะทางประสิทธิผล (L_e) รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณในขณะนั้นและระยะทางประสิทธิผล (PL_e) เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (l) โดยในรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงมีค่าน้อย ค่า PL_e ก็จะมีค่าน้อยซึ่งก็จะทำให้ผลกระทบจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงสามารถลดลงได้ด้วยการลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งส่งผลทำให้การออกแบบอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงง่ายขึ้น (เนื่องจากเป็นระบบที่มีอัตราขยายสัญญาณแสงต่ำๆ) แต่ก็ทำให้เราต้องใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงจำนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ตามมาคือต้นทุนของเครือข่ายที่สูงขึ้น

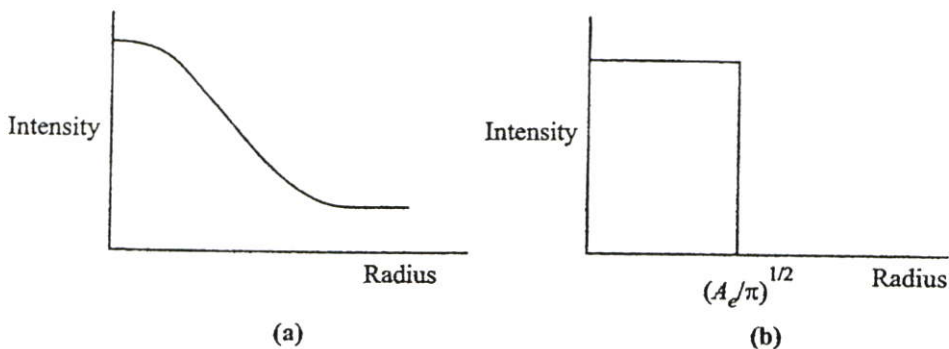


รูปที่ 2.4 การเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณและระยะทางประสิทธิผล (PL_e) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อกำลังของสัญญาณแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของคอร์และกำลังของสัญญาณมีการกระจายออกแบบไม่มีรูปแบบภายในพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อความสะดวกจะพิจารณาจากค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล (Effective Cross-Section Area: A_e) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดจริง (A) และความเข้มของแสงที่กระจายอยู่บนพื้นที่หน้าตัด $I(r, \theta)$ โดย A_e หาได้จาก

$$A_e = \frac{\left[\iint r dr d\theta \cdot I(r, \theta) \right]^2}{\iint r dr d\theta \cdot I^2(r, \theta)} \quad (2.4)$$

เมื่อ r และ θ เป็นค่าในพิกัดโพลาร์ และ I แทนค่าความเข้มของแสง ในที่นี้ A_e แทนพื้นที่หน้าตัดของคอร์ สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวจะมีค่า A_e ประมาณ $50 \mu\text{m}^2$ เมื่อคอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $8 \mu\text{m}$ ส่วนเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Compensating Fiber นั้นจะมีพื้นที่ของคอร์ที่เล็กกว่าจึงมีผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่สูงกว่า (พิจารณาจากพารามิเตอร์ A_e อย่างเดียว)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มของแสงกับพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยแก้วนำแสง

(a) คำนวณจากระยะทางจริง

(b) คำนวณจากระยะทางประสิทธิผล

ผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังงานจากความยาวคลื่นแสงหนึ่งไปยังอีกความยาวคลื่นหนึ่งที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า (กำลังงานต่ำกว่า) กำลังงานที่สูงจะถูกลดด้วยกระบวนการสั่นสะเทือนของโมเลกุลในตัวกลาง (ชนิดของการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจะมีความแตกต่างกันสำหรับ SBS และ SRS) คลื่นลำดับที่สองที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าคลื่นกระตุ้น (Stokes Wave) ซึ่งสัญญาณที่สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นขยาย (Pump Wave) นั้นต้องเกิดขึ้นจากกระบวนการขยายสัญญาณของคลื่นกระตุ้น การแพร่กระจายด้วยการขยายสัญญาณใน

เส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดการสูญเสียกำลังงานและอัตราขยายกำลังของคลื่นกระตุ้น ในที่นี้เราจะพิจารณาว่าคลื่นขยายคือคลื่นของสัญญาณและคลื่นกระตุ้นเป็นคลื่นที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสง โดยทั่วไปผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่เกิดจากสัมประสิทธิ์ของอัตราขยาย (g) ซึ่งวัดในหน่วย m/W และความกว้างของสเปกตรัม (Δf) สำหรับอัตราขยายในขณะนั้น

ผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ PL_c ที่เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงและระยะทางระหว่างโนดของเครือข่าย โดยเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างโนดที่ไกลมาก ๆ ต้องใช้กำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดคู่ของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณกระตุ้นขึ้น สำหรับการกำหนดระยะทางระหว่างโนดสามารถประมาณได้จากการวัดระดับกำลังของสัญญาณแสงที่จุดซึ่งเริ่มมีผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงมาเป็นจุดอ้างอิงซึ่งเรียกกำลังของสัญญาณที่จุดนั้นว่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (Threshold Power) ซึ่งถูกกำหนดด้วยความเข้มของกำลังงานแสงต่อช่องสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีกำลังของสัญญาณขยายและสัญญาณกระตุ้นที่ด้านเอาต์พุตของเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากัน ในระบบที่มีการขยายสัญญาณแสงค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (Threshold Power) จะลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะทางประสิทธิผล ซึ่งทำให้ระบบที่มีการขยายสัญญาณมีความอ่อนไหวมากกว่าที่จะได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง

2.2 Stimulated Brillouin Scattering (SBS)

SBS เกิดขึ้นจากผลกระทบของการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งกรณีของ SBS นั้นความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาของคลื่นแสงกับตัวกลางของเส้นใยแก้วนำแสงจะเป็นแบบ Acoustic Phonons โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นกับช่องสัญญาณที่มีแถบความกว้างของสเปกตรัมแคบมาก ๆ ประมาณ $\Delta f_B = 20$ MHz ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu m$ ซึ่งการกระจายของแสงจากสัญญาณคลื่นขยายและสัญญาณคลื่นกระตุ้นจะอยู่ในทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้น SBS จะไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันมาก ๆ จนกว่าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นแคบมากกว่า $\Delta f_B = 20$ MHz ซึ่งเป็นขอบเขตที่จำกัดของ SBS โดย SBS ทำให้เกิดอัตราขยายของสัญญาณในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางในการแพร่กระจายแสงของสัญญาณ พูด่างๆ ก็คือย้อนกลับสู่แหล่งกำเนิดของสัญญาณ ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปมีกำลังของสัญญาณลดลง ส่งผลให้เกิดความเสื่อมขึ้นในช่องสัญญาณ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SBS (g_B) มีค่าประมาณ $4 \times 10^{-11} m/W$ ซึ่งเป็นอิสระจากกันของแต่ละความยาวคลื่น

ความเข้มของสัญญาณคลื่นขยาย (I_p) และสัญญาณคลื่นกระตุ้น (I_s) มีความสัมพันธ์กันตามสมการคลื่นทั้งสองสมการนี้ [1]

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (2.5)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p \quad (2.6)$$

ความเข้มของสัญญาณแสงมีความสัมพันธ์กับกำลังของสัญญาณดังนี้ $P_s = A_e \cdot I_s$ และ $P_p = A_e \cdot I_p$ สำหรับในกรณีนี้กำลังของสัญญาณคลื่นกระตุ่น (P_s) จะมีค่าน้อยกว่ากำลังของสัญญาณคลื่นขยาย (P_p) มาก เราสามารถอ้างอิงได้ว่าสัญญาณคลื่นขยายไม่ได้ถูกทำให้ลดลงเลย ดังนั้นอาจไม่ต้องสนใจเทอม $-g_B I_p I_s$ ในด้านขวาของสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) ด้วย สมมติฐานนี้สมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) สามารถแก้ปัญหของสมการสำหรับเครือข่ายที่มีความยาว L ได้ดังนี้ [1]

$$P_s(0) = P_s(L) \cdot e^{-\alpha L} \cdot e^{\frac{g_B P_p(0) L_e}{A_e}} \quad (2.7)$$

$$P_p(L) = P_p(0) \cdot e^{-\alpha L} \quad (2.8)$$

ข้อสังเกต เมื่อเอาที่พุดของคลื่นขยายอยู่ที่ $z = L$ แต่เอาที่พุดของคลื่นกระตุ่นอยู่ที่ $z = 0$ เนื่องจากคลื่นทั้งสองนี้มีการแพร่กระจายแสงในทิศทางตรงข้ามกัน

การคำนวณค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (P_{th}) สามารถประมาณในรูปแบบอย่างง่าย ด้วยความสัมพันธ์นี้ [1]

$$P_{th} \approx \frac{21bA_e}{g_B L_e} \quad (2.9)$$

ค่าของ b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของโพราไรเซชันของคลื่นขยายและคลื่นกระตุ่น สมมุติในกรณีที่แย่ที่สุดค่าของ $b = 1$ เราจะได้ $P_{th} = 1.3$ mW เนื่องจากค่านี้เป็นค่าต่ำสุด ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบของ SBS การออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณแสงควรอ้างอิงที่ค่านี้

ที่ผ่านมาจะกำหนดให้สัญญาณของคลื่นขยายมีโลนวิคท์ที่แคบมากๆและมีอัตราขยายช่วงแคบๆภายในช่วงแบนด์วิคท์ของ SBS (ประมาณ 20 MHz) ค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (P_{th}) จะพิจารณาว่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณมีโลนวิคท์ที่กว้างออกและมีค่ากำลังของสัญญาณคลื่นขยายสูงขึ้น จนอยู่ภายนอกช่วงแบนด์วิคท์ของ SBS การประมาณการกระจายออกซึ่งรวมผลกระทบนี้เข้าไปด้วยหาได้จาก [1]

$$P_{th} \approx \frac{2IbA_e}{g_B L_e} \left(1 + \frac{\Delta f_{source}}{\Delta f_B} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ Δf_{source} แทนไลน์วิคท์ของแหล่งกำเนิดและถ้ากำหนดให้ $\Delta f_{source} = 200$ MHz และ $b = 1$ จะได้ค่า P_{th} ของ SBS เพิ่มขึ้นเป็น $P_{th} = 14.4$ mW โดยผลกระทบเนื่องจาก SBS สามารถลดลงได้ด้วยวิธีการดังนี้

(1) รักษาค่ากำลังของสัญญาณแสงต่อช่องสัญญาณไม่ให้สูงเกินกว่า P_{th} ของ SBS โดยอาจลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงลงเมื่อระบบมีระยะทางไกลมากๆ โดยใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณช่วยในการขยายสัญญาณ เพื่อไม่ให้กำลังส่งของสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสงสูงเกินกว่า P_{th} ของ SBS

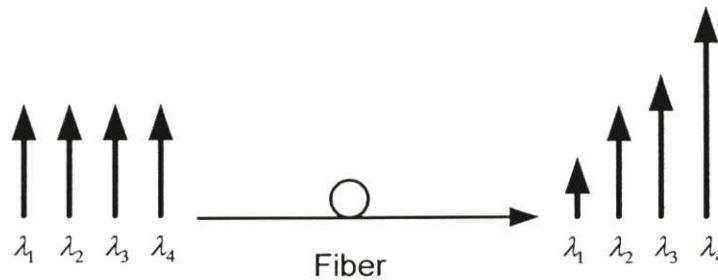
(2) เนื่องจากอัตราขยายแบนด์วิคท์ของ SBS มีค่าน้อยมาก ผลกระทบนี้สามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มไลน์วิคท์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงด้วยการใช้เลเซอร์มอดูเลชันแบบโดยตรง ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เกิดคิสเพอร์ชันสูงขึ้น แต่ค่าคิสเพอร์ชันนี้สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการจัดการคิสเพอร์ชันที่เหมาะสม ส่วนวิธีการอื่นๆ ในการเพิ่มไลน์วิคท์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงคือการสั่นสะเทือนโมเลกุลของเลเซอร์ด้วยความถี่เล็กน้อยที่มีความเหมาะสม (ประมาณ 200 MHz) วิธีการนี้จะไม่ทำให้ค่าคิสเพอร์ชันสูงขึ้นแต่จะทำให้ค่า P_{th} ของ SBS สูงขึ้น เมื่อพิจารณาในเทอมของขนาดวิธีนี้ถูกนำมาใช้กับระบบทั่วไปที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ และส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งของสัญญาณสูงๆ

(3) วิธีการมอดูเลตทางเฟสดีกว่าการมอดูเลตทางแอมพลิจูด เนื่องจากการลดกำลังของสัญญาณแสงในตัวกลางทำให้ผลกระทบของ SBS ลดลงได้ ซึ่งในกรณีนี้ไลน์วิคท์ของแหล่งกำเนิดสามารถทำให้เหมาะสมกับอัตราเร็วของบิตได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่สามารถนำไปใช้กับระบบต่างๆ ได้ทั้งหมด

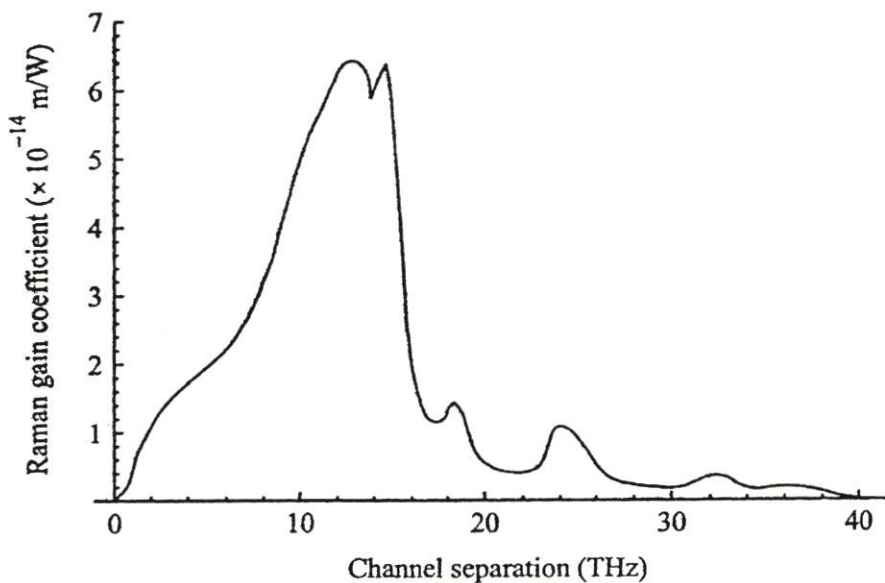
2.3 Stimulated Raman Scattering (SRS)

เมื่อสัญญาณสองสัญญาณหรือมากกว่าและมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันส่งรวมเข้าไปด้วยกันในเส้นใยแก้วนำแสง การเปลี่ยนแปลงกำลังงานจากสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด SRS ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข้อแตกต่างระหว่าง SBS และ SRS คือผลกระทบจากแถบความถี่ที่แถบกว้าง รูปที่ 2.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS (g_R) มีค่าประมาณ 6×10^{-14} m/W ที่ความยาวคลื่น 1.55 μm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SBS แต่อย่างไรก็ตามช่องสัญญาณแต่ละช่องจนถึงที่ความถี่ 150 THz (125 nm) จะถูกคัปปลิงด้วย SRS ซึ่งจะคัปปลิงทั้งสองทิศทางของการ

แพร่กระจายแสงและส่งสัญญาณย้อนกลับในทิศทางตรงข้าม โดยการคัปปลิงระหว่างช่องสัญญาณ จะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณทั้งสองช่องส่งสัญญาณมีบิต 1 เหมือนกัน (หรือมีกำลังของสัญญาณทั้งสองช่องสัญญาณ) ด้วยเหตุนี้ SRS ที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ลดลงได้ตามค่าของคอสเพอร์ชันที่ลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณที่ต่างกันจะส่งผ่านด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ทำให้โอกาสที่จะเกิดการซ้อนทับกันของพัลส์ของแสงระหว่างความยาวคลื่นที่แตกต่างกันที่ทุกๆจุดในเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลง ซึ่งเหมือนกับปรากฏการณ์ pulse walk-off ในกรณีของ cross-phase modulation



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของ SRS เมื่อกำลังของสัญญาณแสงจากช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำ ถูกถ่ายเทไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า



รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ

การคำนวณผลกระทบของ SRS ในระบบสื่อสารแบบหลายช่องสัญญาณ เมื่อกำหนดรูปร่างของ Raman Gain เป็นรูปสามเหลี่ยม สามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS ในรูปความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ ได้จาก [1]

$$\begin{aligned} g(\Delta\lambda) &= g_R \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_c} && \text{เมื่อ } 0 \leq \Delta\lambda \leq \Delta\lambda_c \\ g(\Delta\lambda) &= 0 && \text{ที่ค่าอื่นๆ} \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อกำหนดให้ g_R แทนค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS และแบนด์วิธของ Raman Gain $\Delta\lambda_c = 125$ nm

พิจารณาระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวน W ช่องสัญญาณซึ่งจะประกอบด้วยช่องสัญญาณที่ $0, 1, \dots, W-1$ และแทนระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณด้วย $\Delta\lambda_s$ โดยสมมุติให้ทุกช่องสัญญาณอยู่ภายใต้ช่วงแบนด์วิธของ Raman Gain ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีแบนด์วิธของ Raman Gain อยู่ที่ 125 nm นั่นคือระบบจะมีแบนด์วิธเท่ากับ $\Lambda = (W-1)\Delta\lambda_s \leq \Delta\lambda_c$ ในระบบสื่อสาร DWDM ปกติจะมีแบนด์วิธประมาณ 30 nm ซึ่งถูกกำหนดมาจากแบนด์วิธของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุดคือช่องสัญญาณที่ตรงกับความยาวคลื่นต่ำสุดคือช่องสัญญาณช่องที่ 0 เมื่อมีการส่งบิต 1 ในทุกๆช่องสัญญาณ สมมุติว่ากำลังส่งของทุกช่องสัญญาณเท่ากันและไม่มีการแทรกสอดจากช่องสัญญาณอื่น ในทางปฏิบัติเนื่องจากระบบมีการรบกวนกันของการโพลาไรเซชัน ซึ่งมีการแก้ไขด้วยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถแก้ไขและปรับปรุงการโพลาไรเซชันได้ แต่ก็จะทำให้ผลกระทบของ Raman สูงขึ้นและสมการที่นำมาใช้ก็จะได้ไม่มีแฟคเตอร์เพียง 2 ตัวเท่านั้นในสมการ โดยกำลังของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของช่องสัญญาณและทำให้ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุด จากช่องสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องสัญญาณช่องที่ i สามารถประมาณได้จาก [1]

$$P_0(i) = g_R \frac{i\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_c} \frac{PL_e}{2A_e} \quad (2.12)$$

การกระจายสมการข้างต้นนี้เริ่มต้นจากการรวบรวมสมการของคลื่นจาก SRS ซึ่งคล้ายกับรูปแบบของสมการที่ 2.5 และ 2.6 ดังนั้นกำลังของช่องสัญญาณช่องที่ 0 ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากช่องสัญญาณอื่นๆทั้งหมดในระบบหาได้จาก [1]

$$P_0 = \sum_{i=1}^{W-1} P_0(i) = g_R \frac{g_R \Delta\lambda_s PL_e}{2\Delta\lambda_c A_e} \frac{W(W-1)}{2} \quad (2.13)$$

สำหรับกำลังของสัญญาณของช่องสัญญาณคือ $-10 \log(1 - P_0)$

ถ้าหากต้องการรักษากำลังของสัญญาณให้ต่ำกว่า 0.5 dB เราจะต้องมีค่า $P_0 < 0.1$

ตามการคำนวณในสมการที่ 2.13 จะได้ว่า $WP(W-1)\Delta\lambda_s L_e < 40,000$ mW nm km.

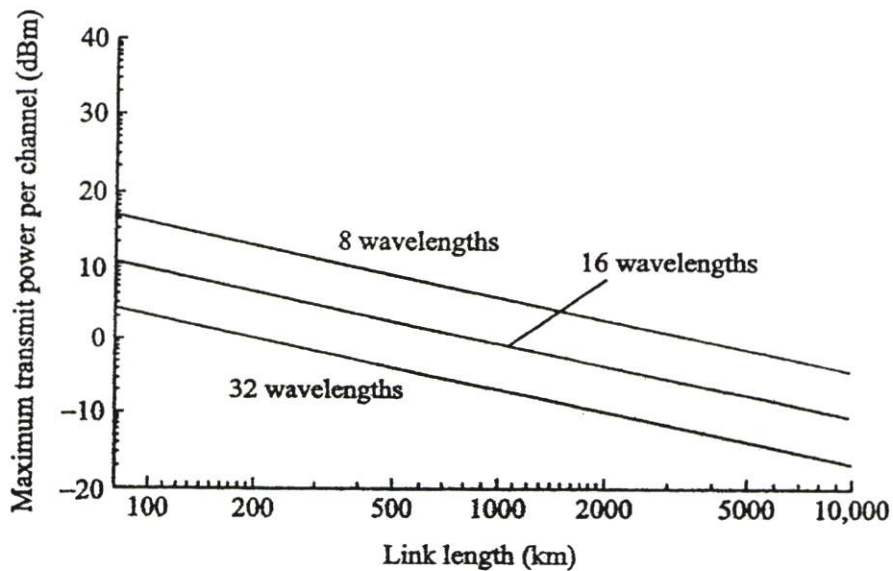
แบนด์วิธรวมทั้งหมดของระบบคือ $\Lambda = (W-1)\Delta\lambda_s$

กำลังส่งของสัญญาณทั้งหมดคือ $P_{tot} = WP$

ดังนั้นจากผลข้างต้นจะได้ว่า $P_{tot}\Lambda L_e < 40,000$ mW nm km.

ที่ผ่านมามีสมมติให้ในระบบไม่มีการสูญเสียจากการกระจายออกของแสง แต่เมื่อมีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการกระจายออกของแสงค่าคงที่ด้านขวาของสมการสามารถประมาณค่าได้เป็น 80,000 mW nm km.

ถ้าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณถูกกำหนดให้คงที่ กำลังของสัญญาณที่สามารถนำมาใช้ได้จะลดลงตามค่า W โดยมีค่า $1/W^2$ ตัวอย่างเช่นในระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวน 32 ช่องสัญญาณ มีความยาวคลื่นระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm (100 GHz) และมีค่า $L_e=20$ กิโลเมตร จะมีค่า $P=2.5$ mW รูปที่ 2.8 แสดงกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้งานได้สูงสุดต่อช่องสัญญาณในฟังก์ชันของระยะทางเชื่อมโยงเครือข่าย [1]



รูปที่ 2.8 กำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก Stimulated Raman Scattering เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm และระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่ากับ 80 กิโลเมตร

ถึงแม้ว่า SRS จะไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญในระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวนน้อยเนื่องจากมีค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (Threshold Power) ที่สูง แต่มันสามารถทำให้ปัญหานี้สำคัญขึ้นมาได้เมื่อระบบมีจำนวนของช่องสัญญาณมากขึ้น ผลกระทบของ SRS สามารถทำให้ลดน้อยลงได้ด้วยการรักษาระยะห่างของช่องสัญญาณให้เป็นอิสระจากกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และรักษาระดับกำลังของสัญญาณให้ต่ำกว่าระดับของ ค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (Threshold Power) ซึ่งอาจจะต้องลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณลง

2.4 Self-Phase Modulation (SPM)

Self-Phase Modulation (SPM) เกิดขึ้นเนื่องจากดัชนีการหักเหของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงมีความไม่เป็นอิสระกับความเข้มของแสง ความไม่เป็นเชิงเส้นของดัชนีการหักเหของแสงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการเลื่อน ไปของเฟสซึ่งแปรผันตรงกับความเข้มของพัลส์ (Pulse) ส่วนของพัลส์ที่มีความเข้มแตกต่างกันจะได้รับการเลื่อนของเฟสที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลื่อนไปของเฟสจะทำให้พัลส์เกิดการ chirping และเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้ความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้นเกิดผลกระทบในรูปของดิสเพอร์ชันที่เพิ่มขึ้น การ chirping ของพัลส์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง ผลจากการเหนี่ยวนำของ SPM จะส่งผลกระทบที่ชัดเจนมากกว่าในระบบที่มีกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงๆ การ chirping ของพัลส์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของ SPM จะส่งผลทำให้พัลส์กว้างขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของดิสเพอร์ชันที่เพิ่มขึ้น โดยค่าดิสเพอร์ชันนี้เป็นข้อจำกัดที่สำคัญสำหรับระบบที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆเช่นระบบที่มีอัตราเร็วของบิต 10 Gb/s หรือมากกว่า และระบบที่มีอัตราเร็วของบิตต่ำๆแต่มีกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงๆ ซึ่งจะทำให้ระบบได้รับผลกระทบจาก SPM สูงขึ้น จากค่าของดิสเพอร์ชันที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference : ISI) เพิ่มขึ้น

เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจผลกระทบของ SPM มากขึ้นให้พิจารณาระบบที่มีช่องสัญญาณเดียวซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ในรูป

$$E(z, t) = E \cos(\omega_0 t - \beta_0 z)$$

เมื่อ E แทนสนามไฟฟ้า (Electric Field)

ω_0 แทนค่าความถี่ศูนย์กลางของพัลส์ (Center Frequency of Pulses)

β_0 แทนค่าคงที่ในการแพร่กระจาย (Propagation Constant)

z แทนค่าระยะทางในการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า

การเกิดขึ้นของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง ทำให้สนามไฟฟ้าในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง และสำหรับระนาบคลื่นแบบโมโนโครมาติก (Monochromatic) เมื่อกำหนดค่าคงที่ในการแพร่กระจายเป็น β_0 จะสามารถหาโพลาไรเซชันเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นได้จาก [1]

$$\begin{aligned}
 P_{NL}(r,t) &= \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \cos^3(\omega_0 t - \beta_0 z) \\
 &= \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \left(\frac{3}{4} \cos(\omega_0 t - \beta_0 z) + \frac{1}{4} \cos(3\omega_0 t - 3\beta_0 z) \right) \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $P_{NL}(r,t)$ แทนค่าโพลาไรเซชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Polarization)

ϵ_0 แทนค่าสภาพยอมในตัวกลางอากาศ (Permittivity of Vacuum)

$\chi^{(3)}$ แทนค่า Third-order Nonlinear Susceptibility

จากสมการที่ 2.14 จะพบว่าโพลาไรเซชันเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นจะมีองค์ประกอบของความถี่ใหม่เกิดขึ้นที่ $3\omega_0$ สมการของคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าได้มาจากเพียงข้อกำหนดขององค์ประกอบที่เป็นเชิงเส้นจากการเหนี่ยวนำของโพลาไรเซชันในขณะนั้นเท่านั้น แต่การเกิดขึ้นขององค์ประกอบของโพลาไรเซชันเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องมีการปรับปรุงสมการคลื่นใหม่ แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงรายละเอียดว่าควรปรับปรุงอย่างไร แต่จะอ้างถึงผลลัพธ์ของสมการที่ได้จากการปรับปรุงแล้ว โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ความถี่ใหม่จะเป็นผลจากโพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในที่นี้สนามไฟฟ้าจะให้องค์ประกอบที่ความถี่ $3\omega_0$

เส้นใยแก้วนำแสงจะมีการแพร่กระจายที่คงที่ที่ความถี่เชิงมุม $3\omega_0$ ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วย $\beta(3\omega_0)$ จากสมการที่ 2.14 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากผลของการโพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่เชิงมุม $3\omega_0$ จะมีค่าคงที่ในการแพร่กระจายเท่ากับ $3\beta_0$ เมื่อ $\beta_0 = \beta(\omega_0)$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ในการแพร่กระจายที่ความถี่เชิงมุม ω_0 โดยในทางอุดมคติของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersionless Fiber จะมี $\beta = \omega n / c$ เมื่อดัชนีการหักเหของแสง (n) เป็นค่าคงที่และเป็นอิสระจากความถี่เชิงมุม ω_0 ดังนั้น $\beta(3\omega_0) = 3\beta(\omega_0)$ แต่ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการใช้งานจริงๆจะมีค่าดัชนีหักเหด้วย ดังนั้นดัชนีการหักเหของแสง n ก็จะไม่คงที่ด้วย และ $\beta(3\omega_0)$ จะมีความแตกต่างอย่างมากกับ $3\beta(\omega_0)$ ทั้งนี้เป็นเพราะความไม่ตรงกันระหว่างค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นทั้งสอง ซึ่งองค์ประกอบจากสนามไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุม $3\omega_0$ อาจไม่ต้องสนใจก็ได้ โดยเงื่อนไขของการไม่ตรงกันของเฟสจะมีความสำคัญมากในการอธิบายเกี่ยวกับ Four-Wave Mixing

เมื่อไม่ต้องพิจารณาองค์ประกอบที่ความถี่เชิงมุม $3\omega_0$ ดังนั้นโพลาไรเซชันเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนได้เป็น [1]

$$P_{NL}(r, t) = \left(\frac{3}{4} \epsilon_0 \chi^{(3)} E^2 \right) E \cos(\omega_0 t - \beta_0 z) \quad (2.15)$$

โดยสามารถอธิบายค่าของ β_0 สำหรับการโพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยสมการต่อไปนี้ [1]

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{c} \sqrt{1 + \tilde{\chi}^{(1)} + \frac{3}{4} \chi^{(3)} E^2}$$

และจาก $n^2 = 1 + \tilde{\chi}^{(1)}$ จะได้ว่า

$$\beta_0 = \frac{\omega_0 n}{c} \sqrt{1 + \frac{3}{4n^2} \chi^{(3)} E^2}$$

- เมื่อ $\tilde{\chi}^{(1)}$ แทนค่า Nonlinear Susceptibility
 n แทนค่าดัชนีการหักเหของแสงแบบเชิงเส้น
 c แทนค่าความเร็วของแสงในอากาศ

แต่ค่า $\chi^{(3)}$ สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกา มีค่าน้อยมากจึงประมาณค่าสมการใหม่เป็น

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{c} \left(n + \frac{3}{8n} \chi^{(3)} E^2 \right) \quad (2.16)$$

ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้า $E(z, t) = E \cos(\omega_0 t - \beta_0 z)$ จะเป็นสัญญาณคลื่นไซน์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสเป็น $E^2 z$ นี้เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Self-Phase Modulation (SPM) ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่พิจารณาในระนาบของคลื่นที่มีแอมพลิจูด E คือ

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c n E^2$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจาก SPM จะแปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของเฟสนี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางของ z ที่เพิ่มขึ้น เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ใน

การแพร่กระจาย (β) กับดัชนีการหักเหของแสง (n) ในรูปเชิงเส้นคือ $\beta = \omega n / c$ เราสามารถอธิบายสมการที่ (2.16) ในรูปของดัชนีการหักเหของแสงที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของกำลังงานได้ดังนี้

$$\hat{n}(E) = n + \bar{n}E^2 \quad (2.17)$$

เมื่อ \hat{n} แทนค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นในฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า

\bar{n} แทนค่าสัมประสิทธิ์บ่งชี้ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Index Coefficient)

$$\text{ซึ่งสามารถหาได้จาก } \bar{n} = \frac{3}{8n} \chi^{(3)}$$

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกาที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นค่าของ \bar{n} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $2.2 - 3.4 \times 10^{-8} \text{ } \mu\text{m}^2/\text{mW}$ ตัวอย่างของค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเช่น $3.2 \times 10^{-8} \text{ } \mu\text{m}^2/\text{mW}$ และเมื่อกำหนดให้ E^2 มีเป็นหน่วย $\text{W}/\mu\text{m}^2$ และความเข้มของสนามไฟฟ้า I หาได้จาก $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 cn |E|^2$ เมื่อวัดค่าในหน่วย $\text{W}/\mu\text{m}^2$ ดังนั้นเมื่อกระจายค่า \bar{n} ในหน่วย $\mu\text{m}^2/\text{mW}$ จะได้ค่าที่อยู่ในรูปองค์ประกอบของ $2/\epsilon_0 cn$

ผลลัพธ์ของสัญญาณที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงจะมีความกว้างที่จำกัดและประกอบด้วยหลายแสงสี โดยจะอยู่ตามขวางของระนาบ (x, y) ตามการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่คงที่และถูกควบคุมด้วยรูปทรงทางเรขาคณิตของเส้นใยแก้วนำแสง จากผลกระทบของ SPM ทำให้เฟสของสนามไฟฟ้าประกอบด้วยเทอมที่แปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีขอบเขตที่จำกัดดังนั้นผลลัพธ์ของสัญญาณจะมีความเข้มของพลังงานไม่คงที่ตลอดทั้งสนามไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้การเลื่อนของเฟสที่ผ่านส่วนของพัลส์ของสัญญาณที่แตกต่างกันก็จะแตกต่างกันด้วย ทิศทางการเลื่อนของเฟสเนื่องจาก SPM จะเป็นลบเพราะว่าเกิดจากสัญญาณที่เป็นลบในการกระจายของเฟสจากเทอม $\omega_0 t - \beta_0 z$ โดยจุดสูงสุดของพัลส์ของสัญญาณที่ผ่านการเลื่อนของเฟสสูงสุดอยู่ในรูปค่าสัมบูรณ์ซึ่งจะมีขอบหน้าและขอบเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นตามการเลื่อนของเฟส เมื่อความถี่เป็นอนุพันธ์ของเฟส ขอบเคลื่อนที่ของพัลส์ทำให้การเลื่อนของความถี่มีค่าเป็นลบและขอบหน้าของความถี่มีค่าเป็นบวก เมื่อการ chirping ของพัลส์แปรผันตรงกับอนุพันธ์ของความถี่ ซึ่งแสดงว่าองค์ประกอบของการ chirping ของพัลส์ของสัญญาณมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะได้ว่า SPM มีสาเหตุมาจากการ chirping ของพัลส์ที่เป็นบวก

เนื่องจากความสัมพันธ์ของผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นลำดับที่สาม ($\chi^{(3)}$) เพียงเล็กน้อยในเส้นใยแก้วนำแสง ทำให้ผลกระทบของ SPM มีความสำคัญขึ้นเมื่อมีการใช้งานสัญญาณที่มีกำลังสูง (เมื่อ E^2 มีค่ามากๆ) โดยการเหนี่ยวนำของ SPM จะทำให้เกิดการ chirping ของพัลส์และส่งผลในรูปผลกระทบของดิสเพอร์ชันและที่ระดับกำลังของสัญญาณเท่ากันผลกระทบของ

SPM จะมีความสำคัญมากสำหรับพัลส์ของสัญญาณที่มีช่วงสั้นๆ (มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ) โดยทั้งหมดจะได้รับผลกระทบในรูปของคิสเพอร์ชัน โดยมีสองประเด็นที่ต้องสนใจในที่นี้คือคุณภาพที่ต้องการของกำลังของสัญญาณและความต่อเนื่องของพัลส์

ผลกระทบของการ chirping ของพัลส์ที่เป็นบวกจะขึ้นอยู่กับทิศทาง การแพร่กระจายของ GVD (Group Velocity Dispersion) ในพารามิเตอร์ β_2 โดยถ้า $\beta_2 > 0$ จะกล่าวได้ว่าค่าคิสเพอร์ชันปกติซึ่งในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิงเกิลโหมดจะมีค่าคิสเพอร์ชันปกติในช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าจุดที่ความยาวคลื่นที่มีค่าคิสเพอร์ชันเป็นศูนย์เช่นที่ค่าความยาวคลื่น $1.33 \mu\text{m}$ สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียชนิดมาตรฐาน แต่เมื่อ $\beta_2 < 0$ จะเรียกค่าคิสเพอร์ชันนี้ว่า anomalous นี่เป็นกรณีสำหรับพัลส์ที่อยู่ในช่วง $1.55 \mu\text{m}$ สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียชนิดมาตรฐาน โดยสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion-Shift Fiber ค่าคิสเพอร์ชันที่เป็นศูนย์จะอยู่ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$ ทำให้พัลส์ในส่วนที่มีความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$ มีค่าคิสเพอร์ชันปกติ และพัลส์ในส่วนอื่นๆเหนือความยาวคลื่นนี้จะมีค่าคิสเพอร์ชันแบบ anomalous เมื่อ $k\beta_2 > 0$ การ chirping ของพัลส์ทำให้เกิดการแผ่กว้างของพัลส์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดผลกระทบในรูปของคิสเพอร์ชัน เมื่อ k แทนค่า chirp factor of pulse ดังนั้น SPM ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโมโนโทน, การแผ่กว้างของพัลส์ในขอบเขตที่มีค่าคิสเพอร์ชันปกติ

แม้ว่าผลกระทบของ SPM ในช่วงที่มีค่าคิสเพอร์ชันแบบ anomalous จะได้รับผลกระทบอย่างมากจากคิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้น แต่เมื่อผลกระทบของ SPM และคิสเพอร์ชันมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าคิสเพอร์ชันจะมีอิทธิพลมากกว่า เนื่องจาก SPM สามารถลดลงได้ด้วยการลดการแผ่กว้างของพัลส์ลงซึ่งทำได้ด้วยการลดผลกระทบของคิสเพอร์ชันลง

2.5 Cross-Phase Modulation (CPM)

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ปรากฏการณ์จากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงเนื่องจากความไม่เป็นอิสระของดัชนีการหักเหของแสงจากความเข้มของสัญญาณแสงทำให้ความเข้มของสัญญาณเพิ่มมากขึ้น และส่งผลทำให้ช่องสัญญาณในระบบเกิดการรวมกันและมีความเข้มเพิ่มขึ้น แม้ว่าแต่ละช่องสัญญาณจะทำงานที่กำลังงานของสัญญาณใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้การเลือนของเฟสจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณและผลจากการ chirping ของสัญญาณจากการเหนี่ยวนำของ SPM จะทำให้ความเข้มของสัญญาณของช่องสัญญาณอื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ผลกระทบนี้จะเรียกว่า Cross-Phase Modulation (CPM)

เพื่อความเข้าใจผลกระทบของ CPM ให้พิจารณาระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีช่องสัญญาณ 2 ช่องสัญญาณ และเขียนเป็นสมการสนามไฟฟ้าได้ดังนี้ [1]

$$E(r, t) = E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2 z)$$

เมื่อ E_1, E_2 แทนสนามไฟฟ้าของช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 ω_1, ω_2 แทนความถี่เชิงมุมของช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 β_1, β_2 แทนค่าคงที่ในการแพร่กระจายของช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

โดยโพลาริเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [1]

$$\begin{aligned}
 P_{NL}(r, t) &= \varepsilon_0 \chi^{(3)} (E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2 z))^3 \\
 &= \varepsilon_0 \chi^{(3)} \left[\left(\frac{3E_1^3}{4} + \frac{3E_2^2 E_1}{2} \right) \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) \right. \\
 &\quad + \left(\frac{3E_2^3}{4} + \frac{3E_1^2 E_2}{2} \right) \cos(\omega_2 t - \beta_2 z) \\
 &\quad + \frac{3E_1^2 E_2}{4} \cos((2\omega_1 - \omega_2)t - (2\beta_1 - \beta_2)z) \\
 &\quad + \frac{3E_2^2 E_1}{4} \cos((2\omega_2 - \omega_1)t - (2\beta_2 - \beta_1)z) \\
 &\quad + \frac{3E_1^2 E_2}{4} \cos((2\omega_1 + \omega_2)t - (2\beta_1 + \beta_2)z) \\
 &\quad + \frac{3E_2^2 E_1}{4} \cos((2\omega_2 + \omega_1)t - (2\beta_2 + \beta_1)z) \\
 &\quad + \frac{E_1^3}{4} \cos(3\omega_1 t - 3\beta_1 z) \\
 &\quad \left. + \frac{E_2^3}{4} \cos(3\omega_2 t - 3\beta_2 z) \right] \tag{2.18}
 \end{aligned}$$

เทอม $2\omega_1 + \omega_2, 2\omega_2 + \omega_1, 3\omega_1, 3\omega_2$ สามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากเป็นเงื่อนไขของการไม่ตรงกันของเฟส (Phase-Matching) ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของคีสเพอร์ชันที่สามารถจัดการได้ ส่วนเทอม $2\omega_1 - \omega_2$ และ $2\omega_2 - \omega_1$ จะขออธิบายในหัวข้อของ Four-Wave Mixing องค์ประกอบของโพลาริเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่ ω_1 คือ

$$\frac{3}{4} \varepsilon_0 \chi^{(3)} (E_1^2 + 2E_1 E_2) E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) \tag{2.19}$$

เมื่อสมการคลื่นถูกปรับปรุงด้วยการนำผลกระทบจากโพลาริเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาพิจารณาร่วมด้วยเพื่อให้ได้ผลของสนามสนามไฟฟ้าที่ตรงตามความเป็นจริงซึ่งเป็นองค์ประกอบของสัญญาณไซน์ (Sinusoidal) ที่ความถี่เชิงมุม ω_1 โดยการเปลี่ยนแปลงของเฟสจะแปรผันตรงกับ $(E_1^2 + 2E_1 E_2)z$ เมื่อเทอมแรกเกิดขึ้นเนื่องจาก Self-Phase Modulation (SPM) ส่วนผลกระทบจาก

เทอมที่สองเรียกว่า Cross-Phase Modulation หรือ CPM เมื่อ $E_1 = E_2$ จะได้ว่าสนามไฟฟ้าทั้งสองมีความเข้มเท่ากัน ผลกระทบของ CPM จะเกิดขึ้นมากกว่า SPM สองเท่า เมื่อผลกระทบของ CPM มีคุณสมบัติคล้ายกับ SPM เราจะประมาณว่า CPM ทำให้การ chirping ของสัญญาณแย่งและส่งผลทำให้พัลส์กว้างออกแล้วส่งผลต่อเนื่องทำให้เกิดผลกระทบของ SPM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

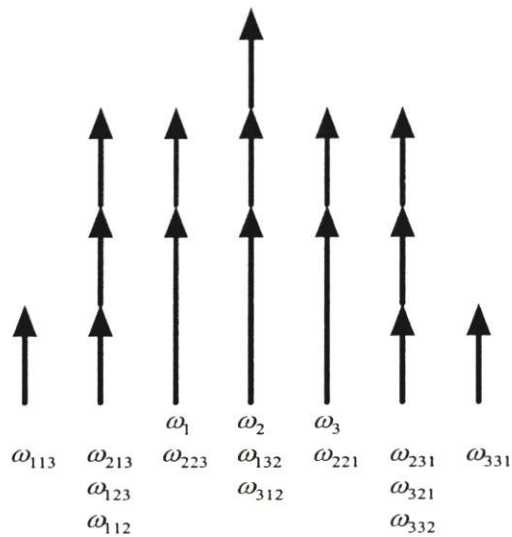
ในทางปฏิบัติผลกระทบของ CPM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM จะเกิดขึ้นบนเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวซึ่งสามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มความยาวคลื่นระหว่างช่องสัญญาณหรือก็คือการเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณนั่นเอง เนื่องจากผลของดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงทำให้ค่าคงที่ในการแพร่กระจาย β_i ของแต่ละช่องสัญญาณจะมีความแตกต่างกันตามพัลส์ของช่องสัญญาณนั้นๆซึ่งแตกต่างจากช่องสัญญาณอื่นๆ สำหรับกรณีตัวอย่างเช่นในระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz ผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์ที่พัลส์กว้างออกนี้ทำให้พัลส์ซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะนั้นมีความสอดคล้องกันชั่วคราวและสิ้นสุดลงหลังจากแพร่กระจายไปในระยะทางหนึ่งและไม่มีปฏิกิริยาที่ขยายต่อไปอีก ด้วยเหตุนี้ผลกระทบของ CPM จะลดลง เมื่อผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นทั้งหมดในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยลงและความยาวของระยะทางที่จะทำให้ระดับของผลกระทบนี้สูงขึ้นสั้นลง ดังนั้นกลไกต่างๆที่ช่วยลดระยะทางที่จะทำให้เกิดผลกระทบ จะทำให้ผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นลดลง แม้ว่าในเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber พัลส์ของช่องสัญญาณที่แตกต่างกันไม่สามารถข้ามไปยังช่องสัญญาณอื่นได้เมื่อแต่ละช่องสัญญาณมีความเร็วกลุ่มเหมือนกัน แต่ปัญหาของ CPM จะเกิดขึ้นกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber ได้เมื่อนำไปใช้งานกับระบบที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ (10 Gb/s ขึ้นไป)

2.6 Four-Wave Mixing

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีความถี่เชิงมุม $\omega_1, \dots, \omega_n$ สำหรับช่องสัญญาณช่องที่ 1, 2, ... n ตามลำดับ ดัชนีการหักเหของแสงจะไม่เป็นอิสระกับความเข้มของสัญญาณแสงซึ่งไม่เพียงเหนี่ยวนำให้เกิดการเลื่อนของเฟสภายในช่องสัญญาณเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดสัญญาณที่ความถี่ใหม่ เช่น $2\omega_i - \omega_j$ และ $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ เมื่อ $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ แทนความถี่เชิงมุมของช่องสัญญาณที่ i, j, k ตามลำดับ โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Four-Wave Mixing (FWM) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Four-Wave Mixing กับ SPM และ CPM สำหรับระบบที่มีอัตราบิตสูงๆ จะพบว่าผลกระทบจาก Four-Wave Mixing จะเป็นอิสระกับอัตราเร็วของบิต แต่จะมีผลอย่างมากกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณและดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสง การลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะยิ่งเพิ่มผลกระทบของ Four-Wave Mixing และทำให้ดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงต้องมีค่าลดลง ดังนั้นผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับอัตราเร็วของบิตในระบบเมื่อช่องสัญญาณมีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากัน

เมื่อกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง เพื่อส่งในระยะทางที่ไกลๆ และระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีช่วงแคบๆ เพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณ ในกรณีเช่นนี้คุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณขึ้นได้ ซึ่งผลกระทบที่มีอิทธิพลมากที่สุดก็คือผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ซึ่งเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชันของแสงที่มีการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าในตัวกลาง ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า E ที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสง และสำหรับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกาเป็นตัวกลาง ความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับต่ำสุดที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อระบบคือผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3

การโพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณ 3 สัญญาณที่ความถี่เชิงมุม $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ เกิดการเหนี่ยวนำกันให้เกิดสัญญาณที่ความถี่ใหม่ $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ โดยสัญญาณที่ความถี่นี้อาจจะไปซ้อนทับกับความถี่ของช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่งผลที่ตามมาคือเกิดการเสื่อมลงของสัญญาณ ในระบบสื่อสารสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณที่มีช่องสัญญาณจำนวน W ช่องสัญญาณ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนเทอมเท่ากับ $W(W-1)^2$ เมื่อช่องสัญญาณที่ i, j, k จะเปลี่ยนแปลงจาก 1 ถึง W ตัวอย่างเช่นในระบบที่มี 3 ช่องสัญญาณจะมีสัญญาณใหม่เกิดขึ้นจำนวน 12 ความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดขึ้นของ Four-Wave Mixing ที่มีสาเหตุมาจากการเหนี่ยวนำของ 3 ช่องสัญญาณ ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากันที่ความถี่เชิงมุม $\omega_1, \omega_2, \omega_3$

เพื่อความเข้าใจผลกระทบของ FWM มากขึ้นให้พิจารณาสัญญาณของระบบ DWDM ซึ่งเป็นผลรวมของระนาบคลื่นแสงจำนวน n คลื่นแสง โดยสนามไฟฟ้าของสัญญาณนี้หาได้จาก [1]

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (2.20)$$

จากรูปแบบของการโพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น [Nonlinear Polarization: $P_{NL}(r, t)$] คือ

$$P_{NL}(r, t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3(r, t) \quad (2.21)$$

สามารถเขียน $P_{NL}(r, t)$ ในเทอมของ FWM ได้เป็น [1]

$$\begin{aligned} P_{NL}(r, t) &= \varepsilon_0 \chi^{(3)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) E_j \cos(\omega_j t - \beta_j z) E_k \cos(\omega_k t - \beta_k z) \\ &= \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \left(E_i^2 + 2 \sum_{j \neq i} E_i E_j \right) E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \end{aligned} \quad (2.22a)$$

$$+ \frac{\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n E_i^3 \cos(3\omega_i t - 3\beta_i z) \quad (2.22b)$$

$$+ \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{i \neq j} E_i^2 E_j \cos((2\omega_i - \omega_j)t - (2\beta_i - \beta_j)z) \quad (2.22c)$$

$$+ \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{i \neq j} E_i^2 E_j \cos((2\omega_i + \omega_j)t - (2\beta_i + \beta_j)z) \quad (2.22d)$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{6\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \sum_{k>j} E_i E_j E_k \\ &\quad (\cos((\omega_i + \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j + \beta_k)z) \end{aligned} \quad (2.22e)$$

$$+ \cos((\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z) \quad (2.22f)$$

$$+ \cos((\omega_i - \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j + \beta_k)z) \quad (2.22g)$$

$$+ \cos((\omega_i - \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j - \beta_k)z) \quad (2.22h)$$

ดังนั้นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะกำเนิดคลื่นใหม่ขึ้นมาที่ความถี่ $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Four-Wave Mixing สาเหตุของปรากฏการณ์นี้คือมีคลื่น 3 คลื่นที่ความถี่ $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ เกิดการรวมกันและกำเนิดคลื่นที่ 4 ขึ้นมาที่ความถี่ $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$

สมการที่ 2.22a แทนผลกระทบของ SPM และ CPM ซึ่งอธิบายแล้วในหัวข้อที่ 2.4 และ 2.5 สมการที่ 2.22b, 2.22d และ 2.22e สามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากเป็นความไม่ตรงกันของเฟส ซึ่งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถประมาณเงื่อนไขที่ทำให้เกิดความไม่ตรงกันของเฟสสำหรับเทอมเหล่านี้ได้ ซึ่งทั้งหมดจะอยู่ในรูป $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ เมื่อ $i, j \neq k$ ตัวอย่างเช่นถ้าความยาวคลื่นในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันหรือมีระยะห่างใกล้เคียงกับจุดที่คัส

เพอร์ซันเป็นศูนย์แล้ว β มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ของช่วงความถี่นี้ และสถานะของความไม่ตรงกันของเฟสใกล้เคียงกับค่านี้ ตามที่กล่าวมานี้กำลังของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ความถี่นี้สามารถทำให้เกิดผลกระทบที่สูงได้

แนวทางที่จะแสดงเทอมของ Four-Wave Mixing ในรูปของ $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ เมื่อ $i, j \neq k$ เมื่อกำหนดให้ $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$ จะได้อंकประกอบที่แสดงสถานะความเสื่อม (degeneracy factor : d_{ijk}) คือ

$$d_{ijk} = 3 \text{ เมื่อ } i = j$$

$$d_{ijk} = 6 \text{ เมื่อ } i \neq j$$

แล้วโพลาไรเซชันที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่ ω_{ijk} สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{ijk}(z, t) = \frac{\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} d_{ijk} E_i E_j E_k \cos((\omega_i + \omega_j - \omega_k) \cdot t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k) \cdot z) \quad (2.23)$$

เมื่อกำหนดให้สัญญาณแสงแพร่กระจายคลื่นบนระนาบพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง (A_{eff}) (ดูรูปที่ 2.5) จากสมการที่ 2.23 จะสามารถหาลำดับของสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นที่ความถี่ ω_{ijk} บนเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาว L ได้ดังนี้

$$P_{ijk} = \left(\frac{\omega_{ijk} \cdot d_{ijk} \cdot \chi^{(3)}}{8 \cdot A_{eff} \cdot n_{eff} \cdot c} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k L^2 \quad (2.24)$$

เมื่อ P_i, P_j, P_k เป็นกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความถี่ $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาดัชนีการหักเหจากโหมดทั่วไปคือ (n_{eff}) ในเทอมของดัชนีการหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (\bar{n}) ซึ่งหาค่าของ (\bar{n}) ได้จาก

$$\bar{n} = \frac{3}{8n_{eff}} \chi^{(3)} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.24 สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น [1]

$$P_{ijk} = \left(\frac{\omega_{ijk} \cdot \bar{n} \cdot d_{ijk}}{3c \cdot A_{eff}} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k L^2 \quad (2.26)$$

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข กำหนดให้สัญญาณแสงแต่ละสัญญาณที่ความถี่ $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ มีกำลังของสัญญาณ 1 mW และพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ $50 \mu\text{m}^2$ และกำหนดให้ $\omega_i \neq \omega_j$ จะได้ $d_{ijk} = 6$ โดยใช้ $\bar{n} = 3.0 \times 10^8 \mu\text{m}^2/\text{W}$ และใช้การแพร่กระจายในช่วงระยะทาง L เท่ากับ 20 กิโลเมตร สามารถคำนวณกำลังของสัญญาณ P_{ijk} ที่ความถี่ ω_{ijk} ที่เกิดจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing ได้เท่ากับ 9.5 μW ซึ่งต่ำกว่ากำลังของสัญญาณ 1 mW ประมาณ 20 dB ในระบบ DWDM ถ้าช่องสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ ω_{ijk} นั้นตรงกับช่องสัญญาณใช้งานอื่นๆ จะทำให้ช่องสัญญาณนั้นมีกำลังของสัญญาณเสื่อมลง ในทางปฏิบัติสัญญาณที่เกิดขึ้นจาก Four-Wave Mixing จะมีกำลังของสัญญาณต่ำซึ่งเกิดจากความไม่ตรงกันของเฟสส่วนการลดทอนของสัญญาณเกิดจากการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง

ในระบบสื่อสารที่ใช้งานจริงจะต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการสูญเสียในระบบส่งสัญญาณและคิสมอร์ชันด้วย จากสมการ (2.26) จะแทนค่า L ด้วยค่า Fiber Effective Length ของเส้นใยแก้วนำแสง (L_{eff}) ซึ่งจะได้ว่า [1]

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha l}}{\alpha} \quad (2.27)$$

เมื่อ l แทนระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง

ส่วนค่าประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก Four-Wave Mixing (FWM Efficiency) กำหนดด้วยพารามิเตอร์ (η_{ijk}) หาได้จาก [5]

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \cdot \sin^2(\Delta\beta \cdot L/2)}{[1 - e^{-\alpha L}]^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{\sin(N_A \Delta\beta \cdot L/2)}{\sin(\Delta\beta \cdot L/2)} \right\}^2 \quad (2.28)$$

เมื่อ N_A แทนจำนวนของช่วงในการขยายสัญญาณ (Number of Amplifier Span)

เมื่อพิจารณาระบบที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ ทำให้ระบบมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเพียงตัวเดียวที่ภาคส่ง (หรือ $N_s = 1$) จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก Four-Wave Mixing ได้คือ

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \cdot \sin^2(\Delta\beta \cdot L/2)}{[1 - e^{-\alpha L}]^2} \right\} \quad (2.29)$$

เมื่อ α แทนการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง
 $\Delta\beta$ แทนค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสง
 ซึ่งสามารถหาค่า $\Delta\beta$ ได้ดังนี้ [1], [3], [6]

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk}$$

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2 D}{c} \cdot (f_i - f_k) \cdot (f_j - f_k) \quad (2.30a)$$

$$\Delta\beta = \frac{\pi\lambda^4}{c^2} \frac{dD}{d\lambda} \{ (f_i - f_o) + (f_j - f_o) \} \cdot (f_i - f_k) (f_j - f_k) \quad (2.30b)$$

สมการที่ (2.30a) สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงแบบ non-zero dispersion shifted fiber

(2.30b) สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงแบบ standard dispersion shifted fiber

เมื่อ D แทนค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion)

λ แทนค่าความยาวคลื่นแสง

f_o แทนค่าความถี่อ้างอิงของแถบความยาวคลื่น

f_i, f_j, f_k แทนค่าความถี่ใดๆในระบบ

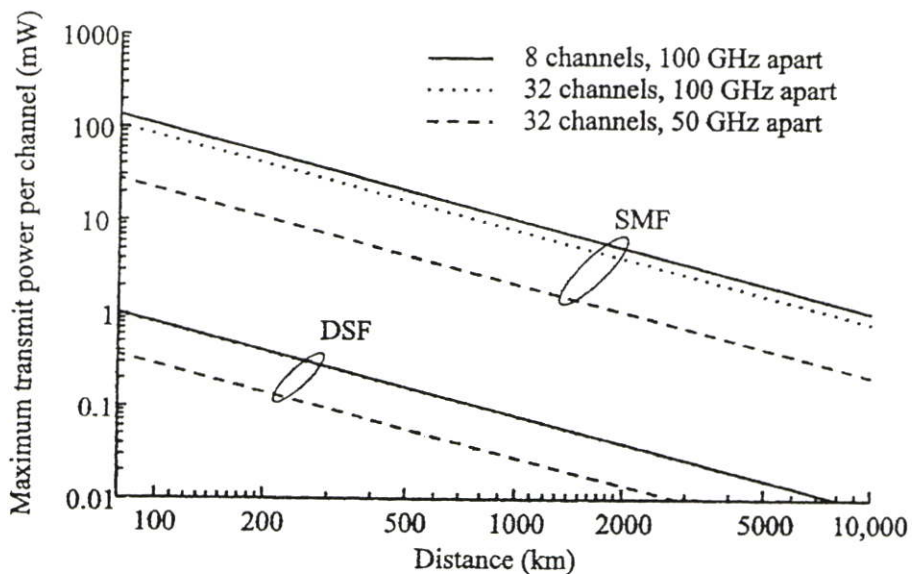
สำหรับระบบที่มีการพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากค่าการสูญเสียในระบบและดิสเพอร์ชันด้วยแล้ว สามารถเขียนสมการที่ (2.26) ใหม่ได้ดังนี้ [1]

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \cdot \left(\frac{\omega_{ijk} \cdot \bar{n} \cdot d_{ijk}}{3c \cdot A_{eff}} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k L_{eff}^2 \quad (2.31)$$

เมื่อกำหนดให้ช่องสัญญาณมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันและกำลังส่งของสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณมีค่าเท่ากัน โดยเมื่อกำหนดให้กำลังส่งของสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ P แล้วค่ากำลังของสัญญาณของ Four-Wave Mixing สูงสุดในแต่ละช่องสัญญาณจะมีค่า $< \varepsilon P$ เมื่อ ε สามารถคำนวณได้ประมาณ 0.034 สำหรับกำลังของสัญญาณ 1 dB ค่ากำลังของสัญญาณของ Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่ากำลังส่งของสัญญาณต่อช่องสัญญาณในฟังก์ชันของระยะทางระหว่างโนด ค่าที่ถูกระบุนี้แสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงสองชนิดคือ Standard Single-mode Fiber (SMF) และ Dispersion-Shifted Fiber (DSF) ในกรณีดังต่อไปนี้

- (1) ระบบ 8 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz
- (2) ระบบ 32 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz
- (3) ระบบ 32 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF ใช้ค่าพารามิเตอร์ของดิสเพอร์ชันคือ $D = 17$ ps/km-nm และสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF ใช้ค่าพารามิเตอร์ของดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์วางอยู่ตรงกึ่งกลางแถบความยาวคลื่นของช่องสัญญาณ ส่วนค่า Slope of dispersion curve ($dD/d\lambda$) เท่ากับ 0.055 ps/km-nm²



รูปที่ 2.10 ค่ากำลังของสัญญาณสูงสุดต่อช่องสัญญาณเมื่อได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing บนเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Standard Single Mode และ Dispersion Shifted Fiber โดยมีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร

จากรูปที่ 2.10 ลำดับแรกจะสังเกตเห็นว่าจุดที่แย่งที่สุดในกรณีของ Dispersion Shifted Fiber จะแย่งกว่าในกรณีของ Standard Single Mode Fiber เนื่องจากประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing ในกรณีของ Dispersion Shifted Fiber จะสูงกว่าเนื่องจากการเหนี่ยวนำของจุดที่มีค่าคิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ ลำดับที่สองกำลังของสัญญาณจะแย่งลงเมื่อเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณ สามารถเห็นได้จากการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีช่องสัญญาณ 8 ช่องสัญญาณและ 32 ช่องสัญญาณ แต่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เท่ากัน ที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะว่าช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนเทอมของ Four-Wave Mixing มากขึ้นด้วย แต่ในกรณีของ Dispersion Shifted Fiber การลดลงนี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยแม้ว่าจะมีเทอมของ Four-Wave Mixing จำนวนมากเช่นกรณีของระบบที่มีช่องสัญญาณ 32 ช่องสัญญาณก็จะให้ผลเหมือนกับในกรณีของระบบที่มีช่องสัญญาณ 8 ช่องสัญญาณ ส่วนบริเวณจุดที่มีค่าคิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ในระบบที่มีช่องสัญญาณ 8 ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณทั้งหมดจะเหนี่ยวนำให้เกิดกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่จุดนี้ ซึ่งกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณอื่นจะมีค่าน้อยกว่าเพราะว่ามีค่าคิสเพอร์ชันสูงกว่าที่ความยาวคลื่นนี้ สุดท้ายกำลังของสัญญาณที่ภาครับจะลดลงถ้าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณลดลง สามารถเห็นได้จากรูปที่ 2.10 เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีช่องสัญญาณ 32 ช่องสัญญาณทั้งสองระบบ(ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz และ 50 GHz) การลดลงของกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดจากประสิทธิภาพการรวมกันของ Four-Wave Mixing ที่เพิ่มขึ้นจากการลดลงของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ทำให้ความแตกต่างของค่าคงที่ในการแพร่กระจาย $\Delta\beta$ ลดลง (สำหรับ SMF ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก Four-Wave Mixing ของทั้งสองระบบคือระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz และ 50 GHz จะน้อยมาก โดยประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก Four-Wave Mixing ของระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz จะสูงกว่าระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz เล็กน้อย)

Four-Wave Mixing เป็นปัญหาที่รุนแรงในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้ Dispersion Shifted Fiber (DSF) แต่ไม่ใช่ปัญหาหลักในระบบที่ใช้ Standard Single Mode Fiber และเพื่อให้ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีสมรรถนะเพิ่มขึ้นจึงมีการพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Fiber (NZ-DSF) การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ลงสามารถทำได้ดังนี้

(1) จัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณให้ไม่เท่ากัน ตำแหน่งของช่องสัญญาณสามารถเลือกด้วยความเหมาะสมให้แต่ละเทอมของ Four-Wave Mixing ไม่เกิดการซ้อนทับกันกับช่องสัญญาณของข่าวสารข้อมูลภายใต้แบนด์วิธของภาครับ ซึ่งอาจจะเป็นไปได้สำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวนน้อย แต่ก็ต้องการการคำนวณที่มีความรอบคอบเพื่อให้ได้ตำแหน่งของช่องสัญญาณที่ถูกต้องแม่นยำ

(2) เพิ่มระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ เป็นการเพิ่ม Group Velocity Mismatch ระหว่างช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิดอุปสรรคในการในการเพิ่มแบนด์วิดท์โดยรวมของระบบและต้องการอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่จะทำให้เกิดการเท่าเทียมกันของสัญญาณแต่ละช่องบนแบนด์วิดท์ที่มีความกว้างมากและเพิ่มผลกระทบที่เกิดจาก SRS

(3) เลือกใช้ความยาวคลื่นในช่วงสูงๆมากกว่า 1560 nm โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF แนวคิดนี้เกิดขึ้นหลังจากมีความคงที่ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF เนื่องจากมีค่าของ dispersion ที่เหมาะสมเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นนี้ ทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ลดลง แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงเกิดปัญหาเนื่องจากความบกพร่องของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงคุณภาพดีที่จะนำมาใช้งานในช่วงความยาวคลื่นนี้ เนื่องจากอัตราขยายของ EDFA ในปัจจุบันนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นมากกว่า 1560 nm การวิจัยยังอยู่ภายใต้แนวทางที่จะทำให้อัตราขยายของแบนด์วิดท์ของ EDFA ขยายกว้างออกนั่นคือทำให้ความยาวของระยะทางระหว่างอุปกรณ์ของระบบสื่อสารสัญญาณเพิ่มขึ้นในช่วงที่ต้องการนี้

(4) ลดผลกระทบอื่นๆที่จะทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง เช่นลดกำลังส่งสัญญาณของเครื่องส่งและระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง เพื่อให้ผลกระทบของ four-wave mixing ลดลง

(5) ถ้าความยาวคลื่นสามารถ คีมัลติเพล็กซ์ และ มัลติเพล็กซ์ ที่จุดกึ่งกลางของเส้นทางของระบบสื่อสารสัญญาณได้ เราสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการหน่วงเวลาที่แตกต่างกันของแต่ละความยาวคลื่น การสุ่มเลือกนี้ทำให้ความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างความยาวคลื่นแตกต่างกัน ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing ที่เหนี่ยวนำก่อนและหลังจุดนี้เป็นผลร่วมของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มเข้าไปในเฟสแทน ผลที่ตามมาคือทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ลดลง

บทที่ 3

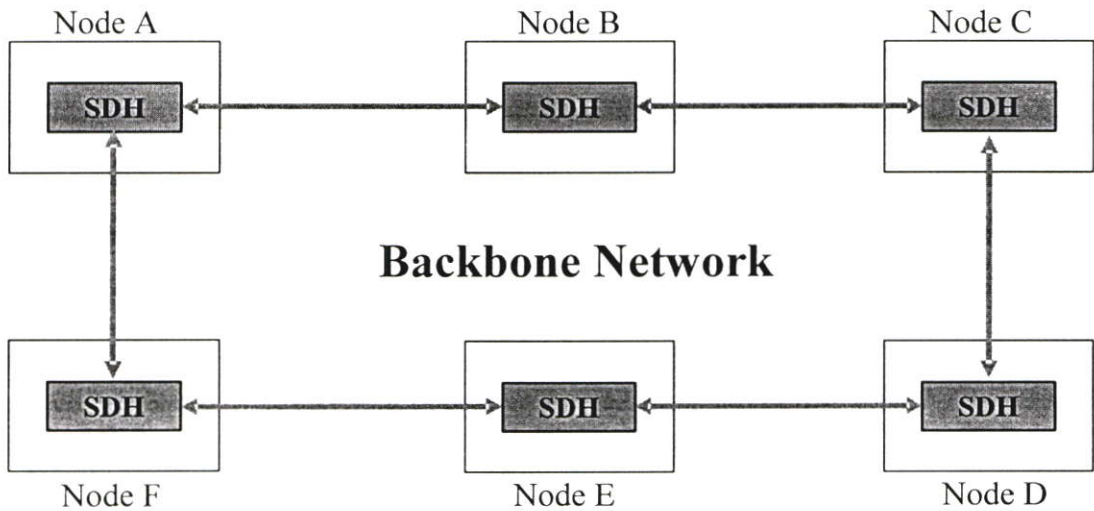
ผลกระทบของ FOUR-WAVE MIXING

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

3.1 ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

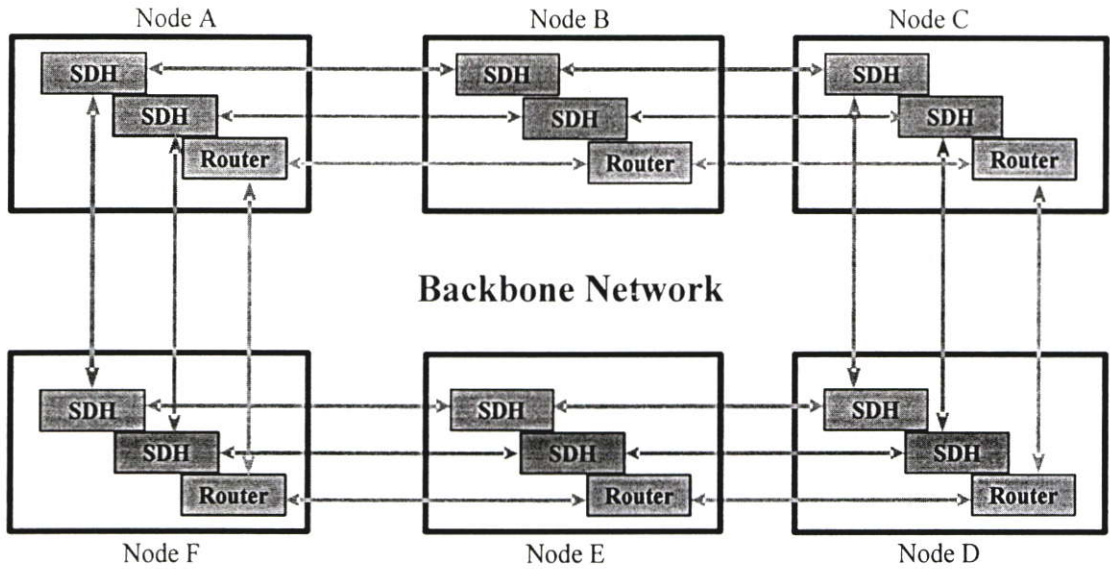
3.1.1 กล่าวนำ

เมื่อพิจารณาระบบสื่อสารสัญญาณแบบเดิมที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่อยู่ต่างสถานที่กันเข้าเป็นเครือข่ายเดียวกัน จะพบว่ามีความเหมาะสมกับเครือข่ายที่มีความจุของข้อมูลจำนวนหนึ่งเท่านั้นเช่น 2.5 Gb/s (STM-16) หรือ 10 Gb/s (STM-64)



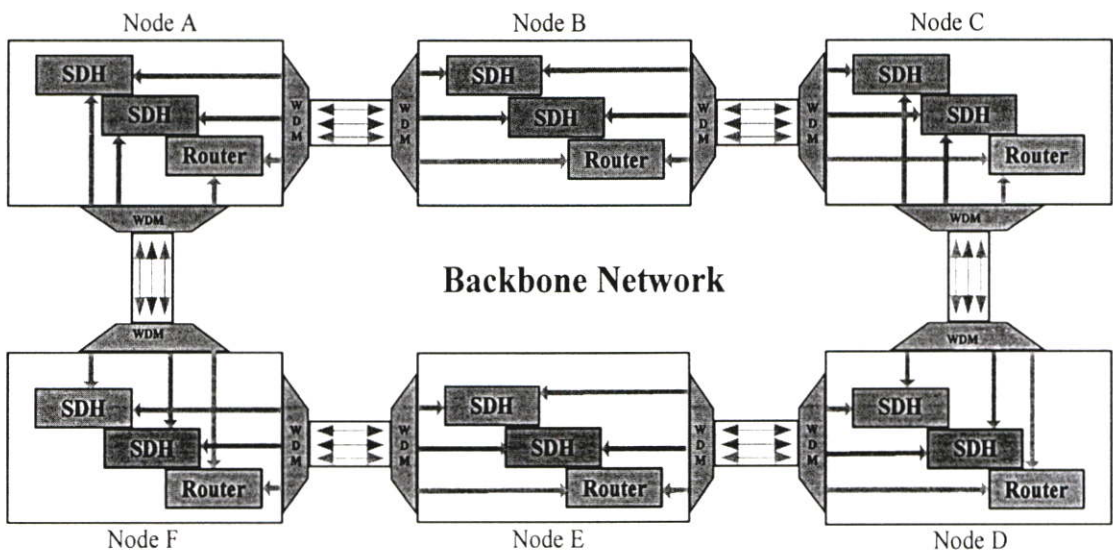
รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

แต่เมื่อเครือข่ายมีความต้องการความจุของข้อมูลในเครือข่ายเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ในเครือข่ายก็ไม่สามารถรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นได้เกินความสามารถที่อุปกรณ์จะทำได้ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แบบเดิมเพิ่มอีกหนึ่งชุด ทำให้ต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มอีกหนึ่งชุดเช่นกัน และนอกจากนั้นหากเครือข่ายเมื่ออุปกรณ์ต่างชนิดกันเช่นอุปกรณ์สื่อสารสัญญาณแบบ SDH และ Router แต่ติดตั้งในสถานที่เดียวกัน ก็ต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มอีกเช่นกัน ดังนั้นเมื่อเครือข่ายมีความจุของข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก็ทำให้ความต้องการเส้นใยแก้วนำแสงมีมากตามไปด้วย จนถึงจุดที่เกิดความขาดแคลนเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง
 เมื่อมีจำนวนของอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น

เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงมีช่วงของแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้กว้างมากทำให้เกิดแนวความคิดที่จะส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นไปพร้อมกันบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันโดยไม่ให้มีการรบกวนกัน ซึ่งเรียกระบบแบบนี้ว่า WDM (Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งสามารถช่วยให้เส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นสามารถส่งสัญญาณได้มากกว่า 1 ช่องสัญญาณ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากเส้นใยแก้วนำแสงเดิมได้มากขึ้น



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายด้วยระบบสื่อสารแบบ WDM

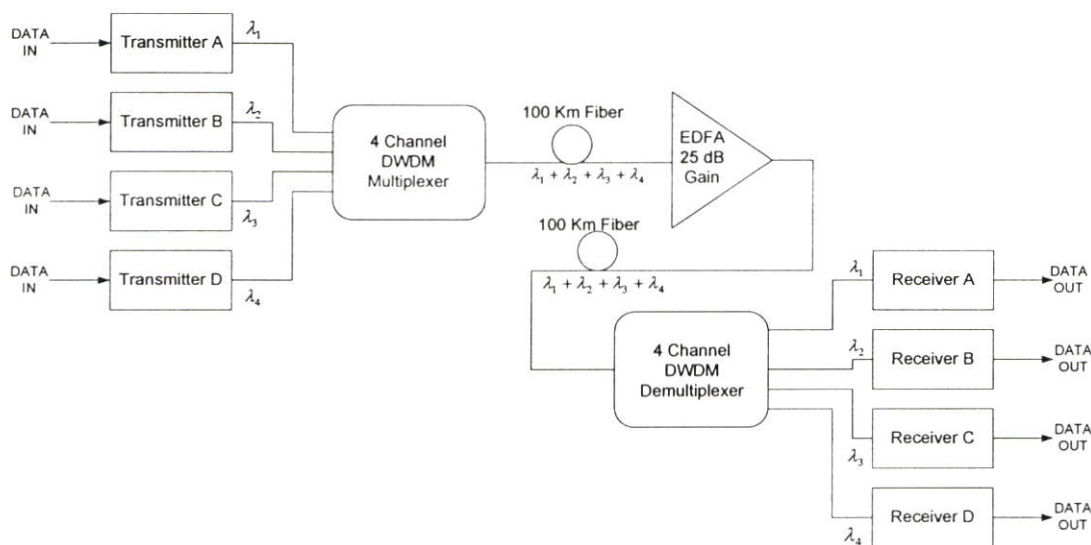
เทคโนโลยี WDM ในช่วงแรกเรียกว่า “Wideband WDM” เนื่องจากสัญญาณแสงมีความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ห่างๆกัน จากนั้นก็มีการพัฒนาเทคโนโลยี WDM ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่แคบลงเรียกว่า “Narrowband WDM” และหลังจากนั้นเมื่อเทคโนโลยีของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) มีการพัฒนาจนมีอัตราการขยายสัญญาณแสงได้สูงขึ้น ประกอบกับการพัฒนาของอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter) ทำให้สามารถลดระยะห่างของช่องสัญญาณให้แคบลงมากๆได้ เทคโนโลยีในลำดับต่อมาจึงถูกเรียกว่าเทคโนโลยี DWDM โดยสามารถส่งสัญญาณออกไปได้พร้อมกัน 16 – 40 ช่องสัญญาณมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 100 – 200 GHz ซึ่งเทคโนโลยี DWDM ก็ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถส่งสัญญาณออกไปได้พร้อมกันประมาณ 64 – 160 ช่องสัญญาณ ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระดับ Gb/s โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณก็แคบลงจนอยู่ที่ประมาณ 25 – 50 GHz แต่ช่องสัญญาณก็จะได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณเมื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น

3.1.2 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น (DWDM) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเกี่ยวกับเทคโนโลยีของการสื่อสารข้อมูล ด้วยการเพิ่มจำนวนของสัญญาณแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีการกำหนดความยาวคลื่นแสงเฉพาะของแต่ละช่องสัญญาณในช่วงความถี่ของเครือข่ายที่ออกแบบไว้ แล้วมัลติเพล็กซ์รวมกันเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน กระบวนการนี้สามารถรวมช่องสัญญาณที่เป็น ภาพ เสียง หรือข้อมูล แล้วส่งรวมกันไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันได้ โดยยังคงรักษาคุณภาพของแต่ละช่องสัญญาณไว้ได้ ทำให้สามารถส่งสัญญาณในเครือข่ายได้เพิ่มมากขึ้น โดยไม่ต้องลงทุนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่ม เทคโนโลยีนี้ตอบสนองกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นด้านประสิทธิภาพและความสามารถของระบบสื่อสารสัญญาณแบบเดิม เช่น SONET/SDH เนื่องจากความต้องการแบนด์วิดท์ที่เพิ่มสูงขึ้น

อุปกรณ์ในระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงขึ้นและทำให้ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายคืออุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นสามารถขยายสัญญาณแสงในช่วงกว้างที่ความยาวคลื่นย่าน 1550 นาโนเมตร โดยไม่มีการเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน สำหรับเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างโหนดไกลๆและต้องมีสถานีทวนสัญญาณระหว่างเส้นทาง ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นสามารถช่วยประหยัดจำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงได้ ตัวอย่างเช่นระบบที่มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงจำนวน 16 ความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งสัญญาณรูป

แบบเดิมสามารถลดจำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงได้จำนวน 16 ชุด ที่สถานีทวนสัญญาณแต่ละสถานี โดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเพียง 1 ชุดต่อสถานี ทำให้สมรรถนะของเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น

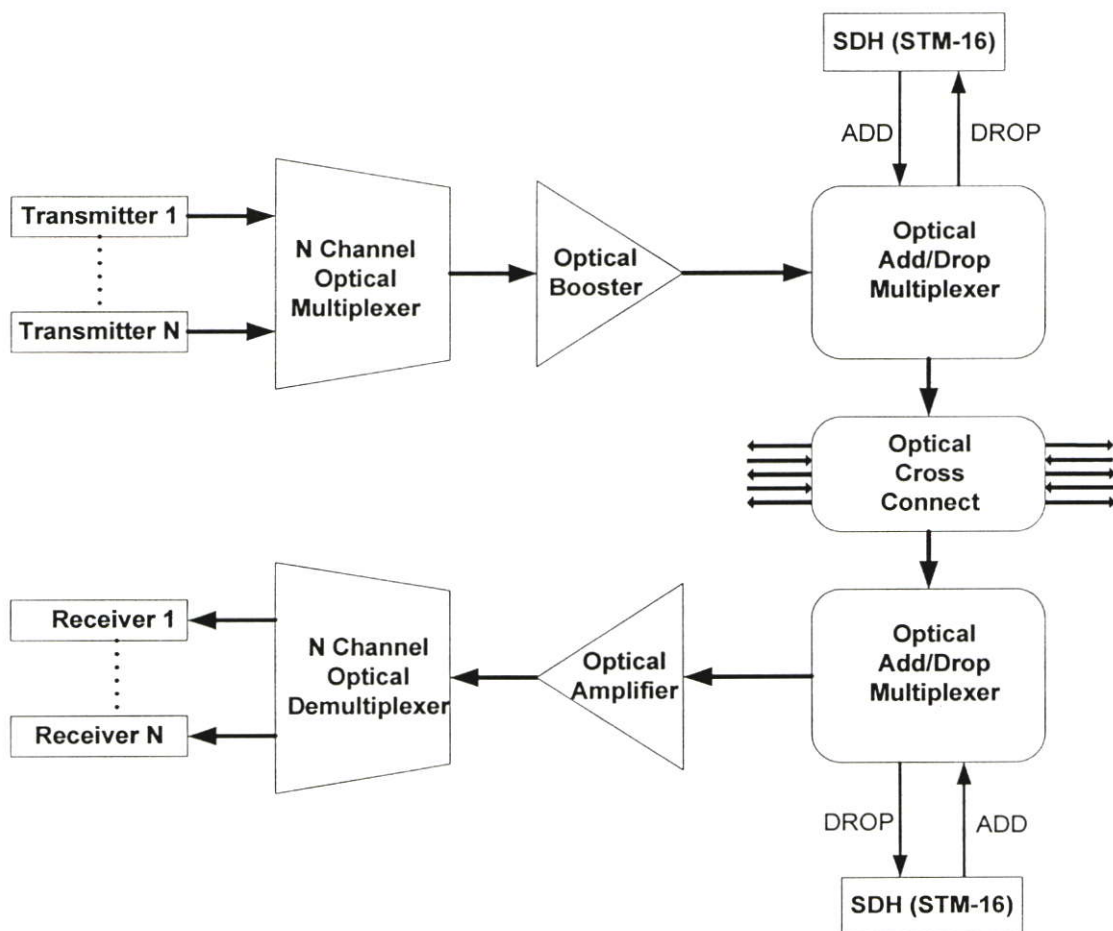


รูปที่ 3.4 ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น

หลักการทำงานของระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นเริ่มจากที่ภาคส่งจะนำช่องสัญญาณซึ่งอาจเป็นสัญญาณ ภาพ เสียง หรือข้อมูล จำนวนหลายๆช่องสัญญาณมัลติเพล็กซ์ตามความยาวคลื่นแสงเข้าด้วยกัน แต่เนื่องจากกำลังของสัญญาณที่ผ่านออกมาจากอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ทางแสงยังต่ำจึงไม่สามารถส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปยังปลายทางที่ต้องการได้ จึงนำสัญญาณที่ผ่านออกมาจากอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ทางแสงไปทำการขยายกำลังของสัญญาณแสงให้สูงขึ้นด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) จากนั้นนำสัญญาณที่ได้รับการขยายสัญญาณแล้วส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปยังปลายทาง ซึ่งถ้าเครือข่ายมีระยะทางไกลมากระหว่างเส้นทางจะต้องติดตั้งสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) เพิ่ม เพื่อให้สัญญาณมีกำลังอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ เมื่อสัญญาณไปถึงปลายทางอุปกรณ์ที่ภาครับจะได้ตรวจจับสัญญาณที่ส่งมาได้ โดยเมื่ออุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ได้รับสัญญาณมาแล้วจะทำการถอดช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณออกตามความยาวคลื่นแสงและส่งต่อไปยังอุปกรณ์ของภาครับแต่ละประเภทเพื่อนำสัญญาณภาพ เสียง หรือข้อมูลที่ส่งมาไปประมวลผลต่อไป

3.2 ส่วนประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (Transmitters), อุปกรณ์รับสัญญาณแสง (Receivers), อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Booster and Optical Amplifiers), อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง (DWDM Multiplexers), อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง (DWDM Demultiplexers), Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) และ Optical Cross Connect (OXC) โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานสอดคล้องกับช่องสัญญาณมาตรฐานของ ITU ทำให้ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM สามารถที่จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ของระบบอื่นๆ ได้เป็นอย่างดีเช่นระบบ SDH/SONET หรือ IP Traffic จาก Router ทั้งนี้ยังจัดเตรียมช่องทางและวิธีการเชื่อมต่อไว้สำหรับการเชื่อมต่อทางแสงไว้ตลอดทั้งเครือข่ายด้วย เพื่อให้สัญญาณแสงจากระบบต่างๆ สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายได้อย่างสะดวก ตามความยาวคลื่นที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

3.2.1 อุปกรณ์รับ/ส่งสัญญาณแสง (Transmitters and Receivers)

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงทำหน้าที่ในการนำสัญญาณภาพ เสียง หรือข้อมูล ที่อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล โดยแต่ละช่องสัญญาณอาจมีอัตราเร็วของบิตที่แตกต่างกัน หรือมีรูปแบบการเข้ารหัสของเฟรมที่แตกต่างกันเช่น เฟรมของ SDH/SONET หรือเฟรมของ Internet Protocol เปลี่ยนเป็นรูปแบบของสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณแตกต่างกันตามที่ออกแบบไว้ในช่วงของแถบความยาวคลื่นที่เครือข่ายต้องการ ซึ่งแถบความยาวคลื่นส่วนใหญ่จะถูกกำหนดตามแถบความยาวคลื่นของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดจำนวนของช่องสัญญาณในเครือข่ายคือเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่ามาก จำนวนของช่องสัญญาณในเครือข่ายก็จะมีจำนวนน้อย แต่เมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณมีค่าน้อย จำนวนของช่องสัญญาณในเครือข่ายก็จะมีจำนวนมาก โดยข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่งของอุปกรณ์รับ/ส่งสัญญาณแสงคือ โลว์นวิดท์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงต้องไม่มากกว่าระยะห่างของช่องสัญญาณ เพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดของช่องสัญญาณที่อยู่ข้างเคียงกัน อุปกรณ์รับ/ส่งสัญญาณแสงส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีของอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter)

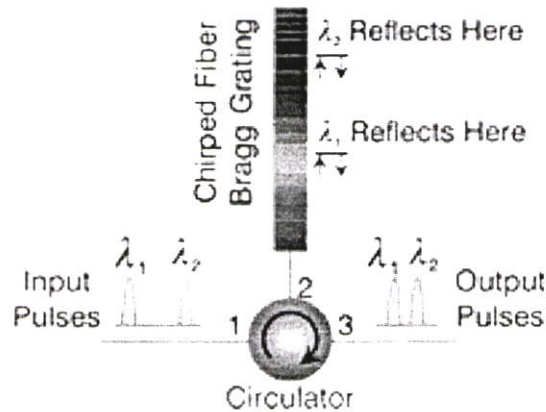
3.2.2 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง

(Optical Multiplexers and Optical Demultiplexers)

สมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ส่วนหนึ่งเกิดจากการพัฒนาอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง (Optical Multiplexers) และอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง (Optical Demultiplexers) ที่สามารถครอบคลุมช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันได้ทั้งหมด ซึ่งต้องการความยาวคลื่นแสงที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณที่แคบเช่นมีความกว้างประมาณ 0.4 nm ทำให้สัญญาณต้องมีความชันมากเพื่อป้องกันการรบกวนจากช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน โดยอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงต้องสามารถทำงานได้อย่างเสถียรเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เทคโนโลยีของ DWDM ที่ผ่านมามีอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงจากที่มีความยาวคลื่นแถบกว้างก็กลายเป็นการใส่ความยาวคลื่นแบบหนาแน่นซึ่งสามารถมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงจำนวนมากในช่องของแถบความยาวคลื่น 192 - 200 THz เข้าด้วยกัน จากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ DWDM นี้สามารถส่งช่องสัญญาณพร้อมกันได้ 64 - 160 ช่องสัญญาณ ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระดับ Gb/s โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณก็แคบลงจนอยู่ที่ประมาณ 25 - 50 GHz

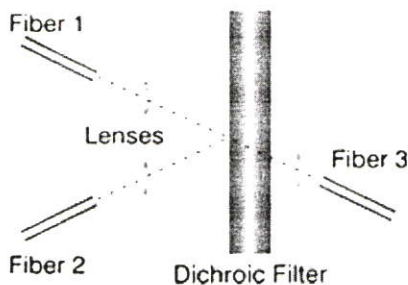
อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงทำหน้าที่ในการรวมช่องสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเข้าด้วยกันและส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันยังปลายทางที่ต้องการ ที่ปลายทางจะมีอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงทำหน้าที่ในการถอดช่องสัญญาณแสงที่รวมกันมาตามความยาว

คลื่นที่ออกแบบไว้ออกจากกันและส่งต่อไปยังเครื่องรับต่อไป อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงและดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงต้องสามารถจัดสัญญาณรบกวนและการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ข้างเคียงได้ ซึ่งคัปเปอร์ (Couplers) และเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่น (diachronic fiber) เป็นอุปกรณ์พาสซีฟที่นิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงและดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง การออกแบบคัปเปอร์ของระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นในช่วงแรกจะอยู่บนพื้นฐานของตัวกรองสัญญาณชนิด Fiber Bragg Grating (FBG) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (www.fiber-optics.info/articles/dwdm.htm) แบริกเกรตติง (Bragg gratings) มีหลักการคือดัชนีหักเหของแสงของคอร์ (Core) จะถูกทำให้ค่าดัชนีหักเหของคอร์ตามความยาวของเส้นใยแก้วมีค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงมากบ้างน้อยบ้างตามระยะทางซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตามคาบเวลา ผลที่ได้คือ Fiber grating จะมีการวางตัวของความยาวคลื่นที่ขึ้นอยู่กับการสะท้อนกลับของดัชนีการหักเหแสงเพื่อการแบ่งแยกความยาวคลื่นอย่างแม่นยำ



รูปที่ 3.6 Bragg Grating

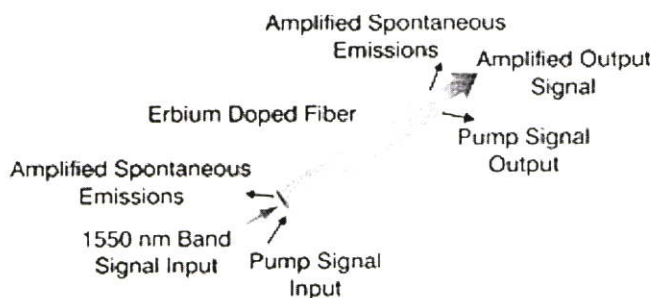
การออกแบบในรูปแบบที่สองจะขึ้นอยู่กับการต่อเรียงเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.7 (www.fiber-optics.info/articles/dwdm.htm) การกรองสัญญาณแสงด้วยเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นมีหลักการคือในตำแหน่งที่เส้นใยแก้วสองเส้นเชื่อมต่อกันจะเพิ่มเติมเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นลงไปประหว่างกลาง โดยจะวางเรียงต่อกันตามความยาวคลื่นจนกว่าความยาวคลื่นทั้งหมดถูกรวมเข้าด้วยกันหรือแยกออกจากกัน การใช้เส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นมีเสถียรภาพที่น่าเชื่อถือมากกว่าและสามารถแยกช่องสัญญาณได้ค่อนข้างดีกว่า



รูปที่ 3.7 เส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่น

3.2.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Booster and Optical Amplifier)

เนื่องจากระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM นำไปใช้งานกับเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างสถานีที่ไกลๆ จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจากดีสเพอร์ชันและการลดทอนสัญญาณได้ แต่จากการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) สามารถลดผลกระทบเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณได้ โดย EDFA ก็คือเส้นใยแก้วชนิดซิลิกาที่ถูกโด๊ปด้วยสาร Erbium (Er_{68}) ซึ่งเป็นธาตุที่มีระดับกำลังงานที่เหมาะสมในด้านโครงสร้างของอะตอมสำหรับการขยายสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1550 nm โดยใช้สัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 980 nm เป็นตัวกระตุ้นกำลังงานในการโด๊ปเส้นใยแก้ว เมื่อนำสัญญาณแสงที่มีกำลังต่ำๆ ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ถูกใส่เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง สัญญาณแสงนี้จะกระตุ้นอะตอมของธาตุ Erbium ให้ปล่อยกำลังงานที่สะสมไว้เพิ่มให้กับสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1550 nm กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสัญญาณสิ้นสุดที่อีกด้านของเส้นใยแก้ว ทำให้สัญญาณมีความเข้มเพิ่มขึ้น โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงมีการใช้งานในสองลักษณะคือ Optical Booster ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ด้านส่งให้สูงขึ้นก่อนส่งผ่านไปในเส้นใยแก้วนำแสง ส่วน Optical Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ภาครับเพื่อทำให้สัญญาณแสงที่ภาครับอยู่ในระดับที่อุปกรณ์ของภาครับสามารถประมวลผลสัญญาณที่รับมาได้ รูปที่ 3.8 แสดงเส้นใยแก้วชนิด Erbium-doped fiber amplifiers (www.fiber-optics.info/articles/dwdm.htm)



รูปที่ 3.8 เส้นใยแก้วชนิด Erbium-Doped Fiber Amplifiers

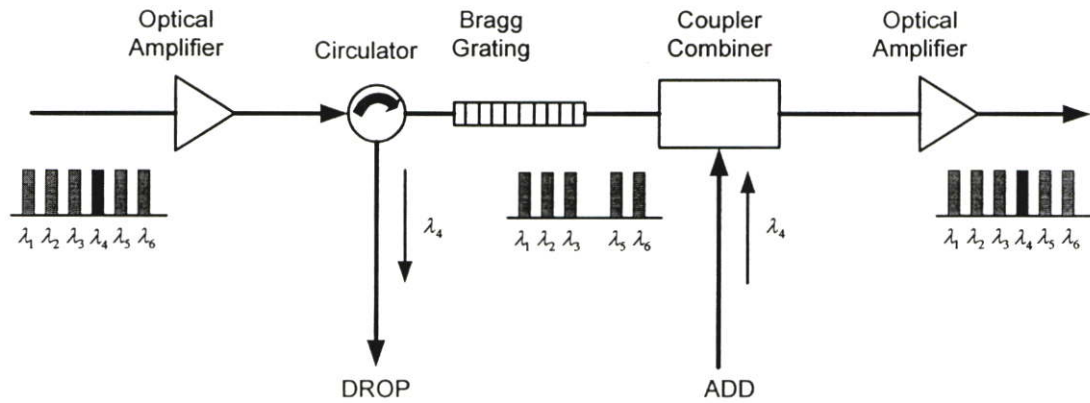
เนื่องจากกำลังของสัญญาณด้านเอาต์พุตของ EDFA มีค่าสูงมาก ด้วยเหตุนี้การนำอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด EDFA ไปใช้งานต้องกำหนดในขั้นตอนการออกแบบระบบที่ดี ในปัจจุบันนี้ อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงสามารถทำงานได้โดยมีสัญญาณรบกวนจาก ASE (Amplified Spontaneous Emission) ที่ต่ำมากและมีอัตราการขยายสัญญาณที่สม่ำเสมอซึ่งเป็นข้อดีและมีความเหมาะสมอย่างมากกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงจะเพิ่มขึ้นถึงสภาวะคงที่ที่ค่าประมาณ +20 dB โดยการขยายสัญญาณแสงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเป็นอิสระกับอัตราเร็วของบิตและโครงสร้างของเฟรม จึงมีความยืดหยุ่นมากในการปรับปรุงสมรรถนะของเครือข่ายเพราะเพียงเปลี่ยนอุปกรณ์ด้านส่งสัญญาณและด้านรับสัญญาณเท่านั้น

เนื่องจากความต้องการแบนด์วิดท์ช่วงที่กว้างขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดความต้องการอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นคือมีแถบความยาวคลื่นในการขยายสัญญาณที่กว้างและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่ช่วงแถบความยาวคลื่นที่ใช้งานได้ของ EDFA มีเพียง 30 nm อยู่ในช่วง 1530 nm – 1560 nm ซึ่งการลดทอนของสัญญาณแสงต่ำสุดจะอยู่ในช่วง 1500 nm – 1600 nm อุปกรณ์ขยายสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงแบนด์คู่ (Dual-Band Fiber Amplifiers : DBFA) ช่วยแก้ปัญหาแถบของความยาวคลื่นใช้งานได้เนื่องจากมีช่วงของแถบความยาวคลื่นที่กว้างมากขึ้นเป็น 75 nm อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิดนี้จะแบ่งการขยายสัญญาณออกเป็นแบนด์ย่อยสองแบนด์ โดยหลักการทั่วไปของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ DBFA จะคล้ายกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA แต่มีช่วงของแถบความยาวคลื่นที่กว้างกว่าคืออยู่ในช่วง 1528 nm – 1610 nm โดยแถบความยาวคลื่นในช่วงแรกจะเหมือนกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ EDFA และแถบความยาวคลื่นช่วงที่สองจะเรียกว่า Extended Band Fiber Amplifier (EBFA) ข้อดีของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ EBFA คือมีอัตราขยายคงที่ถึงจุดอิ่มตัวช้า, สัญญาณรบกวนต่ำ อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ EBFA สามารถทำงานได้โดยมีอัตราขยายคงที่ในช่วงความยาวคลื่น 35 nm ซึ่งสามารถเทียบได้เท่ากับ EDFA มีอัตราขยายคงที่ในช่วงความยาวคลื่น 30 nm แต่เป็นคนละช่วงความยาวคลื่น โดย EDFA มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าคือถึงจุดอิ่มตัวช้ากว่า และรักษาค่าของสัญญาณด้านเอาต์พุตให้คงที่แม้สัญญาณด้านอินพุตเพิ่มขึ้น

3.2.4 Optical Add/Drop Multiplexer (OADM)

Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเสริมสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยทำให้เกิดความสะดวกมากขึ้นสำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบจุดต่อจุดที่ต้องการเชื่อมต่อทรานสพิกผ่านเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยให้ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ทำหน้าที่ในการจัดการเส้นทางผ่านทรัพยากรของเครือข่ายร่วมกัน โดย OADM ทำหน้าที่ในการนำสัญญาณจากจุดที่ต้องการจะเชื่อมต่อ ต่อเข้ากับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM และส่งผ่านสัญญาณนั้นไปยังปลายทางที่ต้องการ ซึ่งที่ด้านปลายทางก็จะมีอุปกรณ์ OADM อีกชุดทำหน้าที่ใน

การนำสัญญาณที่ส่งผ่านระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มา ออกจากระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM และนำสัญญาณนั้นส่งต่อไปยังเครือข่ายอื่นต่อไป โดยช่องสัญญาณที่นำมาใช้งานจะอยู่ภายในช่วงแถบความยาวคลื่นของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ซึ่งมีระยะห่างของช่องสัญญาณเป็นตัวกำหนดจำนวนช่องสัญญาณ โดยมีการกำหนดช่องสัญญาณที่จะใช้งานไว้แล้วในขั้นตอนของการออกแบบระบบ ดังนั้นสัญญาณที่จะนำเข้าและดึงออกที่จุดใดก็สามารถทำได้ตามช่องสัญญาณที่ออกแบบไว้ โดยไม่ต้องมีมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ทั้งหมดและมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณทั้งหมดที่รวมช่องสัญญาณที่ใส่เพิ่มแล้วกลับเข้าไปในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ตามเดิม การจัดการระบบการเชื่อมต่อของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM จะอยู่ในรูปของพอร์ตที่เป็นไปตามลำดับตามความยาวคลื่น ซึ่งถ้าช่องสัญญาณถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้วจะเรียกว่า Fixed OADM แต่ถ้าช่องสัญญาณถูกสร้างขึ้นโดยอัตโนมัติตามชนิดของเครือข่ายเรียกว่า Reconfigure OADM เมื่ออุปกรณ์ OADM ส่วนมากจะใช้หลักการของ Fiber Bragg Gratings ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ OADM ที่ใช้หลักการของ Fiber Bragg Gratings ในการ Add/Drop ช่องสัญญาณ

3.2.5 Optical Cross Connect (OXC)

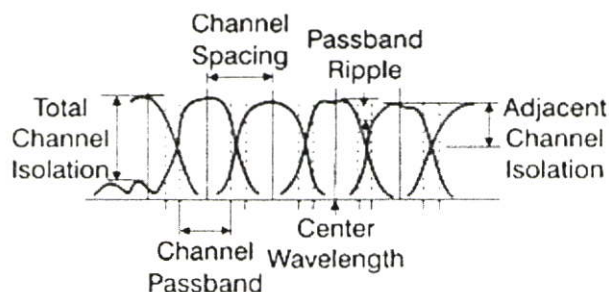
OXC เป็นอุปกรณ์ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ในการสลับเส้นทาง (Cross Connect) ระหว่างพอร์ตอินพุตจำนวน N พอร์ตกับพอร์ตเอาต์พุตจำนวน N พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตรวมกันอยู่ในสัญญาณซึ่งถูกมัลติเพล็กซ์รวมกันมาในแถบความยาวคลื่นเดียวกัน ซึ่งการจัดการแบนด์วิดท์ที่มีความยืดหยุ่นนั้นสามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์สลับเส้นทางด้วยแสง (Optical Cross Connect: OXC) โดย OXC จะช่วยในการจัดการเครือข่ายให้สามารถรับ/ส่งและจัดการความยาวคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์ OXC จะมีอัตราเร็วของบิตเป็นอิสระกับรูปแบบของการสลับเส้นทาง โดยคุณสมบัติพิเศษนี้จะช่วยให้อุปกรณ์ OXC สามารถที่จะทำการสลับ

เส้นทางของสัญญาณที่มีอัตราเร็วของบิตที่มีความหลากหลายได้เช่น OC-3, OC-12, OC-48, OC-192 หรือสัญญาณรูปแบบอื่นๆ เช่น SONET, ATM ด้วยการจัดการเครือข่ายในชั้นการทำงานด้วยแสง ตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของ OXC เช่นท่อนำคลื่นแสงแบบระนาบ (optical planar waveguide) โดยอาศัยการคับปลิง (coupling) ระหว่างท่อนำคลื่นแสงหนึ่งไปสู่อีกท่อนำคลื่นแสงหนึ่งที่ต้องการ

3.3 การจัดการแถบความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management)

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของระบบ โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU ที่ 50 GHz และ 100 GHz ดังตารางที่ 3.1 ในปัจจุบันนี้ระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เป็นระยะห่างที่ผู้ให้บริการระบบสื่อสารโทรคมนาคมนำมาใช้งานกันทั่วไป เนื่องจากเป็นระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่มีพัฒนาจนได้รับความนิยมน่าเชื่อถือ ซึ่งระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในระบบนี้ทำให้สามารถใช้งานช่องสัญญาณได้ทุกช่องสัญญาณที่อยู่ภายในช่วงอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง แต่อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณก็ยังขึ้นกับส่วนประกอบอื่นๆของระบบด้วย

ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นแถบของความถี่ต่ำสุดที่สามารถแยกสองสัญญาณที่รวมกันมาออกจากกันได้ ซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกันกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน ดังนั้นส่วนประกอบที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะประกอบไปด้วย ความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณ แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและความสามารถของเครื่องรับที่จะระบุความแตกต่างระหว่างสองความยาวคลื่น รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างข้อจำกัดของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM (www.fiber-optics.info/articles/dwdm.htm)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

ตารางที่ 3.1 ระยะห่างระหว่างของช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU สำหรับระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz และ 100 GHz

L _α		L _β		C _α		C _β		S _α		S _β	
THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm
186.00	1611.79	186.05	1611.35	191.00	1569.59	191.05	1569.18	196.00	1529.55	196.05	1529.16
186.10	1610.92	186.15	1610.49	191.10	1568.77	191.15	1568.36	196.10	1528.77	196.15	1528.38
186.20	1610.06	186.25	1609.62	191.20	1567.95	191.25	1567.54	196.20	1527.99	196.25	1527.60
186.30	1609.19	186.35	1608.76	191.30	1567.13	191.35	1566.70	196.30	1527.22	196.35	1526.83
186.40	1608.33	186.45	1607.90	191.40	1566.31	191.45	1565.90	196.40	1526.44	196.45	1526.05
186.50	1607.47	186.55	1607.04	191.50	1565.50	191.55	1565.09	196.50	1525.66	196.55	1525.27
186.60	1606.60	186.65	1606.17	191.60	1564.68	191.65	1564.27	196.60	1524.89	196.65	1524.50
186.70	1605.74	186.75	1605.31	191.70	1563.86	191.75	1563.45	196.70	1524.11	196.75	1523.72
186.80	1604.88	186.85	1604.46	191.80	1563.05	191.85	1562.64	196.80	1523.34	196.85	1522.95
186.90	1604.03	186.95	1603.60	191.90	1562.23	191.95	1561.83	196.90	1522.56	196.95	1522.18
187.00	1603.17	187.05	1602.74	192.00	1561.42	192.05	1561.01	197.00	1521.79	197.05	1521.40
187.10	1602.31	187.15	1601.88	192.10	1560.61	192.15	1560.20	197.10	1521.02	197.15	1520.63
187.20	1601.46	187.25	1601.03	192.20	1559.79	192.25	1559.39	197.20	1520.25	197.25	1519.86
187.30	1600.60	187.35	1600.17	192.30	1558.98	192.35	1558.58	197.30	1519.48	197.35	1519.09
187.40	1599.75	187.45	1599.32	192.40	1558.17	192.45	1557.77	197.40	1518.71	197.45	1518.32
187.50	1598.89	187.55	1598.47	192.50	1557.36	192.55	1556.96	197.50	1517.94	197.55	1517.55
187.60	1598.04	187.65	1597.62	192.60	1556.55	192.65	1556.15	197.60	1517.17	197.65	1516.78
187.70	1597.19	187.75	1596.76	192.70	1555.75	192.75	1555.34	197.70	1516.40	197.75	1516.02
187.80	1596.34	187.85	1595.91	192.80	1554.94	192.85	1554.54	197.80	1515.63	197.85	1515.25
187.90	1595.49	187.95	1595.06	192.90	1554.13	192.95	1553.73	197.90	1514.87	197.95	1514.49
188.00	1594.64	188.05	1594.22	193.00	1553.33	193.05	1552.93	198.00	1514.10	198.05	1513.72
188.10	1593.79	188.15	1592.52	193.10	1552.52	193.15	1551.12	198.10	1513.34	198.15	1512.96
188.20	1592.95	188.25	1592.52	193.20	1551.72	193.25	1551.32	198.20	1512.58	198.25	1512.19
188.30	1592.10	188.35	1591.68	193.30	1550.92	193.35	1550.52	198.30	1511.81	198.35	1511.43
188.40	1591.26	188.45	1590.83	193.40	1550.12	193.45	1549.72	198.40	1511.05	198.45	1510.67
188.50	1590.41	188.55	1589.99	193.50	1549.32	193.55	1548.91	198.50	1510.29	198.55	1509.91
188.60	1589.57	188.65	1589.15	193.60	1548.51	193.65	1548.11	198.60	1509.53	198.65	1509.15
188.70	1588.73	188.75	1588.30	193.7	1547.72	193.75	1547.32	198.70	1508.77	198.75	1508.39
188.80	1587.88	188.85	1587.46	193.80	1546.92	193.85	1546.52	198.80	1508.01	198.85	1507.63
188.90	1587.04	188.95	1586.62	193.90	1546.12	193.95	1545.72	198.90	1507.25	198.95	1506.87
189.00	1598.20	189.05	1585.78	194.00	1545.32	194.05	1544.92	199.00	1506.49	199.05	1506.12
189.10	1585.36	189.15	1584.95	194.10	1544.53	194.15	1544.13	199.10	1505.74	199.15	1505.36
189.20	1584.53	189.25	1584.11	194.20	1543.73	194.25	1543.33	199.20	1504.98	199.25	1504.60
189.30	1583.69	189.35	1583.27	194.30	1542.94	194.35	1542.54	199.30	1504.23	199.35	1503.85
189.40	1582.85	189.45	1582.44	194.40	1542.14	194.45	1541.75	199.40	1503.47	199.45	1503.10
189.50	1582.02	189.55	1581.60	194.50	1541.35	194.55	1540.95	199.50	1502.72	199.55	1502.34
189.60	1581.18	189.65	1580.77	194.60	1540.56	194.65	1540.16	199.60	1501.97	199.65	1501.59
189.70	1580.35	189.75	1579.93	194.70	1539.77	194.75	1539.37	199.70	1501.21	199.75	1500.84
189.80	1579.52	189.85	1579.10	194.80	1538.98	194.85	1538.58	199.80	1500.46	199.85	1500.09
189.90	1578.69	189.95	1578.27	194.90	1538.19	194.95	1537.79	199.90	1499.71	199.95	1499.34
190.00	1577.86	190.05	1577.44	195.00	1537.40	195.05	1537.00	200.00	1498.96	200.05	1498.59
190.10	1577.03	190.15	1576.61	195.10	1536.61	195.15	1536.22	200.10	1498.21	200.15	1497.84
190.20	1576.20	190.25	1575.78	195.20	1535.82	195.25	1535.43	200.20	1497.46	200.25	1497.09
190.30	1575.37	190.35	1574.95	195.30	1535.04	195.35	1534.64	200.30	1496.71	200.35	1496.34
190.40	1574.54	190.45	1574.13	195.40	1534.25	195.45	1533.86	200.40	1495.97	200.45	1495.60
190.50	1573.71	190.55	1573.30	195.50	1533.47	195.55	1533.07	200.50	1495.22	200.55	1494.85
190.60	1572.89	190.65	1572.48	195.60	1532.68	195.65	1532.29	200.60	1494.48	200.65	1494.11
190.70	1572.06	190.75	1571.65	195.70	1531.90	195.75	1531.51	200.70	1493.73	200.75	1493.36
190.80	1571.24	190.85	1570.83	195.80	1531.12	195.85	1530.72	200.80	1492.99	200.85	1492.62
190.90	1570.42	190.95	1570.01	195.90	1530.33	195.95	1529.94	200.90	1492.25	200.95	1491.88

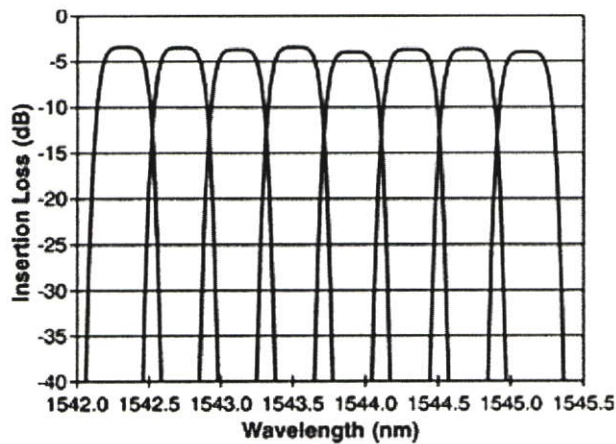
3.3.1 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing)

ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM เป็นการส่งช่องสัญญาณแสงจำนวนมากไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน มาตรฐานนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย ITU (International Telecommunications Union) ซึ่งกำหนดความยาวคลื่นแสงที่แน่นอนสำหรับการใช้งานระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีจุดกึ่งกลางของแถบความยาวคลื่นอยู่ที่ความถี่ 193.10 THz สำหรับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมาตรฐานที่ 200 GHz และ 100 GHz โดยระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz จะมีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 45 ช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน ซึ่งช่องสัญญาณทั้ง 45 ช่องสัญญาณของระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz จะครอบคลุมแถบความยาวคลื่นแสงประมาณ 35 nm ดังนั้นอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงต้องมีแถบความยาวคลื่นแสงที่กว้างประมาณ 35 nm และมีช่วงอัตราขยายของ EDFA ที่คงที่ในช่วงของแถบความยาวคลื่นแสงนี้เช่นกัน

ผู้ออกแบบระบบมีความพยายามหาจุดที่จะมีช่องสัญญาณสูงกว่า 45 ช่องสัญญาณสำหรับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เนื่องจากเริ่มที่จะมีความต้องการช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นในระบบแล้ว แต่ที่คิดที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA ที่มีแถบความยาวคลื่นเพียง 35 nm แต่เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในหน่วยของ GHz ก็ได้ความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงดังนี้ ที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 200 GHz เท่ากันทุกช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นระหว่างช่องว่างของสัญญาณ 1.6 nm, ที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เท่ากันทุกช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นระหว่างช่องว่างของสัญญาณ 0.8 nm และที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz เท่ากันทุกช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นระหว่างช่องว่างของสัญญาณ 0.4 nm โดยรูปแบบอย่างง่ายที่สุดของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz คือทำการเทียบเคียงรูปแบบของระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz ซึ่งก็มีช่องสัญญาณที่สอดคล้องประสานกัน แต่เมื่อเทียบเคียงรูปแบบของระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 75 GHz และ 37.5 GHz กับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz จะพบว่าช่องสัญญาณของทั้งสองระบบนี้ไม่มีความสอดคล้องประสานกับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เนื่องจากระบบที่มีช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz จะมีลำดับของความถี่ของช่องสัญญาณถดถอยไปจากระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz และเมื่อเลือกใช้ระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz (0.4 nm) และแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 45 ช่องสัญญาณจะใช้แบนด์วิดท์เพียง 17.5 nm ซึ่งเป็นแบนด์วิดท์เพียงครึ่งเดียวของช่วงอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบทั่วไป ทำให้มีแบนด์วิดท์เหลือพอที่จะเพิ่มช่องสัญญาณแสงได้อีกอีก และเมื่อพิจารณาการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเส้นใยแก้วนำแสงอาจจะนำระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 25 GHz มาใช้ก็ได้ ก็จะยิ่งทำให้ระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมากขึ้น

การออกแบบอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่เครื่องรับปลายทางก็เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงที่สำคัญเพราะว่าความแตกต่างของ

แถบสีที่บางมากของแต่ละช่องสัญญาณแสง ทำให้อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ต้องมีสมรรถนะที่สูงและมีคุณสมบัติเฉพาะ 3 ประการคือ ประการที่ 1 อุปกรณ์ต้องสามารถทำงานได้คงที่ในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด ประการที่ 2 ต้องมีขอบเขตของช่องสัญญาณที่แน่นอนตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และประการที่ 3 ต้องสามารถลดสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณแสงที่อยู่ติดกันได้ เมื่อมีจำนวนช่องสัญญาณแสงมากขึ้นจะเกิดความยากลำบากเพิ่มขึ้นในการแยกช่องสัญญาณแสงตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่กำหนด แต่ด้วยเทคโนโลยีของ Fiber Bragg Gratings ทำให้ได้จำนวนช่องสัญญาณตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่กำหนดได้ ทั้งนี้จำนวนของช่องสัญญาณแสงที่จะส่งต่อเส้นใยแก้วนำแสงต้องคำนึงถึงสมรรถนะของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ใช้ในระบบด้วย รูปที่ 3.11 แสดงสเปกตรัมของอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm



รูปที่ 3.11 สเปกตรัมของอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm

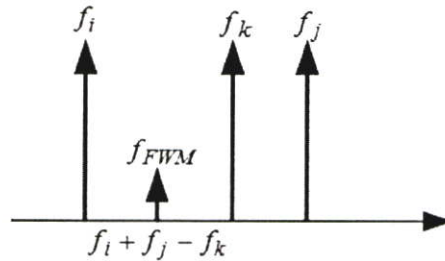
3.3.2 แถบความยาวคลื่นแสงสีแดงและสีน้ำเงิน

ITU ได้นำเสนอแถบความยาวคลื่นที่ขยายออกของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM เป็น 1528.77 nm ถึง 1563.86 nm และแบ่งช่วงของความยาวคลื่นออกเป็นแถบคลื่นแสงสีแดงและแถบคลื่นแสงสีน้ำเงิน โดยแถบความยาวคลื่นแสงสีแดงจะมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 1546.12 nm และสูงขึ้นไปจากความยาวคลื่นค่านี้ ส่วนแถบความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินจะมีความยาวคลื่นต่ำกว่า 1546.12 nm ลงมา การแบ่งความยาวคลื่นแบบนี้จะตรงกับค่าในทางปฏิบัติเนื่องจากขอบเขตของช่วงอัตราขยายที่ต่ำที่สุดที่ปล่อยออกมาของ EDFA จะตรงกับแถบความยาวคลื่นแสงสีแดง ดังนั้นถ้าระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ต้องการเพียงแถบความยาวคลื่นที่จำกัดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA ก็เลือกใช้แถบความยาวคลื่นแสงสีแดงนี้ แต่ถ้าระบบต้องการแถบความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้น

ก็เลือกใช้แถบความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินเพิ่ม โดยเปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด Dual-Band Fiber Amplifiers (DBFA)

3.4 ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันและเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณรูปที่ 3.12 เป็นรูปแบบการกระจายตัวของความถี่ของแสงเมื่อ f_i, f_j และ f_k เป็นสัญญาณความถี่ของแสงและ f_{FWM} เป็นความถี่ของแสงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสัญญาณทั้งสามความถี่เนื่องจากผลของ Four-Wave Mixing ซึ่งหาได้จาก $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$



รูปที่ 3.12 รูปแบบการกระจายตัวของความถี่ของแสงจากผลของ Four-Wave Mixing

การเกิดขึ้นของ Four-Wave Mixing เป็นผลกระทบจาก Fiber Chromatic Dispersion ซึ่งปกติจะทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายความถี่ที่ต่างกัน กำลังของสัญญาณด้านเอาต์พุตที่ความถี่ f_{FWM} สามารถหาได้ดังนี้ [2], [4], [5]

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left(\frac{d_{ijk} \cdot \chi^{(3)} \cdot L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k \cdot e^{-\alpha L} \cdot \eta_{ijk} \quad (3.1)$$

เมื่อ

- P_i, P_j, P_k แทนค่ากำลังของสัญญาณที่ความถี่ f_i, f_j, f_k
- P_{FWM} แทนค่ากำลังของสัญญาณที่ความถี่ f_{FWM}
- n แทนค่าดัชนีหักเหในเส้นใยแก้วนำแสง (Linear Refractive Index)
- λ แทนค่าความยาวคลื่น
- A_{eff} แทนค่า Effective Mode Area ของเส้นใยแก้วนำแสง
- L_{eff} แทนค่า Effective Length ของเส้นใยแก้วนำแสง (หาได้ตามสมการที่ 2.27)

d_{ijk}	แทนค่าองค์ประกอบที่แสดงภาวะความเสื่อม ($d=3$ เมื่อ $i=j$ และ $d=6$ เมื่อ $i \neq j$)
η_{ijk}	แทนค่าประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่ (หาได้ตามสมการที่ 2.29)
$\chi^{(3)}$	แทนค่า Third-order Nonlinear Susceptibility

เมื่อใช้การประมาณค่าแบบเกาส์เซียน ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้การมอดูเลตแบบ on-off keying คือ

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (3.2)$$

เมื่อ t	แทนค่าเวลา
Q	แทนค่า Quality Factor ซึ่งหาได้จาก [4]

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM}} + \sqrt{N_{th}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ P_s	แทนค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้
N_{th}	แทนค่า Thermal Noise Power
N_{sh}	แทนค่า Shot Noise Power
N_{FWM}	แทนค่า Four-Wave Mixing Noise Power ซึ่งหาได้จาก [4]

$$N_{FWM} = 2b^2 \cdot P_s \frac{P_{FWM}}{8} \quad (3.4)$$

โดยค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้หาได้จาก [1]

$$P_s = N_c P_o e^{-\alpha L} \cdot L_r \quad (3.5)$$

เมื่อ P_o	แทนกำลังของสัญญาณแสงด้านอินพุต
L	แทนความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง
L_r	แทนค่าสูญเสียในระบบสื่อสารสัญญาณก่อนถึงภาครับ
N_c	แทนจำนวนช่องสัญญาณ

และเนื่องจากค่าการสูญเสียของ N_{th} และ N_{sh} มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ N_{FWM} ดังนั้นค่า SNR ที่เกิดจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing สามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2bP_s}{\sqrt{b^2 P_s P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}} \quad (3.6)$$

ในระบบ DWDM กำลังของสัญญาณที่ความถี่ f_{FWM} เป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ซึ่งเกิดจากการรวมกันของความถี่ที่เป็นไปได้เมื่อมีช่องสัญญาณใช้งาน n ช่องสัญญาณ [4]

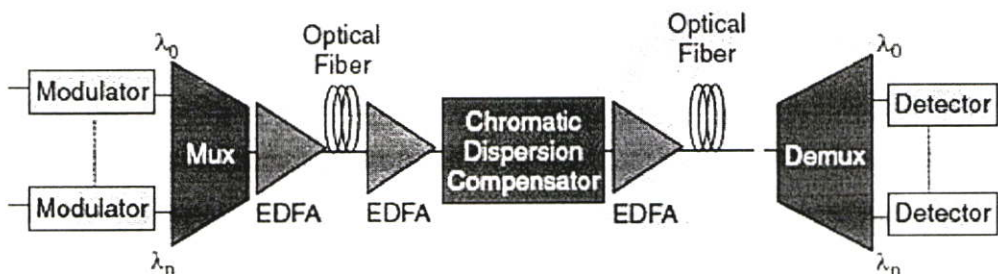
$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (3.7)$$

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1)

3.5 การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

3.5.1 การใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ

เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของ Four-Wave Mixing ดังนั้นหากลดสาเหตุที่จะทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงลง การแทรกสอดของ Four-Wave Mixing ก็จะลดลงตาม เช่นลดผลกระทบของดิสเพอร์ชันในระบบลงด้วยการใช้เส้นใยแก้วแบบ Dispersion Compensating Fiber ซึ่งจะมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบที่มาก เมื่อนำเส้นใยแก้วนี้ไปวางในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบเชื่อมโยง ค่าลบที่มากของดิสเพอร์ชันจะช่วยทำให้ดิสเพอร์ชันโดยรวมของระบบเชื่อมโยงมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ได้ แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงคุณภาพของสัญญาณในระบบด้วย โดยการชดเชยค่าไว้ในขั้นตอนของการออกแบบระบบ



รูปที่ 3.13 รูปแบบการชดเชยค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันด้วย Dispersion Compensating Fiber

เส้นใยแก้วชนิดต่อมาคือเส้นใยแก้วแบบ NZ-DSF ที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพขนาดใหญ่ [11] การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของแสงในเส้นใยแก้วจะทำให้ความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าลดลง สำหรับกำลังส่งค่าหนึ่ง ประโยชน์ของการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพประกอบด้วยความสามารถที่จะส่งกำลังสัญญาณได้สูงขึ้น, อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงกว่า, อัตราบิดผิดผลาดที่ต่ำกว่า, ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ไกลมากกว่าและที่สำคัญก็คือทำให้มีความจุของการส่งข้อมูลที่สูงกว่า โดยปกติเส้นใยแก้วจะมีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพประมาณ 50 ตารางไมครอนเท่านั้น แต่ในขณะนี้ก็ได้มีการผลิตเส้นใยแก้วที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่มากถึง 92 ตารางไมครอนเพื่อตอบสนองความต้องการที่มากขึ้นของระบบการส่งข้อมูลความเร็วสูงและมีการขยายสัญญาณแสงตามเส้นทาง เช่นระบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณ 10 Gb/s จำนวนหลายช่องสัญญาณกำลังมีการใช้งานกันมากอยู่ในขณะนี้ และเส้นใยแบบ NZ-DSF ที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพขนาดใหญ่จะเป็นรูปแบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณขนาด 40 Gb/s ผ่านแถบขยายสัญญาณของ EDFA ได้ในอนาคต ประโยชน์ที่ได้รับจากการลดจำนวนอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและการเพิ่มระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงคือสามารถที่จะปรับปรุงและพัฒนาไปยังระบบการส่งข้อมูลที่เร็วกว่าด้วยค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการดำเนินงานที่น้อยลง

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าทางเลือกใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่ข้อเสียก็คือเป็นการลงทุนเพิ่มด้านเคเบิลจึงใช้ต้นทุนในการลงทุนสูง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของระบบที่นำไปใช้ด้วย

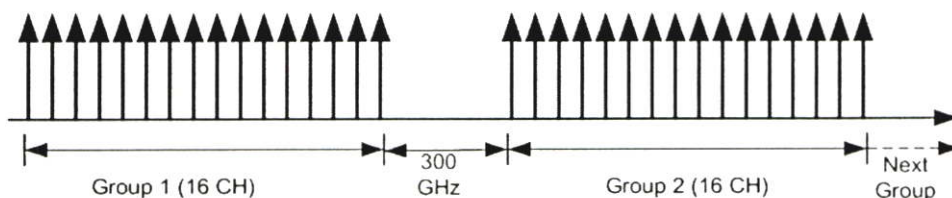
3.5.2 การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากัน (Unequal Channel Spacing)

ถ้าหากมีช่องสัญญาณไม่มากนักก็สามารถลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ให้เหลือน้อยลงได้ด้วยวิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันคือให้ห่างไม่สม่ำเสมอนั่นเอง ซึ่งหลักการนี้จะง่ายสำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณ 3 - 16 ช่องสัญญาณ แต่จะยากและซับซ้อนมากขึ้นสำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวนมากๆ ตัวอย่างของระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากัน และมีช่องสัญญาณจำนวน 16 ช่องสัญญาณ [7] ประกอบด้วยช่องสัญญาณที่มีความถี่ดังนี้ $f_1=192.95$ THz , $f_2=193.00$ THz , $f_3=193.0525$ THz , $f_4=193.1075$ THz , $f_5=193.165$ THz , $f_6=193.225$ THz , $f_7=193.2875$ THz , $f_8=193.3525$ THz , $f_9=193.42$ THz , $f_{10}=193.49$ THz , $f_{11}=193.5650$ THz , $f_{12}=193.6375$ THz , $f_{13}=193.7175$ THz , $f_{14}=193.805$ THz , $f_{15}=193.8875$ THz , $f_{16}=193.9975$ THz การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบนี้ นอกจากจะมีข้อเสียที่ใช้งานกับระบบที่มีช่องสัญญาณมากๆ ไม่ได้แล้ว ยังไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานจริงเนื่องจากค่าความถี่ที่ระบบต้องการมีความละเอียดมากและต้องการความแม่นยำสูง การสร้างแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สำหรับ

ความถี่ค่อนข้างยาก นอกจากนั้นช่องสัญญาณของระบบนี้ไม่ตรงกับช่องสัญญาณมาตรฐานของ ITU ทำให้นำไปใช้งานร่วมกับระบบอื่นๆไม่ได้

3.5.3 เทคนิคการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ (Channel Grouping Separation Technique)

เนื่องจากระยะห่างของช่องสัญญาณมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลกระทบของ Four-Wave Mixing คือถ้าช่องสัญญาณมีระยะห่างกันมากๆ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะมีค่าน้อยแต่ถ้าช่องสัญญาณมีระยะห่างกันน้อยๆ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะมีค่ามาก และเนื่องจากความต้องการแบนด์วิดท์ของเครือข่ายเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงต้องทำการเพิ่มช่องสัญญาณของเครือข่ายด้วยการลดระยะห่างของช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้ผลกระทบเนื่องจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เพิ่มขึ้นด้วยการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่ โดยการแบ่งช่องสัญญาณทั้งหมดออกเป็นกลุ่ม ซึ่งภายในกลุ่มเดียวกันจะมีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากัน ส่วนระหว่างกลุ่มจะมีระยะห่างของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดข้ามกลุ่มช่องสัญญาณได้ ทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing โดยรวมของทั้งเครือข่ายลดลง ตัวอย่างการจัดกลุ่มช่องสัญญาณเช่นในระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz แบ่งกลุ่มช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่มระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz จำนวนช่องสัญญาณต่อกลุ่มเท่ากับ 16 ช่องสัญญาณ โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz ทำให้หลังจากทำการจัดกลุ่มแล้วระบบใหม่นี้มีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 64 ช่องสัญญาณ โดยเพิ่มขึ้นจากระบบเดิม (ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz) จำนวน 24 ช่องสัญญาณ ทำให้ความจุของข้อมูลในเครือข่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 60% โดยวิธีการจัดกลุ่มที่เลือกใช้ได้มาจากการจำลองแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเงื่อนไข 2 ประการคือมีค่าของ Four-Wave Mixing Power ที่ใกล้เคียงกับระบบเดิม (ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz) และมีช่องสัญญาณใช้งานได้มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz) โดยรูปแบบการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 รูปแบบการจัดช่องสัญญาณใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก FWM

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

4.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงแล้วส่งผลทำให้เกิด Four-Wave Mixing ซึ่งเป็นผลกระทบที่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณของระบบสื่อสาร DWDM ภายใต้สภาวะที่กำลังของสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าสูงเพื่อสามารถส่งสัญญาณในระยะทางไกล ทั้งนี้การลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่แคบลงเพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้มากขึ้นและทำให้แบนด์วิดท์ในเครือข่ายสูงขึ้นจะยิ่งทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบสื่อสาร DWDM ความยาวคลื่นย่านซีแบนด์ (C-Band) ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz) ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่าง ๆ กันว่าส่งผลทำให้เกิด Four-Wave Mixing แตกต่างกันอย่างใด และระยะห่างของช่องสัญญาณแต่ละช่วงมีข้อดีข้อเสียต่างกันอย่างไร ซึ่งในที่นี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบสื่อสาร DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz ตามมาตรฐานช่องสัญญาณของ ITU ตามภาคผนวก ก.

4.2 การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ

4.2.1 สมการและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณหาค่าผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสาร DWDM สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.1) - (3.7) โดยระบบที่ทำการศึกษาวิเคราะห์ในที่นี้จะไม่ได้รวมถึงค่าสูญเสียอื่นๆเช่น SRS, SBS และ ASE ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนของ EDFA และพิจารณาเฉพาะผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดจาก three tone product ซึ่งมีนัยสำคัญมากกว่า two tone product (กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่เกิดจาก three tone product จะมีค่าสูงกว่า two tone product มาก เมื่อรวมกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน กำลังที่ได้จะใกล้เคียงกับกำลังของสัญญาณจากผลกระทบที่เกิดจาก three tone product)

ในระบบสื่อสาร DWDM กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่ความถี่ f_{FWM} เป็นผลรวมของกำลังของสัญญาณของ Four-Wave Mixing ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ที่เป็นไปได้เมื่อมีช่องสัญญาณใช้งาน N ช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ (3.7)

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk})$$

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1)

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left(\frac{d_{ijk} \cdot \chi^{(3)} \cdot L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k \cdot e^{-\alpha L} \cdot \eta_{ijk}$$

ส่วนความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบสื่อสาร DWDM สามารถหาได้ตามสมการที่ (3.2)

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

เมื่อค่า SNR ที่เกิดจากผลกระทบของ FWM สามารถหาได้ตามสมการที่ (3.6)

$$Q = \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}}$$

โดยค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้หาได้จากสมการที่ (3.5)

$$P_s = N_c P_o e^{-\alpha L} \cdot L_r$$

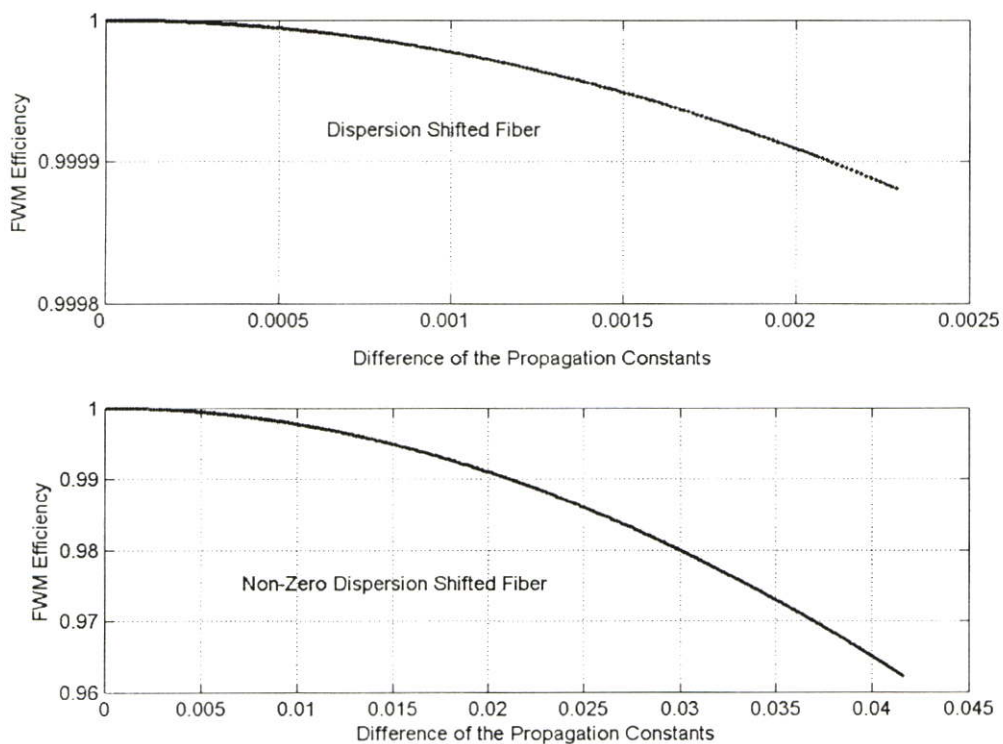
การคำนวณจะทำการเปรียบเทียบระบบสื่อสาร DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5, 25, 50, 100 และ 200 GHz ซึ่งความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และพารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย

- ความยาวคลื่นใช้งานอยู่ในช่วง 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz)
- กำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสง (P_{in}) เท่ากับ 10 dBm
- ดัชนีการหักเหของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกา (n) เท่ากับ 1.45
- ความเร็วของแสงในอากาศ (c) เท่ากับ 3×10^8 m/s
- องค์ประกอบที่แสดงภาวะความเสื่อม ($d=3$ เมื่อ $i=j$ และ $d=6$ เมื่อ $i \neq j$)
- ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นลำดับที่สาม $\chi^{(3)}$ เท่ากับ 4×10^{-15} [esu]
- ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง (L) เท่ากับ 100 กิโลเมตร
- ระยะทางประสิทธิผลของเส้นใยแก้วนำแสง (L_{eff}) ประมาณ 20.7 km

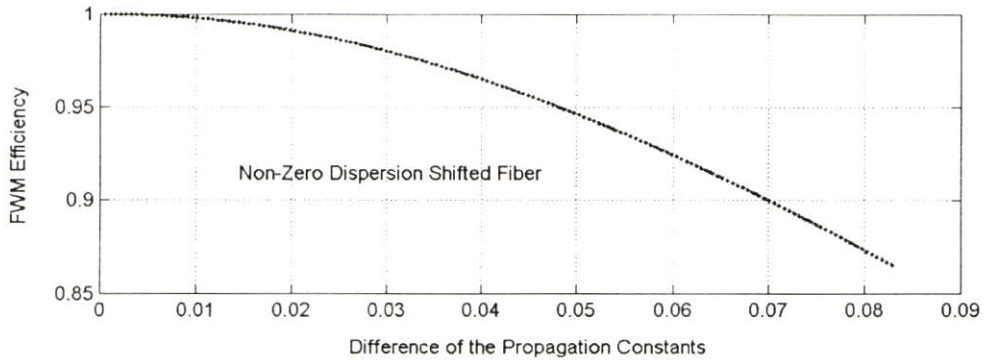
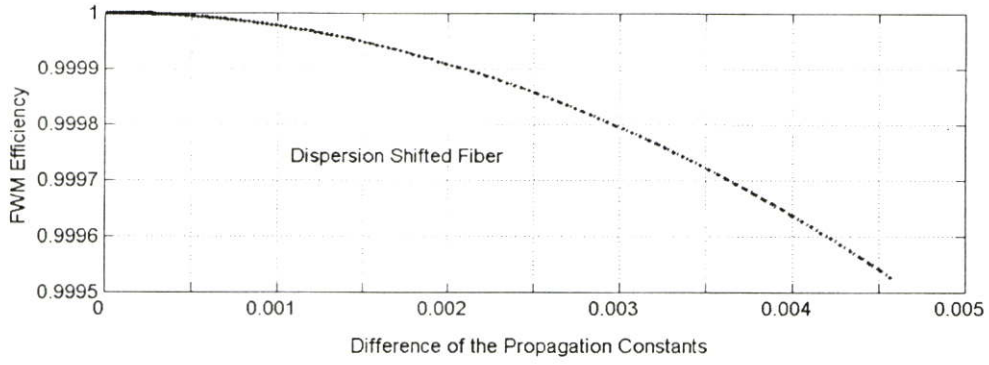
- สัมประสิทธิ์การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง (α) เท่ากับ 0.21 dB/km
- พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วนำแสง (A_{eff}) เท่ากับ $50 \mu\text{m}^2$
- Fiber Chromatic Dispersion (D) เท่ากับ 17 ps/nm km
- Dispersion Slope ($\frac{dD}{d\lambda}$) เท่ากับ 0.06 ps/nm² km

4.2.2 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing

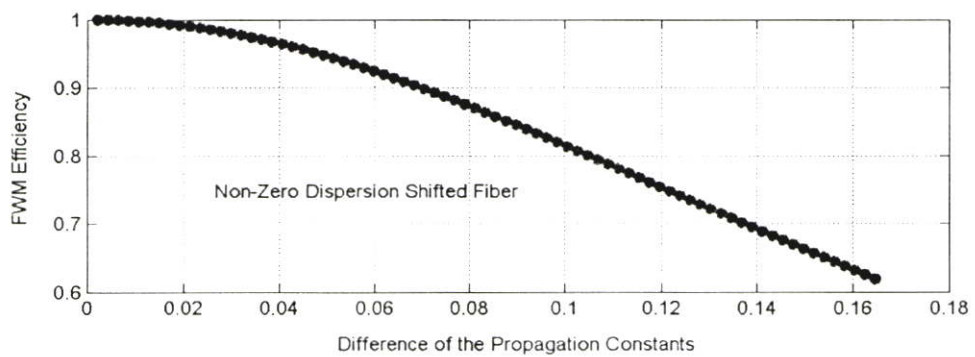
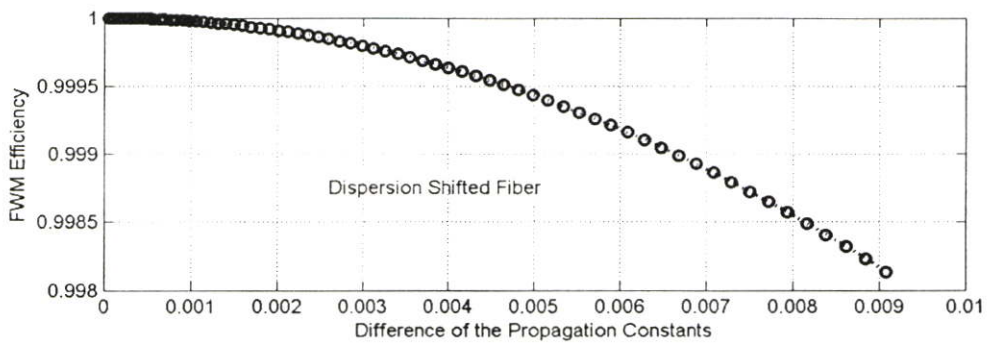
ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing (FWM Efficiency) แสดงความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างช่องสัญญาณที่มีปฏิริยาต่อกัน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5, 25, 50, 100 และ 200 GHz จะได้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing กับความแตกต่างของค่าคงที่ในการแพร่กระจายแสง (Difference of the Propagation Constants) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.5 ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.29 และ 2.30 และใช้พารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 4.2.1



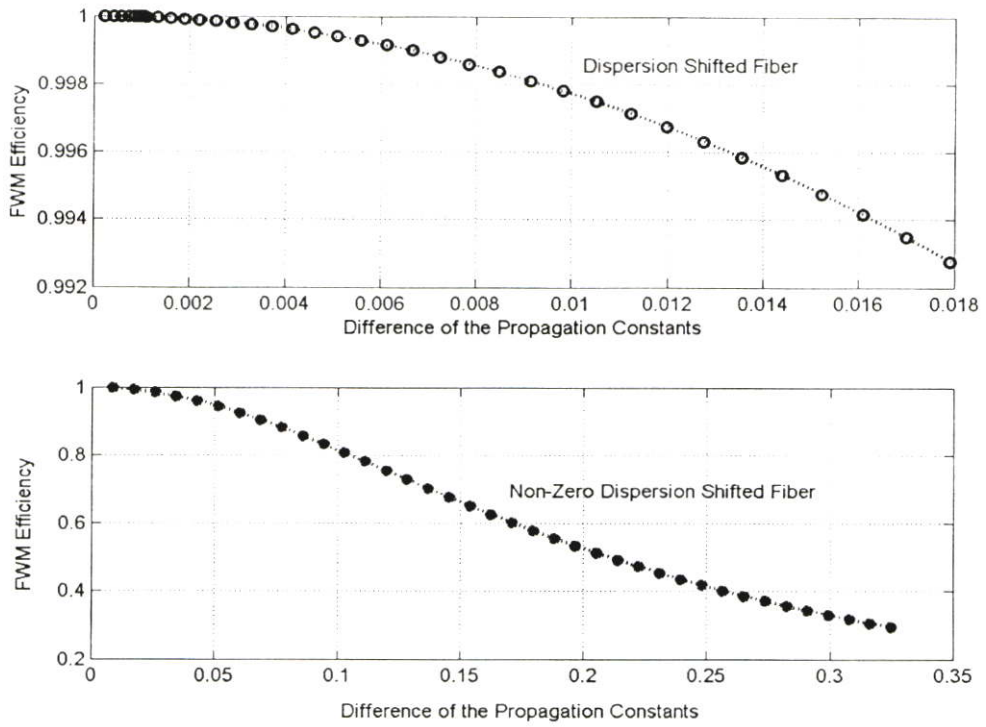
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5 GHz



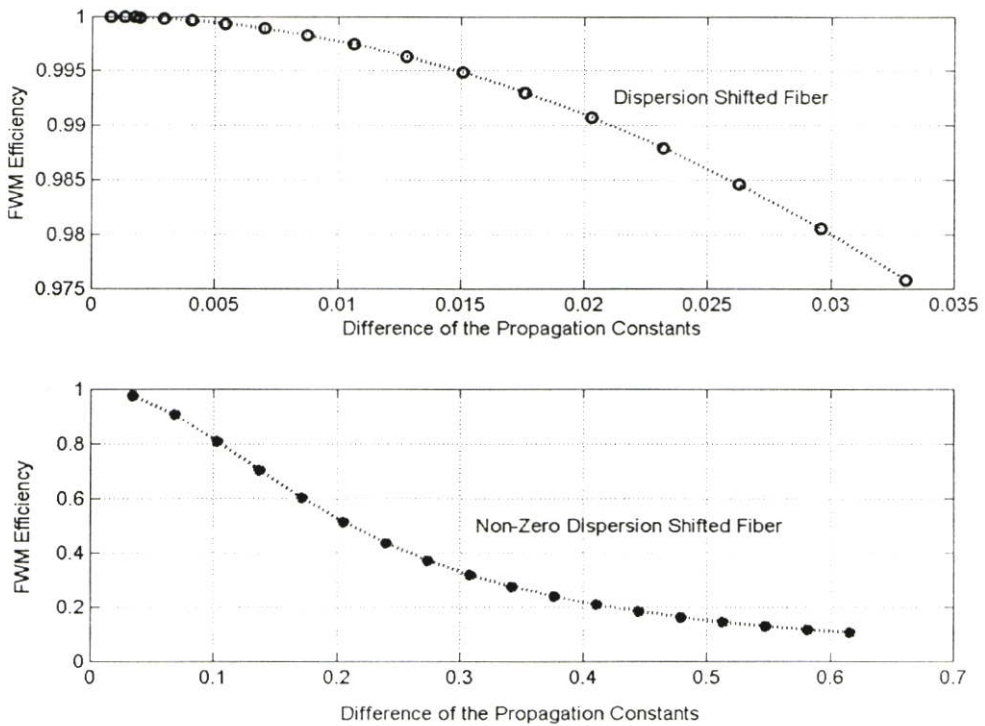
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 25 GHz



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz

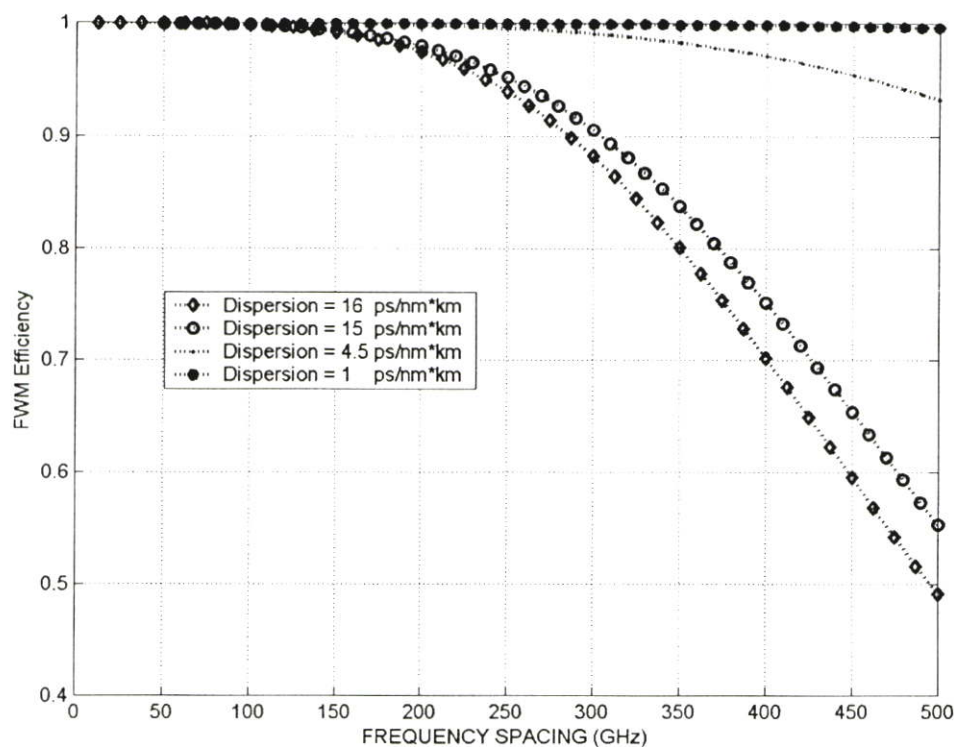


รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 200 GHz

จากรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก Four-Wave Mixing สูงขึ้นและโอกาสที่ช่องสัญญาณจะเกิดการรวมกันและทำให้เกิด Four-Wave Mixing นั้นมีสูงมากสำหรับช่องสัญญาณที่อยู่ข้างเคียงกัน และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อช่องสัญญาณนั้นอยู่ห่างออกไป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shifted Fiber (DSF) และ Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZ-DSF) พบว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber มีประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing ต่ำกว่า เนื่องจากปรากฏการณ์ของ Four-Wave Mixing จะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์ ซึ่งขัดแย้งกับความต้องการของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shifted Fiber ที่ต้องการให้ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลได้มากและไปได้ไกล เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shifted Fiber ตามมาตรฐานจะมีความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์อยู่ภายในแถบความยาวคลื่นที่ใช้งาน ซึ่งในที่นี้คือ 1550 nm ดังนั้นความต้องการที่ขัดแย้งกันนี้จะจำกัดความสามารถของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shifted Fiber ที่ใช้ในเครือข่ายข้อมูลความเร็วสูงและใช้เทคโนโลยีของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM แต่ในทางกลับกันเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM จึงมีการพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber อย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้งานกับเครือข่ายระยะไกลและมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแคบๆมากขึ้น

4.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing เมื่อค่าดิสเพอร์ชันเปลี่ยนแปลง

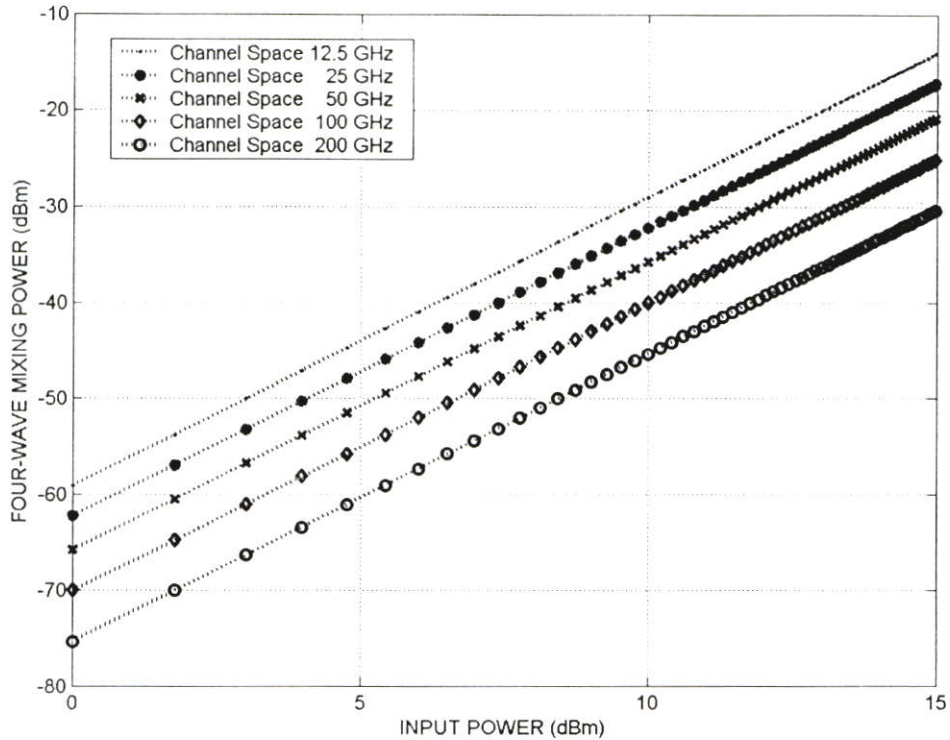
เมื่อกำหนดให้ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีช่องสัญญาณจำนวน 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งเป็น 3 ช่องสัญญาณแรกของแต่ละระบบเช่นระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz จะเป็นช่องสัญญาณที่มีความถี่ 192.10 THz, 192.20 THz, 192.30 THz หรือระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz จะเป็นช่องสัญญาณที่มีความถี่ 192.10 THz, 192.15THz, 192.20 THz เป็นต้น โดยในที่นี้พิจารณากรณีที่ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณในช่วง 12.5 GHz – 500 GHz สำหรับระบบที่มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 17,15,4.5 และ 1 ps/nm km โดยประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าดิสเพอร์ชันลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าดิสเพอร์ชันเดียวกันจะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing ลดลง



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่จาก FWM เปรียบเทียบกับค่าดีสเพอร์ชัน เมื่อระบบสื่อสาร DWDM มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่างกัน

4.2.4 เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing กับกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของ เส้นใยแก้วนำแสง

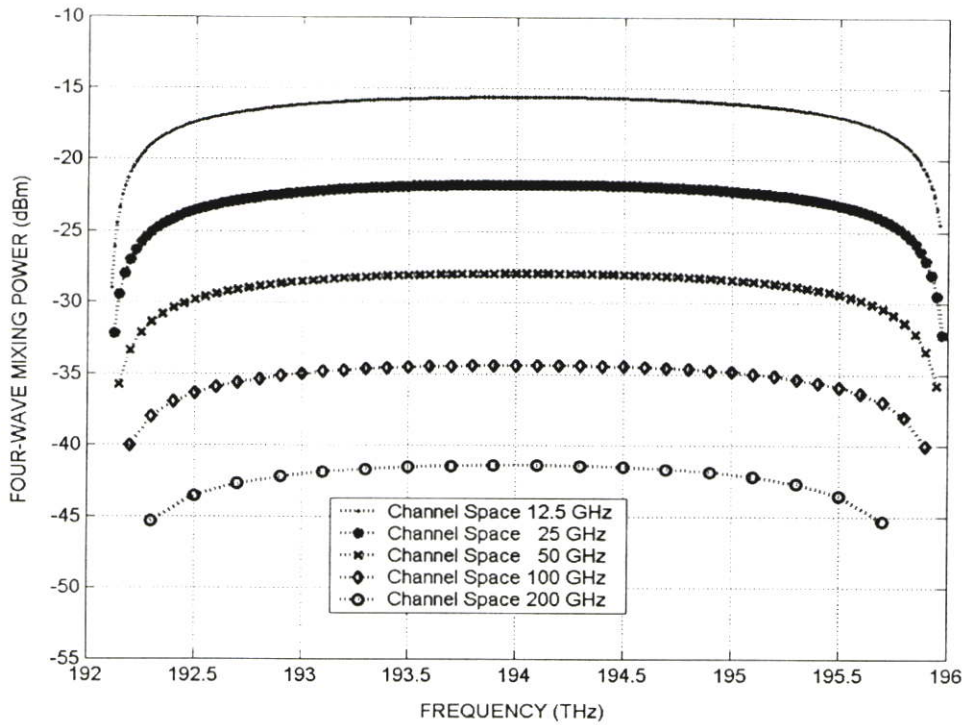
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงว่าส่งผลกระทบทำให้ Four-Wave Mixing Power เปลี่ยนแปลงอย่างไร สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าการเพิ่มกำลังของสัญญาณด้านอินพุตให้สูงขึ้นเพื่อส่งสัญญาณในระยะทางที่ไกลมากขึ้นจะทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้นและเมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณลดลงก็ยิ่งส่งผลทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้นอีก



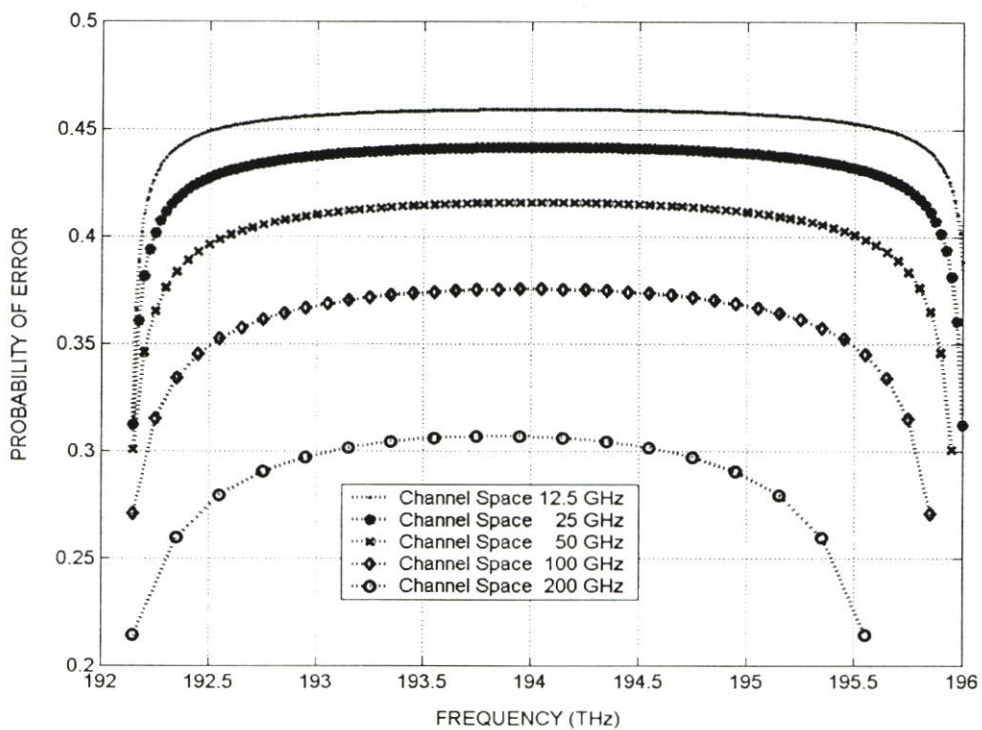
รูปที่ 4.7 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave mixing เปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber

4.2.5 เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในช่วงความยาวคลื่นย่าน C-Band

เมื่อกำหนดให้กำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เท่ากับ 10 dBm (กำลังของสัญญาณหลังจากผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแล้ว) และระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เท่ากับ 100 กิโลเมตร จะได้กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่ความยาวคลื่นต่างๆสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber



รูปที่ 4.9 ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ที่ความยาวคลื่นต่างๆสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber ซึ่งจะพบว่าเมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณน้อยลงจะทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing สูงขึ้น

4.2.6 เปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในช่วงความยาวคลื่นย่าน C-Band

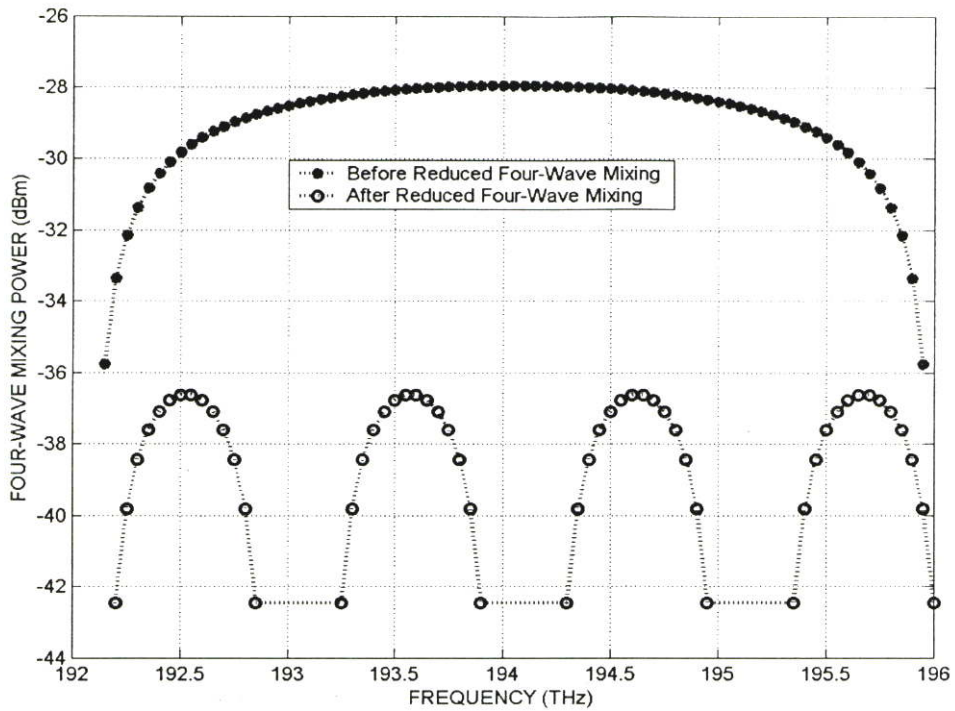
หลังจากการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ผ่านมาข้างต้นจะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าน้อยลงจะส่งผลทำให้ผลกระทบเนื่องจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น แต่เครือข่ายก็จะมีช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้แบนด์วิธท์ในเครือข่ายสูงขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงการออกแบบเครือข่ายจะมีการกำหนดความต้องการใช้งานแบนด์วิธท์ในปัจจุบันและแนวโน้มในอนาคตไว้ล่วงหน้า เพื่อสร้างเครือข่ายที่มีความเหมาะสมกับความต้องการและมีต้นทุนที่ควบคุมได้ ดังนั้นการเพิ่มแบนด์วิธท์ด้วยการเพิ่มช่องสัญญาณจำนวนมากโดยการลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณลงมากๆโดยไม่คำนึงถึงความเหมาะสมของเครือข่ายคงไม่ถูกต้องนัก แต่การคำนวณช่องสัญญาณตามแบนด์วิธท์ที่ต้องการน่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า เพราะเป็นจุดแรกที่สามารถควบคุมผลกระทบเนื่องจาก Four-Wave Mixing ได้ ส่วนผลเสียข้อที่สองจากการลดระยะห่างของช่องสัญญาณที่ไม่เหมาะสมคือยิ่งระยะห่างของช่องสัญญาณแคบมาก อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ก็จะมีไลน์วิธท์ที่แคบมากเช่นกันเพื่อสามารถแยกแยะช่องสัญญาณที่ต้องการได้ซึ่งราคาของอุปกรณ์ประเภทนี้ก็จะสูงขึ้นตามความสามารถของอุปกรณ์ที่สูงขึ้น ทั้งนี้ต้นทุนในการดูแลรักษาอุปกรณ์ก็จะสูงตามไปด้วย ทำให้ต้นทุนของเครือข่ายโดยรวมสูงขึ้น ดังนั้นผู้ออกแบบเครือข่ายต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของระยะห่างของช่องสัญญาณที่จะนำมาใช้ในเครือข่ายด้วย

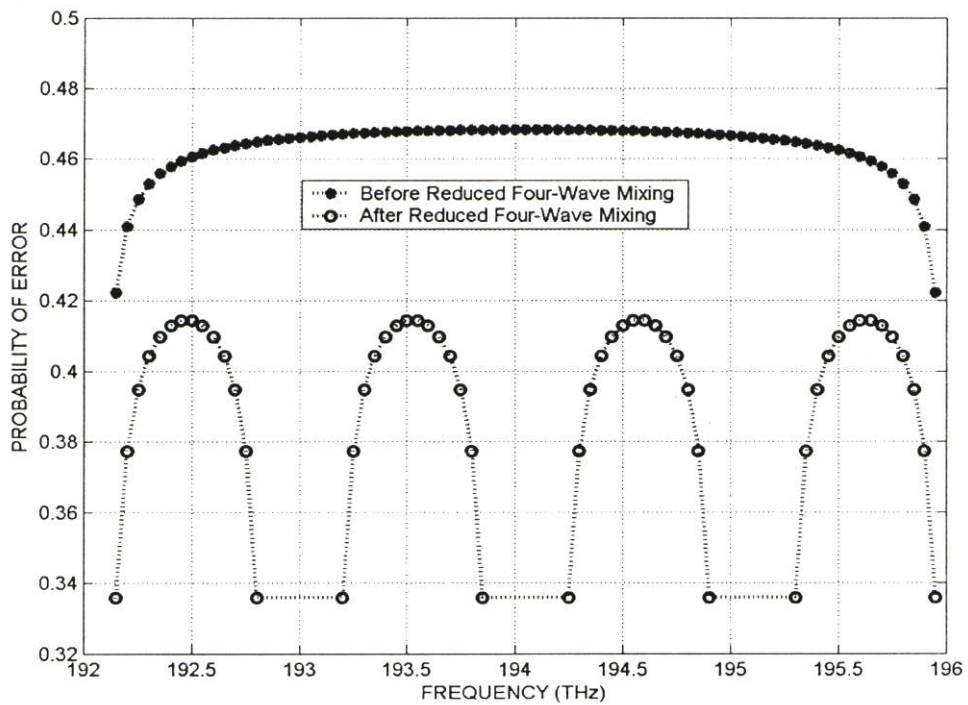
ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ผู้ให้บริการระบบสื่อสารโทรคมนาคมนำมาใช้งานมีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz เป็นส่วนใหญ่ซึ่งเหมาะสมกับความต้องการแบนด์วิธท์ในปัจจุบันนี้ แต่ในอนาคตเครือข่ายมีแนวโน้มความต้องการแบนด์วิธท์ที่เพิ่มขึ้น จึงต้องการระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งก็ทำได้ด้วยการลดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณลง โดยระบบที่นำมาใช้งานต้องมีช่องสัญญาณตรงตามมาตรฐานของ ITU และสอดคล้องกับระบบเดิมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน จากข้อจำกัดดังกล่าวนี้จะพบว่าระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz และ 25 GHz มีความสอดคล้องกับความต้องการนี้ โดยการอัพเกรดอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ในส่วนอื่นๆของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเช่นอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA ต้องสามารถขยายสัญญาณตามที่ต้องการได้เมื่อมีช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น และเทคโนโลยีของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงที่ต้องมีไลน์วิธท์ที่แคบมากๆ เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz และ 25 GHz จะ

พบว่ามิซื่อได้เปรียบและเสียเปรียบแตกต่างกันดังนี้ ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 25 GHz มีมิซื่อได้เปรียบคือมีช่องสัญญาณจำนวนมากทำให้มีแบนด์วิดธ์ของเครือข่ายที่สูง แต่มีมิซื่อเสียเปรียบที่แหล่งกำเนิดสัญญาณแสงและอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณต้องมีไลน์วิทท์ที่แคบมากทำให้อุปกรณ์มีราคาแพง นอกจากนี้ระบบนี้ยังได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงกว่า ส่วนระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz มีช่องสัญญาณจำนวนน้อยกว่า แต่แหล่งกำเนิดสัญญาณแสงและอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณก็มีไลน์วิทท์ที่กว้างกว่าและได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะพบว่าระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

โดยเมื่อเปรียบเทียบระบบสื่อสัญญาณ DWDM ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz - 196.00 THz) ที่จากเดิมมีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz จะมีช่องสัญญาณใช้งาน 40 ช่องสัญญาณ มาเป็นระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz จะมีช่องสัญญาณใช้งาน 79 ช่องสัญญาณ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 2 เท่าและมีไลน์วิทท์ของแหล่งกำเนิดแสงลดลง 2 เท่าซึ่งมีเทคโนโลยีที่สามารถรองรับได้ แต่ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz จะได้รับผลกระทบเนื่องจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น จึงนำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบที่นำเสนอใหม่นี้ด้วยวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจาก FWM ด้วยการแบ่งกลุ่มช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่มระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz จำนวนช่องสัญญาณต่อกลุ่มเท่ากับ 16 ช่องสัญญาณ โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz ทำให้หลังจากทำการจัดกลุ่มแล้วระบบใหม่นี้มีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 64 ช่องสัญญาณ โดยเพิ่มขึ้นจากระบบเดิม (ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz) จำนวน 24 ช่องสัญญาณ ทำให้ความจุของข้อมูลในเครือข่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 60% โดยวิธีการจัดกลุ่มที่เลือกใช้ได้มาจากการจำลองแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเงื่อนไข 2 ประการคือมีกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่ใกล้เคียงกับระบบเดิม (ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz) และมีช่องสัญญาณใช้งานได้มากที่สุดในช่วงความถี่ 192.10 - 196.00 THz โดยรูปแบบการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.10 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing และความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing หลังจากการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz หลังการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่



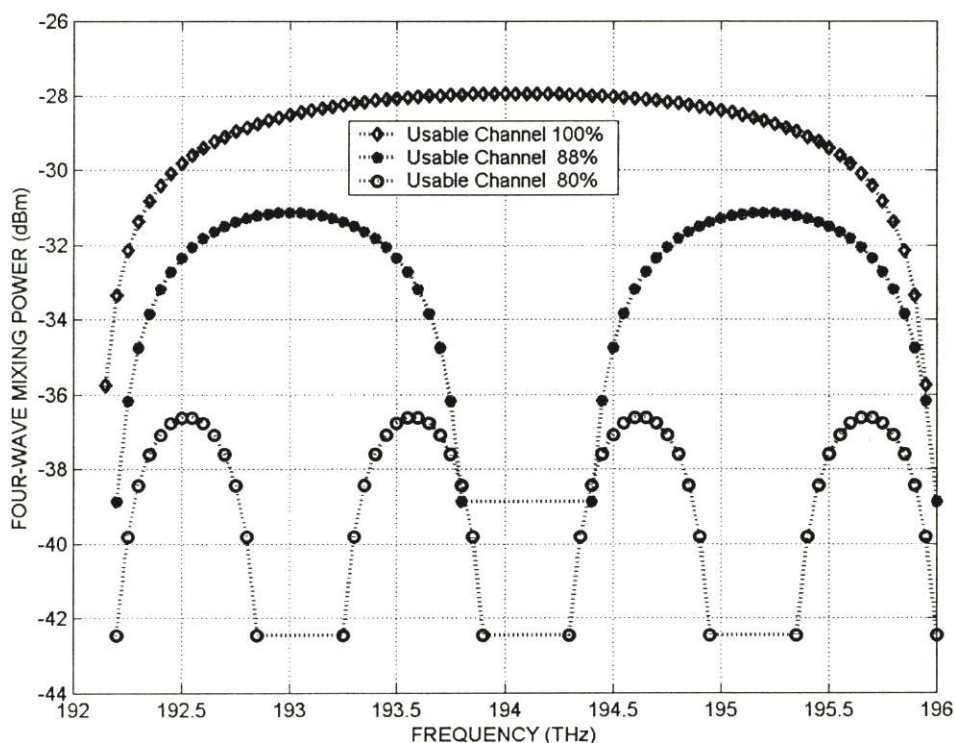
รูปที่ 4.11 ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz หลังจากการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่

ผลจากการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่ทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing โดยรวมของระบบลดลง แต่ช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้ก็จะลดลงเนื่องจากต้องนำช่องสัญญาณบางส่วนไปเป็น Guard Band ระหว่างกลุ่มของสัญญาณ ซึ่งจากผลที่ได้ในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 จะคำนวณที่ประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณ 80% และเมื่อเราเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณให้สูงขึ้น ก็จะทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.12 แสดงกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ของระบบสี่สัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz ที่มีประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณต่าง ๆ กันดังนี้

(1) Usable Channel 100% จะมีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 79 ช่องสัญญาณ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50GHz เท่ากัน

(2) Usable Channel 88% จะมีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 70 ช่องสัญญาณ แบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 2 กลุ่ม มีระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 500 GHz มีช่องสัญญาณกลุ่มละ 35 ช่องสัญญาณ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz

(3) Usable Channel 80% จะมีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 64 ช่องสัญญาณ แบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่ม มีระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz มีช่องสัญญาณกลุ่มละ 16 ช่องสัญญาณ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz

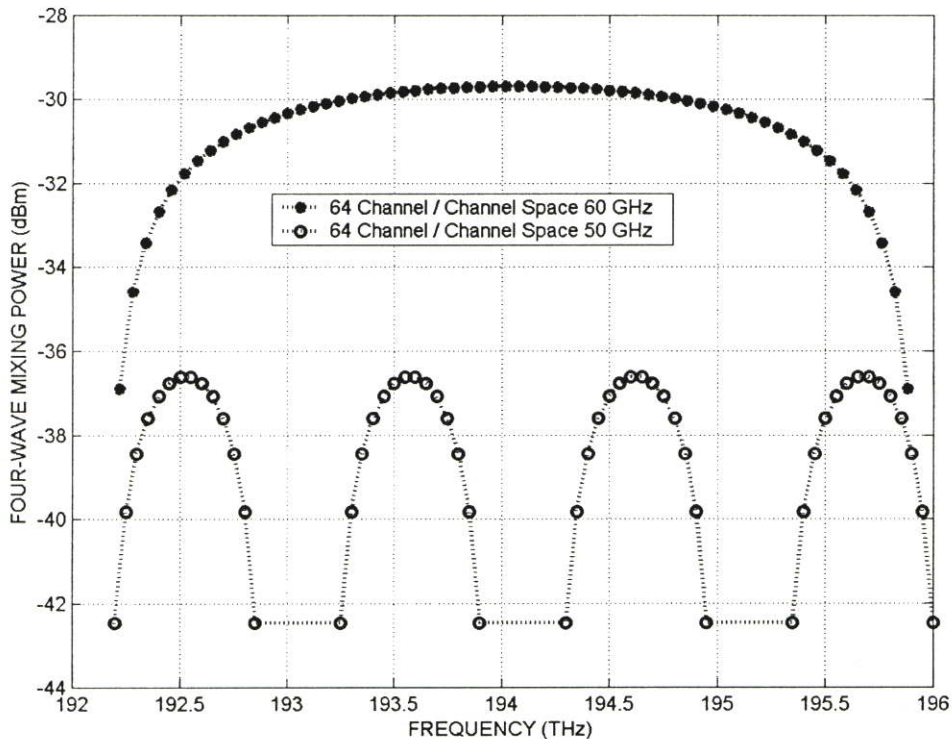


รูปที่ 4.12 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ของระบบสี่สัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz ที่มีประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณต่าง ๆ กัน

เมื่อพิจารณาระบบสื่อสารด้วย DWDM ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz - 196.00 THz) ที่มีช่องสัญญาณใช้งาน 64 ช่องสัญญาณเท่ากัน โดยทำการเปรียบเทียบผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดจากวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณแบบการแบ่งกลุ่มช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่มระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz และมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz เปรียบเทียบกับวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 60 GHz เท่ากัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13 โดยมีการจัดช่องสัญญาณดังนี้

(1) 64 Channel / Channel Space 60 GHz จะมีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 64 ช่องสัญญาณ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 60 GHz เท่ากัน

(2) 64 Channel / Channel Space 50 GHz จะมีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 64 ช่องสัญญาณ แบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่ม มีระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz มีช่องสัญญาณกลุ่มละ 16 ช่องสัญญาณ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz



รูปที่ 4.13 กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณ 80% เปรียบเทียบวิธีการจัดช่องสัญญาณที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 60 GHz เท่ากันจะมีกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing สูงกว่า และข้อเสียอีกข้อหนึ่งของการจัดช่องสัญญาณแบบนี้คือความถี่ของช่องสัญญาณแต่ละช่องจะไม่ตรงกับระบบเดิม ทำให้เมื่อ

เลือกใช้การจัดช่องแบบนี้ด้าน Access Channel ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการ Interface สัญญาณเข้ากับอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณใหม่ทั้งหมด แต่ถ้าเลือกใช้การจัดกลุ่มช่องสัญญาณ ด้าน Access Channel ไม่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการ Interface สัญญาณเข้ากับอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณใหม่แต่ทำการเพิ่มเฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ตรงกับความถี่ของระบบเดิมเท่านั้น

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทั้งหมดที่ผ่านมาจะพบว่าการจัดกลุ่มช่องสัญญาณทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ลดลงและจากการจำลองแบบโดยการเปลี่ยนค่ากำลังของสัญญาณด้านอินพุตก็พบว่าหลังจากการจัดกลุ่มใหม่ทำให้สามารถที่จะส่งกำลังของสัญญาณได้สูงขึ้น, ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ลดลง, ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ไกลมากขึ้นและสำคัญที่สุดก็คือทำให้มีความจุของข้อมูลในเครือข่ายสูงขึ้นและเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน โดยมีต้นทุนในการปรับปรุงเครือข่ายที่ต่ำเนื่องจากการเป็นการปรับปรุงเครือข่ายในส่วนของอุปกรณ์ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงด้านเคเบิลที่ใช้ต้นทุนสูง

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz) โดยการปรับระยะห่างของช่องสัญญาณเป็น 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz สามารถสรุปเป็นข้อๆได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing สูงขึ้น โดยจะมีค่าสูงมากเมื่อช่องสัญญาณอยู่ข้างเคียงกันและจะค่อยๆลดลงเมื่อช่องสัญญาณนั้นอยู่ห่างออกไป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shifted Fiber (DSF) และ Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZ-DSF) พบว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZ-DSF) มีประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing ต่ำกว่าและมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานกับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้งานกับเครือข่ายระยะไกลและมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแคบๆ

2. การเพิ่มกำลังของสัญญาณด้านอินพุตให้สูงขึ้นเพื่อส่งสัญญาณในระยะทางที่ไกลมากขึ้นจะทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น นอกจากนั้นระยะห่างของช่องสัญญาณที่ลดลงก็ยังส่งผลทำให้ผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้นอีก

3. เมื่อกำหนดให้กำลังของสัญญาณด้านอินพุตเท่ากับ 10 dBm และระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 100 กิโลเมตรจะพบว่ากำลังของสัญญาณของ Four-Wave Mixing ที่ภาครับและความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing จะสูงขึ้นเมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณลดลง

4. เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz และ 25 GHz จะพบว่าระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 25 GHz มีข้อได้เปรียบคือมีช่องสัญญาณจำนวนมากทำให้มีแบนด์วิดธ์ของเครือข่ายที่สูง แต่มีข้อเสียเปรียบที่แหล่งกำเนิดสัญญาณแสงและอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณต้องมีไลน์วิคท์ที่แคบมากทำให้อุปกรณ์มีราคาแพง นอกจากนั้นระบบนี้ยังได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing สูงกว่า ส่วนระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz มีช่องสัญญาณจำนวนน้อยกว่า แต่แหล่งกำเนิดสัญญาณแสงและอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณมีไลน์วิคท์ที่กว้างกว่าและได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ต่ำกว่า

5. เมื่อพิจารณาจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะพบว่าระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz มีความเหมาะสมนำมาใช้งานในอนาคตเป็นลำดับต่อไปเพื่อรองรับความ

ต้องการแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นแทนระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz ที่มีการใช้งานเชิงพาณิชย์กันอยู่ในปัจจุบันนี้ เนื่องจากมีความต้องการแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้น

6. ระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz จะมีช่องสัญญาณใช้งานเพิ่มขึ้นจากระบบเดิมที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz ประมาณ 2 เท่า ส่วนผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เพิ่มขึ้น ถูกแก้ไขด้วยวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ โดยการแบ่งกลุ่มช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่มระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz จำนวนช่องสัญญาณต่อกลุ่มเท่ากับ 16 ช่องสัญญาณโดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz ซึ่งทำให้ระบบมีช่องสัญญาณใช้งานเพิ่มขึ้นจากเดิมจำนวน 24 ช่องสัญญาณและความจุของข้อมูลในเครือข่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 60% และนอกจากจะทำให้กำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing และความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ลดลง ก็ยังสามารถที่จะส่งกำลังของสัญญาณอินพุตได้สูงขึ้น, ระยะทางระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงไกลมากขึ้นและสำคัญที่สุดก็คือทำให้ความจุของข้อมูลในเครือข่ายสูงขึ้น โดยมีต้นทุนในการปรับปรุงเครือข่ายที่ต่ำ เนื่องจากเป็นการปรับปรุงเครือข่ายในส่วนของอุปกรณ์ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงด้านเคเบิลที่ใช้ต้นทุนสูง

7. เมื่อพิจารณาระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz – 196.00 THz) ที่มีช่องสัญญาณใช้งาน 64 ช่องสัญญาณเท่ากัน พบว่าวิธีการจัดกลุ่มช่องสัญญาณแบบการแบ่งกลุ่มช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่ม มีระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz และมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz จะได้รับผลกระทบของ Four-Wave Mixing ต่ำกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 60 GHz เท่ากัน นอกจากนั้นยังมีช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับระบบเดิมด้วย

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการพัฒนาต่อไป

การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบด้วยวิธีง่ายๆ โดยกำหนดให้กำลังของสัญญาณอินพุตของทุกช่องสัญญาณเท่ากันซึ่งในระบบที่ใช้งานจริงนั้นค่ากำลังของสัญญาณอินพุตของแต่ละช่องสัญญาณอาจไม่เท่ากันและทำให้ผลกระทบของ Four-Wave mixing เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างนี้ไม่มี ความยืดหยุ่นมากนัก จึงอาจหาวิธีที่สามารถรองรับค่ากำลังของสัญญาณอินพุตที่ไม่เท่ากันนี้ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rajiv Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, “**Optical Networks: A Practical Perspective**” Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.
- [2] R.W. Tkach, A.R. Chraplyvy and Fabrizio Forghieri, “Four-Photon Mixing and High-Speed WDM System” **Light Wave Technology**. 1995, vol 13, pp 841-849
- [3] Weishu Wu, Pochi Yeh and Sien Chi, “Phase Conjugation by Four-Wave Mixing in Single Mode Fibers” **IEEE Photon.Technol.Lett.**, 1994, vol 6, pp 1448-1450
- [4] L. Zhang and J.Tang, “Label-Switching Architecture for IP Traffic over WDM Network” **IEEE Proc.-Commun.** , 2000, vol 147, pp 269-276
- [5] Kiyoshi Nosu, “**Optical FDM Network Technologies**”, Artech House Inc., 1997
- [6] Amnon Yariv, “**Optical Electronics Fourth Edition**”, Rinehart and Winston Inc., 1991
- [7] A.V.Ramprasad, M.Meenakshi, G.Geetha and R.Satheesh Kumar, “Suppression of Four Wave Mixing Crosstalk Components in DWDM Optical Systems”, **Wireless and Optical Communications Networks**, 2006, IFIP International Conference on 11-13 April 2006
- [8] Nikolai Biryukov, Oleg Tytarchuk and Nataliya Triska, “Evaluation of Four-Wave Mixing Products in C-Range”, **Transparent Optical Networks, 2002. Proceedings of the 2002 4th International Conference on 21-25 April 2002**, Vol. 1, pp 229-232
- [9] Yongqian Liu, Sergey Burtsev, Stephen Hegarty, Rachel Mozdy, Martin Hempstead and Richard Smart, “Four-Wave Mixing in EDFAs”, **Optical Fiber Communication Conference on 7-10 March 2000, Vol.2**, pp 111-113
- [10] Stamatios V. Kartalopoulos, “**DWDM Networks, Device and Technology**” John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2003.
- [11] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบุลย์, “พัฒนาการของการออกแบบเส้นใยนำแสง”, Computer and Electronic World, ตุลาคม, 2001
- [12] รศ.ดร.อริคม ฤกษ์บุตร, “เทคโนโลยี DWDM เส้นทางขนานสำหรับการเพิ่ม Bit Rate” ห้องวิจัยเส้นใยแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- [13] สมบัติ เหมือนนาค และสุทธิชัย นพนาถิพงษ์, “การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz” **วิศวกรรมสาร- ม.ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 พฤษภาคม- มิถุนายน 2550**, หน้า 321 - 331

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ความยาวคลื่นของช่องสัญญาณในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM
ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5, 25, 50, 100 และ 200 GHz

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
192.1000	1560.61	1	1	1	1	1
192.1125	1560.51	2				
192.1250	1560.41	3	2			
192.1375	1560.31	4				
192.1500	1560.20	5	3	2		
192.1625	1560.10	6				
192.1750	1560.00	7	4			
192.1875	1559.90	8				
192.2000	1559.79	9	5	3	2	
192.2125	1559.69	10				
192.2250	1559.59	11	6			
192.2375	1559.49	12				
192.2500	1559.39	13	7	4		
192.2625	1559.29	14				
192.2750	1559.19	15	8			
192.2875	1559.09	16				
192.3000	1558.98	17	9	5	3	2
192.3125	1558.88	18				
192.3250	1558.78	19	10			
192.3375	1558.68	20				
192.3500	1558.58	21	11	6		
192.3625	1558.48	22				
192.3750	1558.38	23	12			
192.3875	1558.28	24				
192.4000	1558.17	25	13	7	4	
192.4125	1558.07	26				
192.4250	1557.97	27	14			
192.4375	1557.87	28				
192.4500	1557.77	29	15	8		
192.4625	1557.67	30				
192.4750	1557.57	31	16			
192.4875	1557.47	32				
192.5000	1557.36	33	17	9	5	3
192.5125	1557.26	34				
192.5250	1557.16	35	18			
192.5375	1557.06	36				
192.5500	1556.96	37	19	10		
192.5625	1556.86	38				
192.5750	1556.76	39	20			
192.5875	1556.66	40				
192.6000	1556.55	41	21	11	6	

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
192.6125	1556.46	42				
192.6250	1556.35	43	22			
192.6375	1556.25	44				
192.6500	1556.15	45	23	12		
192.6625	1556.05	46				
192.6750	1555.95	47	24			
192.6875	1555.85	48				
192.7000	1555.75	49	25	13	7	4
192.7125	1555.65	50				
192.7250	1555.55	51	26			
192.7375	1555.45	52				
192.7500	1555.34	53	27	14		
192.7625	1555.24	54				
192.7750	1555.14	55	28			
192.7875	1555.04	56				
192.8000	1554.94	57	29	15	8	
192.8125	1554.84	58				
192.8250	1554.74	59	30			
192.8375	1554.64	60				
192.8500	1554.54	61	31	16		
192.8625	1554.44	62				
192.8750	1554.34	63	32			
192.8875	1554.24	64				
192.9000	1554.13	65	33	17	9	5
192.9125	1554.03	66				
192.9250	1553.93	67	34			
192.9375	1553.83	68				
192.9500	1553.73	69	35	18		
192.9625	1553.63	70				
192.9750	1553.53	71	36			
192.9875	1553.43	72				
193.0000	1553.33	73	37	19	10	
193.0125	1553.23	74				
193.0250	1553.13	75	38			
193.0375	1553.03	76				
193.0500	1552.93	77	39	20		
193.0625	1552.83	78				
193.0750	1552.73	79	40			
193.0875	1552.63	80				
193.1000	1552.52	81	41	21	11	6
193.1125	1552.42	82				
193.1250	1552.32	83	42			
193.1375	1552.22	84				
193.1500	1552.12	85	43	22		
193.1625	1552.02	86				
193.1750	1551.92	87	44			
193.1875	1551.82	88				
193.2000	1551.72	89	45	23	12	
193.2125	1551.62	90				
193.2250	1551.52	91	46			
193.2375	1551.42	92				

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
193.2500	1551.32	93	47	24		
193.2625	1551.22	94				
193.2750	1551.12	95	48			
193.2875	1551.02	96				
193.3000	1550.92	97	49	25	13	7
193.3125	1550.82	98				
193.3250	1550.72	99	50			
193.3375	1550.62	100				
193.3500	1550.52	101	51	26		
193.3625	1550.42	102				
193.3750	1550.32	103	52			
193.3875	1550.22	104				
193.4000	1550.12	105	53	27	14	
193.4125	1550.02	106				
193.4250	1549.92	107	54			
193.4375	1549.82	108				
193.4500	1549.72	109	55	28		
193.4625	1549.62	110				
193.4750	1549.52	111	56			
193.4875	1549.42	112				
193.5000	1549.32	113	57	29	15	8
193.5125	1549.22	114				
193.5250	1549.12	115	58			
193.5375	1549.02	116				
193.5500	1548.91	117	59	30		
193.5625	1548.81	118				
193.5750	1548.71	119	60			
193.5875	1548.61	120				
193.6000	1548.51	121	61	31	16	
193.6125	1548.41	122				
193.6250	1548.31	123	62			
193.6375	1548.21	124				
193.6500	1548.11	125	63	32		
193.6625	1548.01	126				
193.6750	1547.92	127	64			
193.6875	1547.82	128				
193.7000	1547.72	129	65	33	17	9
193.7125	1547.62	130				
193.7250	1547.52	131	66			
193.7375	1547.42	132				
193.7500	1547.32	133	67	34		
193.7625	1547.22	134				
193.7750	1547.12	135	68			
193.7875	1547.02	136				
193.8000	1546.92	137	69	35	18	
193.8125	1546.82	138				
193.8250	1546.72	139	70			
193.8375	1546.62	140				
193.8500	1546.52	141	71	36		
193.8625	1546.42	142				

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
193.8750	1546.32	143	72			
193.8875	1546.22	144				
193.9000	1546.12	145	73	37	19	10
193.9125	1546.02	146				
193.9250	1545.92	147	74			
193.9375	1545.82	148				
193.9500	1545.72	149	75	38		
193.9625	1545.62	150				
193.9750	1545.52	151	76			
193.9875	1545.42	152				
194.0000	1545.32	153	77	39	20	
194.0125	1545.22	154				
194.0250	1545.12	155	78			
194.0375	1545.02	156				
194.0500	1544.92	157	79	40		
194.0625	1544.82	158				
194.0750	1544.73	159	80			
194.0875	1544.63	160				
194.1000	1544.53	161	81	41	21	11
194.1125	1544.43	162				
194.1250	1544.33	163	82			
194.1375	1544.23	164				
194.1500	1544.13	165	83	42		
194.1625	1544.03	166				
194.1750	1543.93	167	84			
194.1875	1543.83	168				
194.2000	1543.73	169	85	43	22	
194.2125	1543.63	170				
194.2250	1543.53	171	86			
194.2375	1543.43	172				
194.2500	1543.33	173	87	44		
194.2625	1543.23	174				
194.2750	1543.14	175	88			
194.2875	1543.04	176				
194.3000	1542.94	177	89	45	23	12
194.3125	1542.84	178				
194.3250	1542.74	179	90			
194.3375	1542.64	180				
194.3500	1542.54	181	91	46		
194.3625	1542.44	182				
194.3750	1542.34	183	92			
194.3875	1542.24	184				
194.4000	1542.14	185	93	47	24	
194.4125	1542.04	186				
194.4250	1541.95	187	94			
194.4375	1541.85	188				
194.4500	1541.75	189	95	48		
194.4625	1541.65	190				
194.4750	1541.55	191	96			
194.4875	1541.45	192				

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
194.5000	1541.35	193	97	49	25	13
194.5125	1541.25	194				
194.5250	1541.15	195	98			
194.5375	1541.05	196				
194.5500	1540.95	197	99	50		
194.5625	1540.85	198				
194.5750	1540.76	199	100			
194.5875	1540.66	200				
194.6000	1540.56	201	101	51	26	
194.6125	1540.56	202				
194.6250	1540.36	203	102			
194.6375	1540.26	204				
194.6500	1540.16	205	103	52		
194.6625	1540.06	206				
194.6750	1539.97	207	104			
194.6875	1539.87	208				
194.7000	1539.77	209	105	53	27	14
194.7125	1539.67	210				
194.7250	1539.57	211	106			
194.7375	1539.47	212				
194.7500	1539.37	213	107	54		
194.7625	1539.27	214				
194.7750	1539.18	215	108			
194.7875	1539.08	216				
194.8000	1538.98	217	109	55	28	
194.8125	1538.88	218				
194.8250	1538.78	219	110			
194.8375	1538.68	220				
194.8500	1538.58	221	111	56		
194.8625	1538.48	222				
194.8750	1538.39	223	112			
194.8875	1538.29	224				
194.9000	1538.19	225	113	57	29	15
194.9125	1538.09	226				
194.9250	1537.99	227	114			
194.9375	1537.89	228				
194.9500	1537.79	229	115	58		
194.9625	1537.69	230				
194.9750	1537.60	231	116			
194.9875	1537.50	232				
195.0000	1537.40	233	117	59	30	
195.0125	1537.30	234				
195.0250	1537.20	235	118			
195.0375	1537.10	236				
195.0500	1537.00	237	119	60		
195.0625	1536.91	238				
195.0750	1536.81	239	120			
195.0875	1536.71	240				
195.1000	1536.61	241	121	61	31	16
195.1125	1536.51	242				

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
195.1250	1536.42	243	122			
195.1375	1536.32	244				
195.1500	1536.22	245	123	62		
195.1625	1536.12	246				
195.1750	1536.02	247	124			
195.1875	1536.92	248				
195.2000	1535.82	249	125	63	32	
195.2125	1536.72	250				
195.2250	1535.63	251	126			
195.2375	1535.53	252				
195.2500	1535.43	253	127	64		
195.2625	1535.34	254				
195.2750	1535.24	255	128			
195.2875	1535.14	256				
195.3000	1535.04	257	129	65	33	17
195.3125	1534.94	258				
195.3250	1534.84	259	130			
195.3375	1534.74	260				
195.3500	1534.64	261	131	66		
195.3625	1534.54	262				
195.3750	1534.45	263	132			
195.3875	1534.35	264				
195.4000	1534.25	265	133	67	34	
195.4125	1534.15	266				
195.4250	1534.06	267	134			
195.4375	1533.96	268				
195.4500	1533.86	269	135	68		
195.4625	1533.76	270				
195.4750	1533.67	271	136			
195.4875	1533.57	272				
195.5000	1533.47	273	137	69	35	18
195.5125	1533.37	274				
195.5250	1533.27	275	138			
195.5375	1533.17	276				
195.5500	1533.07	277	139	70		
195.5625	1532.97	278				
195.5750	1532.88	279	140			
195.5875	1532.78	280				
195.6000	1532.68	281	141	71	36	
195.6125	1532.58	282				
195.6250	1532.49	283	142			
195.6375	1532.39	284				
195.6500	1532.29	285	143	72		
195.6625	1532.19	286				
195.6750	1532.10	287	144			
195.6875	1532.00	288				
195.7000	1531.90	289	145	73	37	19
195.7125	1531.80	290				
195.7250	1531.71	291	146			
195.7375	1531.61	292				

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Channel Number				
		12.5GHz	25GHz	50GHz	100GHz	200GHz
195.7500	1531.51	293	147	74		
195.7625	1531.41	294				
195.7750	1531.32	295	148			
195.7875	1531.22	296				
195.8000	1531.12	297	149	75	38	
195.8125	1531.02	298				
195.8250	1530.92	299	150			
195.8375	1530.82	300				
195.8500	1530.72	301	151	76		
195.8625	1530.62	302				
195.8750	1530.53	303	152			
195.8875	1530.43	304				
195.9000	1530.33	305	153	77	39	20
195.9125	1530.23	306				
195.9250	1530.14	307	154			
195.9375	1530.04	308				
195.9500	1529.94	309	155	78		
195.9625	1529.84	310				
195.9750	1529.75	311	156			
195.9875	1529.65	312				
196.0000	1529.55	313	157	79	40	

ภาคผนวก ข.

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

(1) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.1 – 4.5

Parameter	Symbol	Value
Wavelength of Light	λ	1550 nm
Speed of Light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km
Number of Amplified Spans	N_A	1
Fiber Chromatic Dispersion	D	17 ps/nm km
Dispersion Slope	$\frac{dD}{d\lambda}$	0.06 ps/nm ² km
Zero Dispersion Frequency	f_0	193.10 THz

Note: Vary Frequency (f_p, f_p, fk) in Range 192.10 – 196.00 THZ

(2) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.6

Parameter	Symbol	Value
Wavelength of Light	λ	1550 nm
Speed of Light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km
Number of amplified spans	N_A	1

Note: Vary Fiber Chromatic Dispersion (D) in Value: 17, 15, 4.5, 1 ps/nm km

(3) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.7

Parameter	Symbol	Value
Refractive Index	n	1.45
Wavelength of Light	λ	1550 nm
Speed of Light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Effective Area of Fiber	A_{eff}	$50 \mu\text{m}^2$
Nonlinear susceptibility	$\chi^{(3)}$	4×10^{-15} [esu]
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km
The Degeneracy factor	d	$d = 3$ เมื่อ $i = j$ $d = 6$ เมื่อ $i \neq j$
Number of amplified spans	N_A	1
Fiber Chromatic Dispersion	D	17 ps/nm km

Note: Vary Input Power (P_{in}) in Value 0.001W - 0.03163W (0 dBm – 15 dBm)

(4) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.8 – 4.9

Parameter	Symbol	Value
Input Power	P_{in}	0.01W (10 dBm)
Refractive Index	n	1.45
Wavelength of light	λ	1550 nm
Speed of light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Effective Area of Fiber	A_{eff}	$50 \mu\text{m}^2$
Nonlinear susceptibility	$\chi^{(3)}$	4×10^{-15} [esu]
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km
The Degeneracy factor	d	$d = 3$ เมื่อ $i = j$ $d = 6$ เมื่อ $i \neq j$
Number of amplified spans	N_A	1
Fiber Chromatic Dispersion	D	17 ps/nm km

Note: Vary Frequency (f_p, f_p, f_k) in Range 192.10 THz – 196.00 THz (1529.55 nm - 1560.61 nm) for Channel Space: 200,100,50,25,12.5 GHz

(5) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.10 – 4.11

Parameter	Symbol	Value
Input Power	P_{in}	0.01W (10 dBm)
Refractive Index	n	1.45
Wavelength of light	λ	1550 nm
Speed of light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Effective Area of Fiber	A_{eff}	$50 \mu\text{m}^2$
Nonlinear susceptibility	$\chi^{(3)}$	4×10^{-15} [esu]
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km
The Degeneracy factor	d	$d = 3$ เมื่อ $i = j$ $d = 6$ เมื่อ $i \neq j$
Number of amplified spans	N_A	1
Fiber Chromatic Dispersion	D	17 ps/nm km

Note: Vary Frequency (f_p, f_p, f_k) in Range 192.10 THz – 196.00 THz (1529.55 nm - 1560.61 nm) for Channel Space 50 GHz.

(6) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.12

Parameter	Symbol	Value
Input Power	P_{in}	0.01W (10 dBm)
Refractive Index	n	1.45
Wavelength of light	λ	1550 nm
Speed of light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Effective Area of Fiber	A_{eff}	$50 \mu\text{m}^2$
Nonlinear susceptibility	$\chi^{(3)}$	4×10^{-15} [esu]
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km

Parameter	Symbol	Value
The Degeneracy factor	d	$d = 3$ เมื่อ $i = j$ $d = 6$ เมื่อ $i \neq j$
Number of amplified spans	N_A	1
Fiber Chromatic Dispersion	D	17 ps/nm km

Note: Vary Frequency (f_r, f_p, f_k) in Range 192.10 THz – 196.00 THz (1529.55 nm - 1560.61 nm for Channel Space 50 GHz with Usable Channel 100%, 88%, 80%)

(7) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณรูปที่ 4.13

Parameter	Symbol	Value
Input Power	P_{in}	0.01W (10 dBm)
Refractive Index	n	1.45
Wavelength of light	λ	1550 nm
Speed of light	c	3×10^8 m/s
Fiber Length	L	100 km
Effective Area of Fiber	A_{eff}	$50 \mu\text{m}^2$
Nonlinear susceptibility	$\chi^{(3)}$	4×10^{-15} [esu]
Fiber Loss Coefficients	α	0.21 dB/km
The Degeneracy factor	d	$d = 3$ เมื่อ $i = j$ $d = 6$ เมื่อ $i \neq j$
Number of amplified spans	N_A	1
Fiber Chromatic Dispersion	D	17 ps/nm km

Note: Vary Frequency (f_r, f_p, f_k) in Range 192.10 THz – 196.00 THz (1529.55 nm - 1560.61 nm for Channel Space 50 GHz and 60 GHz with Usable Channel 80%)

ภาคผนวก ค.

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] สมบัติ เหมือนนาค และสุทธิชัย นพนาคีพงษ์, “การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสาร DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz” วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 พฤษภาคม- มิถุนายน 2550, หน้า 321 - 331

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสมบัติ เหมือนนาค
วัน เดือน ปีเกิด	7 พฤษภาคม 2519 ที่จังหวัดนนทบุรี
ที่อยู่	225/139 หมู่ที่ 4 ซอยแจ้งวัฒนะ6 (เทพไพบราณีนิมิตร) ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงตลาดบางเขน เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
ประวัติการศึกษา	2543 อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม (เกียรตินิยมอันดับสอง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2544 – 2547	วิศวกรประจำฝ่ายตรวจสอบและควบคุมโครงข่ายกลาง ศูนย์บริหารโครงข่ายกลาง บริษัททรูคอร์ปอเรชัน จำกัด (มหาชน)
พ.ศ. 2547-ปัจจุบัน	วิศวกรอาวุโสประจำฝ่ายตรวจสอบและควบคุมโครงข่ายกลาง ศูนย์บริหารโครงข่ายกลาง บริษัททรูคอร์ปอเรชัน จำกัด (มหาชน)