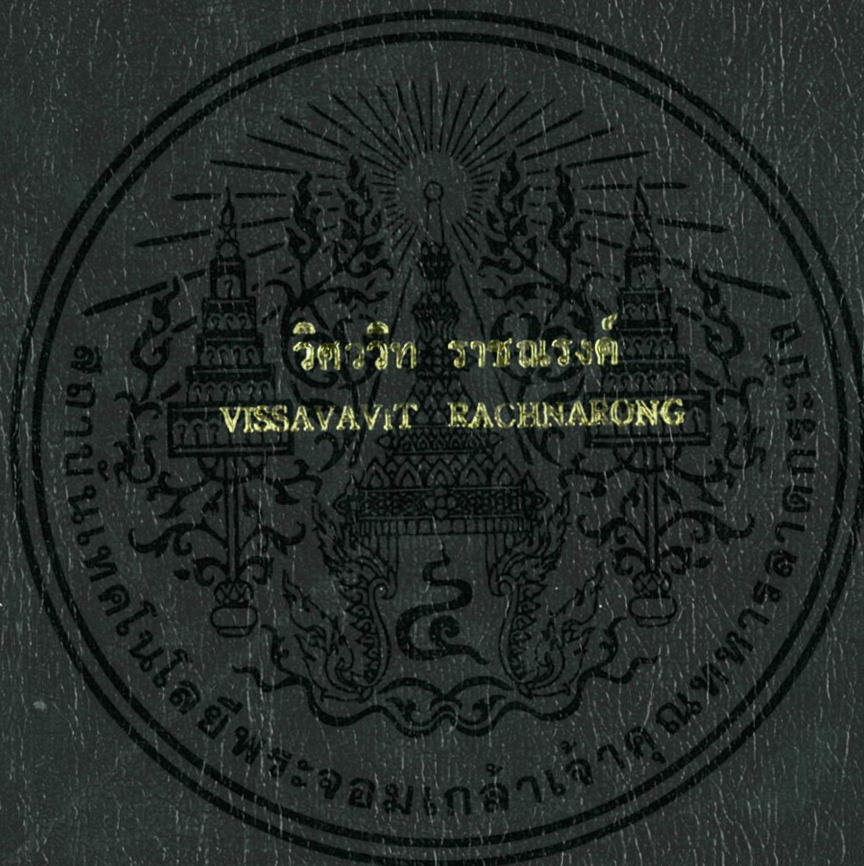


การศึกษาวិธีการจัดระบบส่งสัญญาณแบบ ERAUS  
เพื่อปรับปรุงระบบส่งสัญญาณ DWDM

A STUDY OF ERAUS TECHNIQUE TO IMPROVE  
THE DWDM TRANSMISSION SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงงานตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-EN-M-010-015

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS  
เพื่อปรับปรุงระบบส่งสัญญาณ DWDM

A STUDY OF ERAUS TECHNIQUE TO IMPROVE  
THE DWDM TRANSMISSION SYSTEMS



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**117894**  
วัน,เดือน,ปี.....**22 ส.ค. 2554**

b. 12350321  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา พ.ศ. 2554 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง KMITL 2011-EN-M-010-015 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF ERAUS TECHNIQUE TO IMPROVE  
THE DWDM TRANSMISSION SYSTEMS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2011**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMUTL 2011-EN-M-010-015  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2011**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อผู้ใดที่ละเมิดลิขสิทธิ์ประการใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS เพื่อปรับปรุงระบบ  
ส่งสัญญาณ DWDM

Thesis Title A STUDY OF ERAUS TECHNIQUE TO IMPROVE THE DWDM  
TRANSMISSION SYSTEMS

นักศึกษา นายวิศวิท ราชณรงค์

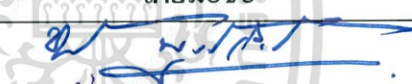




รหัสประจำตัว 52611226

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2011-EN-M-010-015

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์	
รศ.ดร.สุวิพล สิริทธิชิวภาค	
รศ.ดร.โกสินทร์ จ้างนงไทย	
ดร.สถาพร พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2554 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น วันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2554 ขณดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS เพื่อปรับปรุงระบบส่งสัญญาณ DWDM
นักศึกษา	นายวิศวิทย์ ราชณรงค์
รหัสนักศึกษา	52611226
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Alternative RUS (ARUS), Repeated Alternate US (RAUS), Equally Spaced ARUS (EARUS) และ Equally Spaced RAUS (ERAUS) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจาก Four-Wave Mixing ซึ่งพัฒนามาจากเทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES), Unequally Spaced (US), Repeated Unequally Spaced (RUS) และ Equally Spaced RUS (ERUS) โดยพิจารณาการจัดระยะห่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55-1560.61 nm ของสัญญาณ Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) ที่ได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณชนิด Erbium Dope Fiber Amplifier (EDFA) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS มีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS ที่  $f_{FWM} = f_i$  ดังนั้นเทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS สามารถปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของการเกิดผลกระทบจาก FWM และกำลังของ FWM ให้มีค่าลดลง ในระบบการส่งสัญญาณ DWDM

<b>Thesis Title</b>	A Study of ERAUS Technique to Improve The DWDM Transmission Systems
<b>Student</b>	Mr. Vissavavit Rachnarong
<b>Student ID.</b>	52611226
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suthichai Noppanakeepong

### ABSTRACT

This thesis proposes the new techniques alternative RUS (ARUS), repeated alternate US (RAUS), equally spaced ARUS (EARUS) and equally spaced RAUS (ERAUS) to arrange the channel allocation to avoid the effect of four-wave mixing (FWM) due to the fibers nonlinear. We proposed new techniques to space channel allocation of ITU-T G.694.1 standard. By developing techniques of equally spaced (ES), unequally spaced (US), repeated unequally spaced (RUS) and equally spaced RUS (ERUS) channel allocations. This system, we consider the generated wavelength of erbium dope fiber amplifier (EDFA) between 1529.55-1560.61 nm for dense wavelength division multiplexing (DWDM) signals. From the simulation results, It was found the new proposed techniques ARUS, RAUS, EARUS and ERAUS are the better performance of the efficiency of FWM lights ( $f_{FWM} = f_i$ ). By comparing the proposed techniques with ES, RUS and ERUS channel allocations. The new proposed techniques can be improved the bit error probabilities and decreases the FWM lights power in DWDM transmission systems.

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุทธิชัย นพนาดีพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ทั้งหลายของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจให้แรงผลักดันที่ทำให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นในการทำวิทยานิพนธ์ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนๆภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบพระคุณให้บิดามารดา และญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพของข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้มอบ “ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์” ให้แก่ข้าพเจ้า

นาย วิสววิท ราชณรงค์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 รายละเอียดและเนื้อหาในบทต่างๆ.....	4
บทที่ 2 ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 Stimulated Brillouin Scattering.....	11
2.3 Stimulated Raman Scattering.....	13
2.4 Self-Phase Modulation.....	17
2.5 Cross-Phase Modulation.....	21
2.6 Four-Wave Mixing.....	23
บทที่ 3 ผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบส่งสัญญาณ DWDM.....	32
3.1 กล่าวนำ.....	32
3.2 ผลกระทบที่เกิดจาก Four-Wave Mixing.....	32
3.3 การจัดแถบความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management).....	35
3.4 การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบส่งสัญญาณ DWDM.....	38
3.4.1 การใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
3.4.2 เทคนิคการจัดกลุ่มของสัญญาณ..... 39  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ.....	39
3.4.3.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES).....	39
3.4.3.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US).....	40
3.4.3.3 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS).....	42
3.4.3.4 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RUS (ERUS).....	42
3.4.3.5 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced RUS (URUS).....	44
3.4.4 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมา....	45
3.4.4.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Alternative RUS (ARUS).....	45
3.4.4.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Alternate US (RAUS).....	49
3.4.4.3 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced ARUS (EARUS).....	54
3.4.4.4 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RAUS (ERAUS).....	57
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	63
4.1 กล่าวนำ.....	63
4.2 การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing.....	63
4.2.1 สมการและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	63
4.2.2 จำนวนของ Four-Wave Mixing.....	64
4.2.3 ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก Four-Wave Mixing.....	66
4.2.4 กำลังของ Four-Wave Mixing.....	70
4.2.5 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก Four-Wave Mixing.....	71
4.3 บทสรุป.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ความยาวคลื่นของช่องสัญญาณในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5, 25, 50, 100 และ 200 GHz.....	84
ภาคผนวก ข. จำนวนของ FWM.....	91
ภาคผนวก ค. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	98



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	40
3.2 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ US ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	41
3.3 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	42
3.4 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	43
3.5 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ URUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	45
3.6 กลุ่มของ base unit จากการหาค่าความน่าจะเป็นที่ระยะห่างช่องสัญญาณเกิดขึ้น ไม่ซ้ำกัน.....	47
3.7 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	49
3.8 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 2 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	52
3.9 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 3 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	52
3.10 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 4 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	52
3.11 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 5 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	53
3.12 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 6 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	53
3.13 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 7 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	53
3.14 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	57
3.15 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 2 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	60
3.16 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 3 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	60
3.17 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 4 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	60
3.18 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 5 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	61

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.19 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 6 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	61
3.20 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 7 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1.....	61
5.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดผลกระทบของ FWM จากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ.....	78



# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง ( $L$ ) กับระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ( $l$ ).....	8
2.2 กำลังของสัญญาณเปรียบเทียบกับระยะทางของระบบสื่อสารสัญญาณ.....	8
2.3 ระยะทางประสิทธิผลของระบบสื่อสารสัญญาณเปรียบเทียบกับระยะทาง.....	8
2.4 การเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณและระยะทางประสิทธิผล ( $PL_e$ ) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ.....	9
2.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มของแสงกับพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยแก้วนำแสง.....	10
2.6 ผลกระทบของ SRS เมื่อกำลังของสัญญาณจากช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำถูกถ่ายเทไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า.....	14
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ.....	14
2.8 กำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก Stimulated Raman Scattering เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm และระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่ากับ 80 กิโลเมตร.....	16
2.9 การเกิดขึ้นของ Four-Wave Mixing ที่มีสาเหตุจากการเหนี่ยวนำของ 3 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากันที่ความถี่เชิงมุม $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ .....	24
2.10 ค่ากำลังของสัญญาณสูงสุดต่อช่องสัญญาณเมื่อได้รับผลกระทบจาก Four-Wave Mixing บนเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Standard Single-Mode และ Dispersion Shift Fiber โดยมีระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเท่ากับ 80 กิโลเมตร.....	29
3.1 รูปแบบการกระจายของความถี่ของแสงจากผลกระทบของปรากฏการณ์ FWM.....	33
3.2 ตัวอย่างคุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	36
3.3 สเปคตรัมของอุปกรณ์ที่มีผลติเฟิลิกสัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm.....	37
3.4 รูปแบบการชดเชยค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันด้วย Dispersion Compensating Fiber.....	38
3.5 รูปแบบการจัดช่องสัญญาณใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก FWM.....	39
3.6 การจัดช่องสัญญาณแบบ ES.....	40
3.7 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES.....	40

3.8 นี้เป็นการจัดช่องสัญญาณแบบ US ใช้กรณีเมื่อการรบกวนของแสงนั้น ไม่อนุญาตให้มันไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ US.....	41
3.10 การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS.....	42
3.11 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS.....	43
3.12 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS.....	43
3.13 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS.....	44
3.14 การจัดช่องสัญญาณแบบ URUS.....	44
3.15 การจัดช่องสัญญาณแบบ ARUS.....	46
3.16 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ARUS.....	46
3.17 จำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่ม จากการจัดช่องสัญญาณ แบบ RUS.....	48
3.18 การจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS.....	50
3.19 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RAUS.....	51
3.20 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณ RAUS โดยการสลับกลุ่ม 1 – 7 กลุ่ม.....	54
3.21 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS.....	55
3.22 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ EARUS.....	55
3.23 จำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่ม ในการจัดช่องสัญญาณ แบบ ERUS.....	56
3.24 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS.....	58
3.25 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS.....	59
3.26 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยการสลับ 1 - 7 กลุ่ม.....	59
4.1 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ARUS.....	64
4.2 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ RAUS.....	65
4.3 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS และ EARUS.....	65
4.4 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS และ ERAUS.....	66
4.5 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ARUS.....	67
4.6 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ RAUS.....	68

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS และ EARUS..... 68

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS และ ERAUS..... 69
4.9	กำลังของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS และ RAUS..... 70
4.10	กำลังของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS, EARUS และ ERAUS... 71
4.11	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES..... 72
4.12	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS... 72
4.13	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ARUS. 72
4.14	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS. 73
4.15	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS. 73
4.16	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ EARUS..... 73
4.17	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS..... 73
4.18	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS และ RAUS..... 74
4.19	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS, EARUS และ ERAUS..... 74
5.1	ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS..... 76
5.2	กำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS..... 77
5.3	ความน่าจะเป็นบิดผิดพลาด จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS..... 77
5.4	กำลังของ FWM ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน..... 79

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเป็นสิ่งที่กำลังแพร่หลายในประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา เนื่องจากข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงที่ดีกว่าการสื่อสารด้วยตัวกลางชนิดอื่นๆ เช่น สาย Coaxial Cable ซึ่งในข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นก็ยังมีการพัฒนาในองค์ประกอบอื่นๆ ขึ้นมาเรื่อยๆ เพื่อสมรรถนะที่ดีขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

ซึ่งการพัฒนาอย่างหนึ่งที่เรานำมาทำการศึกษาวิจัยนี้ก็คือ ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) [1-2] ซึ่งพัฒนามาจากระบบส่งสัญญาณแบบ WDM (Wavelength Division Multiplexing) ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM นี้มีข้อดีคือ สามารถส่งสัญญาณแสงได้จำนวนมากผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณที่จะทำการส่งจากต้นทางไปยังปลายทางได้จำนวนมากขึ้น แต่ก็มีจำนวนแบนด์วิดท์ที่จำกัด เนื่องจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA (Erbium Dope Fiber Amplifier) [3-4] ที่มีช่วงของความยาวคลื่นของสัญญาณอยู่ในช่วง 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) จากแบนด์วิดท์ที่มีช่วงจำกัดนี้ก็ต้องการจัดสรรช่องสัญญาณให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการจัดช่องสัญญาณคือผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้น ทำให้ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM นี้สามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่จำกัด ซึ่งผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดต่อระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM รุนแรงที่สุดนั้นก็คือผลกระทบจาก FWM (Four-Wave Mixing) ผลกระทบของ FWM เกิดขึ้นจากความถี่ของช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันเกิดการรบกวนกันเกิดขึ้นทำให้การโพลาไรซ์ของแสงเกิดการไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น ทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมาไปแทรกสอดความถี่ของช่องสัญญาณที่ส่งไปยังปลายทาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณลดลง ซึ่งผลกระทบจาก FWM นี้จะเกิดขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงนั้นมีค่าที่ลดลง (การลดลงของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณนี้จะทำให้สามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนมากขึ้น) ทำให้เกิดผลกระทบของ FWM สูงขึ้น

จากการสังเกตของปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ที่จะทำอย่างไรที่จะทำให้สามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากขึ้นและเกิดผลกระทบจาก FWM ให้มีค่าน้อยที่สุดในระบบส่งสัญญาณ DWDM เพื่อที่จะเพิ่มสมรรถนะในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางให้ดีขึ้นในระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเกิด FWM ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณ DWDM ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่มีจำนวนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ที่ส่งผลให้สมรรถนะในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางที่ลดลง จึงได้มีการศึกษาวิธีที่จะลดผลกระทบจาก FWM เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆที่ส่งผลให้ผลกระทบของ FWM ลดลง และทำการปรับปรุงการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆนั้นให้ดีขึ้น ที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลงมากกว่าเดิม ที่ส่งผลให้ระบบในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางแบบ DWDM มีสมรรถนะที่ดีขึ้น

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระบบการสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM นั้นข้อดีก็คือสามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณได้จำนวนหลายช่องสัญญาณส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวทำให้เกิดผลคือสามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางได้ปริมาณมาก ในข้อดีนี้ก็ยังมีการพัฒนาให้สามารถช่องสัญญาณมากขึ้นอีก แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเพิ่มช่องสัญญาณนั้นก็คือผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นจาก FWM ที่ทำให้เป็นข้อจำกัดในการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ที่จำกัด เพราะฉะนั้นเราจึงได้มีการศึกษาการเกิดผลกระทบของ FWM ในการส่งสัญญาณจำนวนหลายช่องสัญญาณ เพื่อนำมาซึ่งวิธีในการลดผลกระทบของ FWM ในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

## 1.4 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้เราทำการศึกษาการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบระยะห่างไม่เท่ากัน (Unequally Spaced หรือ US) ในการจัดช่องสัญญาณ ซึ่งวิธีการแบบ US [5-8] ความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ไปแทรกสอดความถี่ของความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการส่งไปโดยตรง ทำให้ผลกระทบของ FWM ลดลงจากการจัดระยะห่างแบบเท่ากัน (Equally spaced หรือ ES) [9] ที่ความถี่ของ FWM นั้นเกิดขึ้นไปแทรกสอดความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการส่งไปโดยตรงทำให้เกิดผลกระทบจาก FWM ที่สูง จากการจัดช่องสัญญาณแบบ US ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ US เป็นการจัดระยะห่างแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) [10-12], Equally Spaced RUS (ERUS) และ Unequally spaced RUS (URUS) [13-14] ในการจัดช่องสัญญาณ แต่ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ US และ URUS จะสามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่น้อยกว่าการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS ในช่วงของความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 [15] ซึ่งในงานวิจัยนี้เราจึงไม่ได้นำมาทำการศึกษาในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ERUS โดยมีช่วงความถี่ที่เรากำลังศึกษาไว้ที่ 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแบนด์วิดท์ของระยะห่างแต่ละช่องสัญญาณที่แคบกว่าแบบ US ทำให้สามารถจุจำนวนช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากกว่าการจัดระยะห่างแบบ ES และทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ลดน้อยลงกว่าการจัดระยะห่างแบบ ES ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS ให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลงอีก จากการสลับกันของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงแบบไม่เท่ากันเรียกว่า Alternated Unequally Spaced (AUS) และวิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงแบบไม่เท่ากันเรียกว่า Alternative Unequally spaced (AtUS) ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานกับ RUS และ ERUS กลายเป็น Repeated Alternate Unequally Spaced (RAUS), Alternative Repeated Unequally spaced (ARUS), Equally Spaced RAUS (ERAUS) และ Equally Spaced ARUS (EARUS) [16-18] การจัดระยะห่างแบบ RAUS, ARUS, EARUS และ ERAUS นี้จะเกิดผลกระทบจาก FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS ดังนั้นเมื่อผลกระทบของ FWM ที่ลดลง จะทำให้สมรรถนะในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางที่ดีขึ้นตามมา

### 1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการลดผลกระทบของ FWM (ในบทความนี้เราพิจารณาผลกระทบของ FWM เป็นสิ่งสำคัญ เราจะไม่พิจารณาผลกระทบของ SPM (self-phase modulation), CPM (cross-phase modulation) และการเลื่อมลงของรูปคลื่น เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด [13-15]) ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ โดยทำการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ในช่วงของความยาวคลื่นที่ผลิตได้จากตัวขยายสัญญาณชนิด EDFA ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ในการศึกษาวิจัยนี้เราได้กำหนดระยะห่างช่องสัญญาณอยู่ที่ 50 GHz, 75 GHz, 100 GHz, 125 GHz และ 150 GHz (สาเหตุที่เลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง [1-2]) ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber (DSF) ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง ( $L$ ) = 80 km, สัมประสิทธิ์ของอัตราการลดทอน ( $\alpha$ ) = 0.2 dB/km, ดิสเพอร์ชัน ( $D_{DSF}$ ) = 0 ps/nm-km, ความชันของดิสเพอร์ชัน ( $dD/d\lambda_{DSF}$ ) = 0.06 ps/km/nm<sup>2</sup>, พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ ( $A_{eff}$ ) = 50  $\mu\text{m}^2$  และกำหนดให้ประสิทธิภาพควอนตัม ( $\eta$ ) ของ Avalanche Photodiode (APD) = 80 % [19-20] โดยแสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในรูปของประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่ FWM, กำลังของ FWM และความน่าจะเป็นที่เกิดผลกระทบจาก FWM ที่  $f_{FWM} = f_i$  เมื่อ  $f_{FWM}$  คือความถี่ของแสง FWM และ  $f_i$  คือความถี่ของสัญญาณแสงของแต่ละช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ FWM ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ในช่วงของความยาวคลื่นที่ผลิตได้จากตัวขยายสัญญาณชนิด EDFA ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆที่นำมาวิเคราะห์ รวมถึงวิธีที่เราทำการปรับปรุงขึ้นมา โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ต่างๆดังนี้

1. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของจำนวนความถี่ของ FWM ที่เกิดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ERUS และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RAUS, ARUS, ERAUS และ EARUS ที่  $f_{FWM} = f_i$
2. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ERUS และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RAUS, ARUS, ERAUS และ EARUS ที่  $f_{FWM} = f_i$
3. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลัง FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ERUS และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RAUS, ARUS, ERAUS และ EARUS ที่  $f_{FWM} = f_i$
4. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแนวโน้มที่จะเกิดผลกระทบของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ERUS และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RAUS, ARUS, ERAUS และ EARUS ที่  $f_{FWM} = f_i$

## 1.7 รายละเอียดเนื้อหาในบทต่างๆ

การศึกษานี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา, สมมติฐานของการศึกษา, แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย, ขอบเขตของการศึกษาวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงในระบบส่งสัญญาณ DWDM ประกอบด้วย Stimulated Brillouin Scattering (SBS), Stimulated Raman Scattering (SRS), Self-Phase Modulation (SPM), Cross-Phase Modulation (CPM) และ Four-Wave Mixing (FWM)

บทที่ 3 กล่าวถึงผลกระทบที่เกิดจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM เช่น ผลกระทบที่เกิดจาก FWM, วิธีการลดผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM โดยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีคุณสมบัติเฉพาะ, การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ และวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมา เป็นต้น

บทที่ 4 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากผลกระทบของ FWM โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ERUS และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RAUS, ARUS, ERAUS และ EARUS ที่  $f_{FWM} = f_i$  ในระบบส่งสัญญาณ DWDM เช่น จำนวนของความถี่ FWM ที่เกิดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ, ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM, กำลังของ FWM และความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลกระทบของ FWM เป็นต้น

บทที่ 5 สรุปผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบผลกระทบของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS กับการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RAUS, ARUS, ERAUS และ EARUS รวมถึงแนวทางในการพัฒนาต่อไป



## บทที่ 2

# ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง

### 2.1 กล่าวนำ

เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงมีความเข้มของแสงที่เหมาะสม ค่าดัชนีการหักเหของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงก็จะเป็นอิสระกับกำลังของสัญญาณแสง ทำให้โพลาไรเซชันของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงให้ผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้น แต่เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงมีความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับการส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นพร้อมกันในระบบสื่อสารสัญญาณระยะทางไกลๆ โดยผลกระทบที่เกิดจากความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้นคือค่าดัชนีการหักเหของแสงเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นส่งผลทำให้โพลาไรเซชันของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งผลจากปฏิกิริยาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงนี้สามารถเปลี่ยนข้อจำกัดที่สำคัญในระบบสื่อสารที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ 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 จะทำให้เฟสของสัญญาณเปลี่ยนแปลงและทำให้แถบของสเปกตรัมกว้างขึ้นนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าดีสเพอร์ชัน (Dispersion) เมื่อพัลส์ของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการกว้างออกและซ้อนทับกับพัลส์ข้างเคียงจะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างกัน

การเกิดขึ้นของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโนดในเครือข่ายและพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง ยิ่งระยะทางระหว่างโนดในเครือข่ายมีระยะทางห่างกันมากๆ ก็ยิ่งทำให้ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงมีความรุนแรงขึ้น ถึงแม้ว่าจะสามารถส่งสัญญาณได้ตลอดทั้งเครือข่ายแต่คุณภาพของสัญญาณก็จะลดลงเนื่องจากการลดทอนจากการสูญเสียภายในเส้นใยแก้วนำแสง แบบจำลองอย่าง

ง่ายในการพิจารณาผลกระทบนี้ เมื่อกำหนดให้กำลังงานของสัญญาณที่ค่าคงที่ตลอดระยะทาง ประสิทธิภาพ (Effective Length:  $L_e$ ) เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจกับผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงได้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.1

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

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

ซึ่งจะได้ระยะทางประสิทธิผลแสดงดังรูปที่ 2.2 และเขียนสมการได้ดังนี้

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

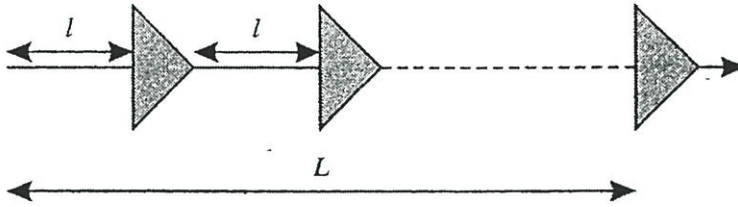
ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้  $\alpha = 0.232 \text{ dB/km}$  ที่ความยาวคลื่น  $1.55 \text{ } \mu\text{m}$

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

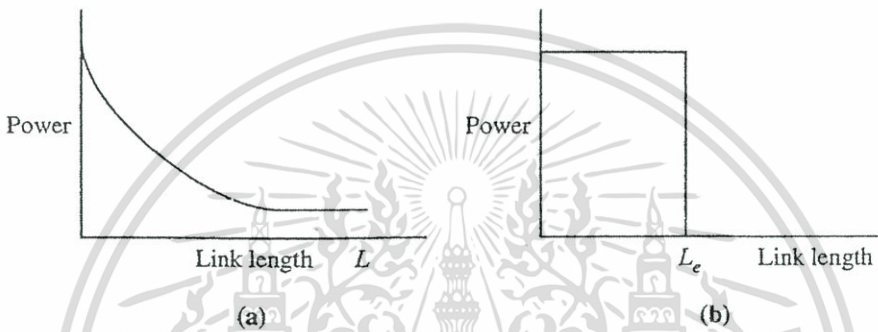
เราจะได้ว่า  $L_e \approx 20.7 \text{ km}$

ในระบบที่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงด้วย สัญญาณที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในแต่ละจุดขยายสัญญาณจะไม่มีผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจากช่วงที่ผ่านมา ดังนั้นระยะทางประสิทธิผลของเครือข่ายจะเป็นผลรวมของระยะทางประสิทธิผลแต่ละช่วง เช่นในเครือข่ายที่มีระยะทาง  $L$  และมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆระยะทาง  $l$  จะสามารถประมาณความยาวประสิทธิผลได้ดังนี้

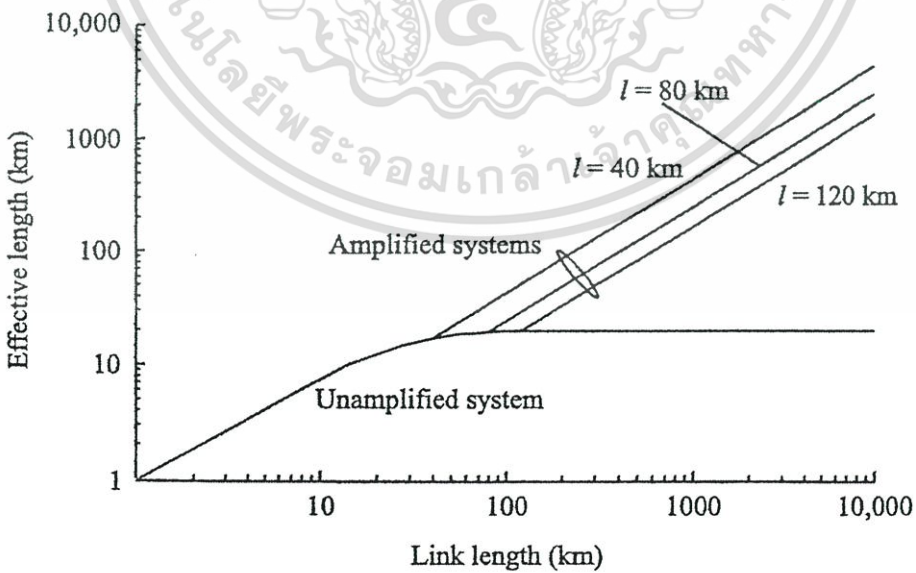
$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha l}}{\alpha} \frac{L}{l} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง ( $L$ ) กับระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ( $L_e$ )



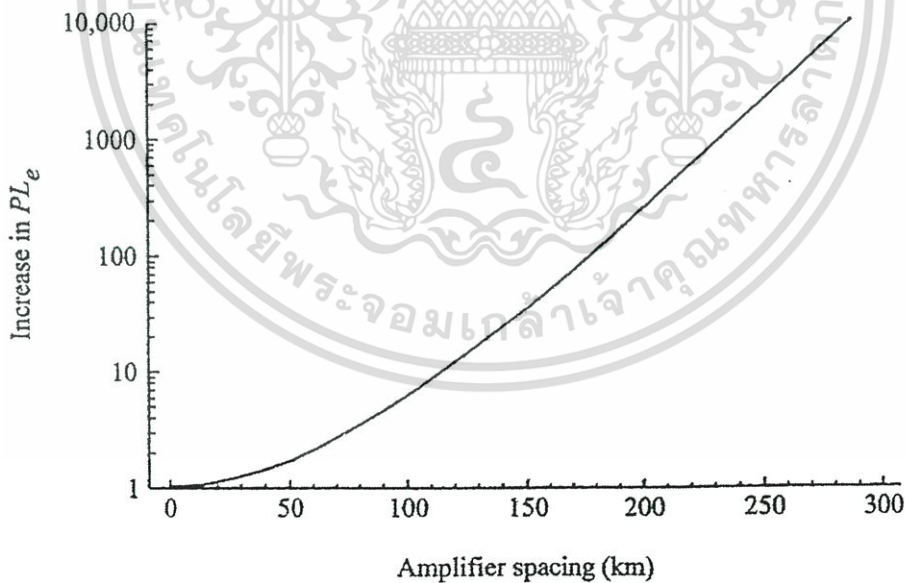
รูปที่ 2.2 ค่าตั้งของสัญญาณเปรียบเทียบกับระยะทางของระบบสื่อสารสัญญาณ  
(a) ระยะทางจริง ( $L$ ) (b) ระยะทางประสิทธิผลจากการคำนวณ ( $L_e$ )



รูปที่ 2.3 ระยะทางประสิทธิผลของระบบสื่อสารสัญญาณเปรียบเทียบในแต่ละช่วงระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 แสดงระยะทางประสิทธิผลเปรียบเทียบกับระยะทางจริงของระบบสื่อสารสัญญาณสำหรับระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและระบบที่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ในรูปแสดงให้เห็นว่าระยะทางประสิทธิผลจะดีขึ้นเมื่อระยะทางระหว่าง โหนดในเครือข่ายลดลงจากการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณทำการขยายสัญญาณเป็นช่วงๆ แต่อย่างไรก็ตามในสถานะที่เครือข่ายได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะไม่สามารถกำหนดระยะทางประสิทธิผลที่แน่นอนได้ โดยปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณในขณะนั้น ( $P$ ) และระยะทางประสิทธิผล ( $L_e$ ) รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณในขณะนั้นและระยะทางประสิทธิผล ( $PL_e$ ) เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ( $l$ ) โดยในรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงมีค่าน้อย ค่า  $PL_e$  ก็จะมีค่าน้อยซึ่งก็จะทำให้ผลกระทบจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงสามารถลดลงได้ด้วยการลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งส่งผลทำให้การออกแบบอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงง่ายขึ้น (เนื่องจากเป็นระบบที่มีอัตราขยายสัญญาณแสงต่ำๆ) แต่ก็ทำให้เราต้องใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงจำนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ตามมาก็คือต้นทุนของเครือข่ายที่สูงขึ้น



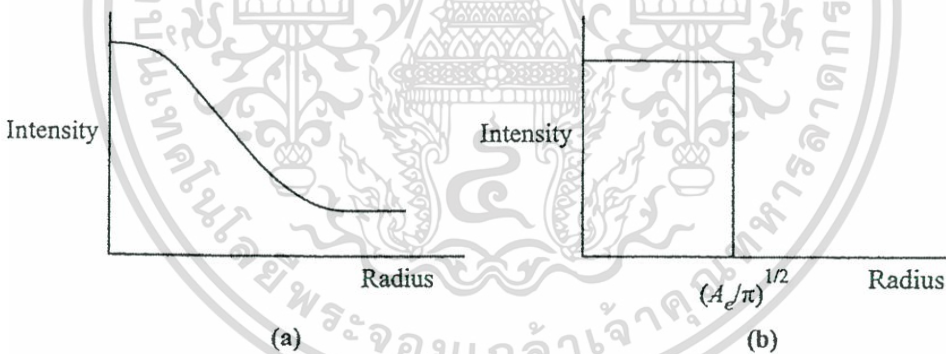
รูปที่ 2.4 การเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณและระยะทางประสิทธิผล ( $PL_e$ ) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อ  $r$  และ  $\theta$  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) กำลังงานที่สูงจะเสียดูดซับด้วยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลในตัวกลาง (ชนิดของการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจะมีความแตกต่างกันสำหรับ SBS และ SRS) คลื่นลำดับที่สองที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าคลื่นกระตุ้น (Stokes Wave) ซึ่งสัญญาณที่สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นขยาย (Pump Wave) นั้นต้องเอกละการเกิดขึ้นจากกระบวนการขยายสัญญาณของคลื่นกระตุ้น การแพร่กระจายด้วยการขยายสัญญาณในไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดการสูญเสียกำลังงานและอัตราขยายกำลังของคลื่นกระตุ้น ในที่นี้เราจะพิจารณาว่าคลื่นขยายคือคลื่นของสัญญาณและคลื่นกระตุ้นเป็นคลื่นที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสง โดยทั่วไปผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่เกิดจากสัมประสิทธิ์ของอัตราขยาย ( $g$ ) ซึ่งวัดในหน่วย  $m/W$  และความกว้างของสเปกตรัม ( $\Delta f$ ) สำหรับอัตราขยายในขณะนั้น

ผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์  $PL_c$  ที่เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของกำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงและระยะทางระหว่างโนดของเครือข่าย โดยเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างโนดที่ไกลมากๆต้องใช้กำลังของสัญญาณด้านอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดคู่ของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณกระตุ้นขึ้น สำหรับการกำหนดระยะทางระหว่างโนดสามารถประมาณได้จากการวัดระดับกำลังของสัญญาณแสงที่จุดซึ่งเริ่มมีผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงมาเป็นจุดอ้างอิงซึ่งเรียกค่ากำลังของสัญญาณที่จุดนั้นว่าค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (Threshold Power) ซึ่งถูกกำหนดด้วยความเข้มของกำลังงานแสงต่อช่องสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีกำลังของสัญญาณขยายและสัญญาณกระตุ้นที่ด้านเอาต์พุตของเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากัน ในระบบที่มีการขยายสัญญาณแสงค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (Threshold Power) จะลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะทางประสิทธิผล ซึ่งทำให้ระบบที่มีการขยายสัญญาณมีความอ่อนไหวมากกว่าที่จะได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง

## 2.2 Stimulated Brillouin Scattering (SBS)

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

ความเข้มของสัญญาณคลื่นขยาย ( $I_p$ ) และสัญญาณคลื่นกระตุ้น ( $I_s$ ) มีความสัมพันธ์กัน

ตามสมการคลื่นทั้งสองสมการนี้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ความเข้มของสัญญาณแสงมีความสัมพันธ์กับกำลังของสัญญาณดังนี้  $P_s = A_e \cdot I_s$  และ  $P_p = A_e \cdot I_p$  สำหรับในกรณีนี้กำลังของสัญญาณคลื่นกระตุ้น ( $P_p$ ) จะมีค่าน้อยกว่ากำลังของสัญญาณคลื่นขยาย ( $P_s$ ) 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]

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

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

ข้อสังเกต เมื่อเอาที่พุดของคลื่นขยายอยู่ที่  $z = L$  แต่เอาที่พุดของคลื่นกระตุ้นอยู่ที่  $z = 0$  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 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของโพราไรเซชันของคลื่นขยายและคลื่นกระตุ้น สมมติในกรณีที่แย่ที่สุดค่าของ  $b = 1$  เราจะได้  $P_{th} = 1.3$  mW เนื่องจากค่านี้เป็นค่าต่ำสุด ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบของ SBS การออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณแสงควรอ้างอิงที่ค่านี้

ที่ผ่านมาจะกำหนดให้สัญญาณของคลื่นขยายมีไลน์วิคท์ที่แคบมากๆและมีอัตราขยายช่วงแคบๆภายในช่วงแบนด์วิคท์ของ SBS (ประมาณ 20 MHz) ค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น ( $P_{th}$ ) จะพิจารณาว่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณมีไลน์วิคท์ที่กว้างออกและมีค่ากำลังของสัญญาณคลื่นขยายสูงขึ้นจนอยู่ภายนอกช่วงแบนด์วิคท์ของ SBS การประมาณการกระจายออกซึ่งรวมผลกระทบนี้เข้าไปด้วยหาได้จาก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{th} \approx \frac{21bA_e}{g_B L_e} \left( 1 + \frac{\Delta f_{source}}{\Delta f_B} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\Delta f_{source}$  แทนไลน์วิดท์ของแหล่งกำเนิดและถ้ากำหนดให้  $\Delta f_{source} = 200$  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

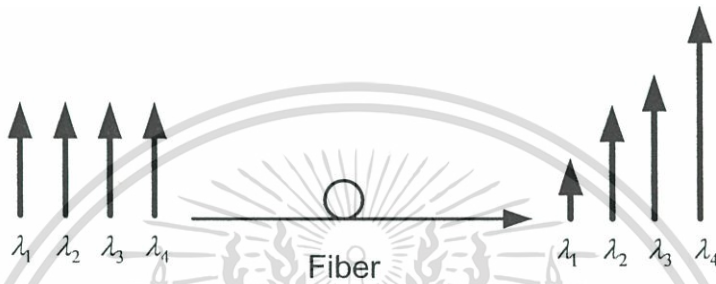
(2) เนื่องจากอัตราขยายแบนด์วิดท์ของ SBS มีค่าน้อยมาก ผลกระทบนี้สามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มไลน์วิดท์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงด้วยการใช้เลเซอร์มอดูเลชันแบบโดยตรง ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เกิดดีสเพอร์ชันสูงขึ้น แต่ค่าดีสเพอร์ชันนี้สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการจัดการดีสเพอร์ชันที่เหมาะสม ส่วนวิธีการอื่นๆ ในการเพิ่มไลน์วิดท์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงคือการสันตะเทียนโมเลกุลของเลเซอร์ด้วยความถี่เล็กน้อยที่มีความเหมาะสม (ประมาณ 200 MHz) วิธีการนี้จะไม่ทำให้ค่าดีสเพอร์ชันสูงขึ้นแต่จะทำให้ค่า  $P_{th}$  ของ SBS สูงขึ้น เมื่อพิจารณาในเทอมของขนาดวิธีนี้ถูกนำมาใช้กับระบบต่างๆ ไปที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ และส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งของสัญญาณสูงๆ

(3) วิธีการมอดูเลตทางเฟสดีกว่าการมอดูเลตทางแอมพลิจูด เนื่องจากการลดกำลังของสัญญาณแสงในตัวกลางทำให้ผลกระทบของ SBS ลดลงได้ ซึ่งในกรณีนี้ไลน์วิดท์ของแหล่งกำเนิดสามารถทำให้เหมาะสมกับอัตราเร็วของบิตได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่สามารถนำไปใช้กับระบบต่างๆ ได้ทั้งหมด

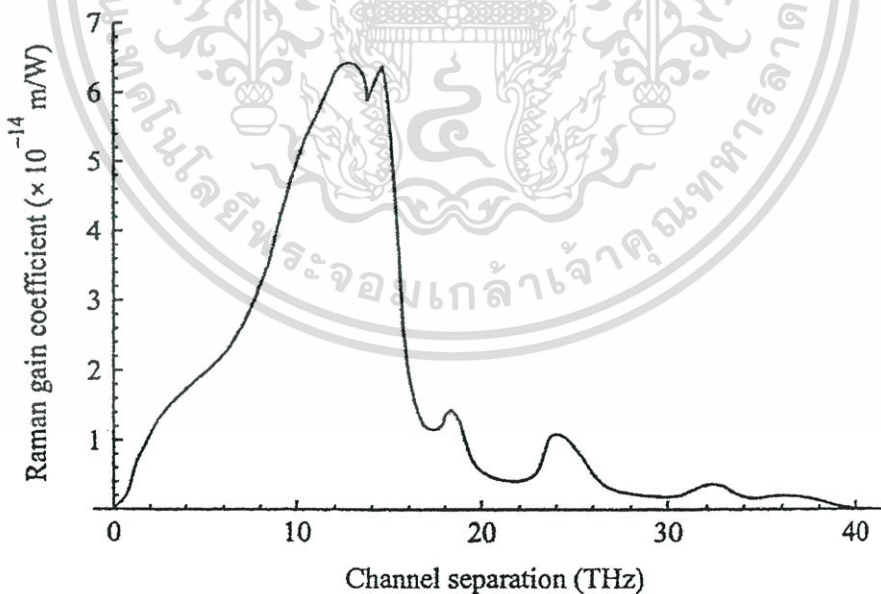
### 2.3 Stimulated Raman Scattering (SRS)

เมื่อสัญญาณสองสัญญาณหรือมากกว่าและมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันส่งรวมเข้าไปด้วยกันในเส้นใยแก้วนำแสง การเปลี่ยนแปลงกำลังงานจากสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด SRS ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข้อแตกต่างระหว่าง SBS และ SRS คือผลกระทบจากแถบความถี่แถบกว้าง รูปที่ 2.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS ( $g_R$ ) มีค่าประมาณ  $6 \times 10^{-14}$  m/W ที่ความยาวคลื่น  $1.55 \mu\text{m}$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SBS แต่อย่างไรก็ตามช่องสัญญาณแต่ละช่องจนถึงที่ความถี่ 150 THz (125 nm) จะถูกคัปปลิงด้วย SRS ซึ่งจะคัปปลิงทั้งสองทิศทางของการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายแสงและส่งสัญญาณย้อนกลับในทิศทางตรงข้าม โดยการคัปปลิงระหว่างช่องสัญญาณ จะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณทั้งสองช่องส่งสัญญาณมีบิต 1 เหมือนกัน (หรือมีกำลังของสัญญาณทั้งสอง ช่องสัญญาณ) ด้วยเหตุนี้ SRS ที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ลดลงได้ตามค่าของดีสเพอร์ชันที่ลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณที่ต่างกันจะส่งผ่านด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ทำให้โอกาสที่จะเกิดการซ้อนทับกันของพัลส์ของแสงระหว่างความยาวคลื่นที่แตกต่างกันที่ทุกๆจุดในเส้นใยแก้ว นำแสงจะลดลง ซึ่งเหมือนกับปรากฏการณ์ pulse walk-off ในกรณีของ cross-phase modulation



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของ SRS เมื่อกำลังของสัญญาณแสงจากช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำ ถูกถ่ายเทไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า



รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 และแบนด์วิดท์ของ Raman Gain  $\Delta\lambda_c = 125$  nm

พิจารณาระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวน  $W$  ช่องสัญญาณซึ่งจะประกอบด้วยช่องสัญญาณที่  $0, 1, \dots, W-1$  และแทนระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณด้วย  $\Delta\lambda_s$  โดยสมมติให้ทุกช่องสัญญาณอยู่ภายใต้ช่วงแบนด์วิดท์ของ Raman Gain ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีแบนด์วิดท์ของ Raman Gain อยู่ที่ 125 nm นั่นคือระบบจะมีแบนด์วิดท์เท่ากับ  $\Lambda = (W-1)\Delta\lambda_s \leq \Delta\lambda_c$  ในระบบสื่อสาร DWDM ปกติจะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 30 nm ซึ่งถูกกำหนดมาจากแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยช่องสัญญาณที่ได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุดคือช่องสัญญาณที่ตรงกับความยาวคลื่นต่ำสุดคือช่องสัญญาณช่องที่ 0 เมื่อมีการส่งบิต 1 ในทุกๆช่องสัญญาณ สมมติว่ากำลังส่งของทุกช่องสัญญาณเท่ากันและไม่มีการแทรกสอดจากช่องสัญญาณอื่น ในทางปฏิบัติเนื่องจากระบบมีการรบกวนกันของการโพลาไรเซชัน ซึ่งมีการแก้ไขด้วยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถแก้ไขและปรับปรุงการโพลาไรเซชันได้ แต่ก็จะทำให้ผลกระทบของ Raman สูงขึ้นและสมการที่นำมาใช้ก็จะไม่ได้มีแฟคเตอร์เพียง 2 ตัวเท่านั้นในสมการ โดยกำลังของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของช่องสัญญาณและทำให้ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุด จากช่องสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องสัญญาณช่องที่  $i$  สามารถประมาณได้จาก [1]

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ถ้าหากต้องการรักษากำลังของสัญญาณให้ต่ำกว่า  $0.5 \text{ dB}$  เราจะต้องมีค่า  $P_0 < 0.1$

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

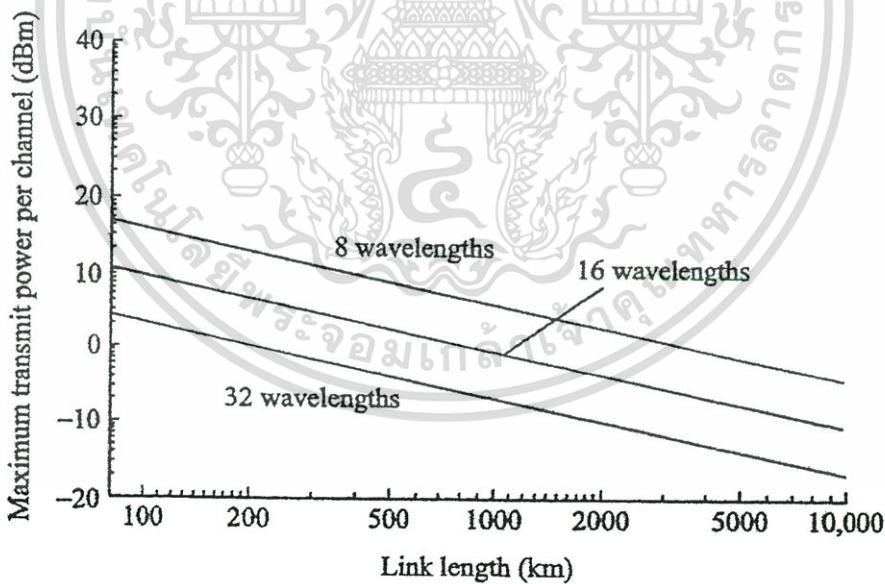
แบนด์วิดท์รวมทั้งหมดของระบบคือ  $\Lambda = (W-1)\Delta\lambda_s$

กำลังส่งของสัญญาณทั้งหมดคือ  $P_{tot} = WP$

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

ที่ผ่านมาสมมุติให้ในระบบไม่มีการสูญเสียจากการกระจายออกของแสง แต่เมื่อมีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการกระจายออกของแสงค่าคงที่ด้านขวาของสมการสามารถประมาณค่าได้เป็น  $80,000 \text{ mW nm km}$ .

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



รูปที่ 2.8 กำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก Stimulated Raman Scattering เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ  $0.8 \text{ nm}$  และระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่ากับ  $80$  กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ความไม่เป็นเชิงเส้นของดัชนีการหักเหของแสงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการเลื่อนไปของเฟสซึ่งแปรผันตรงกับความเข้มของพัลส์ (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)
	$\omega_0$	แทนค่าความถี่ศูนย์กลางของพัลส์ (Center Frequency of Pulses)
	$\beta_0$	แทนค่าคงที่ในการแพร่กระจาย (Propagation Constant)
	$z$	แทนค่าระยะทางในการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า

การเกิดขึ้นของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง ทำให้สนามไฟฟ้าในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง และสำหรับระนาบคลื่นแบบโมนโครมาติก (Monochromatic) เมื่อกำหนดค่าคงที่ในการแพร่กระจายเป็น  $\beta_0$  จะสามารถหาโพลาไรเซชันเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นได้จาก [1]

$$\begin{aligned} P_{NL}(r,t) &= \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \cos^3(\omega_0 t - \beta_0 z) \\ &= \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \left( \frac{3}{4} \cos(\omega_0 t - \beta_0 z) + \frac{1}{4} \cos(3\omega_0 t - 3\beta_0 z) \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$P_{NL}(r,t)$	แทนค่าโพลาไรเซชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Polarization)
	$\varepsilon_0$	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  $\omega_0$  โดยในทางอุดมคติของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersionless Fiber จะมี  $\beta = \omega n / c$  เมื่อดัชนีการหักเหของแสง ( $n$ ) เป็นค่าคงที่และเป็นอิสระจากความถี่เชิงมุม  $\omega_0$  ดังนั้น  $\beta(3\omega_0) = 3\beta(\omega_0)$  แต่ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการใช้งานจริงๆจะมีค่าดิสเพอร์ชันด้วย ดังนั้นดัชนีการหักเหของแสง  $n$  ก็จะไม่คงที่ด้วย และ  $\beta(3\omega_0)$  จะมีความแตกต่างอย่างมากกับ  $3\beta(\omega_0)$  ทั้งนี้เป็นเพราะความไม่ตรงกันระหว่างค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นทั้งสอง ซึ่งองค์ประกอบจากสนามไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุม  $3\omega_0$  อาจไม่ต้องสนใจก็ได้ โดยเงื่อนไขของการไม่ตรงกันของเฟสจะมีความสำคัญมากในการอธิบายเกี่ยวกับ Four-Wave Mixing

เมื่อไม่ต้องพิจารณาองค์ประกอบที่ความถี่เชิงมุม  $3\omega_0$  ดังนั้น โพลาริเซชันเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนได้เป็น [1]

$$P_{NL}(r, t) = \left( \frac{3}{4} \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^2 \right) E \cos(\omega_0 t - \beta_0 z) \quad (2.15)$$

โดยสามารถอธิบายค่าของ  $\beta_0$  สำหรับการโพลาริเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยสมการต่อไปนี้ [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  $\chi^{(3)}$  สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกามีค่าน้อยมากจึงประมาณค่าสมการใหม่เป็น

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

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

$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n E^2$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจาก SPM จะแปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของเฟสนี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางของ  $z$  ที่เพิ่มขึ้น เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจาย ( $\beta$ ) 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  $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c n |E|^2$  เมื่อวัดค่าในหน่วย  $\text{W}/\mu\text{m}^2$  ดังนั้นเมื่อกระจายค่า  $\bar{n}$  ในหน่วย  $\mu\text{m}^2/\text{mW}$  จะได้ค่าที่อยู่ในรูปองค์ประกอบของ  $2/\epsilon_0 c n$

พัลส์ของสัญญาณที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงจะมีความกว้างที่จำกัดและประกอบด้วยหลายแสงสี โดยจะอยู่ตามขวางของระนาบ  $(x, y)$  ตามการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่คงที่และถูกควบคุมด้วยรูปทรงทางเรขาคณิตของเส้นใยแก้วนำแสง จากผลกระทบของ SPM ทำให้เฟสของสนามไฟฟ้าประกอบด้วยเทอมที่แปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีขอบเขตที่จำกัดดังนั้นพัลส์ของสัญญาณจะมีความเข้มของพลังงานไม่คงที่ตลอดทั้งสนามไฟฟ้า 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 ของพัลส์

และส่งผลในรูปผลกระทบของดิสเพอร์ชันและที่ระดับกำลังของสัญญาณเท่ากันผลกระทบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPM จะมีความสำคัญมากสำหรับพัลส์ของสัญญาณที่มีช่วงสั้นๆ (มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ) โดยทั้งหมดจะได้รับผลกระทบในรูปของคิสเพอร์ชัน โดยมีสองประเด็นที่ต้องสนใจในที่นี้คือคุณภาพที่ต้องการของกำลังของสัญญาณและความต่อเนื่องของพัลส์

ผลกระทบของการ chirping ของพัลส์ที่เป็นบวกจะขึ้นอยู่กับทิศทาง การแพร่กระจายของ GVD (Group Velocity Dispersion) ในพารามิเตอร์  $\beta_2$  โดยถ้า  $\beta_2 > 0$  จะกล่าวได้ว่าค่าคิสเพอร์ชันปกติซึ่งในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกาจะมีค่าคิสเพอร์ชันปกติในช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าจุดที่ความยาวคลื่นที่มีค่าคิสเพอร์ชันเป็นศูนย์เช่นที่ค่าความยาวคลื่น  $1.33 \mu\text{m}$  สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเตียวชนิดมาตรฐาน แต่เมื่อ  $\beta_2 < 0$  จะเรียกค่าคิสเพอร์ชันนี้ว่า anomalous นี่เป็นกรณีสำหรับพัลส์ที่อยู่ในช่วง  $1.55 \mu\text{m}$  สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเตียวชนิดมาตรฐาน 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 แม้ว่าแต่ละช่องสัญญาณจะทำงานที่กำลังงานของสัญญาณ ใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้การเลื่อนของเฟสจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณและผลจากการ chirping ของสัญญาณจากการเหนี่ยวนำของ SPM จะทำให้ความเข้มของสัญญาณของช่องสัญญาณอื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ผลกระทบนี้จะเรียกว่า Cross-Phase Modulation (CPM)

เพื่อความเข้าใจผลกระทบของ CPM ให้พิจารณาระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีช่องสัญญาณ 2 ช่องสัญญาณ และเขียนเป็นสมการสนามไฟฟ้าได้ดังนี้ [1]

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

เมื่อ	$E_1, E_2$	แทนสนามไฟฟ้าของช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
	$\omega_1, \omega_2$	แทนความถี่เชิงมุมของช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
	$\beta_1, \beta_2$	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) ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของคอสเฟอรัลชันที่สามารถจัดการได้ ส่วนเทอม  $2\omega_1 - \omega_2$  และ  $2\omega_2 - \omega_1$  จะขออธิบายในหัวข้อของ Four-Wave Mixing องค์ประกอบของโพลาริเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่  $\omega_1$  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  $\omega_1$  โดยการเปลี่ยนแปลงของเฟสจะแปรผันตรงกับ

$(E_1^2 + 2E_2 E_1)z$  เมื่อเทอมแรกเกิดขึ้นเนื่องจาก Self-Phase Modulation (SPM) ส่วนผลกระทบจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ของสัญญาณแยกลงและส่งผลทำให้พัลส์กว้างออกแล้วส่งผลต่อเนื่องทำให้เกิดผลกระทบของ SPM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

ในทางปฏิบัติผลกระทบของ CPM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM จะเกิดขึ้นบนเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวซึ่งสามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มความยาวคลื่นระหว่างช่องสัญญาณหรือก็คือการเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณนั่นเอง เนื่องจากผลของดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงทำให้ค่าคงที่ในการแพร่กระจาย  $\beta_i$  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)

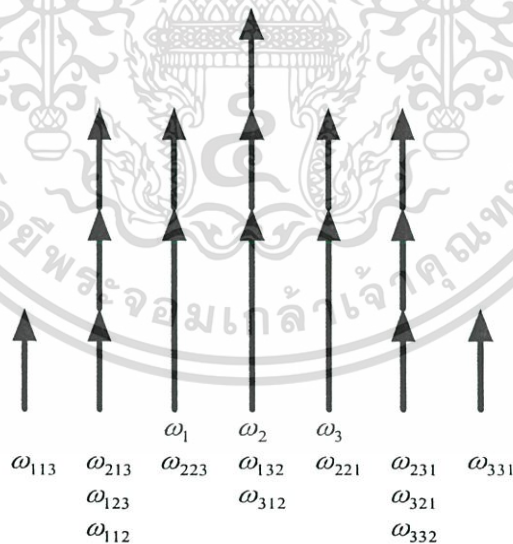
## 2.6 Four-Wave Mixing

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีความถี่เชิงมุม  $\omega_1, \dots, \omega_N$  สำหรับช่องสัญญาณช่องที่  $1, 2, \dots, N$  ตามลำดับ ดัชนีการหักเหของแสงจะไม่เป็นอิสระกับความเข้มของสัญญาณแสงซึ่งไม่เพียงเหนี่ยวนำให้เกิดการเลื่อนของเฟสภายในช่องสัญญาณเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดสัญญาณที่ความถี่ใหม่ เช่น  $2\omega_i - \omega_j$  และ  $\omega_i + \omega_j - \omega_k$  เมื่อ  $\omega_i, \omega_j, \omega_k$  แทนความถี่เชิงมุมของช่องสัญญาณที่  $i, j, k$  ตามลำดับโดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า 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 จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับอัตราเร็วของบิตในระบบเมื่อช่องสัญญาณมี

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเพื่อส่งในระยะทางที่ไกลๆ และระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีช่วงแคบๆ เพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณ ในกรณีเช่นนี้คุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณขึ้นได้ ซึ่งผลกระทบที่มีอิทธิพลมากที่สุดก็คือผลกระทบจาก Four-Wave Mixing ซึ่งเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชันของแสงที่มีการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าในตัวกลางด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  $E$  ที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสง และสำหรับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกาเป็นตัวกลาง ความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับต่ำสุดที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อระบบคือผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3

การโพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณ 3 สัญญาณที่มีความถี่เชิงมุม  $\omega_i, \omega_j, \omega_k$  เกิดการเหนี่ยวนำกันให้เกิดสัญญาณที่มีความถี่ใหม่  $\omega_i + \omega_j - \omega_k$  โดยสัญญาณที่มีความถี่นี้อาจจะไปซ้อนทับกับความถี่ของช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่งผลที่ตามมาคือเกิดการเสื่อมลงของสัญญาณ 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 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากันที่ความถี่เชิงมุม  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$

เพื่อความเข้าใจผลกระทบของ FWM มากขึ้นให้พิจารณาสัญญาณของระบบ DWDM ซึ่งเป็นผลรวมของระนาบคลื่นแสงจำนวน  $n$  คลื่นแสง โดยสนามไฟฟ้าของสัญญาณนี้หาได้จาก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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]

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

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

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

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

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

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

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

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

ดังนั้นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะกำเนิดคลื่นใหม่ขึ้นมาที่มีความถี่  $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$  ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Four-Wave Mixing สาเหตุของปรากฏการณ์นี้คือมีคลื่น 3 คลื่นที่มีความถี่  $\omega_i, \omega_j, \omega_k$  เกิดการรวมกันและกำเนิดคลื่นที่ 4 ขึ้นมาที่มีความถี่  $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$

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  $i, j \neq k$  ตัวอย่างเช่นถ้าความยาวคลื่นในระบบสื่อสาร DWDM มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันหรือมีระยะห่างใกล้เคียงกับจุดที่ตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพอร์ชันเป็นศูนย์แล้ว  $\beta$  มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ของช่วงความถี่นี้ และสถานะของความไม่ตรงกันของเฟสใกล้เคียงกับค่านี้ ตามที่กล่าวมานี้กำลังของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ความถี่นี้สามารถทำให้เกิดผลกระทบที่สูงได้

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

$$d_{ijk} = 3 \text{ เมื่อ } i = j$$

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

แล้วโพลาไรเซชันที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่  $\omega_{ijk}$  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 จะสามารถหากำลังของสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นที่ความถี่  $\omega_{ijk}$  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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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  $\omega_{ijk}$  ที่เกิดจากผลกระทบของ Four-Wave Mixing ได้เท่ากับ  $9.5 \mu\text{W}$  ซึ่งต่ำกว่ากำลังของสัญญาณ 1 mW ประมาณ 20 dB ในระบบ DWDM ถ้าช่องสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นที่ความถี่  $\omega_{ijk}$  นั้นตรงกับช่องสัญญาณใช้งานอื่นๆ จะทำให้ช่องสัญญาณนั้นมีกำลังของสัญญาณเสื่อมลง ในทางปฏิบัติสัญญาณที่เกิดขึ้นจาก Four-Wave Mixing จะมีกำลังของสัญญาณต่ำซึ่งเกิดจากความไม่ตรงกันของเฟสส่วนการลดทอนของสัญญาณเกิดจากการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง

ในระบบสื่อสารที่ใช้งานจริงจะต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการสูญเสียในระบบส่งสัญญาณและดีสเพอร์ชันด้วย 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 ( $\eta_{ijk}$ ) 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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาระบบที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ ทำให้ระบบมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเพียงตัวเดียวที่ภาคส่ง (หรือ  $N_A = 1$ ) 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  $\alpha$  แทนการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง

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

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

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

$$\Delta\beta = \frac{\pi\lambda^4}{c^2} \frac{dD}{d\lambda} \{ (f_i - f_0) + (f_j - f_0) \} \cdot (f_i - f_k) (f_j - f_k) \quad (2.30b)$$

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

(2.30b) สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงแบบ standard dispersion shifted fiber

เมื่อ  $D$  แทนค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic Dispersion)  
 $\lambda$  แทนค่าความยาวคลื่นแสง  
 $f_0$  แทนค่าความถี่อ้างอิงของแถบความยาวคลื่น  
 $f_i, f_j, f_k$  แทนค่าความถี่ใดๆในระบบ

สำหรับระบบที่มีการพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากค่าการสูญเสียในระบบและดิสเพอร์ชันด้วยแล้ว สามารถเขียนสมการที่ (2.26) ใหม่ได้ดังนี้ [1]

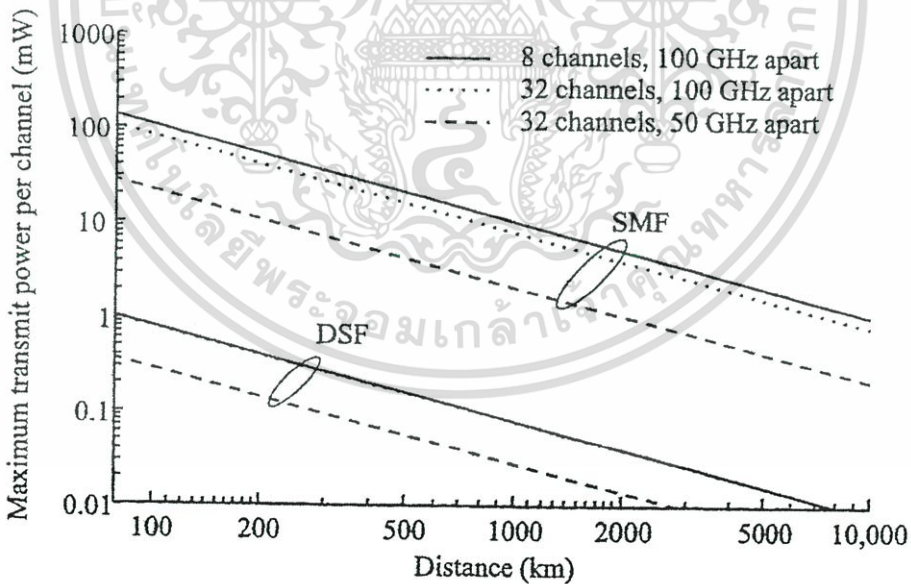
$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \cdot \left( \frac{\omega_{ijk} \cdot \bar{n} \cdot d_{ijk}}{3c \cdot A_{eff}} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k L_{eff}^2 \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ช่องสัญญาณมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันและกำลังส่งของสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณมีค่าเท่ากัน โดยเมื่อกำหนดให้กำลังส่งของสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ  $P$  แล้วค่ากำลังของสัญญาณของ Four-Wave Mixing สูงสุดในแต่ละช่องสัญญาณจะมีค่า  $< \varepsilon P$  เมื่อ  $\varepsilon$  สามารถคำนวณได้ประมาณ 0.034 สำหรับกำลังของสัญญาณ 1 dB ค่ากำลังของสัญญาณของ Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่ากำลังส่งของสัญญาณต่อช่องสัญญาณในฟังก์ชันของระยะทางระหว่างโนด ค่าที่ถูกระบุแสดงในรูปที่ 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-nm<sup>2</sup>



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

จากรูปที่ 2.10 ลำดับแรกจะสังเกตเห็นว่าจุดที่แยกที่สุดในกรณีของ Dispersion Shifted Fiber จะแยกว่าในกรณีของ Standard Single Mode Fiber เนื่องจากประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ Four-Wave Mixing ในกรณีของ Dispersion Shifted Fiber จะสูงกว่าเนื่องจากการเหนี่ยวนำของจุดที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ ลำดับที่สองกำลังของสัญญาณจะแยกลงเมื่อเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณ 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 ส่วนบริเวณจุดที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ในระบบที่มีช่องสัญญาณ 8 ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณทั้งหมดจะเหนี่ยวนำให้เกิดกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่จุดนี้ ซึ่งกำลังของสัญญาณจาก Four-Wave Mixing ที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณอื่นจะมีค่าน้อยกว่าเพราะว่ามีค่าดิสเพอร์ชันสูงกว่าที่ความยาวคลื่นนี้ 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 เพื่อทำให้ผลกระทบของ four-wave mixing ลดลง

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

## ผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

### 3.1 กล่าวนำ

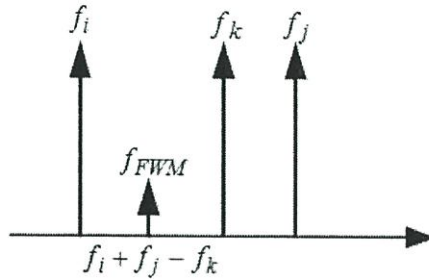
ปัจจุบันนี้มีการใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อลดผลกระทบของการเกิด Four-Wave Mixing (FWM) เช่น การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสงร่วมกันของสายหน่วง [21] เทคนิคการผสมผสานกันของ wavelength/time division multiplexing [22] การผสมผสานกันของการมอดูเลต amplitude/frequency shift keying โดยการใช้ prechirped pulses [23] การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) [5-8] และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) [10-12]

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้เน้นไปที่ความสัมพันธ์ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ปัจจุบันนี้ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RUS (ERUS) [13-14] ได้นำเสนอการแก้ไข ปัญหาของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES) [9] ES จะเกิดผลกระทบจาก FWM สูง ที่  $f_{FWM} = f_i$  เมื่อ  $f_{FWM}$  คือความถี่ของแสง FWM และ  $f_i$  คือความถี่ของสัญญาณแสงของแต่ละช่องสัญญาณ ในการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS จะทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากัน (US) จำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เราเรียกกลุ่มของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำว่า base unit) และเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ที่เท่ากัน โดย ERUS ใช้แบนด์วิดท์ที่แคบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ES ที่จำนวนช่องสัญญาณเท่ากัน โดยการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS จะทำให้ผลกระทบที่เกิดจาก FWM ลดลง จากการสังเกตนี้ เราจึงได้มีการปรับปรุงการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ โดยอาศัยการเลือกและการสลับกันของช่องสัญญาณภายใน base unit ที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำเช่น Alternative RUS (ARUS), Repeated Alternate US (RAUS), Equally Spaced ARUS (EARUS) และ Equally Spaced RAUS (EARUS) [16-18] เป็นต้น โดยวิธีการเหล่านี้จะทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ RUS และ ERUS ที่  $f_{FWM} = f_i$  ในการจัดช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 [15] ที่ได้จาก EDFA [3-4] ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

### 3.2 ผลกระทบที่เกิดจาก Four-Wave Mixing

ระบบส่งสัญญาณ DWDM ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันและเป็นสาเหตุให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณ แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 เป็นรูปแบบการกระจายตัวของความถี่ของแสง [1] เมื่อ  $f_i$ ,  $f_j$  และ  $f_k$  เป็นสัญญาณความถี่ของแสงและ  $f_{FWM}$  เป็นความถี่ของแสงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสัญญาณทั้งสามความถี่เนื่องจากผลกระทบของ FWM ซึ่งหาได้จาก  $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$  (ใน

บทความนี้พิจารณาผลกระทบของ FWM เป็นสิ่งสำคัญ โดยไม่พิจารณาผลกระทบของ self-phase modulation, cross-phase modulation และการเลื่อมลงของรูปคลื่น เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด [13-15])



รูปที่ 3.1 รูปแบบการกระจายของความถี่ของแสงจากผลกระทบของปรากฏการณ์ FWM

การคำนวณค่าผลกระทบของ FWM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM กำลังของสัญญาณที่มีความถี่  $f_{FWM}$  เป็นผลรวมของกำลังสัญญาณของ FWM ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ที่เป็นไปได้เมื่อมีช่องสัญญาณใช้งาน  $N_C$  ช่อง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้ [24-25]

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_i=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_k} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $P_{FWM}(f_{ijk})$  สามารถคำนวณได้จาก [24-25]

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left( \frac{d_{ijk} \chi^3 L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $d_{ijk}$  คือองค์ประกอบที่แสดงสถานะความเสื่อม (Degeneracy Factor)

$$d_{ijk} = 3 \text{ เมื่อ } i=j, \quad d_{ijk} = 6 \text{ เมื่อ } i \neq j$$

$P_i, P_j, P_k$  คือกำลังของสัญญาณอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความถี่  $f_i, f_j, f_k$

$\lambda$  คือความยาวคลื่นแสง

$n$  คือดัชนีหักเหของคอร์

$L$  คือความยาวเส้นใยแก้ว

$A_{eff}$  คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (Effective Core Area)

$L_{eff}$  คือระยะทางประสิทธิภาพ (Effective Length)

$\chi^3$  คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3

$c$  คือความเร็วแสง

$\eta_{ijk}$  คือประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM หาค่าได้จาก [24-25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใด (3.3)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\Delta\beta$  คือค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงหาค่าได้จาก [24-25]

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \left[ D + \frac{\lambda^2}{2c} \frac{dD}{d\lambda} (|f_i - f_0| + |f_j - f_0|) \right] \quad (3.4)$$

เมื่อ  $D$  คือค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน

$dD/d\lambda$  คือค่าความชันของดิสเพอร์ชัน

$f_i, f_j, f_k$  คือความถี่ใดๆในระบบ

$f_0$  คือความถี่อ้างอิงหรือความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0

เมื่อใช้การประมาณค่าแบบเกาส์เซียนความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่ใช้การมอดูเลตแบบ On-Off Keying สามารถหาได้ดังนี้ [24-25]

$$P_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (3.5)$$

เมื่อ  $Q$  คือ Quality Factor (SNR) หาค่าได้จาก [24]

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM}} + \sqrt{N_{th}}} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $P_s$  คือกำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้

$N_{th}$  คือ Thermal Noise Power

$N_{sh}$  คือ Shot Noise Power

$N_{FWM}$  คือ FWM Noise Power ซึ่งหาค่าได้จาก [24-25]

$$N_{FWM} = 2b^2 P_s \frac{P_{FWM}}{8} \quad (3.7)$$

$b$  คือเรสปอนซิวิตี (Hz) หาค่าได้จาก [1-2]

$$b = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\eta$  คือประสิทธิภาพควอนตัม

$e$  คือประจุอิเล็กตรอน

$h$  คือค่าคงที่ของพลังค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าการสูญเสียของ  $N_{th}$  และ  $N_{sh}$  มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ  $N_{FWM}$  ดังนั้นค่า SNR ที่เกิดจากผลกระทบของ FWM สามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้ [24-25]

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2bP_s}{\sqrt{b^2 P_s P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_0 e^{-\alpha L}}}{\sqrt{P_{FWM}}} \quad (3.9)$$

เมื่อค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้ ( $P_s$ ) หาได้จาก [1-2]

$$P_s = N_C P_0 e^{-\alpha L} \cdot L_r \quad (3.10)$$

เมื่อ  $L_r$  คือค่าสูญเสียในระบบสื่อสารก่อนถึงภาครับ

$N_C$  คือจำนวนช่องสัญญาณ

$P_0$  คือค่ากำลังของสัญญาณแสงด้านอินพุต หาค่าได้ดังสมการที่ (3.11)

เมื่อ อัตราการลดทอน ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.2 dB/km [27]

$$P_{in}(\max) = \frac{\ln(10) \alpha}{100 \gamma} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Propagation Coefficient) หาค่าได้จาก [2], [27]

$$\gamma = \frac{2\pi \bar{n}}{\lambda A_{eff}} \quad (3.11)$$

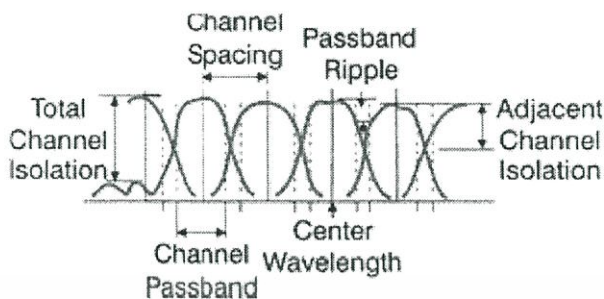
เมื่อ  $\bar{n}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Index Coefficient) ในสมการที่ (3.11)  $\bar{n} = 2.6 \times 10^{-26} \text{ m}^2/\text{W}$  สำหรับเส้นใยแก้วที่ทำจากซิลิกา [2]

### 3.3 การจัดการความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management)

ในระบบสื่อสารด้วยสัญญาณ DWDM ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของระบบ โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU ที่ 50 GHz และ 100 GHz ดังแสดงในภาคผนวก ก. ในปัจจุบันนี้ระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เป็นระยะห่างที่ผู้ให้บริการระบบสื่อสารโทรคมนาคมนำมาใช้งานกันทั่วไป เนื่องจากเป็นระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่มีพัฒนาจนได้รับความน่าเชื่อถือ ซึ่งระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในระบบนี้ทำให้สามารถใช้งานช่องสัญญาณได้ทุกช่องสัญญาณที่อยู่ภายในช่วงอัตรายายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง แต่อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณก็ยังขึ้นกับส่วนประกอบอื่นๆของระบบด้วย

ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นแถบของความถี่ต่ำสุดที่สามารถแยกสองสัญญาณที่รวมกันนำออกจากกันได้ ซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกันกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน ดังนั้นส่วน

ประกอบที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะประกอบไปด้วย ความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณ แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและความสามารถของเครื่องรับที่จะระบุความแตกต่างระหว่างสองความยาวคลื่น รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างข้อจำกัดของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM



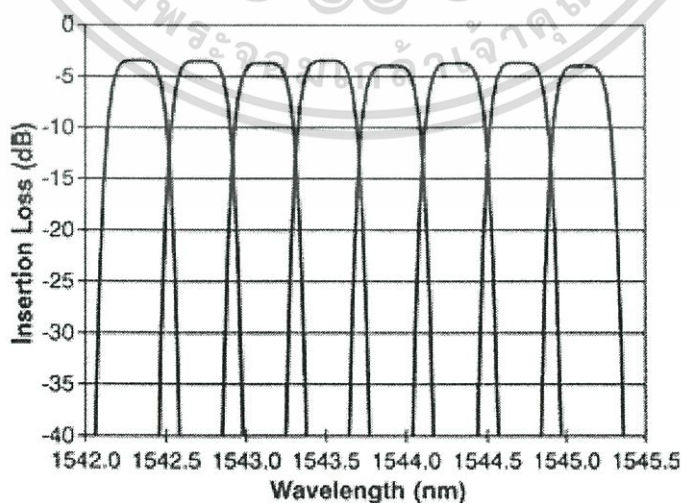
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM

### 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 ผู้ออกแบบระบบมีความพยายามหาจุดที่จะมีช่องสัญญาณ สูงกว่า 45 ช่องสัญญาณสำหรับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เนื่องจากเริ่มที่จะมีความต้องการช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นในระบบแล้ว แต่กัคิดว่าอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA ที่มีแถบความยาวคลื่นเพียง 35 nm แต่เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในหน่วยของ GHz ก็ได้ความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงดังนี้ ที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 200 GHz เท่ากันทุกช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นระหว่างช่องว่างของสัญญาณ 1.6 nm, ที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เท่ากัน ทุกช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นระหว่างช่องว่างของสัญญาณ 0.8 nm และที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz เท่ากันทุกช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นระหว่างช่องว่างของสัญญาณ 0.4 nm โดยรูปแบบอย่างง่ายที่สุดของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz คือทำการเทียบเคียงรูปแบบของระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz ซึ่งก็มีช่องสัญญาณที่สอดคล้องกัน แต่เมื่อเทียบเคียงรูปแบบของระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 75 GHz และ 37.5 GHz กับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz จะพบว่าช่องสัญญาณของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองระบบนี้ไม่มีความสอดคล้องกับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เนื่องจากระบบที่มีช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz จะมีลำดับของความถี่ของช่องสัญญาณ ถัดลงไปจากระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz และเมื่อเลือกใช้ระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz (0.4 nm) และแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 45 ช่องสัญญาณจะใช้แบนด์วิดท์เพียง 17.5 nm ซึ่งเป็นแบนด์วิดท์เพียงครึ่งเดียวของช่วงอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบทั่วไป ทำให้มีแบนด์วิดท์เหลือพอที่จะเพิ่มช่องสัญญาณแสงได้อีกอีก และเมื่อพิจารณาการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเส้นใยแก้วนำแสงอาจจะนำระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 25 GHz มาใช้ก็ได้ ก็จะทำให้ระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมากขึ้น

การออกแบบอุปกรณ์คิมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่เครื่องรับปลายทางก็เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงที่สำคัญเพราะว่าความแตกต่างของแถบสปีทิงมากของแต่ละช่องสัญญาณแสง ทำให้อุปกรณ์คิมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ต้องมีสมรรถนะที่สูงและมีคุณสมบัติเฉพาะ 3 ประการคือ ประการที่ 1 อุปกรณ์ต้องสามารถทำงานได้คงที่ในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด ประการที่ 2 ต้องมีขอบเขตของช่องสัญญาณที่แน่นอนตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และประการที่ 3 ต้องสามารถลดสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณแสงที่อยู่ติดกันได้ เมื่อมีจำนวนช่องสัญญาณแสงมากขึ้นจะเกิดความยากลำบากเพิ่มขึ้นในการแยกช่องสัญญาณแสงตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่กำหนด แต่ด้วยเทคโนโลยีของ Fiber Bragg Gratings ทำให้ได้จำนวนช่องสัญญาณตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่กำหนดได้ ทั้งนี้จำนวนของช่องสัญญาณแสงที่จะส่งต่อเส้นใยแก้วนำแสงต้องคำนึงถึงสมรรถนะของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ใช้ในระบบด้วย รูปที่ 3.3 แสดงสเปกตรัมของอุปกรณ์คิมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm



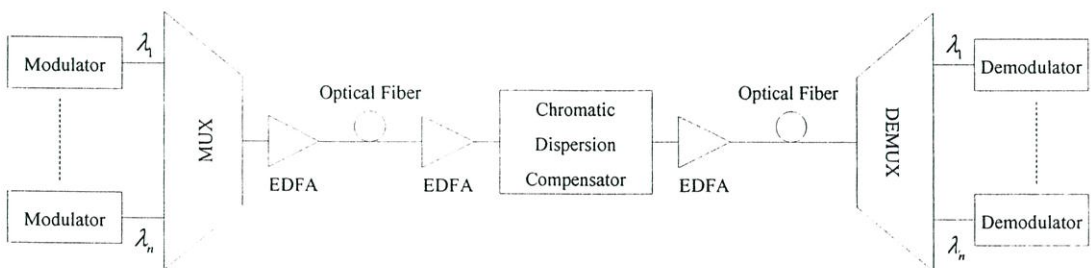
**รูปที่ 3.3** สเปกตรัมของอุปกรณ์คิมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่าง  
 เอกระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

#### 3.4.1 การใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ

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

เส้นใยแก้วชนิดต่อมาคือเส้นใยแก้วแบบ NZ-DSF ที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพผลขนาดใหญ่ [28] การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพผลของแสงในเส้นใยแก้วจะทำให้ความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าลดลง สำหรับกำลังส่งค่าหนึ่ง ประโยชน์ของการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพผลประกอบด้วยความสามารถที่จะส่งกำลังสัญญาณได้สูงขึ้น, อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงกว่า, อัตราบิดผิวดลาดที่ต่ำกว่า, ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ไกลมากกว่าและที่สำคัญก็คือทำให้มีความจุของการส่งข้อมูลที่สูงกว่า โดยปกติเส้นใยแก้วจะมีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพผลประมาณ 50 ตารางไมครอนเท่านั้น แต่ในขณะนี้ก็ได้มีการผลิตเส้นใยแก้วที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพผลขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่มากถึง 92 ตารางไมครอนเพื่อตอบสนองความต้องการที่มากขึ้นของระบบการส่งข้อมูลความเร็วสูงและมีการขยายสัญญาณแสงตามเส้นทาง เช่นระบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณ 10 Gb/s จำนวนหลายช่องสัญญาณกำลังมีการใช้งานกันมากอยู่ในขณะนี้ และเส้นใยแบบ NZ-DSF ที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพผลขนาดใหญ่จะเป็น รูปแบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณขนาด 40 Gb/s ผ่านแถบขยายสัญญาณของ EDFA ได้ในอนาคต ประโยชน์ที่ได้รับจากการลดจำนวนอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและการเพิ่มระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงคือสามารถที่จะปรับปรุงและพัฒนาไปยังระบบการส่งข้อมูลที่เร็วกว่าด้วยค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการดำเนินงานที่น้อยลง

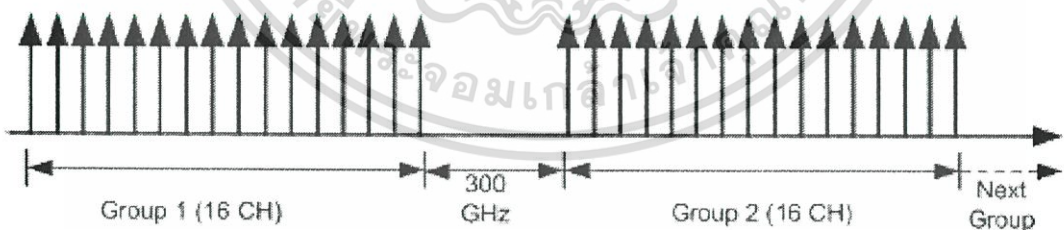


รูปที่ 3.4 รูปแบบการชดเชยค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันด้วย Dispersion Compensating Fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 เทคนิคการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ (Channel Grouping Separation Technique)

เนื่องจากระยะห่างของช่องสัญญาณมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลกระทบของ Four-Wave Mixing คือถ้าช่องสัญญาณมีระยะห่างกันมากๆ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะมีค่าน้อย แต่ถ้าวช่องสัญญาณมีระยะห่างกันน้อยๆ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะมีค่ามาก และเนื่องจากความต้องการแบนด์วิธของเครือข่ายเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงต้องทำการเพิ่มช่องสัญญาณของเครือข่ายด้วยการลดระยะห่างของช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้ผลกระทบเนื่องจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น จึงมีการนำเสนอการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เพิ่มขึ้นด้วยการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่ [29] 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% โดยวิธีการจัดกลุ่มที่เลือกใช้ได้มาจากการจำลองแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยมีเงื่อนไข 2 ประการคือมีค่าของ Four-Wave Mixing Power ที่ใกล้เคียงกับระบบเดิม (ระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100 GHz) และมีช่องสัญญาณใช้งานได้มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm - 1560.61 nm (192.10 THz - 196.00 THz) โดยรูปแบบการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.5

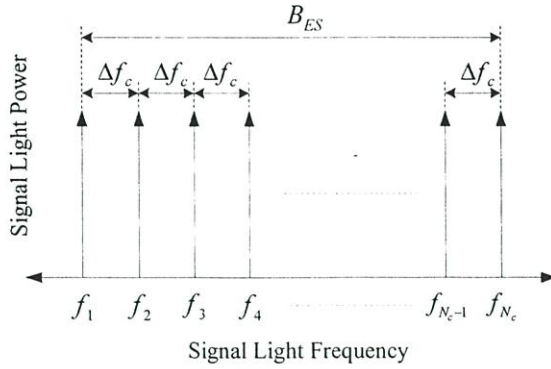


รูปที่ 3.5 รูปแบบการจัดช่องสัญญาณใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก FWM

### 3.4.3 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ

#### 3.4.3.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จะมีระยะห่างของช่องสัญญาณ ( $\Delta f_c$ ) ที่เท่ากันทุกๆ ช่องสัญญาณ ( $f_1$  ถึง  $f_{N_c}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.1 เมื่อ  $B_{ES}$  คือผลรวมของแบนด์วิธของการจัดช่องสัญญาณแบบ ES หาได้จาก  $B_{ES} = (N_c - 1)\Delta f_c$  เมื่อ  $N_c$  คือจำนวนของช่องสัญญาณและ  $f_i$  คือความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

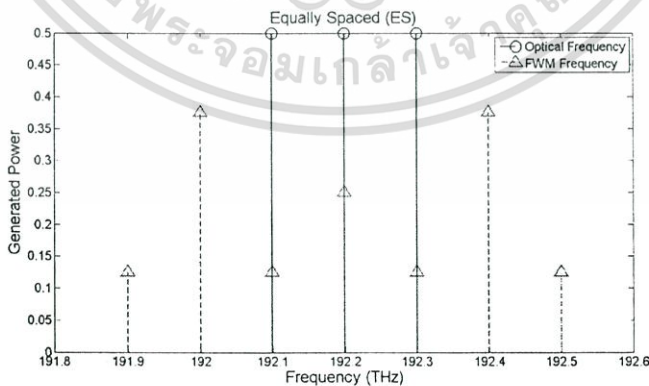


รูปที่ 3.6 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES

ตารางที่ 3.1 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$f_i$ (THz)	192.1	192.2	192.3	192.4	192.5	192.6	192.7	192.8	192.9	193.0	193.1	193.2	193.3	193.4
$\Delta f_c$ (GHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$f_i$ (THz)	193.5	193.6	193.7	193.8	193.9	194.0	194.1	194.2	194.3	194.4	194.5	194.6	194.7	194.8
$\Delta f_c$ (GHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
$f_i$ (THz)	194.9	195.0	195.1	195.2	195.3	195.4	195.5	195.6	195.7	195.8	195.9	196.0		
$\Delta f_c$ (GHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		

การจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES) เมื่อความถี่  $f_i$ ,  $f_j$  และ  $f_k$  เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือความถี่ของ FWM ซึ่งหาได้จาก  $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$  โดยสัญญาณความถี่นี้จะไปซ้อนทับกับความถี่ของช่องสัญญาณโดยตรงทำให้เกิดผลกระทบจาก FWM สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.7



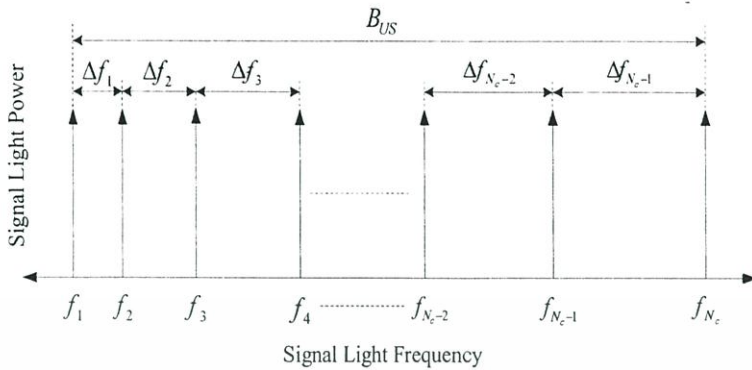
รูปที่ 3.7 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES

### 3.4.3.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1

เอกสจะมีระยะห่างช่องช่องสัญญาณ ( $\Delta f_i$ ) ที่ไม่เท่ากันทุกช่องช่องสัญญาณ ( $f_1$  ถึง  $f_{N_c}$ ) เมื่อ  $B_{US}$  คือการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลรวมของแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ US หาได้จาก  $B_{US} = \sum_{i=1}^{N_c-1} d_i \cdot \Delta f$  [30] เมื่อ  $d_i \cdot \Delta f$  เป็นระยะห่างช่องสัญญาณลำดับที่  $i$  ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และตารางที่ 3.2

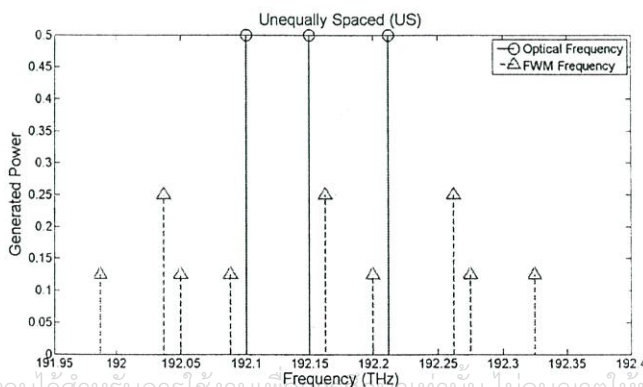


รูปที่ 3.8 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ US

ตารางที่ 3.2 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ US ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.15	192.2125	192.2875	192.375	192.475	192.5875	192.7125	192.85	193.0	193.1625
$\Delta f_i$ (GHz)	50	62.5	75	87.5	100	112.5	125	137.5	150	162.5	175
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.3375	193.525	193.725	193.9375	194.1625	194.4	194.65	194.9125	195.1875	195.475	195.775
$\Delta f_i$ (GHz)	187.5	200	212.5	225	237.5	250	262.5	275	287.5	300	

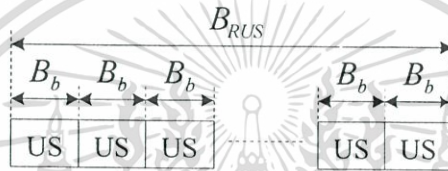
การจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) เมื่อความถี่  $f_i$ ,  $f_j$  และ  $f_k$  เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือความถี่ของ FWM ซึ่งหาได้จาก  $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$  โดยสัญญาณความถี่นี้จะไม่ไปซ้อนทับกับความถี่ของช่องสัญญาณ ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 แต่การจัดช่องสัญญาณแบบ US จะมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่มาก ทำให้สามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณได้น้อย ถ้าหากมีช่องสัญญาณไม่มากนักก็สามารถลดผลกระทบของ FWM ให้เหลือน้อยลงได้ด้วยวิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ US ซึ่งหลักการนี้จะง่ายสำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณ 3 - 16 ช่องสัญญาณ แต่จะยากและซับซ้อนมากขึ้นสำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวนมากๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ารูปที่ 3.9 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ US ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3.3 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่งแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เรียกกลุ่มที่เกิดขึ้นใหม่แบบซ้ำว่า base unit) ดังรูปที่ 3.10 เมื่อ  $B_{RUS}$  คือแบนด์วิธของการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS หาได้จาก  $B_{RUS} = nB_b + B_{res}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของ base unit,  $B_b$  คือแบนด์วิธของ base unit และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิธของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยแบนด์วิธของ base unit แรกครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 1-5, base unit ที่ 2 ครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 6-10 ไปจนถึง base unit สุดท้าย และรวมช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เมื่อกำหนดให้  $f_1$  เท่ากับ 192.1 THz โดย  $f_{i+1} = f_i + \Delta f_i$  และ  $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$  ซึ่ง  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$



รูปที่ 3.10 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS

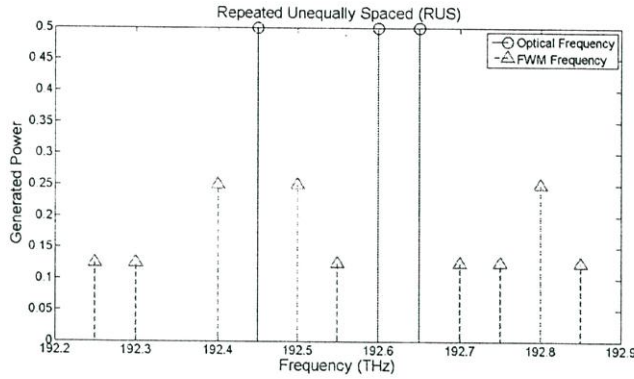
ตารางที่ 3.3 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$f_i$ (THz)	192.1	192.15	192.225	192.325	192.45	192.6	192.65	192.725	192.825	192.95	193.1	193.15	193.225	193.325
$\Delta f_i$ (GHz)		50	75	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$f_i$ (THz)	193.45	193.6	193.65	193.725	193.825	193.95	194.1	194.15	194.225	194.325	194.45	194.6	194.65	194.725
$\Delta f_i$ (GHz)	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
$f_i$ (THz)	194.825	194.95	195.1	195.15	195.225	195.325	195.45	195.6	195.65	195.725	195.825	195.95		
$\Delta f_i$ (GHz)	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	125		

การจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) จะทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลง และสามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณได้มากกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ US เมื่อความถี่  $f_i$ ,  $f_j$  และ  $f_k$  เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือความถี่ของ FWM ซึ่งหาได้จาก  $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$  โดยสัญญาณความถี่นี้จะไม่ไปซ้อนทับกับความถี่ของช่องสัญญาณ ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลงน้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES ดังแสดงในรูปที่ 3.11

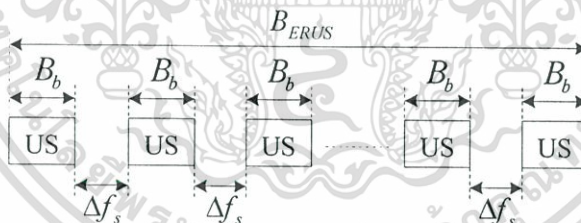
### 3.4.3.4 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RUS (ERUS) ตามมาตรฐานของ

ITU-T G.694.1 จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำใช้



รูปที่ 3.11 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS

(เราเรียกกลุ่มของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำว่า base unit) และเว้นให้มีระยะห่างระหว่าง base unit ( $\Delta f_s$ ) ที่เท่าๆกัน โดยหาค่า  $\Delta f_s$  ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดย  $\Delta f_s \neq \Delta f_i$  ดังนั้นจะทำการเลือกค่า  $\Delta f_s = 62.5$  GHz เมื่อ  $\Delta f_s$  มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของ  $\Delta f_i = 50$  GHz และน้อยกว่าค่าที่น้อยสุดถัดมา  $\Delta f_i = 75$  GHz เมื่อ  $B_{ERUS}$  คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS หาได้จาก  $B_{ERUS} = nB_b + (n-1)\Delta f_s + B_{res}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของ base unit,  $B_b$  คือแบนด์วิดท์ของ base unit,  $\Delta f_s$  คือระยะห่างระหว่าง base unit ที่อยู่ข้างเคียง และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยแบนด์วิดท์ของ base unit แรกครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 1-6, base unit ที่ 2 ครอบคลุมช่องสัญญาณ 7-12 ไปจนถึง base unit สุดท้ายดังในรูปที่ 3.12 และตารางที่ 3.4 เมื่อ  $f_1$  เท่ากับ 192.1THz โดย  $f_{i+1} = f_i + \Delta f_i$  และ  $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$  ซึ่ง  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

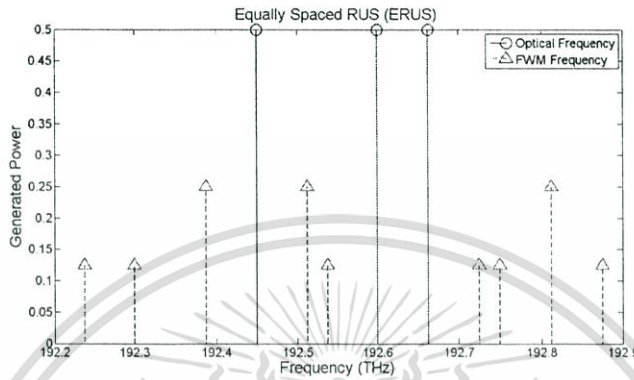


รูปที่ 3.12 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS

ตารางที่ 3.4 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.15	192.225	192.325	192.45	192.6	192.6625	192.7125	192.7875	192.8875	193.0125
$\Delta f_i$ (GHz)	50	75	100	125	150	<b>62.5</b>	50	75	100	125	150
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.275	193.35	193.45	193.575	193.725	193.7875	193.8375	193.9125	194.0125
$\Delta f_i$ (GHz)	<b>62.5</b>	50	75	100	125	150	<b>62.5</b>	50	75	100	125
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1375	194.2875	194.35	194.4	194.475	194.575	194.7	194.85	194.9125	194.9625	195.0375
$\Delta f_i$ (GHz)	150	<b>62.5</b>	50	75	100	125	150	<b>62.5</b>	50	75	100
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.1375	195.2625	195.4125	195.475	195.525	195.6	195.7	195.825	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	125	150	<b>62.5</b>	50	75	100	125	150			

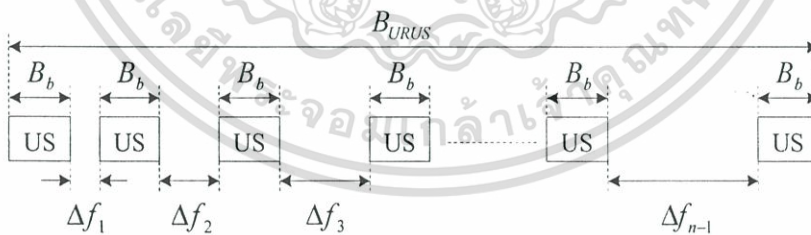
การจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RUS (ERUS) จะเกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลงน้อยกว่าแบบ ES และ RUS และสามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณได้มากกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS เมื่อความถี่  $f_i$ ,  $f_j$  และ  $f_k$  เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือความถี่ของ FWM ซึ่งหาได้จาก  $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$  โดยสัญญาณความถี่นี้จะไม่ไปซ้อนทับความถี่ของช่องสัญญาณ ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS

### 3.4.3.5 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced RUS (URUS)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced RUS (URUS) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ และเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ( $\Delta f_d$ ) ที่ไม่เท่ากันเมื่อกำหนดให้  $B_{URUS}$  เป็นแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ URUS ดังรูปที่ 3.14 และในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.14 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ URUS

การจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced RUS (URUS) จะทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลง แต่จะสามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณได้น้อย ในการจัดช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จากการจัดช่องสัญญาณแบบ URUS จะอาศัยการเกิดขึ้นมาใหม่ของกลุ่มการจัดช่องสัญญาณแบบ US (base unit) และเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งผลรวมของแบนด์วิดท์แบบ URUS ( $B_{URUS}$ ) หาได้จาก  $B_{URUS} = nB_b + \sum_{d=1}^{n-1} \Delta f_d + B_{res}$  เมื่อ  $n$

คือจำนวนของ base unit,  $B_b$  คือแบนด์วิดท์ของ base unit,  $\Delta f_d$  คือค่าคงที่ของความถี่การซ้ำ  
ไม่ว่าระหว่าง base unit ที่อยู่ข้างเคียง และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดย

ช่องสัญญาณเริ่มต้นของ base unit แรกอยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 1-6 base unit ที่ 2 อยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 7-12 ไปจนถึง base unit สุดท้าย และรวมช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ URUS จะมีจำนวนของช่องสัญญาณที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS เมื่อนำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA (192.1THz –196.0THz หรือ 1560.61nm –1529.55nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [3-5])

ตารางที่ 3.5 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ URUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.15	192.225	192.325	192.45	192.6	192.6625	192.7125	192.7875	192.8875	193.0125
$\Delta f_i$ (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.25	193.3	193.375	193.475	193.6	193.75	193.8625	193.9125	193.8975	194.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	87.5	50	75	100	125	150	112.5	50	75	125	100
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.2125	194.3625	194.5	194.55	194.625	194.725	194.85	195.0	195.1625	195.2125	195.2875
$\Delta f_i$ (GHz)	150	137.5	50	75	100	125	150	162.5	50	75	
Channel	34	35	36	37	38	39					
$f_i$ (THz)	195.3875	195.5125	195.6625	195.8375	195.8875	195.9625					
$\Delta f_i$ (GHz)	100	125	150	175	50	75					

### 3.4.4 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมา

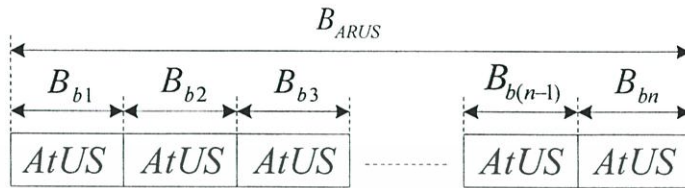
#### 3.4.4.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Alternative RUS (ARUS)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Alternative Repeated Unequally Spaced (ARUS) ที่ทำการปรับปรุงมาจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS โดยการใช้เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) และทำการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ภายใน base unit ที่ทำให้เกิดผลกระทบของ FWM น้อยที่สุด เรียกว่า เทคนิค Alternative Unequally Spaced (AtUS) (คล้ายกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS แต่แตกต่างกันที่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณภายใน base unit) การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ARUS แสดงดังรูปที่ 3.15 เมื่อกำหนดให้  $B_{ARUS}$  คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ ARUS ซึ่งภายใน  $B_{ARUS}$  จะจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ AtUS ในแต่ละ base unit โดยกำหนดให้แต่ละ base unit มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 5 ช่อง เมื่อช่องสัญญาณเริ่มต้นของแต่ละ base unit ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ( $N_{C_{first-ARUS}}$ ) เขียนได้ดังนี้

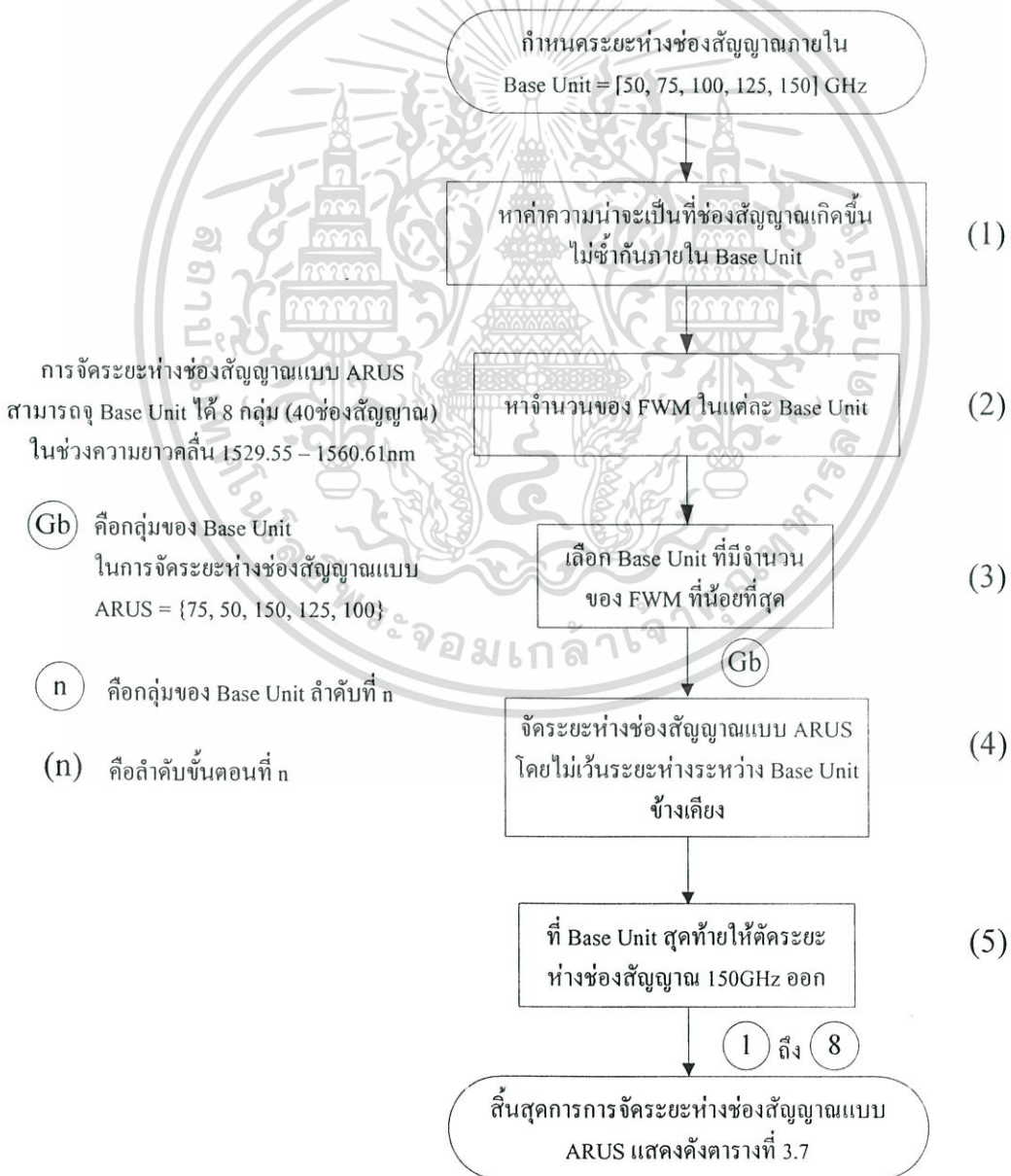
$$N_{C_{first-ARUS}} = \{1, 6, 11, 16, 21, 26, 31, 36\}$$

วิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Alternative Repeated Unequally Spaced (ARUS) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 เมื่อกำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ

( $\Delta f_i$ ) ภายใน base unit เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz (สาเหตุที่เลือก ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามข้างต้น เพราะจะได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่าง ว่าต่างจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES เพียงใด (ที่แบนด์วิดท์ของ base unit เท่ากัน) และสาเหตุที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ และดีมัลติเพล็กซ์แสง [1-2]) โดยขั้นตอนในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.16 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ARUS  
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

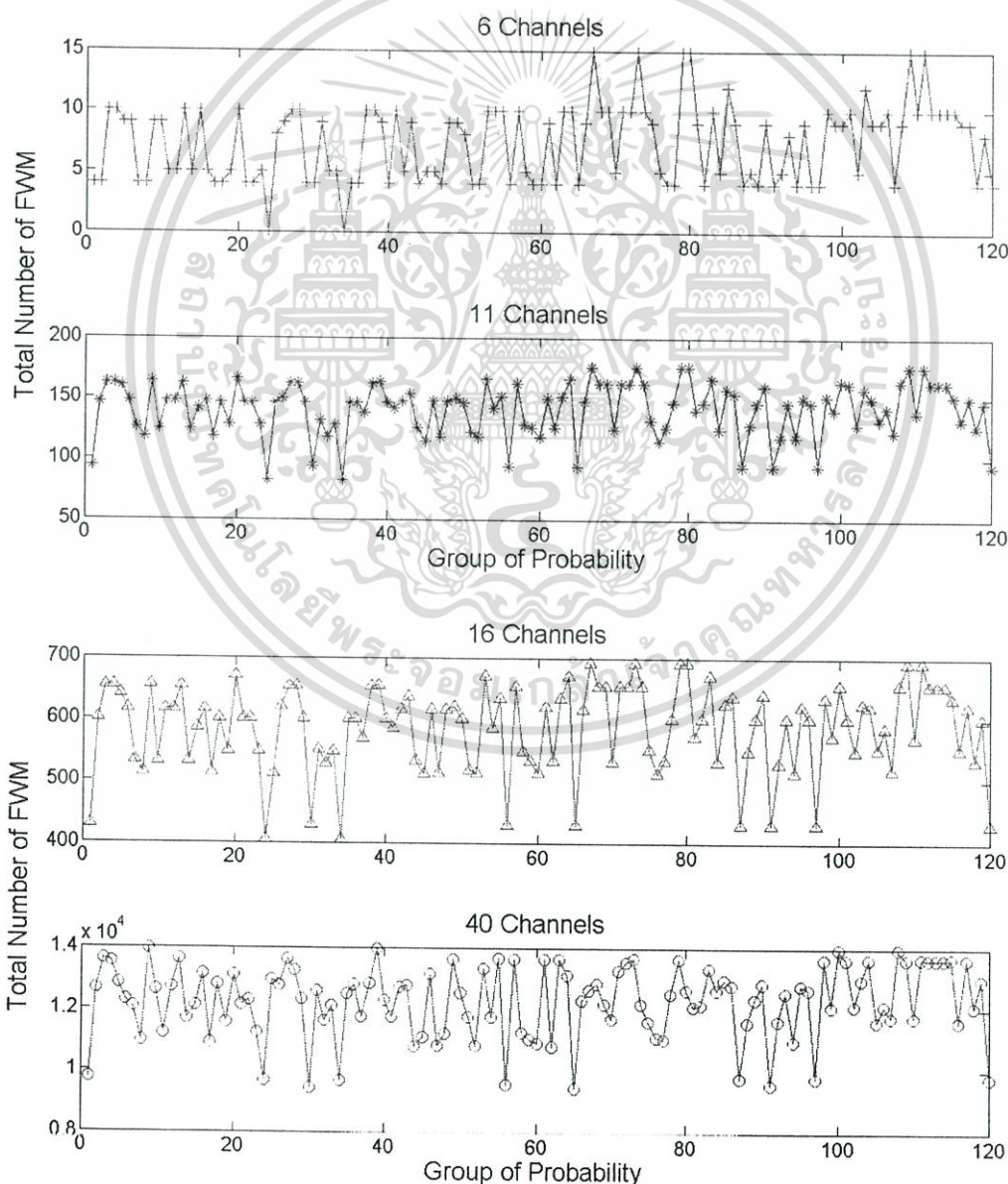
1. ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่  $\Delta f_i$  เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันภายใน base unit ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 กลุ่มของ base unit จากการหาค่าความน่าจะเป็นที่ระหว่างช่องสัญญาณเกิดขึ้นไม่ซ้ำกัน

ลำดับ	$\Delta f_i$ ภายใน base unit	ลำดับ	$\Delta f_i$ ภายใน base unit	ลำดับ	$\Delta f_i$ ภายใน base unit
1	50, 75, 100, 125, 150	34	75, 100, 125, 150, 50	67	100, 150, 50, 75, 125
2	50, 75, 100, 150, 125	35	75, 100, 150, 50, 125	68	100, 150, 50, 125, 75
3	50, 75, 125, 100, 150	36	75, 100, 150, 125, 50	69	100, 150, 75, 50, 125
4	50, 75, 125, 150, 100	37	75, 125, 50, 100, 150	70	100, 150, 75, 125, 50
5	50, 75, 150, 100, 125	38	75, 125, 50, 150, 100	71	100, 150, 125, 50, 75
6	50, 75, 150, 125, 100	39	75, 125, 100, 50, 150	72	100, 150, 125, 75, 50
7	50, 100, 75, 125, 150	40	75, 125, 100, 150, 50	73	125, 50, 75, 100, 150
8	50, 100, 75, 150, 125	41	75, 125, 150, 50, 100	74	125, 50, 75, 150, 100
9	50, 100, 125, 75, 150	42	75, 125, 150, 100, 50	75	125, 50, 100, 75, 150
10	50, 100, 125, 150, 75	43	75, 150, 50, 100, 125	76	125, 50, 100, 150, 75
11	50, 100, 150, 75, 125	44	75, 150, 50, 125, 100	77	125, 50, 150, 75, 100
12	50, 100, 150, 125, 75	45	75, 150, 100, 50, 125	78	125, 50, 150, 100, 75
13	50, 125, 75, 100, 150	46	75, 150, 100, 125, 50	79	125, 75, 50, 100, 150
14	50, 125, 75, 150, 100	47	75, 150, 125, 50, 100	80	125, 75, 50, 150, 100
15	50, 125, 100, 75, 150	48	75, 150, 125, 100, 50	81	125, 75, 100, 50, 150
16	50, 125, 100, 150, 75	49	100, 50, 75, 125, 150	82	125, 75, 100, 150, 50
17	50, 125, 150, 75, 100	50	100, 50, 75, 150, 125	83	125, 75, 150, 50, 100
18	50, 125, 150, 100, 75	51	100, 50, 125, 75, 150	84	125, 75, 150, 100, 50
19	50, 150, 75, 100, 125	52	100, 50, 125, 150, 75	85	125, 100, 50, 75, 150
20	50, 150, 75, 125, 100	53	100, 50, 150, 75, 125	86	125, 100, 50, 150, 75
21	50, 150, 100, 75, 125	54	100, 50, 150, 125, 75	87	125, 100, 75, 50, 150
22	50, 150, 100, 125, 75	55	100, 75, 50, 125, 150	88	125, 100, 75, 150, 50
23	50, 150, 125, 75, 100	56	100, 75, 50, 150, 125	89	125, 100, 150, 50, 75
24	50, 150, 125, 100, 75	57	100, 75, 125, 50, 150	90	125, 100, 150, 75, 50
25	75, 50, 100, 125, 150	58	100, 75, 125, 150, 50	91	125, 150, 50, 75, 100
26	75, 50, 100, 150, 125	59	100, 75, 150, 50, 125	92	125, 150, 50, 100, 75
27	75, 50, 125, 100, 150	60	100, 75, 150, 125, 50	93	125, 150, 75, 50, 100
28	75, 50, 125, 150, 100	61	100, 125, 50, 75, 150	94	125, 150, 75, 100, 50
29	75, 50, 150, 100, 125	62	100, 125, 50, 150, 75	95	125, 150, 100, 50, 75
30	75, 50, 150, 125, 100	63	100, 125, 75, 50, 150	96	125, 150, 100, 75, 50
31	75, 100, 50, 125, 150	64	100, 125, 75, 150, 50	97	150, 50, 75, 100, 125
32	75, 100, 50, 150, 125	65	100, 125, 150, 50, 75	98	150, 50, 75, 125, 100
33	75, 100, 125, 50, 150	66	100, 125, 150, 75, 50	99	150, 50, 100, 75, 125

ลำดับ	$\Delta f_i$ ภายใน base unit	ลำดับ	$\Delta f_i$ ภายใน base unit	ลำดับ	$\Delta f_i$ ภายใน base unit
100	150, 50, 100, 125, 75	107	150, 75, 125, 50, 100	114	150, 100, 125, 75, 50
101	150, 50, 125, 75, 100	108	150, 75, 125, 100, 50	115	150, 125, 50, 75, 100
102	150, 50, 125, 100, 75	109	150, 100, 50, 75, 125	116	150, 125, 50, 100, 75
103	150, 75, 50, 100, 125	110	150, 100, 50, 125, 75	117	150, 125, 75, 50, 100
104	150, 75, 50, 125, 100	111	150, 100, 75, 50, 125	118	150, 125, 75, 100, 50
105	150, 75, 100, 50, 125	112	150, 100, 75, 125, 50	119	150, 125, 100, 50, 75
106	150, 75, 100, 125, 50	113	150, 100, 125, 50, 75	120	150, 125, 100, 75, 50

2. หาจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่มในขั้นตอนที่ 1 จากการจัดช่องสัญญาณ 6, 11, 16 และ 40 ช่อง ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 จำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่ม จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ARUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นรับใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดมาหนึ่งกลุ่ม จากรูปที่ 3.17 base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดคือลำดับของกลุ่มที่ 30 {75, 50, 150, 125, 100} และ กลุ่มที่ 65 {100, 125, 150, 50, 75} โดยมีจำนวนของ FWM โดยรวมเท่ากับ 9430 เท่ากันทั้งสองกลุ่ม แต่ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS ต้องการเพียงแค่หนึ่งกลุ่ม เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้เราเลือกกลุ่มที่ 30 {75, 50, 150, 125, 100} เป็น base unit ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS

4. จากขั้นตอนที่ 3 นำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS จะสามารถจัดระยะห่างช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิธของ EDFA (1529.55 – 1560.61 nm หรือ 192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 เมื่อผลรวมของแบนด์วิธทั้งหมดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ARUS สามารถหาค่าได้ดังนี้  $B_{ARUS} = n(B_b) + B_{res}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของ base unit,  $B_b$  คือแบนด์วิธของ base unit และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิธของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยช่องสัญญาณเริ่มต้นของ base unit แรกอยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 1-5 base unit ที่ 2 อยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 6-10 ไปจนถึง base unit สุดท้าย

5. ที่ base unit สุดท้าย ให้จัดระยะห่างช่องสัญญาณ 150 GHz ออก สาเหตุที่จัดระยะห่างช่องสัญญาณ 150 GHz ออก เพราะแบนด์วิธของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS นั้นเกินช่วงแบนด์วิธของ EDFA (192.1 - 196.0 THz) จึงทำการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ 150 GHz ออก จะทำให้ได้กลุ่มของ base unit สุดท้ายคือ {75, 50, 125, 100} โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.675	192.725	192.875	193	193.1	193.175	193.225	
$\Delta f_i$ (GHz)		75	50	150	125	100	75	50	150	125	100	75	50	150
Channel	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
$f_i$ (THz)	193.375	193.5	193.6	193.675	193.725	193.875	194	194.1	194.175	194.225	194.375	194.5	194.6	
$\Delta f_i$ (GHz)		125	100	75	50	150	125	100	75	50	150	125	100	75
Channel	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$f_i$ (THz)	194.675	194.725	194.875	195	195.1	195.175	195.225	195.375	195.5	195.6	195.675	195.725	195.85	195.95
$\Delta f_i$ (GHz)		50	150	125	100	75	50	150	125	100	75	50	125	100

เมื่อกำหนดให้  $f_1$  เท่ากับ 192.1THz โดย  $f_{i+1} = f_i + \Delta f_i$  และ  $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$  ซึ่ง  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

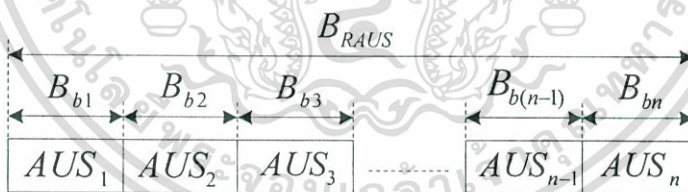
### 3.4.4.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Alternate US (RAUS)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Alternate Unequally Spaced (RAUS) ที่ทำการปรับปรุงมาจากวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS โดยการใส่เทคนิคการจัดระยะห่างไม่เท่ากันใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) และทำให้ระยะห่างช่องสัญญาณที่อยู่ภายใน base unit สลับที่กันแบบไม่ซ้ำกันในแต่ละ base unit ข้างเคียง เรียกว่า เทคนิค Alternated Unequally Spaced (AUS) และไม่วั้นระยะห่างระหว่าง base unit ข้างเคียง (คล้ายกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS แต่แตกต่างกันที่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณภายใน base unit) การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RAUS แสดงดังรูปที่ 3.18 เมื่อกำหนดให้  $B_{RAUS}$  คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS ซึ่งภายใน  $B_{RAUS}$  จะจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ AUS ในแต่ละ base unit โดยกำหนดให้แต่ละ base unit มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 5 ช่อง เมื่อช่องสัญญาณเริ่มต้นของแต่ละ base unit ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ( $N_{C_{first-RAUS}}$ ) เขียนได้ดังนี้

$$N_{C_{first-RAUS}} = \{1, 6, 11, 16, 21, 26, 31, 36\}$$

วิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Repeated Alternate Unequally Spaced (RAUS) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 เมื่อกำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ ( $\Delta f_i$ ) ภายใน base unit เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz (สาเหตุที่เลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามข้างต้น เพราะจะได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างว่าต่างจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES เพียงใด (ที่แบนด์วิดท์ของ base unit เท่ากัน) และสาเหตุที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสง [1-2]) โดยขั้นตอนในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS

วิธีการเลือกช่องสัญญาณในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่  $\Delta f_i$  เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันภายใน base unit ดังตารางที่ 3.6
2. หาจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่มในขั้นตอนที่ 1 จากการจัดช่องสัญญาณ 6, 11, 16 และ 40 ช่อง ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.17

3. เลือก base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดมา 7 กลุ่ม จากรูปที่ 3.17 base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุด 7 กลุ่ม คือลำดับ (เรียงจากน้อยไปหามาก) ของกลุ่มที่ 30 {75, 50,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
150, 125, 100}, กลุ่มที่ 65 {100, 125, 150, 50, 75}, กลุ่มที่ 56 {100, 75, 50, 150, 125}, กลุ่มที่ 91  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{125, 150, 50, 75, 100}, กลุ่มที่ 24 {50, 150, 125, 100, 75}, กลุ่มที่ 34 {75, 100, 125, 150, 50} และ กลุ่มที่ 87 {125, 100, 75, 50, 150} โดยมีจำนวนของ FWM โดยรวมเท่ากับ 9430, 9430, 9564, 9564, 9660, 9660 และ 9756 ตามลำดับ ซึ่งต้องทำการสลับกลุ่มจำนวน 7 กลุ่ม ถึงจะเต็มความจุของแบนด์วิคท์ในช่วงของ EDFA (192.1 – 196.0 THz) ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1



รูปที่ 3.19 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RAUS

4. การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS จะทำการสลับ base unit จากที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยไปหามาก แต่ในการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS ต้องการเพียงแค่ 6 กลุ่ม เพราะการไม่วางกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลัปกุ่มของ base unit จำนวน 6 กลุ่ม จะทำให้ประสิทธิภาพของ FWM ( $\eta_{ijk}$ ) ต่ำที่สุด จากการทดลองสลัปกุ่มทั้งหมด 7 กลุ่ม แสดงดังรูปที่ 3.20 เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้เราเลือกกลุ่มที่ 24, 30, 34, 56, 87 และ 91 เป็น base unit ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS แสดงให้เห็นดังตารางที่ 3.8 – 3.13 (โดยตารางที่ 3.7 เป็นการสลัปกุ่มเพียงกลุ่มเดียว)

**ตารางที่ 3.8** การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลัปกุ่มของ base unit จำนวน 2 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิธของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.725	192.875	192.925	193	193.1	193.175	193.225	
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	75	50	150	
Channel	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
$f_i$ (THz)	193.375	193.5	193.6	193.725	193.875	193.925	194	194.1	194.175	194.225	194.375	194.5	194.6	
$\Delta f_i$ (GHz)	125	100	125	150	50	75	100	75	50	150	125	100	125	
Channel	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$f_i$ (THz)	194.725	194.875	194.925	195	195.1	195.175	195.225	195.375	195.5	195.6	195.725	195.775	195.85	195.95
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	75	100	75	50	150	125	100	125	50	75	100	

**ตารางที่ 3.9** การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลัปกุ่มของ base unit จำนวน 3 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิธของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.725	192.875	192.925	193	193.1	193.175	193.275	
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	75	100	125	
Channel	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
$f_i$ (THz)	193.4	193.55	193.6	193.675	193.725	193.875	194	194.1	194.225	194.375	194.425	194.5	194.6	
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	75	
Channel	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$f_i$ (THz)	194.675	194.775	194.9	195.05	195.1	195.175	195.225	195.375	195.5	195.6	195.725	195.775	195.85	195.95
$\Delta f_i$ (GHz)	100	125	150	50	75	50	150	125	100	125	50	75	100	

**ตารางที่ 3.10** การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลัปกุ่มของ base unit จำนวน 4 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิธของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.725	192.875	192.925	193	193.1	193.175	193.275	
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	75	100	125	
Channel	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
$f_i$ (THz)	193.4	193.55	193.6	193.725	193.825	193.9	193.95	194.1	194.175	194.225	194.375	194.5	194.6	
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	125	100	75	50	150	75	50	150	125	100	125	
Channel	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$f_i$ (THz)	194.725	194.875	194.925	195	195.1	195.175	195.275	195.4	195.55	195.6	195.725	195.825	195.9	195.95
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	75	100	75	100	125	150	50	125	100	75	50	

ตารางที่ 3.11 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 5 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.725	192.875	192.925	193	193.1	193.175	193.275	
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	75	100	125	
Channel	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
$f_i$ (THz)	193.4	193.55	193.6	193.725	193.825	193.9	193.95	194.1	194.2	194.275	194.325	194.475	194.6	
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	125	100	75	50	150	100	75	50	150	125	75	
Channel	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$f_i$ (THz)	194.675	194.725	194.875	195	195.1	195.225	195.375	195.425	195.5	195.6	195.675	195.775	195.9	195.95
$\Delta f_i$ (GHz)	50	150	125	100	125	150	50	75	100	75	100	125	50	

ตารางที่ 3.12 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 6 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.725	192.875	192.925	193	193.1	193.15	193.3	193.425
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	50	150	125	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
$f_i$ (THz)	193.525	193.6	193.725	193.825	193.9	193.95	194.1	194.2	194.275	194.325	194.475	194.6	194.675	
$\Delta f_i$ (GHz)	100	75	125	100	75	50	150	100	75	50	150	125	75	
Channel	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
$f_i$ (THz)	194.775	194.9	195.05	195.1	195.175	195.225	195.375	195.5	195.6	195.725	195.775	195.85	195.95	
$\Delta f_i$ (GHz)	100	125	150	50	75	50	150	125	100	125	50	75	100	

ตารางที่ 3.13 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 7 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

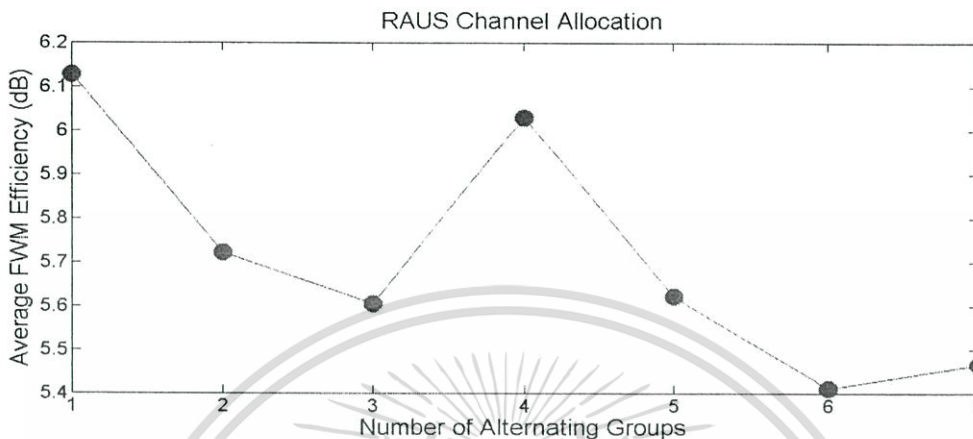
Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.725	192.875	192.925	193	193.1	193.15	193.3	193.425
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	125	150	50	75	100	50	150	125	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
$f_i$ (THz)	193.525	193.6	193.725	193.825	193.9	193.95	194.1	194.2	194.275	194.325	194.475	194.6	194.675	
$\Delta f_i$ (GHz)	100	75	125	100	75	50	150	100	75	50	150	125	75	
Channel	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
$f_i$ (THz)	194.775	194.9	195.05	195.1	195.2	195.325	195.425	195.525	195.6	195.65	195.725	195.825	195.95	
$\Delta f_i$ (GHz)	100	125	150	50	100	125	150	50	75	50	75	100	125	

เมื่อกำหนดให้  $f_1$  เท่ากับ 192.1 THz โดย  $f_{i+1} = f_i + \Delta f_i$  และ  $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$  ซึ่ง  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

5. จากขั้นตอนที่ 4 นำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS จะสามารถจัดระยะห่างช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA (192.1 – 196.0 THz) ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่สงวนสิทธิ์ในไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
เมื่อผลรวมของแบนด์วิดท์ทั้งหมดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS สามารถหาค่าได้ดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$B_{RAUS} = n(B_{b1} + B_{b2} + B_{b3} + \dots + B_{bn}) + B_{res}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของ base unit,  $B_{bn}$  คือแบนด์วิดท์ของ base unit และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยช่องสัญญาณเริ่มต้นของ base unit แรกอยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 1-5 base unit ที่ 2 อยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 6-10 ไปจนถึง base unit สุดท้าย



รูปที่ 3.20 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณ RAUS โดยการสลับกลุ่ม 1 – 7 กลุ่ม

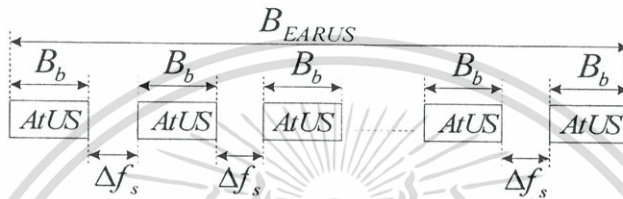
6. ที่ base unit สุดท้าย ให้ตัดระยะห่างช่องสัญญาณ 150 GHz ออก สาเหตุที่ตัดระยะห่างช่องสัญญาณ 150 GHz ออก เพราะแบนด์วิดท์ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS นั้นเกินช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA (192.1 - 196.0 THz) จึงทำการตัดระยะห่างช่องสัญญาณ 150 GHz ออก จะทำให้ได้กลุ่มของ base unit สุดท้ายคือ {125, 50, 75, 100} โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS แสดงดังตารางที่ 3.12

#### 3.4.4.3 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced ARUS (EARUS)

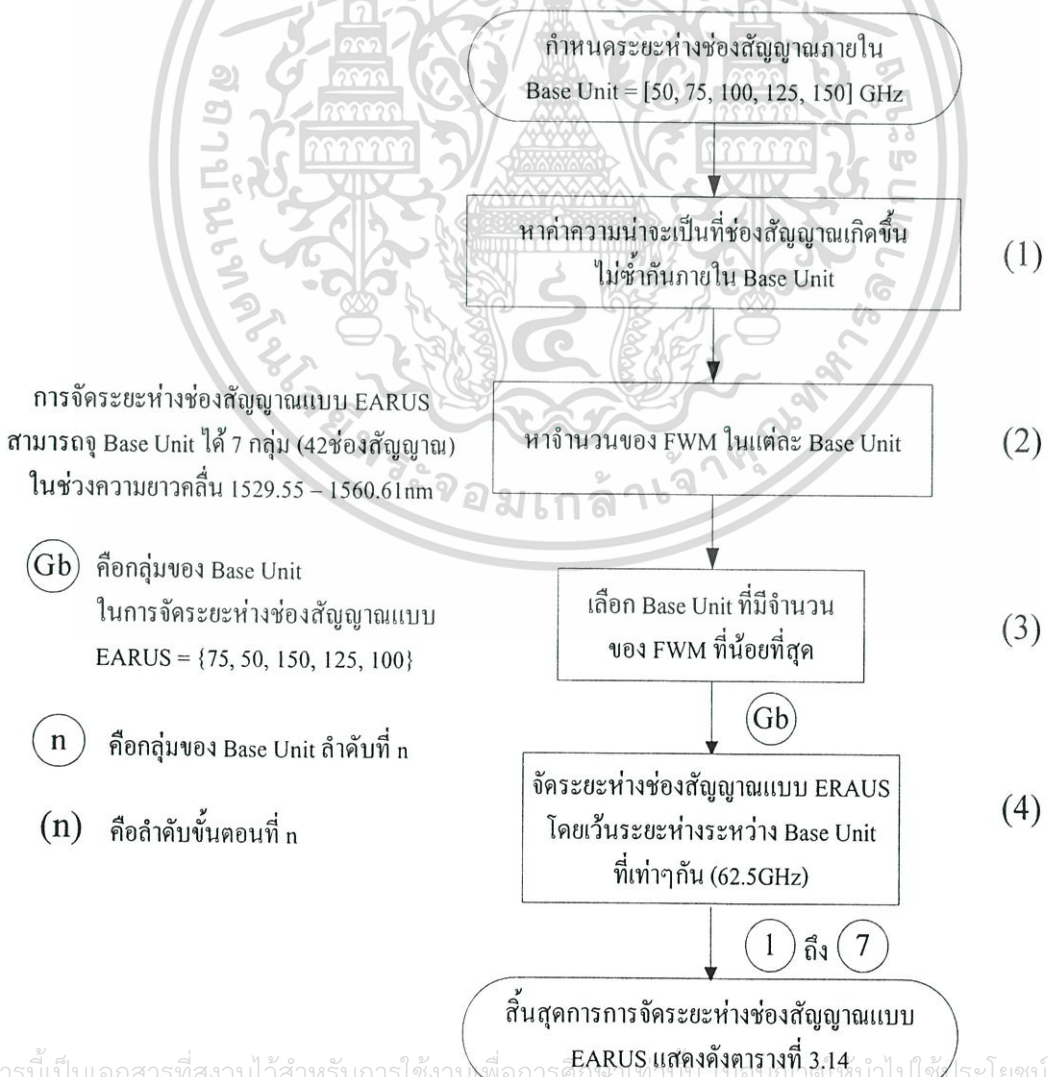
วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced ARUS (EARUS) ที่ทำการปรับปรุงมาจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยเลือกระยะห่างที่อยู่ภายใน base unit ที่ทำให้เกิดผลกระทบของ FWM น้อยที่สุด เรียกว่า เทคนิค Alternative Unequally Spaced (AUS) แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ และเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ข้างเคียง ( $\Delta f_s$ ) ที่เท่าๆกัน (คล้ายกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS แต่แตกต่างกันที่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณภายใน base unit) การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ EARUS แสดงดังรูปที่ 3.21 โดยหาค่า  $\Delta f_s$  ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดย  $\Delta f_s \neq \Delta f_i$  ดังนั้นจะทำการเลือกค่า  $\Delta f_s = 62.5$  GHz เมื่อ  $\Delta f_s$  มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของ  $\Delta f_i = 50$  GHz) และน้อยกว่าค่าที่น้อยสุดถัดมา  $\Delta f_i = 75$  GHz เมื่อกำหนดให้  $B_{EARUS}$  คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ EARUS ซึ่งภายใน  $B_{EARUS}$  จะจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ AUS ในแต่ละ base unit โดยกำหนดให้แต่ละ base unit มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 6 ช่อง และช่องสัญญาณเริ่มต้นของแต่ละ base unit ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS การคำนวณ  $(N_{C_{EARUS}})$  เขียนได้ดังนี้  $N_{C_{EARUS}} = \frac{B_{EARUS}}{\Delta f_s}$  หักตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{C_{first}-EARUS} = \{1, 7, 13, 19, 25, 31, 37\}$$

วิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced ARUS (EARUS) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 เมื่อกำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ ( $f_i$ ) ภายใน base unit เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz (สาเหตุที่เลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามข้างต้น เพราะจะได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างว่าต่างจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES เพียงใด (ที่แบนด์วิดท์ของ base unit เท่ากัน) และสาเหตุที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสง [1-2]) โดยขั้นตอนในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

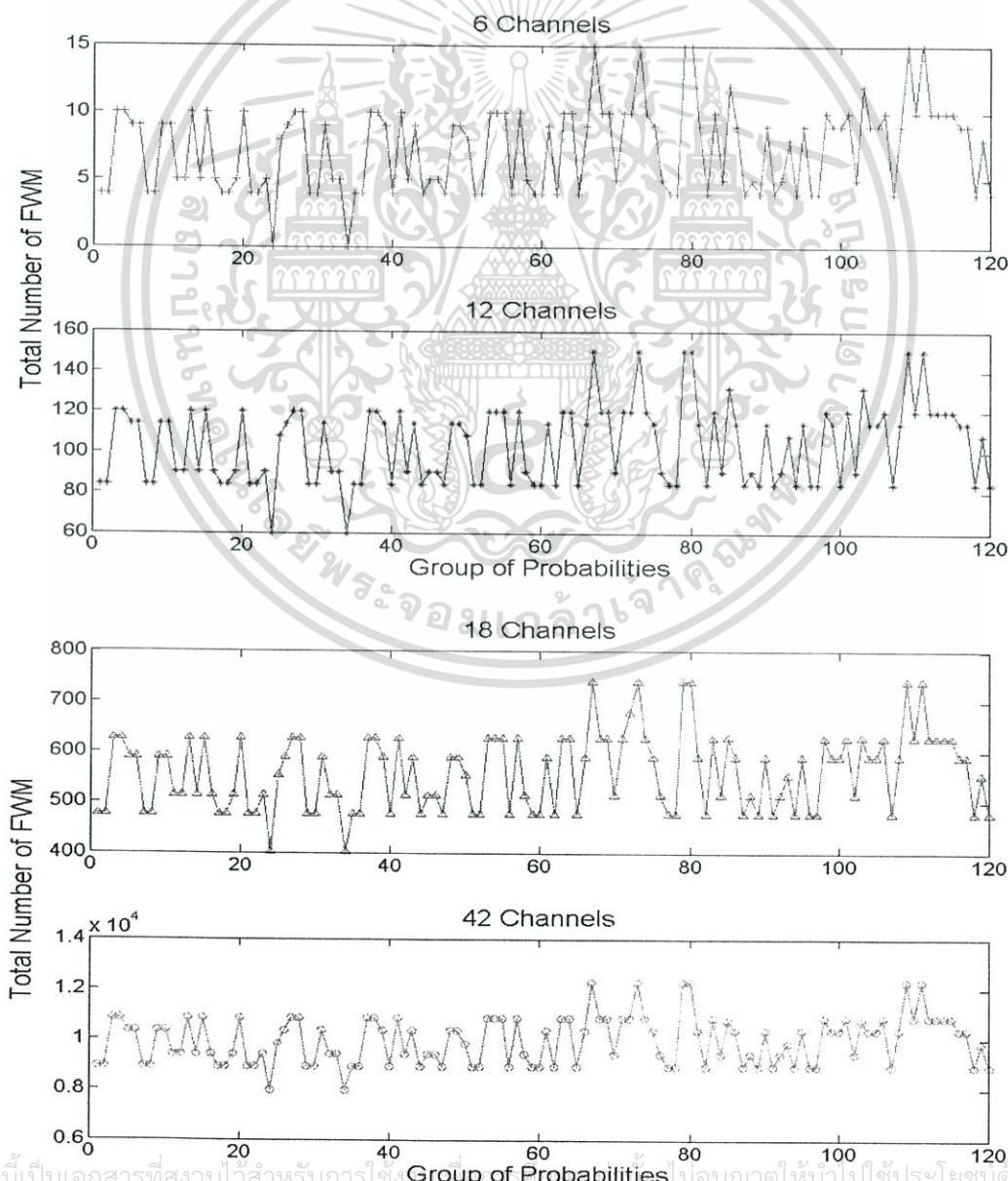
ไม่รูปที่ 3.22 รูปแบบขั้นตอนการจักระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ EARUS ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเลือกช่องสัญญาณในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่  $\Delta f_i$  เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันภายใน base unit ดังตารางที่ 3.6

2. หาจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่มในขั้นตอนที่ 1 จากการจัดช่องสัญญาณ 6, 12, 18 และ 42 ช่อง ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.23

3. เลือก base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดมาหนึ่งกลุ่ม จากรูปที่ 3.23 base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดคือลำดับของกลุ่มที่ 24 {50, 150, 125, 100, 75} และ กลุ่มที่ 34 {75, 100, 125, 150, 50} โดยมีจำนวนของ FWM โดยรวมเท่ากับ 7986 เท่ากันทั้งสองกลุ่ม แต่ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS ต้องการเพียงแค่หนึ่งกลุ่ม เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้ เราเลือกกลุ่มที่ 34 {75, 100, 125, 150, 50} เป็น base unit ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ารูปที่ 3.23 จำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่ม ในการจัดช่องสัญญาณแบบ EARUS

4. จากขั้นตอนที่ 3 นำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณรวมกันแบบ EARUS โดยเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ข้างเคียงเท่ากับ 62.5 GHz จะสามารถจัดช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA (192.1–196 THz) ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ได้ดังตารางที่ 3.14 เมื่อผลรวมของแบนด์วิดท์ทั้งหมดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS สามารถหาค่าได้ดังนี้  $B_{EARUS} = n(B_b) + (n-1)\Delta f_s + B_{res}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของ base unit,  $B_b$  คือแบนด์วิดท์ของ base unit,  $\Delta f_s$  คือค่าคงที่ของความกว้างระหว่าง base unit ที่อยู่ข้างเคียง และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา

ตารางที่ 3.14 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.275	192.4	192.55	192.6	192.6625	192.7375	192.8375	192.9625	193.1125
$\Delta f_i$ (GHz)	75	100	125	150	50	62.5	75	100	125	150	50
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.275	193.3	193.4	193.525	193.675	193.725	193.7875	193.8625	193.9625	194.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	75	100	125	150	50	62.5	75	100	125	150
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.2375	194.2875	194.35	194.425	194.525	194.65	194.8	194.85	194.9125	194.9875	195.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	50	62.5	75	100	125	150	50	62.5	75	100	125
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.2125	195.3625	195.4125	195.475	195.55	195.65	195.775	195.925	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	62.5	75	100	125	150	50			

เมื่อกำหนดให้  $f_1$  เท่ากับ 192.1 THz โดย  $f_{i+1} = f_i + \Delta f_i$  และ  $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$  ซึ่ง  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

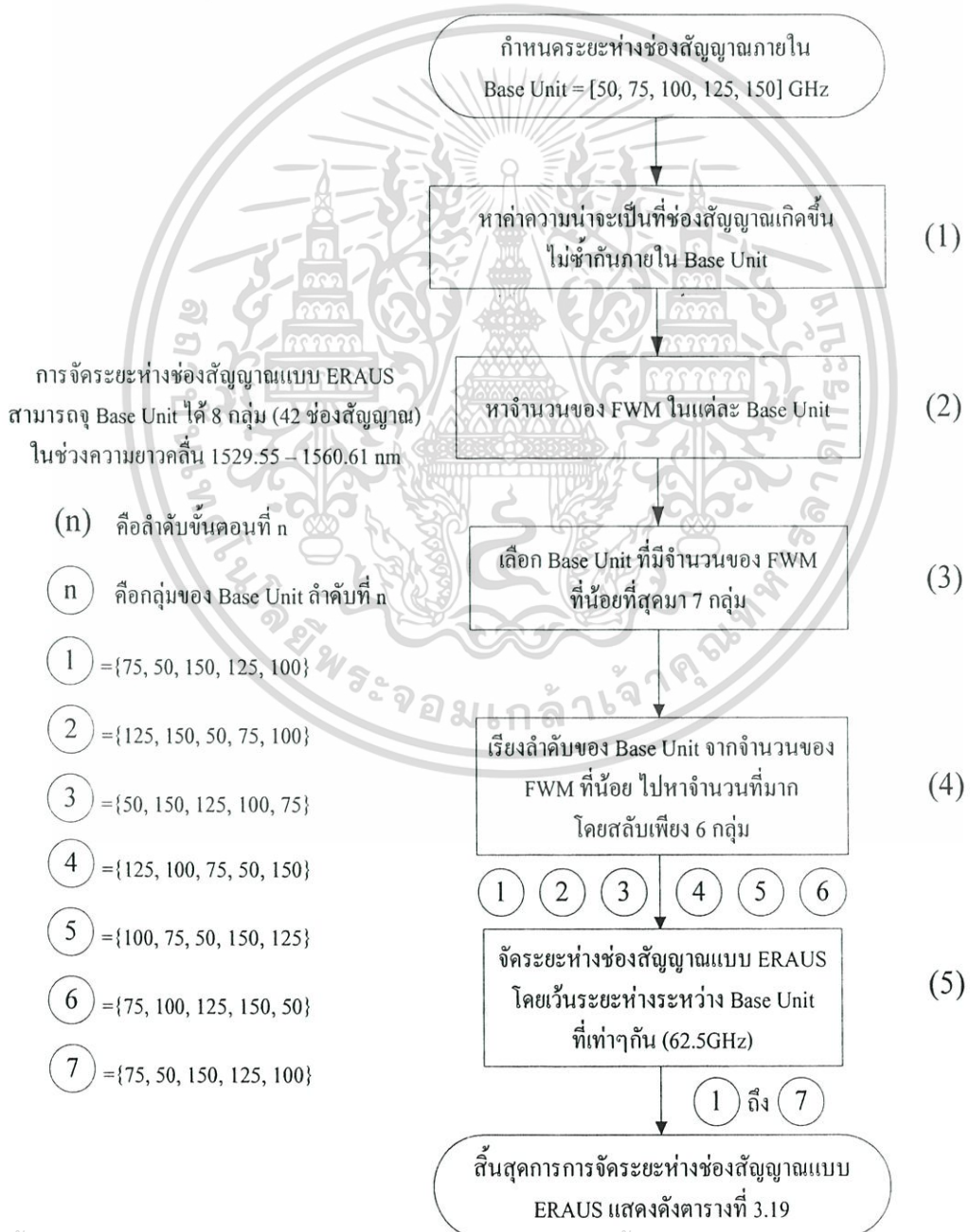
#### 3.4.4.4 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RAUS (ERAUS)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RAUS (ERAUS) ที่ทำการปรับปรุงมาจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยระยะห่างของความถี่ที่อยู่ภายใน base unit จะนำมาสลับที่กันแบบไม่ซ้ำกันในแต่ละ base unit ข้างเคียงเรียกว่า เทคนิค Alternate Unequally Spaced (AUS) และเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ข้างเคียง ( $\Delta f_s$ ) ที่เท่าๆกัน (คล้ายกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS แต่แตกต่างกันที่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณภายใน base unit) การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS แสดงดังรูปที่ 3.25 โดยหาค่า  $\Delta f_s$  ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดย  $\Delta f_s \neq \Delta f_i$  ดังนั้นจะทำการเลือกค่า  $\Delta f_s = 62.5$  GHz เมื่อ  $\Delta f_s$  มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของ  $\Delta f_i = 50$  GHz) และน้อยกว่าค่าที่น้อยสุดถัดมา  $\Delta f_i = 75$  GHz เมื่อกำหนดให้  $B_{ERAUS}$  คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS ซึ่งภายใน  $B_{ERAUS}$  จะจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ AUS โดยกำหนดให้แต่ละ base unit มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 6 ช่อง และช่องสัญญาณเริ่มต้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

$$N_{C_{first-ERAUS}} = \{1, 7, 13, 19, 25, 31, 37\}$$

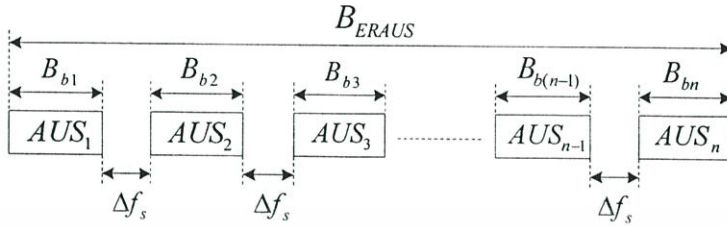
วิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced RAUS (ERAUS) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 เมื่อกำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ ( $f_i$ ) ภายใน base unit เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz (สาเหตุที่เลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามข้างต้น เพราะจะได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างว่าต่างจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES เพียงใด (ที่แบนด์วิดท์ของ base unit เท่ากัน) และสาเหตุที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสง [1-2]) โดยขั้นตอนในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS แสดงดังรูปที่ 3.24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.24 รูปแบบขั้นตอนการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS

วิธีการเลือกช่องสัญญาณในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

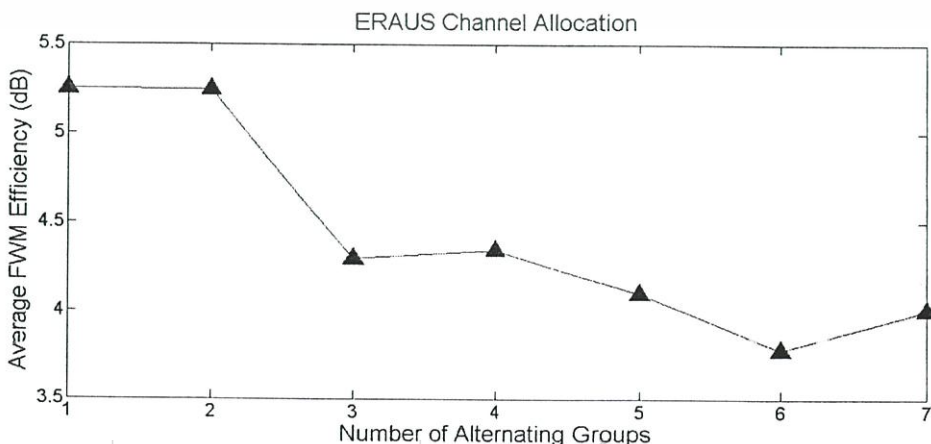
1. ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่  $\Delta f_i$  เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันภายใน base unit ดังตารางที่ 3.6
2. หาจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่มในขั้นตอนที่ 1 จากการจัดช่องสัญญาณ 6, 12, 18 และ 42 ช่อง ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.25 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS

3. เลือก base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดมา 7 กลุ่ม จากรูปที่ 3.23 base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุด 7 กลุ่ม คือลำดับ (เรียงจากน้อยไปหามาก) ของกลุ่มที่ 24 {50, 150, 125, 100, 75}, กลุ่มที่ 34 {75, 100, 125, 150, 50}, กลุ่มที่ 30 {75, 50, 150, 125, 100}, กลุ่มที่ 65 {100, 125, 150, 50, 75}, กลุ่มที่ 56 {100, 75, 50, 150, 125}, กลุ่มที่ 91 {125, 150, 50, 75, 100} และ กลุ่มที่ 87 {125, 100, 75, 50, 150} โดยมีจำนวนของ FWM โดยรวมเท่ากับ 7986, 7986, 8910, 8910, 8910 และ 8910 ตามลำดับ ซึ่งต้องทำการสลับกลุ่มจำนวน 7 กลุ่ม ถึงจะเต็มความจุของแบนด์วิดท์ในช่วงของ EDFA (192.1 – 196.0 THz) ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

4. การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS จะทำการสลับ base unit จากที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยไปหามาก แต่ในการจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS ต้องการเพียงแค่ 6 กลุ่ม เพราะการสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 6 กลุ่ม จะทำให้ประสิทธิภาพของ FWM ( $\eta_{ijk}$ ) ต่ำที่สุดจากการทดลองสลับกลุ่มทั้งหมด 7 กลุ่ม แสดงดังรูปที่ 3.26 เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้เราเลือกกลุ่มที่ 24, 30, 34, 56, 87 และ 91 เป็น base unit ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS แสดงให้เห็นดังตารางที่ 3.15 - 3.20 (โดยตารางที่ 3.14 เป็นการสลับกลุ่มเพียงกลุ่มเดียว)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.26 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยการสลับ 1-7 กลุ่มใช้

ตารางที่ 3.15 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 2 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.6625	192.7875	192.9375	192.9875	193.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75	100
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.3	193.35	193.5	193.625	193.725	193.7875	193.9125	194.0625	194.1125
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1875	194.2875	194.35	194.425	194.475	194.625	194.75	194.85	194.9125	195.0375	195.1875
$\Delta f_i$ (GHz)	100	62.5	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.2375	195.3125	195.4125	195.475	195.55	195.6	195.75	195.875	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	75	100	62.5	75	50	150	125	100			

ตารางที่ 3.16 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 3 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.6625	192.7875	192.9375	192.9875	193.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75	100
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.3	193.4	193.525	193.675	193.725	193.7875	193.8625	193.9125	194.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	75	100	125	150	50	62.5	75	50	150	125
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1875	194.2875	194.35	194.475	194.625	194.675	194.75	194.85	194.9125	194.9875	195.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	100	62.5	125	150	50	75	100	62.5	75	100	125
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.2125	195.3625	195.4125	195.475	195.55	195.6	195.75	195.875	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	62.5	75	50	150	125	100			

ตารางที่ 3.17 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 4 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.6625	192.7875	192.9375	192.9875	193.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75	100
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.3	193.4	193.525	193.675	193.725	193.7875	193.9125	194.0125	194.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	75	100	125	150	50	62.5	125	100	75	50
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1375	194.2875	194.35	194.425	194.475	194.625	194.75	194.85	194.9125	195.0375	195.1875
$\Delta f_i$ (GHz)	150	62.5	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50

Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42
$f_i$ (THz)	195.2375	195.3125	195.4125	195.475	195.55	195.65	195.775	195.925	195.975
$\Delta f_i$ (GHz)	75	100	62.5	75	100	125	150	50	

ตารางที่ 3.18 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 5 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.6625	192.7875	192.9375	192.9875	193.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75	100
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.3	193.4	193.525	193.675	193.725	193.7875	193.9125	194.0125	194.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	75	100	125	150	50	62.5	125	100	75	50
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1375	194.2875	194.35	194.45	194.525	194.575	194.725	194.85	194.9125	194.9875	195.0375
$\Delta f_i$ (GHz)	150	62.5	100	75	50	150	125	62.5	75	50	150
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.1875	195.3125	195.4125	195.475	195.6	195.75	195.8	195.875	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	125	100	62.5	125	150	50	75	100			

ตารางที่ 3.19 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 6 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.6625	192.7875	192.9375	192.9875	193.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75	100
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.275	193.425	193.55	193.65	193.725	193.7875	193.9125	194.0125	194.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	50	150	125	100	75	62.5	125	100	75	50
Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1375	194.2875	194.35	194.45	194.525	194.575	194.725	194.85	194.9125	194.9875	195.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	150	62.5	100	75	50	150	125	62.5	75	100	125
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.2125	195.3625	195.4125	195.475	195.55	195.6	195.75	195.875	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	62.5	75	50	150	125	100			

ตารางที่ 3.20 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยสลับกลุ่มของ base unit จำนวน 7 กลุ่ม ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_i$ (THz)	192.1	192.175	192.225	192.375	192.5	192.6	192.6625	192.7875	192.9375	192.9875	193.0625
$\Delta f_i$ (GHz)	75	50	150	125	100	62.5	125	150	50	75	100
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f_i$ (THz)	193.1625	193.225	193.275	193.425	193.55	193.65	193.725	193.7875	193.9125	194.0125	194.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	62.5	50	150	125	100	75	62.5	125	100	75	50

Channel	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$f_i$ (THz)	194.1375	194.2875	194.35	194.45	194.525	194.575	194.725	194.85	194.9125	194.9875	195.0875
$\Delta f_i$ (GHz)	150	62.5	100	75	50	150	125	62.5	75	100	125
Channel	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
$f_i$ (THz)	195.2125	195.3625	195.4125	195.475	195.575	195.7	195.85	195.9	195.975		
$\Delta f_i$ (GHz)	150	50	62.5	100	125	150	50	75			

เมื่อกำหนดให้  $f_1$  เท่ากับ 192.1 THz โดย  $f_{i+1} = f_i + \Delta f_i$  และ  $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$  ซึ่ง  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

5. จากขั้นตอนที่ 4 นำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณรวมกันแบบ ERAUS โดยเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ข้างเคียงเท่ากับ 62.5 GHz สามารถจัดระยะห่างช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ได้ดังตารางที่ 3.19 เมื่อผลรวมของแบนด์วิดท์ทั้งหมดจาก ERAUS หาค่าได้ดังนี้  $B_{ERAUS} = n(B_{b1} + B_{b2} + B_{b3} + \dots + B_{bn}) + (n-1)\Delta f_s + B_{res}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของ base unit,  $B_{bn}$  คือแบนด์วิดท์ของ base unit,  $\Delta f_s$  คือค่าคงที่ของความกว้างระหว่าง base unit ที่อยู่ข้างเคียง และ  $B_{res}$  คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยช่องสัญญาณเริ่มต้นของ base unit แรกอยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 1-6 base unit ที่ 2 อยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 7-12 ไปจนถึง base unit สุดท้าย

## บทที่ 4

# ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

### 4.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณในระบบส่งสัญญาณ DWDM ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [15] ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0THz) ที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA [3-4] โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์วิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) และ Equally Spaced RUS (ERUS) เปรียบเทียบความแตกต่างกับวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Alternative RUS (ARUS), Repeated Alternate US (RAUS), Equally Spaced ARUS (EARUS) และ Equally Spaced RAUS (EARUS) [16-18] สังเกตผลลัพธ์ที่ได้ในรูปแบบของจำนวนของ FWM, ประสิทธิภาพของ FWM, กำลังของ FWM และ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของการเกิดผลกระทบจาก FWM (ในบทความนี้พิจารณาผลกระทบของ FWM เป็นสิ่งสำคัญ โดยไม่พิจารณาผลกระทบของ self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (CPM) และการเสื่อมลงของรูปคลื่น เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด [13-15]) เพื่อนำมาวิเคราะห์ให้เห็นความแตกต่างข้อดีข้อเสียจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบเดิมและแบบที่ได้ปรับปรุงขึ้นมา

### 4.2 การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing

#### 4.2.1 สมการและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

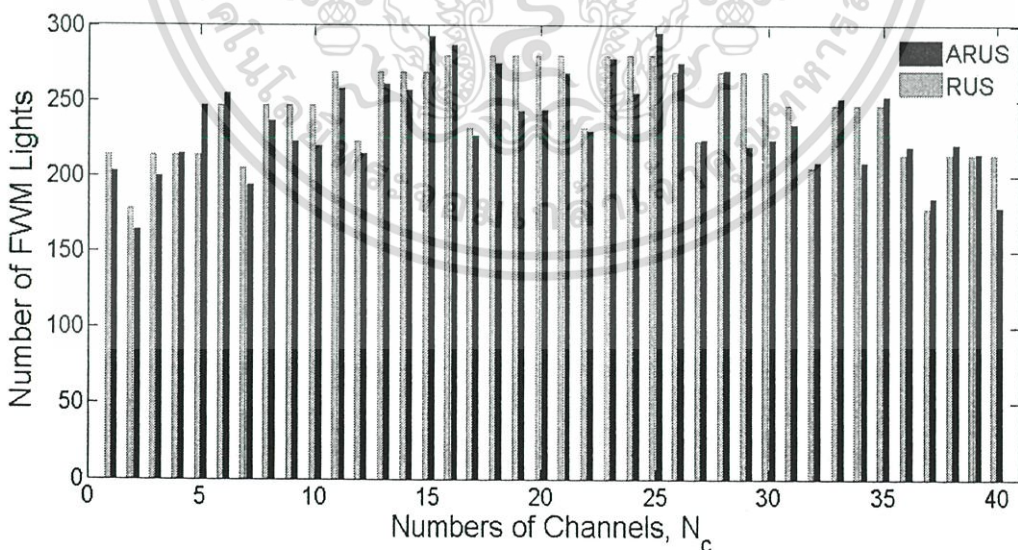
การคำนวณหาค่าผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.1) – (3.11) โดยระบบที่ได้ทำการวิเคราะห์นี้จะไม่ได้อัปเดตถึงค่าสูญเสียอื่นๆเช่น Stimulated Raman Scattering (SRS), Stimulated Brillouin Scattering (SBS) และ Amplifier Spontaneous Emission (ASE) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนของ EDFA โดยพิจารณาเฉพาะผลกระทบของ FWM ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ FWM กับ SPM และ CPM สำหรับระบบที่มีอัตราบิดสูงๆ จะพบว่าผลกระทบจาก FWM จะเป็นอิสระกับอัตราเร็วของบิต โดยในการหาผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์กำหนดให้ส่งสัญญาณ โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber (DSF) และพารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย

- ความยาวคลื่นใช้งานในช่วง 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0THz)
- กำลังของสัญญาณอินพุต ( $P_m$ ) เท่ากับ 10 dBm
- โครมาติกดิสเพอร์ชัน ( $D$ ) เท่ากับ 0 ps/nm-km
- ความชันของดิสเพอร์ชัน ( $dD/d\lambda$ ) เท่ากับ 0.06 ps/nm<sup>2</sup>-km

- ความเร็วของแสงในอากาศ ( $c$ ) เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s
- องค์ประกอบที่แสดงภาวะความเสื่อม ( $d_{jk} = 3$  เมื่อ  $i = j$  และ  $d_{jk} = 6$  เมื่อ  $i \neq j$ )
- ความไม่เป็นเชิงเส้นลำดับที่สาม ( $\chi^3$ ) เท่ากับ  $6 \times 10^{-15}$  [esu]
- ความยาวเส้นใยแก้ว ( $L$ ) เท่ากับ 80 km
- ระยะทางประสิทธิผล ( $L_{eff}$ ) ประมาณ 20 km
- สัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.2 dB/km
- พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล ( $A_{eff}$ ) เท่ากับ  $50 \mu m^2$
- Avalanche Photodiode (APD) มีค่าประสิทธิภาพควอนตัม ( $\eta$ ) เท่ากับ 80 %

#### 4.2.2 จำนวนของ Four-Wave Mixing

จำนวนของ Four-Wave Mixing เกิดจากการแทรกสอดกันระหว่างความถี่ข้างเคียงแล้วส่งผลให้เกิดเป็นความถี่ใหม่เกิดขึ้นมาแทรกสอดความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการส่งไป ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง สามารถหาได้จากสมการความถี่ของ FWM คือ  $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$  เมื่อ  $i, j$  ไม่เท่ากับ  $k$  ( $i, j$  และ  $k$  คือจำนวนของช่องสัญญาณใดๆ) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS กับแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นที่ไปซ้อนทับช่องสัญญาณแสงแต่ละช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 (ซึ่งตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข.)

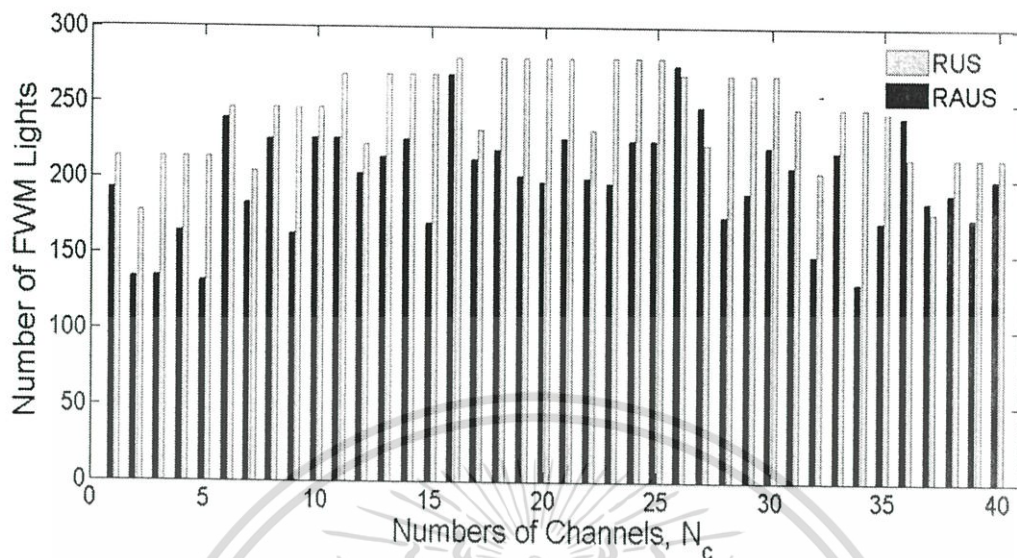


รูปที่ 4.1 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ARUS

จากรูปที่ 4.1 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS

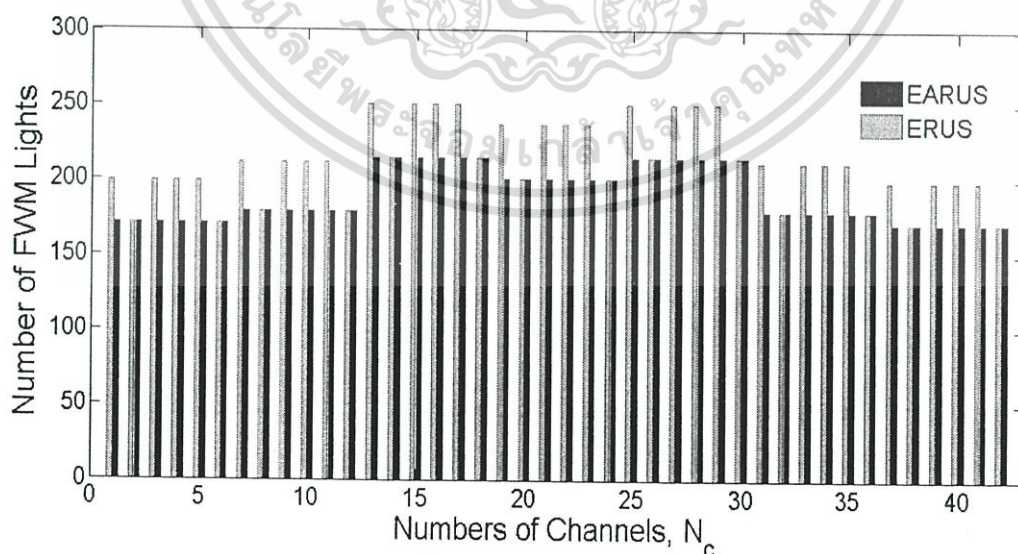
เปรียบเทียบกับ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS มีจำนวนที่น้อยกว่าแบบ RUS โดยจำนวนของ FWM ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 9756 และ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 9430



รูปที่ 4.2 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ RAUS

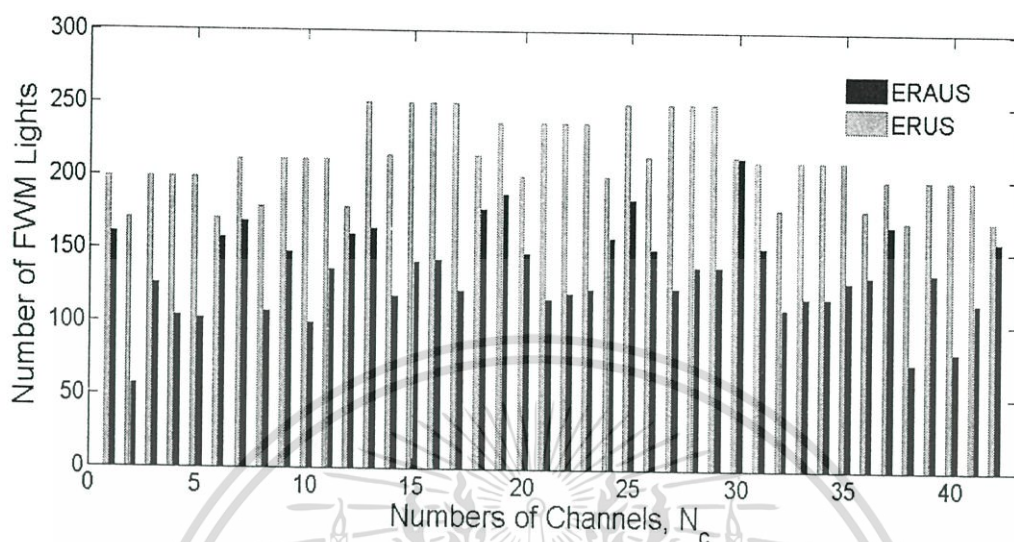
จากรูปที่ 4.2 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS มีจำนวนที่น้อยกว่าแบบ RUS โดยจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 9756 และ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 7994



รูปที่ 4.3 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS และ EARUS

จากรูปที่ 4.3 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จาก

การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS มีจำนวนที่น้อยกว่าแบบ ERUS โดยจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 8910 และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 7986



รูปที่ 4.4 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS และ ERAUS

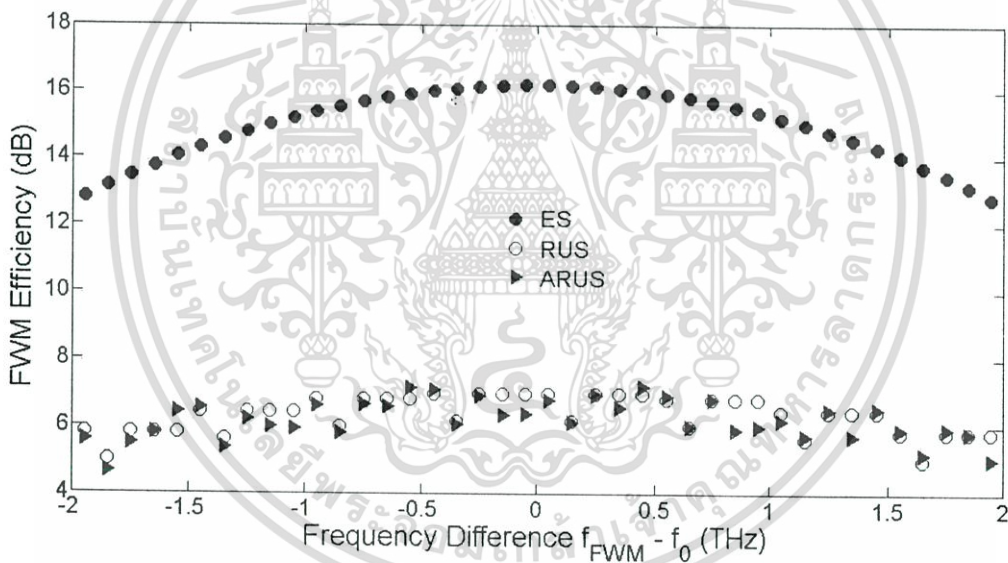
จากรูปที่ 4.4 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS มีจำนวนที่น้อยกว่าแบบ ERUS โดยจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 8910 และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 5688

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 จะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS และ ERAUS มีจำนวนของ FWM ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ที่ได้ทำการปรับปรุงแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS เมื่อจำนวนของ FWM ที่มากจะส่งผลทำให้ความถี่ที่ไปแทรกสอดช่องสัญญาณข้อมูลที่มากขึ้น และจะเห็นได้ว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงนั้นมีจำนวนของ FWM ที่ลดลงทำให้ความถี่ที่ไปแทรกสอดช่องสัญญาณที่ทำการส่งไปลดลงตามมา สาเหตุที่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS และ ERAUS มีจำนวนของ FWM ที่น้อยก็เพราะใช้วิธีการสลับกันของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณภายใน base unit ที่ไม่ซ้ำกัน ทำให้ความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นแต่ละ base unit เกิดการซ้อนทับกันน้อยลงระหว่าง base unit ข้างเคียงทำให้จำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นมีจำนวนที่น้อยลงที่  $f_{FWM} = f_i$

#### 4.2.3 ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก Four-Wave Mixing

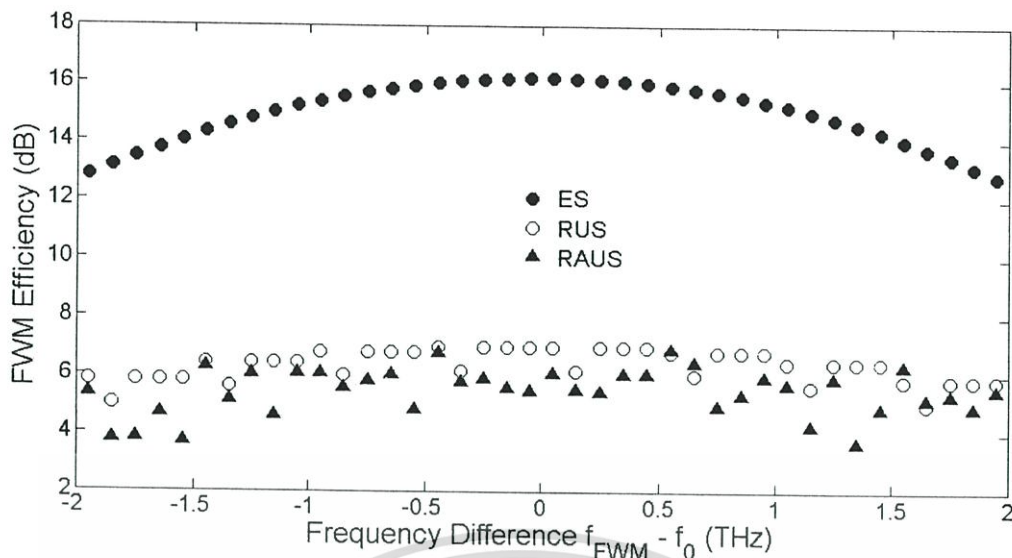
ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM (FWM Efficiency) วิเคราะห์โดยการเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างช่องสัญญาณที่ทำการปฏิกิริยาต่อกัน เมื่อความยาวคลื่นที่ทำการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งไปในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากๆ ทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างความถี่ที่อยู่ใกล้เคียงกัน จึงทำการวิเคราะห์ค่าของสัญญาณออกมาเป็นประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM ซึ่งประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM นี้เป็นตัวบอกระดับผลกระทบที่เกิดจาก FWM มากน้อยเพียงใด ในหัวข้อนี้เราได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS กับแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นกับความแตกต่างของความถี่ เมื่อ  $f_{FWM}$  คือความถี่ของแสง FWM และ  $f_0$  คือความถี่อ้างอิงหรือความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 (zero-dispersion frequency) เมื่อกำหนดให้  $f_0$  อยู่ตรงกลางของแบนด์วิดท์เพราะว่าที่ตรงกลางของแบนด์วิดท์มีจำนวนของ FWM ที่มากที่สุดจากบริเวณช่องสัญญาณรอบข้าง ( $f_0 = 194.05$  THz) ในการคำนวณประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM ใช้สมการที่ 3.3 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 ถึง 4.8



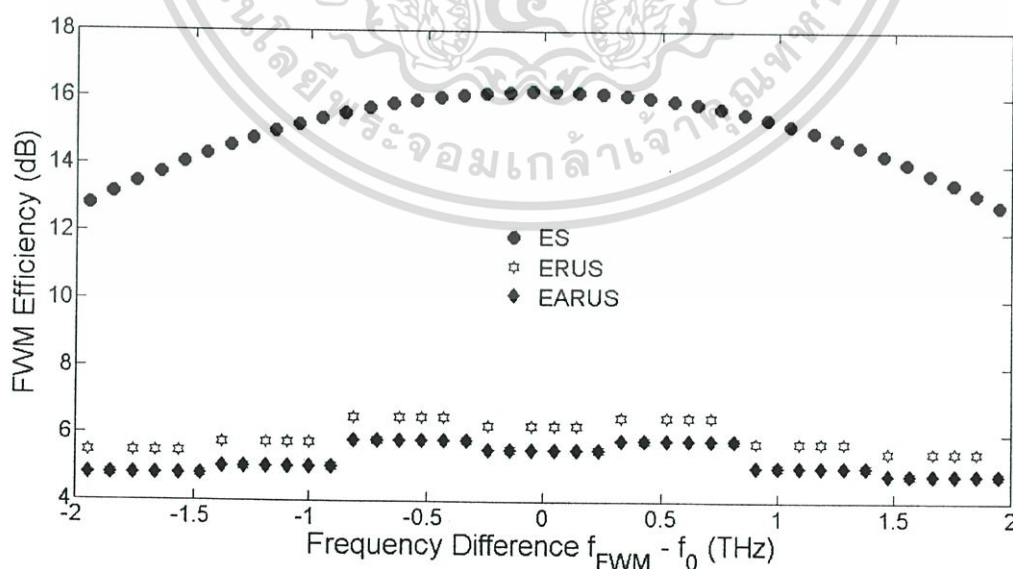
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ARUS

จากรูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS เปรียบเทียบกับแบบ ARUS โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ARUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 15.0044 dB, 6.3291 dB และ 6.1765 dB ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ RAUS

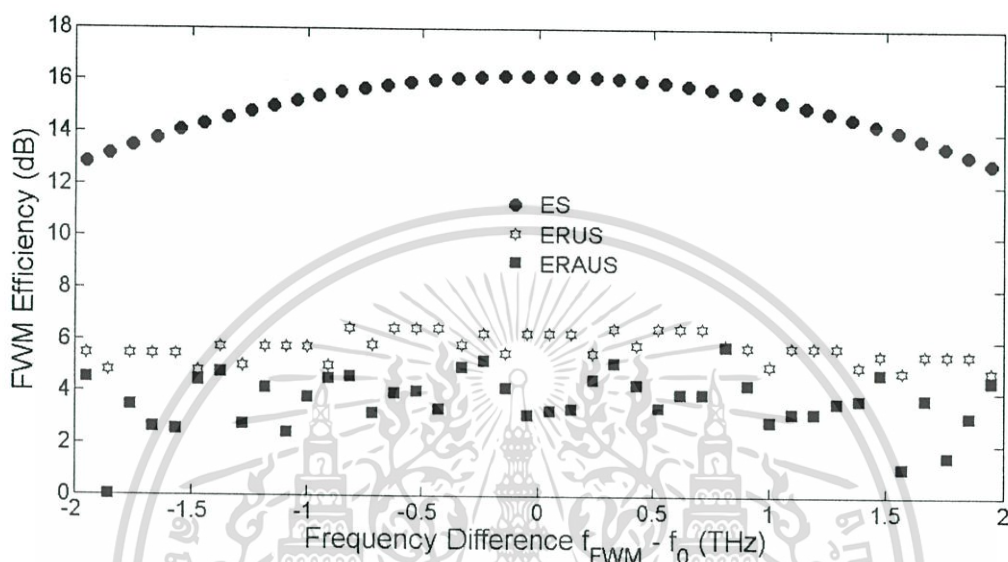
จากรูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 6.3291 dB และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 5.4265 dB



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS และ EARUS

จากรูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS โดยใช้

จะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 5.7132 dB และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 5.2498 dB



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS และ ERAUS

จากรูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 5.7132 dB และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 3.6685 dB

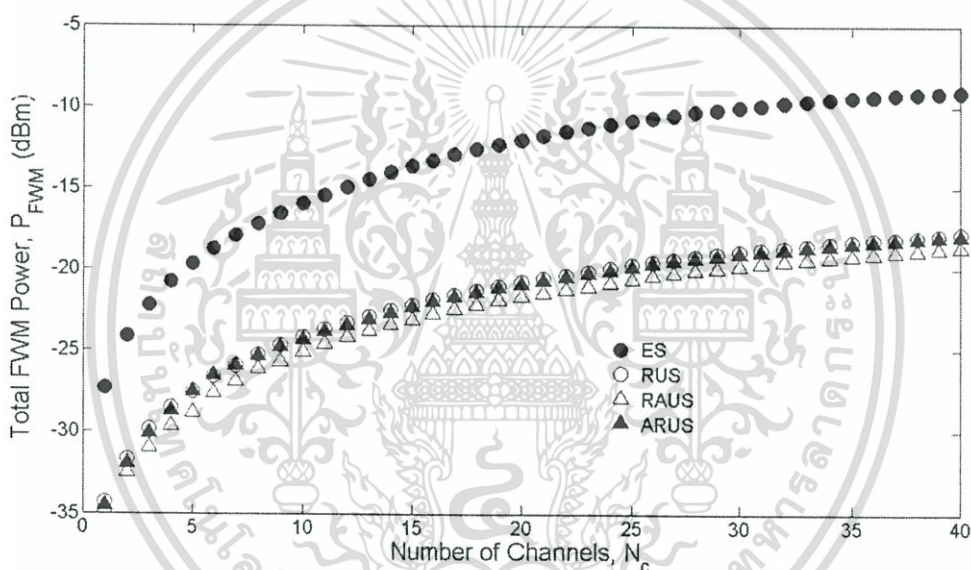
จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS มีค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS สาเหตุที่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS และ ERAUS มีค่าของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM ที่น้อยก็เพราะใช้วิธีการสลับกันของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณภายใน base unit ที่ไม่ซ้ำกัน ทำให้ค่าของความแตกต่างของค่าคงที่ในการแพร่กระจายแสง (Difference of the Propagation Constants) มีค่าที่เพิ่มขึ้น เมื่อค่าความแตกต่างของค่าคงที่ในการแพร่กระจายแสงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM นั้นลดลงตามมา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

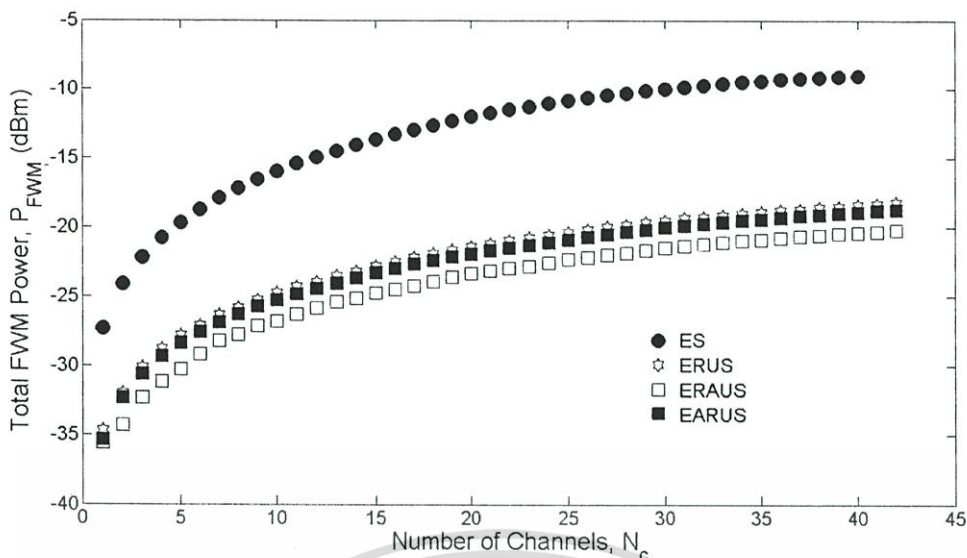
#### 4.2.4 กำลังของ Four-Wave Mixing

กำลังของ FWM เกิดขึ้นจากการรวมกันของกำลังของความถี่ FWM ทำให้เกิดเป็นกำลังที่ไปแทรกสอดหรือรบกวนเข้าไปในกำลังหลักของแต่ละช่องสัญญาณ ทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Polarization) เกิดขึ้น ยิ่งกำลังของ FWM ยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้เกิดการโพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นมากขึ้นเท่านั้น จะทำให้เกิดการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มีประสิทธิภาพที่ลดลง ในหัวข้อนี้เราได้ทำการวิเคราะห์กำลังของ FWM โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลัง FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS กับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM ที่เกิดขึ้นกับจำนวนของช่องสัญญาณความถี่แสงที่มีค่ามากขึ้น ในการคำนวณค่ากำลังของ FWM ใช้สมการที่ 3.1 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 กำลังของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS และ RAUS

จากรูปที่ 4.9 แสดงกำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS และ RAUS โดยจะเห็นว่ากำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS และ RAUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS และ RAUS มีค่าผลรวมของกำลัง FWM เท่ากับ  $-9.0592$  dBm,  $-17.8220$  dBm,  $-17.9694$  dBm และ  $-18.6879$  dBm ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กำลังของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS, EARUS และ ERAUS

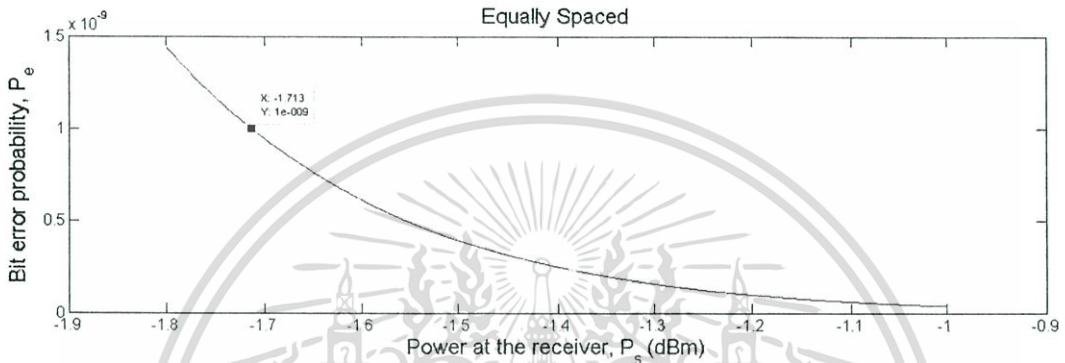
จากรูปที่ 4.10 แสดงกำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS และ ERAUS โดยจะเห็นว่ากำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS และ ERAUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS, EARUS และ ERAUS มีค่าผลรวมของกำลัง FWM เท่ากับ  $-18.2280$  dBm,  $-18.7036$  dBm และ  $-20.1774$  dBm ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่ากำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS มีค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS สาเหตุที่ กำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS มีค่าที่น้อยกว่าแบบ RUS และ ERUS นั้นก็เพราะค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จะเป็นตัวกำหนดค่ากำลังของ FWM คือเมื่อประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM น้อยก็จะส่งผลให้กำลังของ FWM มีค่าที่น้อยลงตามมา จึงทำให้การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS มีค่าที่น้อยสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.2.3

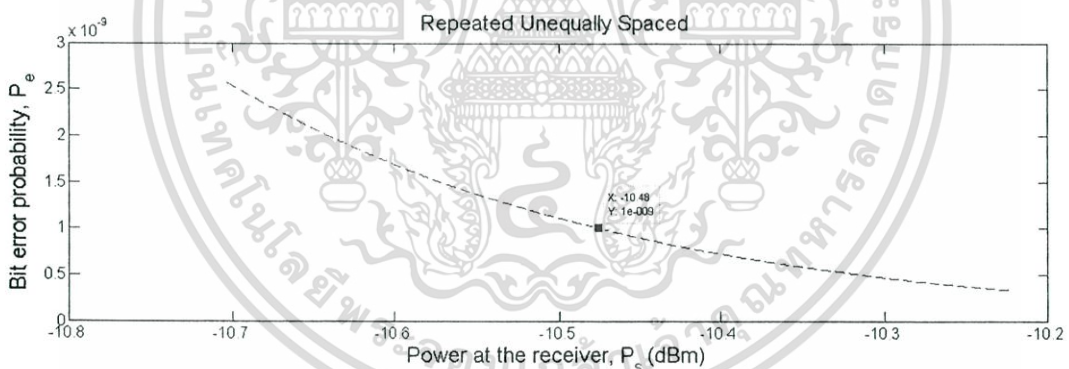
#### 4.2.5 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก Four-Wave Mixing

เมื่อเราวิเคราะห์ค่ากำลังของ FWM แล้วเราจะนำค่ากำลังของ FWM ที่ได้มาทำการหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ตามค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ ( $10^{-9}$ ) ว่ามีกำลังแสงที่ภาครับสามารถรับได้มากเท่าใดในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแต่ละรูปแบบ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดจะเป็นตัววิเคราะห์วัดความน่าเชื่อถือของระบบในการส่งข้อมูล การที่เราจะรู้ค่าของความน่าจะเป็นความผิดพลาดนั้นเราจะต้องรู้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ก่อน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

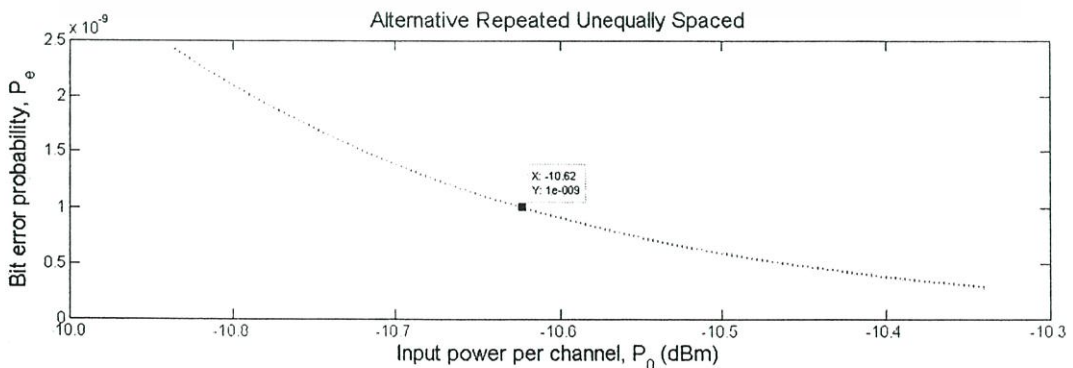
(สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.6) ในหัวข้อนี้เราได้ทำการวิเคราะห์ที่ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS กับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ที่เกิดขึ้นกับกำลังแสงที่ภาครับสามารถรับได้ ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ใช้สมการที่ 3.5 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.17



รูปที่ 4.11 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES

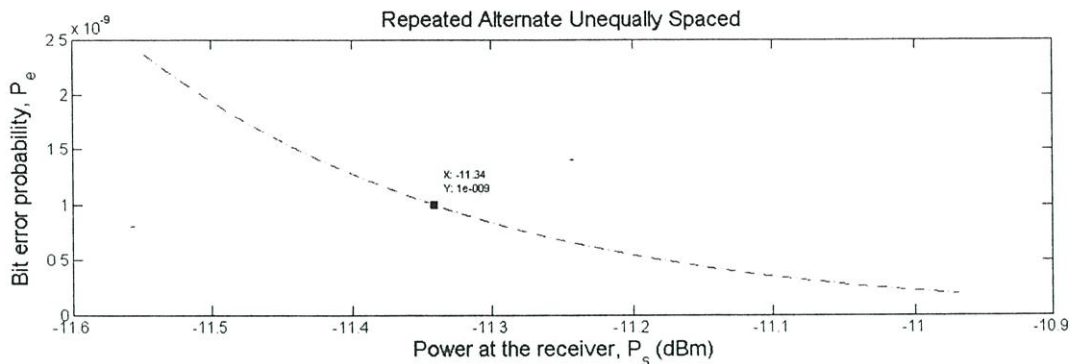


รูปที่ 4.12 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS

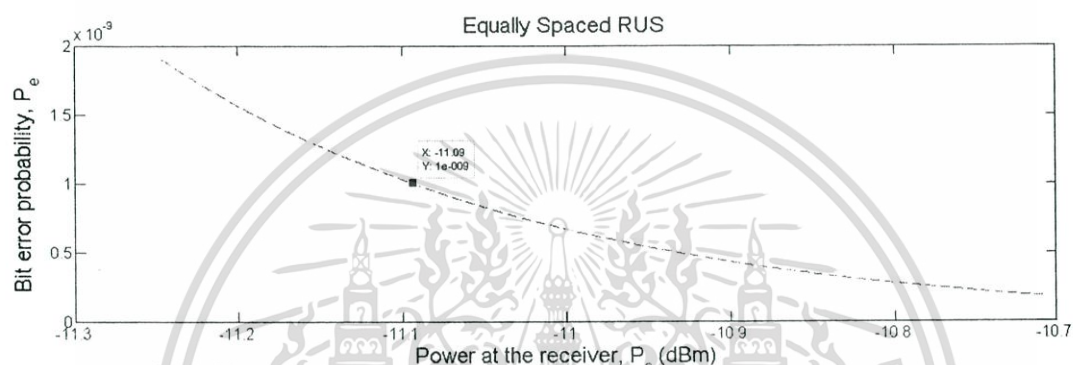


รูปที่ 4.13 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ARUS

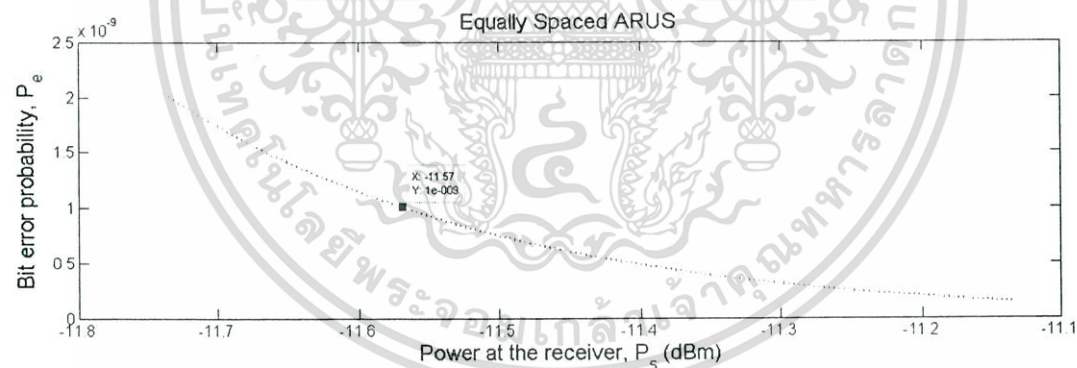
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



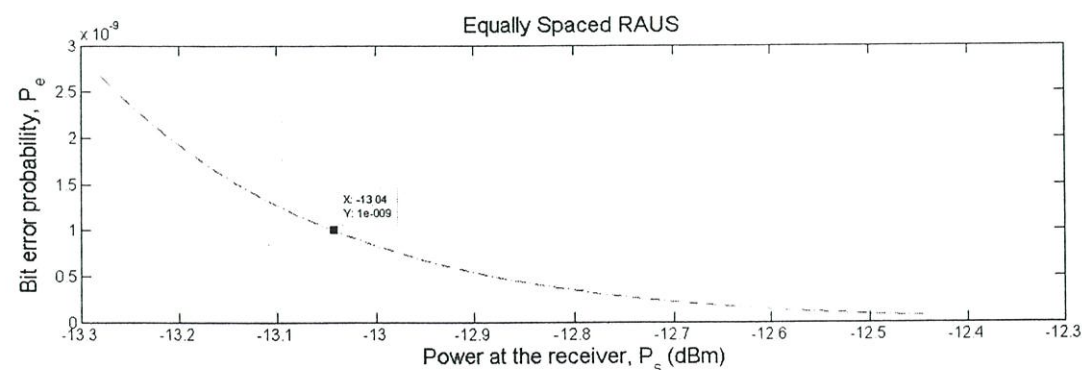
รูปที่ 4.14 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS



รูปที่ 4.15 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS

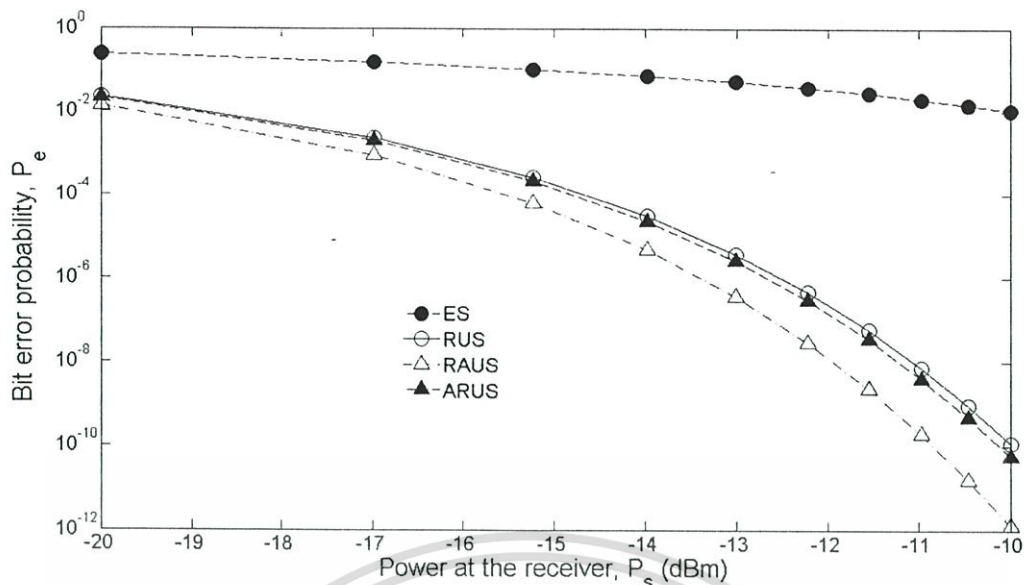


รูปที่ 4.16 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ EARUS

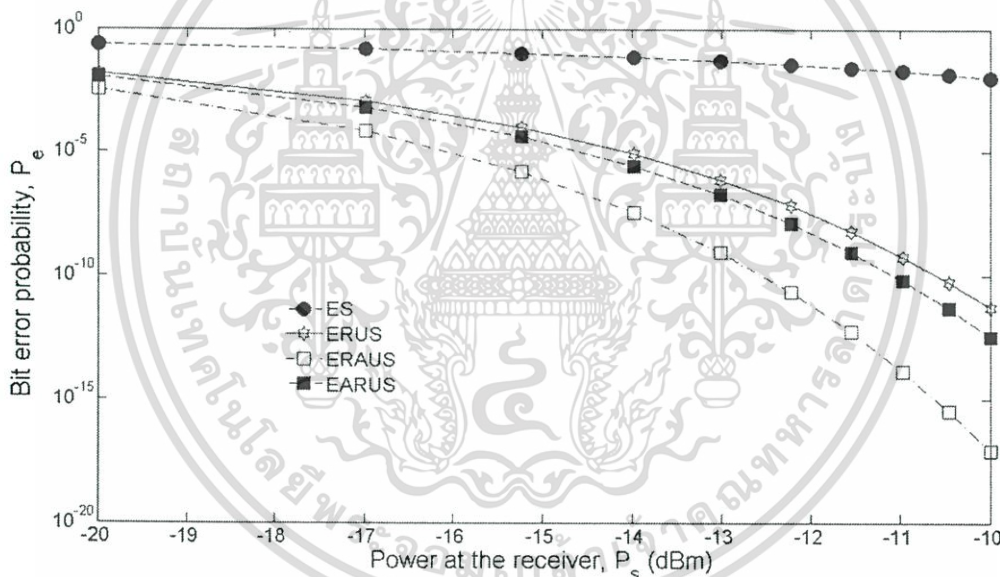


รูปที่ 4.17 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERAUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS และ RAUS



รูปที่ 4.19 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS, EARUS และ ERAUS

จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.19 แสดงความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS โดยจะเห็นว่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS มีค่ากำลังแสงของสัญญาณที่ภาครับเท่ากับ  $-1.713$  dBm,  $-10.48$  dBm,  $-10.62$  dBm,  $-11.34$  dBm,  $-11.09$  dBm,  $-11.57$  dBm และ  $-13.04$  dBm ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM เท่ากับ  $10^{-9}$  และจะ

เห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS มีค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS สาเหตุที่ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS มีความน่าจะเป็นที่น้อยกว่าแบบ RUS และ ERUS นั้นก็เพราะค่ากำลังของ FWM จะเป็นตัวกำหนดค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM คือเมื่อกำลังของ FWM น้อยก็จะส่งผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM มีค่าที่น้อยลงตามมา จึงทำให้การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS มีค่าที่น้อยสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.2.4

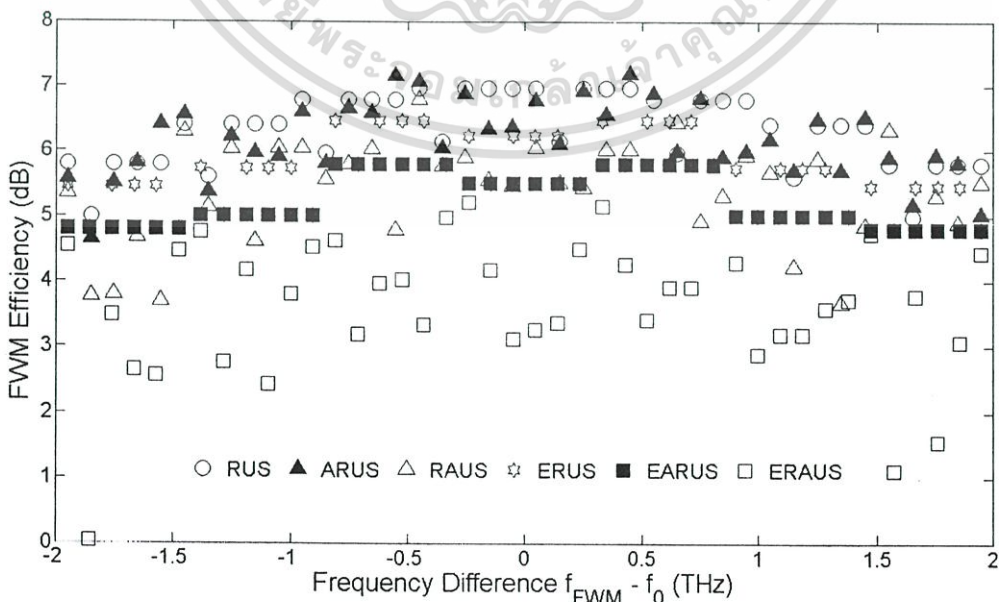
### 4.3 บทสรุป

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.19 เราได้ทำการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบเดิมคือ ES, RUS และ ERUS ซึ่งทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS จากผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS สามารถที่จะหลีกเลี่ยงความถี่ของ FWM ทำให้มีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS ที่  $f_{FWM} = f_i$  ดังนั้นเทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS สามารถที่จะปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดและกำลังของ FWM ให้มีค่าลดลงได้ ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

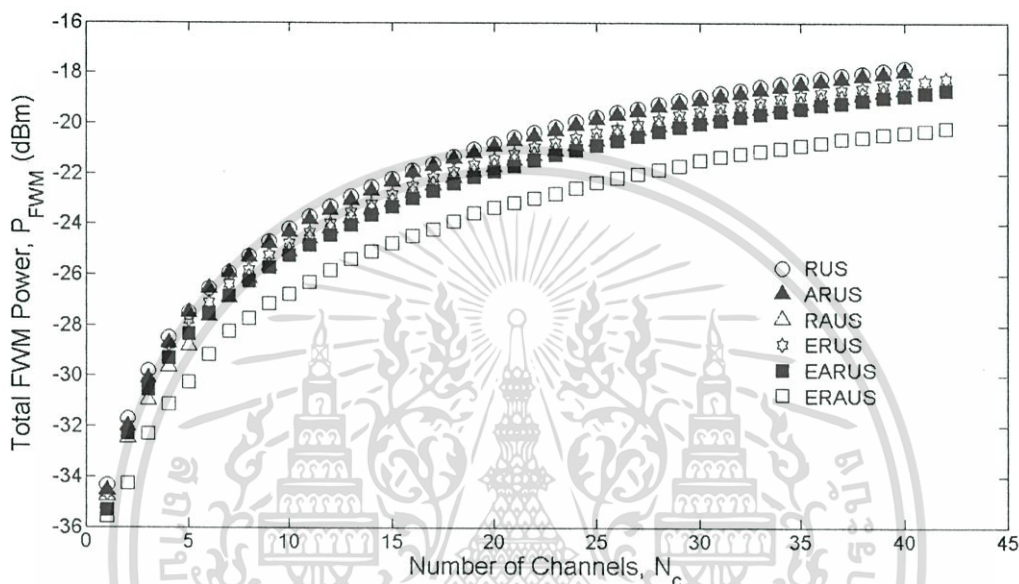
### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิจัยผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงคือผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดจากการสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิธีการลดผลกระทบจาก Four-Wave Mixing โดยการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ES, US, RUS และ ERUS และได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาใหม่เป็นวิธีการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ARUS, RAUS, EARUS และ ERAUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS และ EARUS โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS และ RAUS ได้ทำการปรับปรุงมาจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS (วิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS ได้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบของ FWM) และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS และ ERAUS ได้ทำการปรับปรุงมาจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS (วิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS ได้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบของ FWM และการเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณให้มากขึ้น) ได้ทำการใช้วิธีการเลือกกลุ่มของ base unit ที่มีจำนวนของ FWM ที่น้อยที่สุดเรียกว่า เทคนิค Alternative Unequally Spaced (AtUS) ที่ได้จากการหาค่าความน่าจะเป็นมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ARUS และ EARUS นั้นมีคุณภาพของสัญญาณ (จำนวนของ

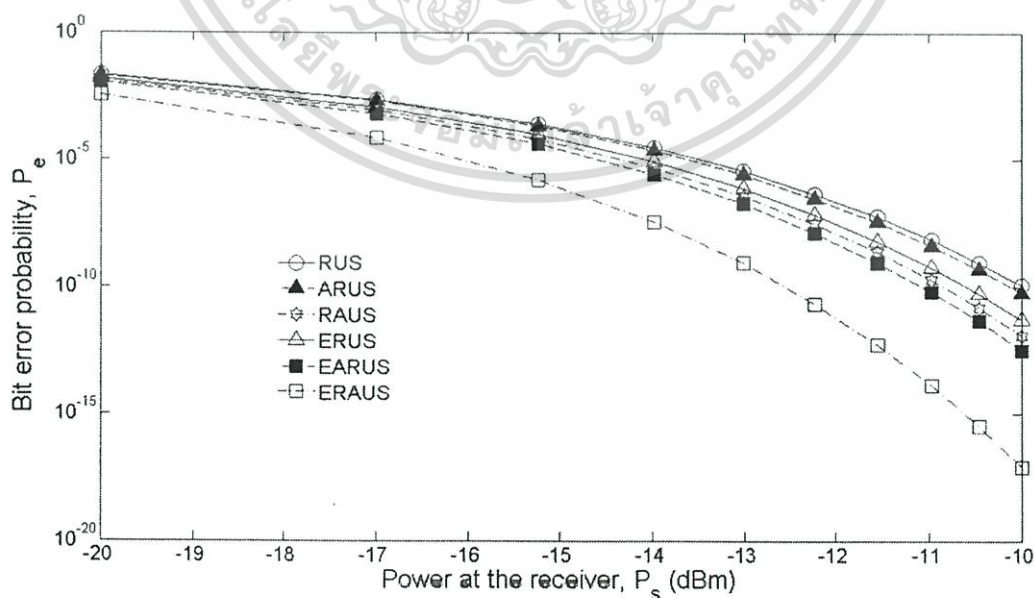


เอกสารรูปที่ 5.1 ประสิทธิภาพการรบกวนกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS

FWM, ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM, กำลังของ FWM และ ความน่าจะเป็นผิดพลาดของการเกิดผลกระทบจาก FWM) ที่ดีกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ ERUS ที่  $f_{FWM} = f_i$  สำหรับวิธีการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RAUS และ ERAUS นั้น จะทำให้ระยะห่างช่องสัญญาณที่อยู่ภายใน base unit สลับที่กันแบบไม่ซ้ำกันในแต่ละ base unit ข้างเคียง เรียกว่า เทคนิค Alternated Unequally Spaced (AUS) ที่ได้จากการหาค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณเกิดขึ้นแบบไม่ซ้ำกันและนำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการ



รูปที่ 5.2 กำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS



รูปที่ 5.3 ความน่าจะเป็นผิดพลาด จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS, ARUS, RAUS, ERUS, EARUS และ ERAUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RAUS และ ERAUS นั้นมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS, ARUS, ERUS และ EARUS ที่  $f_{FWM} = f_i$  แต่ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS นั้น จะมีความซับซ้อนมากขึ้นในการออกแบบอุปกรณ์ดังนั้นจึงทำให้มีราคาแพง โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS จะมีอุปกรณ์ที่การออกแบบอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter) และสวิตช์ทางแสง (Optical Switch) เนื่องจากระยะห่างของช่องสัญญาณที่ไม่เท่ากันทำให้ยากที่จะกรองหรือจัดเอาความถี่ที่ต้องการออกมาได้ [1-2] การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ARUS และ RAUS มีความกว้างของแบนด์วิดท์ที่เท่ากันกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ EARUS และ ERAUS มีความกว้างของแบนด์วิดท์ที่เท่ากันกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS แต่การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ERUS, EARUS และ ERAUS มีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, US, RUS, ARUS และ RAUS ทำให้สามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากกว่าและยังสามารถลดผลกระทบที่เกิดจาก FWM ได้น้อยกว่า ซึ่งสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงให้มากขึ้นได้ จากรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 เราสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดผลกระทบของ FWM จากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ

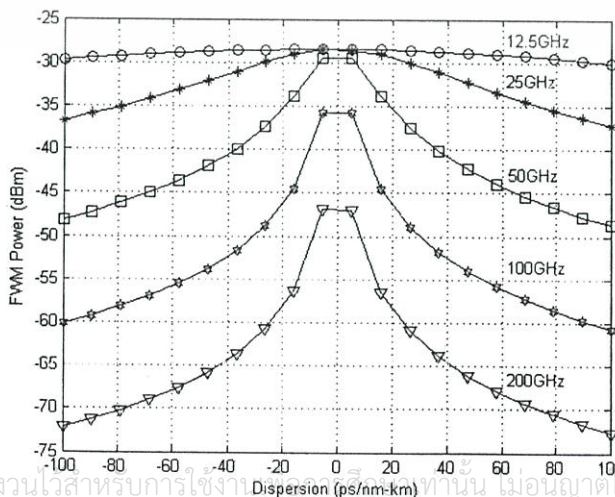
เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ	ผลรวมของจำนวนของ FWM	ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของ FWM	ผลรวมของกำลัง FWM (dBm)	ค่าเฉลี่ยของกำลังแสงของสัญญาณที่ภาครับเมื่อ $P_e$ เท่ากับ $10^{-9}$
ES	33820	15.0044 dB	-9.0592	-1.713 dBm
RUS	9756	6.3291 dB	-17.8220	-10.48 dBm
ARUS	9430	6.1765 dB	-17.9694	-10.62 dBm
RAUS	7994	5.4265 dB	-18.6879	-11.34 dBm
ERUS	8910	5.7132 dB	-18.2280	-11.09 dBm
EARUS	7986	5.2498 dB	-18.7036	-11.57 dBm
ERAUS	5688	3.6685 dB	-20.1774	-13.04 dBm

จากตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดผลกระทบของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ จะเห็นว่า การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS นั้นเกิดผลกระทบจาก FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบอื่นๆ ที่ได้ทำการศึกษาและได้ทำการปรับปรุงขึ้นมา เพราะวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS สามารถที่จะหลีกเลี่ยงความถี่ของ FWM ที่ไปซ้อนทับช่องสัญญาณได้ดีกว่าแบบอื่นๆ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ตั้งชื่อหัวข้อเป็นการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ข้อเสนอแนะในการศึกษาผลกระทบของ FWM ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยกำหนดให้กำลังของสัญญาณอินพุตของทุกช่องสัญญาณเท่ากันซึ่งในระบบที่ใช้งานจริงนั้นค่ากำลังของสัญญาณอินพุตของแต่ละช่องสัญญาณอาจไม่เท่ากันและให้ผลกระทบของ FWM เปลี่ยนแปลงไป การเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีค่าต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง [1-2] ซึ่งในอนาคตอาจมีการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีระยะห่างช่องสัญญาณที่แคบกว่านี้ได้อีก ซึ่งจะทำให้สามารถที่จะจุจำนวนของช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากกว่าเดิมได้

แนวทางในการพัฒนาในงานวิทยานิพนธ์นี้คือวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้ช่วงของความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm ที่ได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณชนิด EDFA ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงแบบคู่ (Dual-Band Fiber Amplifiers หรือ DBFA) ที่ช่วยแก้ปัญหาแถบของความยาวคลื่นใช้งานได้เนื่องจากมีช่วงของแถบความยาวคลื่นที่กว้างกว่าคืออยู่ในช่วง 1528 – 1610 nm ซึ่งสามารถที่จะมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณได้จำนวนหลายช่องสัญญาณมากยิ่งขึ้น เมื่อจำนวนของช่องสัญญาณภายใน base unit ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้กำหนดให้ใช้จำนวน 6 ช่องสัญญาณต่อ base unit แต่ถ้าสามารถลดจำนวนของช่องสัญญาณต่อกลุ่มลงได้ จะทำให้สามารถเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณได้มากขึ้นมาอีก และในงานวิจัยนี้เราได้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber (DSF) ซึ่งมีคิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 ps/nm-km ถ้าเราเปลี่ยนมาใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF) ซึ่งมีคิสเพอร์ชันเท่ากับ 4.6 ps/nm-km ซึ่งเมื่อค่าคิสเพอร์ชันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของการแพร่กระจายคลื่นลดลง ( $\Delta\beta$ ) เมื่อความแตกต่างของการแพร่กระจายคลื่นลดลงจะทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง แต่ถ้าค่าคิสเพอร์ชันมากเกินไปก็ไม่ดีเพราะจะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference : ISI) เพิ่มขึ้น และจะทำให้เกิดผลกระทบมากขึ้นในการส่งสัญญาณที่อัตราเร็วบิตสูงๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าจะเป็นโดยทางใดก็ตาม ลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้สงวนไว้แก่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 กำลังของ FWM ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าโครมาติกคิสเพอร์ชัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan (2002), **Optical Networks: A Practical Perspective**, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, 2002.
- [2] G. P. Agrawal, **Fiber Optic Communication Systems**, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, 2002.
- [3] M. Yamada, T. Kanamori, Y. Terunuma, K. Oikawa, M. Shimizu, S. Sudo and K. Sagawa, **"Fluoride - based erbium-doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum,"** *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 7, July 1996, pp. 882-884.
- [4] S. Pinter, J. Jiang and X. Fernando, **"A dynamic multi-wavelength simulink model for EDFA,"** *CCGEI 2004*, May. 2004, pp. 2077-2080.
- [5] F. Forghieri, R. Tkach, A. Chraplyvy, and D. Marcuse, **"Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM system using unequally spaced channels,"** *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 5, May. 1995, pp. 889-897.
- [6] F. Forghieri, R. Tkach, A. Chraplyvy, and D. Marcuse, **"Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels,"** *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 6, Jun. 1994, pp. 754-756.
- [7] H. Suzuki, S. Ohteru, and N. Takahiro, **"22 × 10 Gb/s WDM transmission based on extended method of unequally spaced channel allocation around the zero-dispersion wavelength region,"** *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, no. 12, Dec. 1999, pp. 1677-1679.
- [8] A. Boskovic, S. Ten, and V. L. da Silva, **"FWM penalty reduction in dense WDM systems through channel detuning,"** in *Proc. ECOC*, 1998, pp. 163-164.
- [9] K. Inoue, **"Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region,"** *J. Lightw. Technol.*, vol. 10, no. 11, Nov. 1992, pp. 1553-1561.
- [10] J. S. Lee, D. H. Lee, and C. S. Park, **"Periodic allocation of a set shifted fibers,"** *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, Jun. 1998, pp. 825-827.
- [11] S. S. Lee, M. K. Kim, C. S. Park, J. S. Lee, D. H. Lee, and S. G. Lee, **"Enhancement of power margin and scalability in WDM links adopting dispersion-shifted fibers using periodic-unequally-spaced-channel allocation,"** *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 14, Jul. 1999, pp. 1176-1177.
- [12] Numai and O. Kubota, **"Analysis of repeated unequally spaced channels for FDM lightwave systems,"** *J. Lightw. Technol.*, vol. 18, no. 5, May 2000, pp. 656-664.

- [13] S. Kojima and T. Numai, "Theoretical analysis of modified repeated unequally spaced frequency allocations in FDM lightwave transmission systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 7, July 2006, pp. 2786-2797.
- [14] J. Onishi, S. Kojima, and T. Numai, "Effect of frequency allocations and zero-dispersion frequencies on FDM lightwave transmission systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 7, July 2007, pp. 1719-1727.
- [15] ITU-T Recommendation G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," ITU-T Study Group 15 (2001-2004).
- [16] วิสววิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาถิพงษ์, "เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ในระบบส่งสัญญาณ DWDM," *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, 2553, หน้า 118-124
- [17] วิสววิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาถิพงษ์, "เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS ในระบบส่งสัญญาณ DWDM," *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2552, หน้า 19-24
- [18] A. Jumpates, V. Rachnarong and S. Noppanakepong, "The effect of four-wave mixing in DWDM transmission systems by spaced channel allocation," *2010 International Workshop on Information Communication Technology*, 2010, pp. 178-185.
- [19] S. Fujita, M. Kitamura, T. Torikai, N. Henmi, H. Yamada, T. Suzuki, I. Takano, and M. Shikada, "10 Gb/s, 100 km optical fiber transmission experiment using high-speed MQW DFB-LD and back-illuminated GaInAs APD," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 11, May. 1989, pp. 702-703.
- [20] S. Fujita, T. Suzuki, A. Matsuoka, S. Miyazaki, T. Torikai, T. Nakata, and M. Shikada, "High sensitivity 5 Gb/s optical receiver module using Si IC and GaInAs APD," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 3, Feb. 1990, pp. 175-176.
- [21] K. Inoue, "Suppression technique for fiber four-wave mixing using optical multi-/demultiplexers and a delay line," *J. Lightw. Technol.*, vol. 11, no. 3, Mar. 1993, pp. 455-461.
- [22] A. Okada, V. Curri, S. M. Gemelos, and L. G. Kazovsky, "Reduction of four-wave mixing crosstalk using a novel hybrid WDM/TDM technique," in *Proc. ECOC*, 1998, pp. 289-290.

- [23] I. Neokosmidis, T. Kamalakis, A. Chipouras, and T. Sphicopou-los, “New techniques for the suppression of the four-wave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 3, Mar. 2005, pp. 1137-1144.
- [24] L. Zhang and J. Tang, “Label-switching architecture for IP traffic over WDM networks,” *IEEE Proc - Commun*, vol. 147, no. 5, Oct. 2000, pp. 269-276.
- [25] T. S. Chin, F. M. Abbou and E. H. Tat, “Impact of four wave mixing (FWM) in routing and wavelength assignment,” *American Journal of Applied Sciences* 5 (8): 1059 – 1063, 2008.
- [26] ปุณยวีร์ จามจรีกุล, ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้ว, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550
- [27] S. S. Hossain, and A. Couchman, “Design of single mode SMF, NZ-DSF and DCF optical fibers,” *IEEE CCECE/CCGEI*, Sakatoon, May. 2005, pp. 13-16.
- [28] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบุลย์, “พัฒนาการของการออกแบบเส้นใยนำแสง,” *Computer and Electronic World*, ตุลาคม, 2544
- [29] สมบัติ เหมือนนาค และ สุทธิชัย นพนาตีพงษ์, “การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างช่องสัญญาณ 50 GHz,” *วิศวกรรมสาร มข.*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, พฤษภาคม-มิถุนายน 2550, หน้า 321-331
- [30] W. C. Kwong and G. C. Yang, “An algebraic approach to the unequal-spaced channel-allocation problem in WDM lightwave systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 3, Mar. 1997, pp. 352-359.
- [31] N. Shibata, R. P. Braun and R. G. Wraarts, “Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single mode fiber”, *J. Quant. Electron.*, vol. QE-23, no. 7, July 1985, pp. 1205 – 1210.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

ความยาวคลื่นของช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วย 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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในหน่วยงานราชการเท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก. ข

### จำนวนของ FWM

#### 1. วิธีการหาจำนวนของ FWM

จาก  $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$  เมื่อ  $i, j$  ไม่เท่ากับ  $k$  ( $i, j$  และ  $k$  คือจำนวนของช่องสัญญาณใดๆ)

เมื่อ  $f_{FWM} = f_{FWM_1} + f_{FWM_2} + f_{FWM_3}$

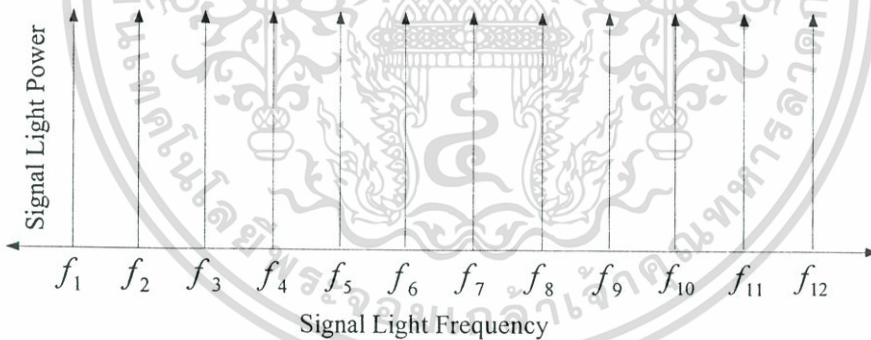
$$f_{FWM_1} = \sum_{n=0}^{n=C-3} \left( \sum_{k=n+3}^{i=n+1, j=n+2, k=C} f_i + f_j - f_k \right)$$

$$f_{FWM_2} = \sum_{n=0}^{n=C-4} \left( \sum_{j=n+3, k=n+4}^{i=n+1, j=C-1, k=C} f_i + f_j - f_k \right)$$

$$f_{FWM_3} = \sum_{m=0}^{m=C-5} \left( \sum_{n=0}^{n=C-5-m} \left( \sum_{k=n+m+5}^{i=1+m, j=3+n+m, k=C} f_i + f_j - f_k \right) \right)$$

$C$  คือจำนวนของช่องสัญญาณ

ตัวอย่าง การหาจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES จำนวน 12 ช่องสัญญาณ



**รูปที่ 1** การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES จำนวน 12 ช่องสัญญาณ

สามารถหาได้ดังนี้

เมื่อ  $f_{FWM} = f_{FWM_1} + f_{FWM_2} + f_{FWM_3}$  และ  $C = 12$

$$f_{FWM_1} = \sum_{n=0}^{n=9} \left( \sum_{k=n+3}^{i=n+1, j=n+2, k=12} f_i + f_j - f_k \right)$$

$$f_{FWM_2} = \sum_{n=0}^{n=8} \left( \sum_{j=n+3, k=n+4}^{i=n+1, j=11, k=12} f_i + f_j - f_k \right)$$

$$f_{FWM_3} = \sum_{m=0}^{m=7} \left( \sum_{n=0}^{n=7-m} \left( \sum_{k=n+m+5}^{i=1+m, j=3+n+m, k=12} f_i + f_j - f_k \right) \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแจกแจงได้ดังต่อไปนี้

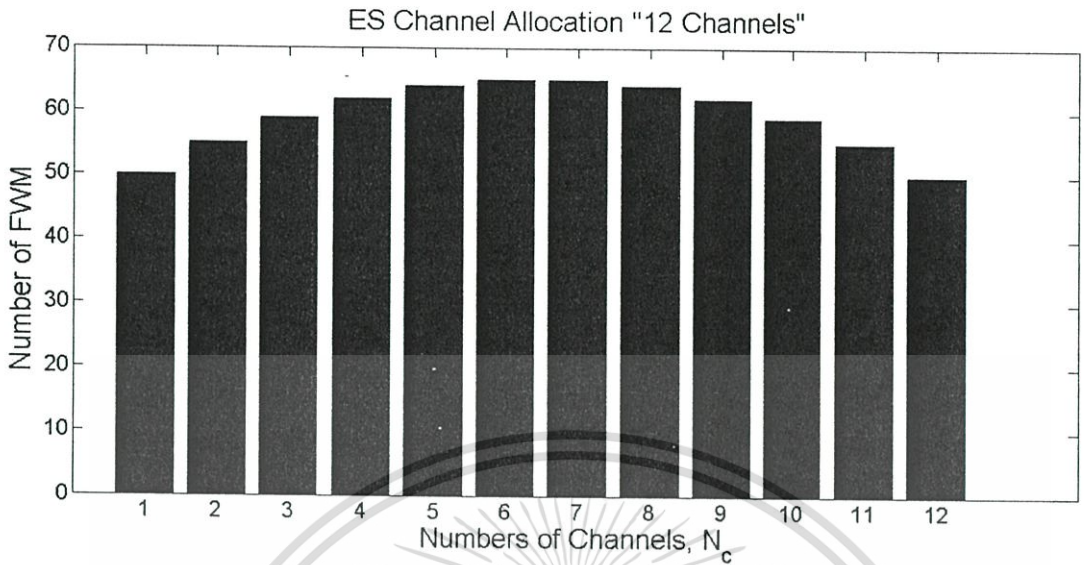
- {1, 2, 3}, {1, 2, 4}, {1, 2, 5}, {1, 2, 6}, {1, 2, 7}, {1, 2, 8}, {1, 2, 9}, {1, 2, 10}, {1, 2, 11}, {1, 2, 12}
- {2, 3, 4}, {2, 3, 5}, {2, 3, 6}, {2, 3, 7}, {2, 3, 8}, {2, 3, 9}, {2, 3, 10}, {2, 3, 11}, {2, 3, 12}
- {3, 4, 5}, {3, 4, 6}, {3, 4, 7}, {3, 4, 8}, {3, 4, 9}, {3, 4, 10}, {3, 4, 11}, {3, 4, 12}
- {4, 5, 6}, {4, 5, 7}, {4, 5, 8}, {4, 5, 9}, {4, 5, 10}, {4, 5, 11}, {4, 5, 12}
- {5, 6, 7}, {5, 6, 8}, {5, 6, 9}, {5, 6, 10}, {5, 6, 11}, {5, 6, 12}
- {6, 7, 8}, {6, 7, 9}, {6, 7, 10}, {6, 7, 11}, {6, 7, 12}
- {7, 8, 9}, {7, 8, 10}, {7, 8, 11}, {7, 8, 12}
- {8, 9, 10}, {8, 9, 11}, {8, 9, 12}
- {9, 10, 11}, {9, 10, 12}
- {10, 11, 12}
- {1, 11, 12}, {2, 11, 12}, {3, 11, 12}, {4, 11, 12}, {5, 11, 12}, {6, 11, 12}, {7, 11, 12}, {8, 11, 12}, {9, 11, 12}
- {1, 10, 11}, {2, 10, 11}, {3, 10, 11}, {4, 10, 11}, {5, 10, 11}, {6, 10, 11}, {7, 10, 11}, {8, 10, 11}
- {1, 9, 10}, {2, 9, 10}, {3, 9, 10}, {4, 9, 10}, {5, 9, 10}, {6, 9, 10}, {7, 9, 10}
- {1, 8, 9}, {2, 8, 9}, {3, 8, 9}, {4, 8, 9}, {5, 8, 9}, {6, 8, 9}
- {1, 7, 8}, {2, 7, 8}, {3, 7, 8}, {4, 7, 8}, {5, 7, 8}
- {1, 6, 7}, {2, 6, 7}, {3, 6, 7}, {4, 6, 7}
- {1, 5, 6}, {2, 5, 6}, {3, 5, 6}
- {1, 4, 5}, {2, 4, 5}
- {1, 3, 4}
- {1, 3, 12}, {1, 4, 12}, {1, 5, 12}, {1, 6, 12}, {1, 7, 12}, {1, 8, 12}, {1, 9, 12}, {1, 10, 12}
- {1, 3, 11}, {1, 4, 11}, {1, 5, 11}, {1, 6, 11}, {1, 7, 11}, {1, 8, 11}, {1, 9, 11}
- {1, 3, 10}, {1, 4, 10}, {1, 5, 10}, {1, 6, 10}, {1, 7, 10}, {1, 8, 10}
- {1, 3, 9}, {1, 4, 9}, {1, 5, 9}, {1, 6, 9}, {1, 7, 9}
- {1, 3, 8}, {1, 4, 8}, {1, 5, 8}, {1, 6, 8}
- {1, 3, 7}, {1, 4, 7}, {1, 5, 7}
- {1, 3, 6}, {1, 4, 6}
- {1, 3, 5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- {2, 4, 12}, {2, 5, 12}, {2, 6, 12}, {2, 7, 12}, {2, 8, 12}, {2, 9, 12}, {2, 10, 12}
- {2, 4, 11}, {2, 5, 11}, {2, 6, 11}, {2, 7, 11}, {2, 8, 11}, {2, 9, 11}
- {2, 4, 10}, {2, 5, 10}, {2, 6, 10}, {2, 7, 10}, {2, 8, 10}
- {2, 4, 9}, {2, 5, 9}, {2, 6, 9}, {2, 7, 9}
- {2, 4, 8}, {2, 5, 8}, {2, 6, 8}
- {2, 4, 7}, {2, 5, 7}
- {2, 4, 6}
  
- {3, 5, 12}, {3, 6, 12}, {3, 7, 12}, {3, 8, 12}, {3, 9, 12}, {3, 10, 12}
- {3, 5, 11}, {3, 6, 11}, {3, 7, 11}, {3, 8, 11}, {3, 9, 11}
- {3, 5, 10}, {3, 6, 10}, {3, 7, 10}, {3, 8, 10}
- {3, 5, 9}, {3, 6, 9}, {3, 7, 9}
- {3, 5, 8}, {3, 6, 8}
- {3, 5, 7}
  
- {4, 6, 12}, {4, 7, 12}, {4, 8, 12}, {4, 9, 12}, {4, 10, 12}
- {4, 6, 11}, {4, 7, 11}, {4, 8, 11}, {4, 9, 11}
- {4, 6, 10}, {4, 7, 10}, {4, 8, 10}
- {4, 6, 9}, {4, 7, 9}
- {4, 6, 8}
  
- {5, 7, 12}, {5, 8, 12}, {5, 9, 12}, {5, 10, 12}
- {5, 7, 11}, {5, 8, 11}, {5, 9, 11}
- {5, 7, 10}, {5, 8, 10}
- {5, 7, 9}
  
- {6, 8, 12}, {6, 9, 12}, {6, 10, 12}
- {6, 8, 11}, {6, 9, 11}
- {6, 8, 10}
  
- {7, 9, 12}, {7, 10, 12}
- {7, 9, 11}
  
- {8, 10, 12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

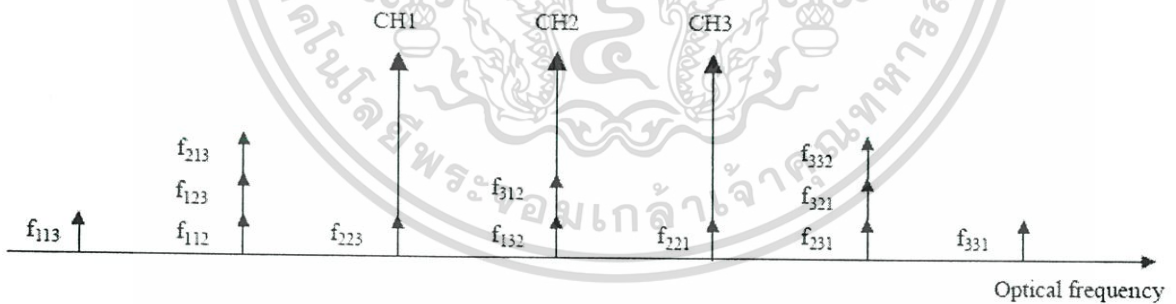
จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES จำนวน 12 ช่องสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2



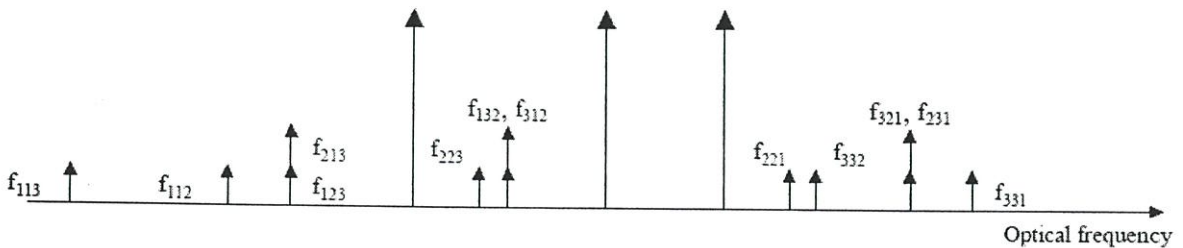
รูปที่ 2 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES

2. ความถี่อ้างอิงหรือความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์ (Zero Dispersion Frequency,  $f_0$ )

การจัดรูปแบบของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีอยู่ 2 ประเภทคือแบบระยะห่างที่เท่ากัน (ES) และแบบระยะห่างที่ไม่เท่ากัน (US) ซึ่งรูปแบบของความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างทั้งสองแบบนี้แสดงดังรูปที่ 3 และ 4



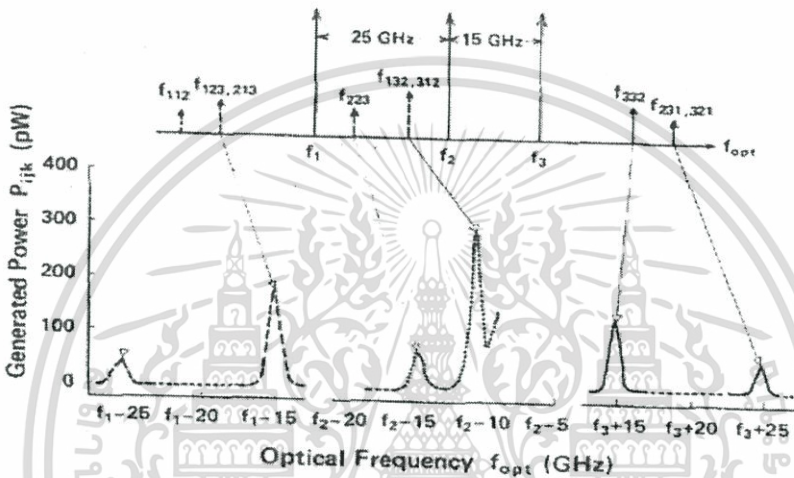
รูปที่ 3 ความถี่ FWM ที่เกิดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบระยะห่างที่เท่ากัน (ES)



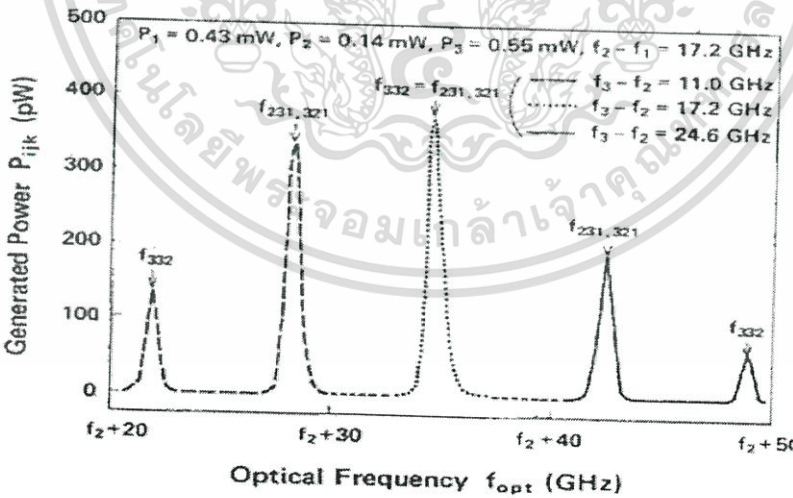
รูปที่ 4 ความถี่ FWM ที่เกิดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบระยะห่างที่ไม่เท่ากัน (US)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบทความเรื่อง “Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Through Four-Wave Mixing in a Single Mode [31]” ได้ทำการหาความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นสูงสุดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากัน (US) ว่าความถี่ FWM จะเกิดขึ้นสูงสุดที่จุดใด (ความถี่ FWM จะเกิดขึ้นสูงสุดเรียกว่า ความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์ (Zero Dispersion Frequency) ตรงจุดนั้นจะเกิดผลกระทบจาก FWM สูงที่สุด ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบเท่ากัน (ES) นั้น ความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์จะเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของแบนด์วิดท์โดยรวมดังรูปที่ 3 แต่ว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันนั้น ความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์จะเกิดขึ้นที่จุดอื่นภายนอกความถี่ของช่องสัญญาณ



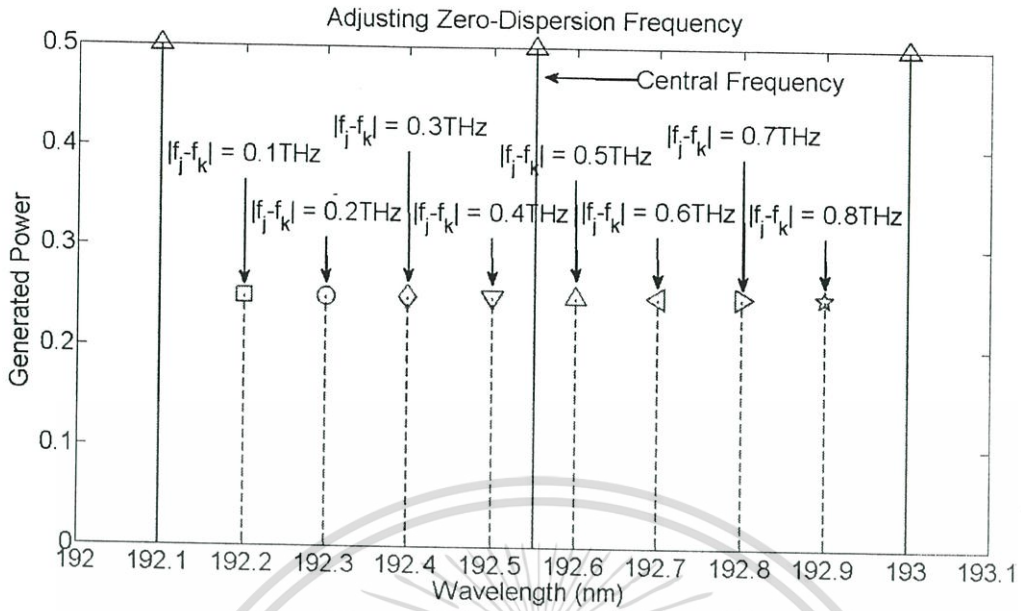
รูปที่ 5 กำลังงานของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากัน (US)



รูปที่ 6 กำลังงานของ FWM จากการปรับเปรียบเทียบความถี่  $|f_j - f_k|$  จากการจัดช่องสัญญาณแบบ US

จากงานวิจัย [31] จะเห็นว่าความถี่ของ FWM จะเกิดขึ้นสูงสุดที่ความถี่  $f_{132,312}$  เนื่องจากจุดดังกล่าวอยู่ในกลุ่มของความถี่ทั้งสามความถี่ที่เกิดการแทรกสอดกันทำให้มีกำลังของ FWM สูงที่สุดที่จุดๆนั้น ดังนั้นที่ความถี่  $f_{132,312}$  เป็น Zero-Dispersion Frequency ของความถี่ใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ตำแหน่งของ  $f_{132,312}$  ที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนความแตกต่างของความถี่  $|f_j - f_k|$

จากรูปที่ 7 ตำแหน่งของ  $f_{132,312}$  (Zero-Dispersion Frequency) ที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนความแตกต่างของความถี่  $|f_j - f_k|$  เมื่อกำหนดให้  $f_j$  เท่ากับ 192.1THz และ  $f_k$  เท่ากับ 193.0THz (เส้นทึบ) ในรูปที่ 7 เราจะสื่อให้เห็นถึงความสอดคล้องกับรูปที่ 6 เมื่อ  $f_{132,312}$  (เส้นปะ) ห่างออกจากจุดศูนย์กลาง (Center Frequency) มากเท่าไร ก็ยิ่งทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง

## ภาคผนวก ก.

### ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] วิสววิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาคีพงษ์, “การศึกษาผลกระทบ Four Wave Mixing และ Stimulated Brillouin Scattering ในระบบส่งสัญญาณ DWDM ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง,” *วิศวกรรมสาร มข.*, ปีที่ 36, ฉบับที่ 4, ตุลาคม - ธันวาคม 2552, หน้า 261-271
- [2] วิสววิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาคีพงษ์, “เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS ในระบบส่งสัญญาณ DWDM,” *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2552, หน้า 19-24
- [3] วิสววิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาคีพงษ์, “เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ในระบบส่งสัญญาณ DWDM,” *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, 2553, หน้า 118-12
- [4] วิสววิท ราชณรงค์, ประมินทร์ วงษ์เจริญ และ สุทธิชัย นพนาคีพงษ์, “ผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ,” *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า*, ปีที่ 33, หน้า 1437 - 1440
- [5] A. Jumpates, V. Rachnarong and S. Noppanakepong, “The effect of four-wave mixing in DWDM transmission systems by spaced channel allocation,” *2010 International Workshop on Information Communication Technology*, 2010, pp. 178-185.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิสวาท ราชณรงค์
วัน เดือน ปีเกิด	15 มกราคม 2529
ที่อยู่	178/6 หมู่ 14 ถนนแจ้งสนิท ตำบล แคนเหนือ อำเภอ บ้านไผ่ จังหวัด ขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40110
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้