

เทคนิคการจัดสรรช่องส่งสัญญาณแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก

FOUR WAVE MIXING

NEW CHANNEL ALLOCATION TECHNIQUE FOR REDUCING EFFECT OF
FOUR WAVE MIXING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-114

เทคนิคการจัดสรรช่องส่งสัญญาณแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก
FOUR WAVE MIXING

NEW CHANNEL ALLOCATION TECHNIQUE FOR REDUCING EFFECT OF
FOUR WAVE MIXING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NEW CHANNEL ALLOCATION TECHNIQUE FOR REDUCING EFFECT
OF FOUR WAVE MIXING



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
2016

KMITL-2016-EN-M-010-141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

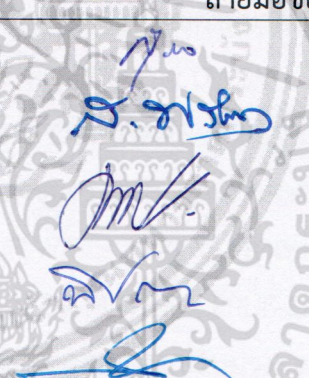
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

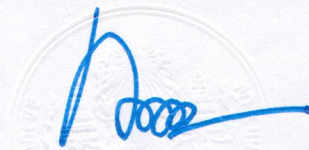
หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบ
จาก FOUR WAVE MIXING
Thesis Title New Channel Allocation Technique for Raducing Effect of Four Wave Mixing
นักศึกษา นายพิษณุ รอดยง
รหัสประจำตัว 54611805
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-010-141

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวันภาค	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกฑาลิน	
ผศ.ดร.พิษณุ	สุพรรณกุล	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น **ฉบับดี คณะวิศวกรรมศาสตร์** นี้ดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 ไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบใหม่เพื่อลดผลกระทบ จาก FOUR WAVE MIXING
นักศึกษา	นายพิษณุ รอดยัง
รหัสประจำตัว	54611805
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคในการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU, ERUS-UBU เพื่อลดผลกระทบจาก FOUR WAVE MIXING ซึ่งพัฒนามาจากเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, US, RUS-EBU, ERUS-EBU โดยพิจารณาการจัดระยะห่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 - 1560.61 nm ของสัญญาณ DWDM ที่ได้จาก EDFA เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจำนวนของ FOUR WAVE MIXING, ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FOUR WAVE MIXING, กำลังของ FOUR WAVE MIXING และ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของการเกิดผลกระทบจาก FOUR WAVE MIXING ของเทคนิคแบบ RUS-UBU, ERUS-UBU มีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิคแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU ดังนั้นเทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU, ERUS-UBU สามารถปรับปรุงผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก FOUR WAVE MIXING ให้มีค่าลดลงยิ่งขึ้นในระบบการส่งสัญญาณ DWDM และมีระยะทางระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ไกลมากขึ้น

Thesis Title	New Channel Allocation Technique for Reducing Effect of Four Wave Mixing
Student	Mr.Pitsanu Rodyoung
Student ID.	54611805
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suthichai Noppanakepong

ABSTRACT

This thesis presents the technique RUS-UBU and ERUS-UBU to arrange the channel allocation to reduce the effect of four wave mixing. We proposed a new technique to space channel allocation of ITU-TG.694.1 standard. Those techniques were developed from ES, US, RUS-EBU, ERUS-EBU. This system, we consider the generate wavelength of EDFA between 1529.55-1560.61 nm for DWDM signals. From the simulation results, number of four wave mixing, four wave mixing efficiency, four wave mixing Power and bit error probability of RUS-UBU, ERUS-UBU are the better performance of FWM lights by comparing the proposed technique with ERUS-EBU. The new proposed technique, RUS-UBU and ERUS-UBU, can improve and decrease the efficiency of four wave mixing light in DWDM transmission systems and distance between optical amplifiers.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า และนอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณ วิศรวิฑ ราชณรงค์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาเรื่องต่างๆ ด้วยดีมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง และเพื่อนๆ ของข้าพเจ้าที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจรวมทั้งเป็นแรงผลักดันที่ทำให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นในการทำวิทยานิพนธ์ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

นาย พิษณุ รอดยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
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 องค์ประกอบของระบบส่งสัญญาณ DWDM.....	6
2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความยาวคลื่น.....	6
2.1.1 กล่าวนำ.....	6
2.1.2 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น.....	10
2.2 ส่วนประกอบของระบบส่งสัญญาณ DWDM.....	12
2.2.1 อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแสง.....	13
2.2.2 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง.....	13
2.2.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง.....	15
2.2.4 Optical Add/Drop Multiplexer (OADM).....	17
2.2.5 Optical Cross Connect (OXC).....	18
บทที่ 3 ผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM.....	20
3.1 กล่าวนำ.....	20
3.2 ผลกระทบที่เกิดจาก Four-Wave Mixing.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การจัดการความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management).....	23
3.3.1 การจัดการความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management).....	24
3.4 การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบส่งสัญญาณ DWDM.....	25
3.4.1 การใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ.....	25
3.4.2 เทคนิคการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ.....	26
3.4.3 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ.....	27
3.4.3.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES).....	27
3.4.3.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US).....	29
3.4.3.3 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-Equal Base Unit (RUS-EBU).....	30
3.4.3.4 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-Equal Base Unit (ERUS-EBU).....	31
3.4.4 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณของงานวิจัยที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมา.....	33
3.4.4.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-Unequal Base Unit (RUS-UBU).....	33
3.4.4.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-Unequal Base Unit (ERUS-UBU).....	34
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	36
4.1 กล่าวนำ.....	36
4.2 การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing.....	36
4.2.1 สมการและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	36
4.2.2 จำนวนของ Four-Wave Mixing.....	37
4.2.3 ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก Four-Wave Mixing.....	38
4.2.4 กำลังของ Four-Wave Mixing.....	40
4.2.5 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก Four-Wave Mixing.....	41
4.3 บทสรุป.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	50
ก. ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T สำหรับระบบที่มีระยะห่างของ ช่องสัญญาณ 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz และ 100 GHz.....	51
ข. จำนวนของ FWM.....	54
ค. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T สำหรับระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz และ 100 GHz	15
3.1	การจัดช่องสัญญาณแบบ ES ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.....	28
3.2	การจัดช่องสัญญาณแบบ US ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.....	29
3.3	การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.....	31
3.4	การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.....	32
3.5	การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.....	34
3.6	การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.....	35
5.1	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดผลกระทบของ Four Wave Mixing จากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แบนด์วิดท์หน้าต่างย่านความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm.....	7
2.2	โครงข่ายที่อาศัยการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความถี่.....	8
2.3	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสง.....	9
2.4	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อมีจำนวนของอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น.....	9
2.5	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายด้วยระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM.....	10
2.6	ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น.....	11
2.7	ส่วนประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM.....	12
2.8	Bragg Grating.....	14
2.9	เส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่น.....	14
2.10	เส้นใยแก้วชนิด Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA).....	15
2.11	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ OADM ที่ใช้หลักการของ Fiber Bragg Gratings ในการ Add/Drop ช่องสัญญาณ.....	18
3.1	รูปแบบการกระจายของความถี่ของแสงจากผลกระทบของปรากฏการณ์ FWM.....	21
3.2	ตัวอย่างคุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM.....	24
3.3	สเปกตรัมของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่าง ระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm.....	25
3.4	รูปแบบการชดเชยค่าโครมาติคิตีเพอร์ซันด้วย Dispersion Compensating Fiber.....	26
3.5	รูปแบบการจัดช่องสัญญาณใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก FWM.....	27
3.6	การจัดช่องสัญญาณแบบ ES.....	28
3.7	ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES.....	28
3.8	การจัดช่องสัญญาณแบบ US.....	29
3.9	ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ US.....	30
3.10	การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU.....	30
3.11	ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU.....	31
3.12	การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU.....	32
3.13	ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU.....	33
3.14	การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU.....	34
3.15	การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU กับ RUS-UBU.....	37
4.2	จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU กับ ERUS-UBU.....	38
4.3	ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ RUS-UBU.....	39
4.4	ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS-EBU และ ERUS-UBU.....	39
4.5	กำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, RUS-UBU, ERUS-EBU และ ERUS-UBU.....	40
4.6	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES.....	41
4.7	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU.....	42
4.8	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU.....	42
4.9	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU.....	42
4.10	ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU.....	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเป็นสิ่งที่กำลังแพร่หลายในประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา เนื่องจากข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงที่ดีกว่าการสื่อสารด้วยตัวกลางชนิดอื่นๆ เช่น สาย Coaxial, สาย UTP เป็นต้น ซึ่งในข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงก็ยังมีการพัฒนาในองค์ประกอบอื่นๆ ขึ้นมาเรื่อยๆ เพื่อสมรรถนะที่ดีขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

ซึ่งการพัฒนาอย่างหนึ่งที่เรานำมาทำการศึกษาคือ ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งพัฒนามาจากระบบส่งสัญญาณแบบ WDM (Wavelength Division Multiplexing) ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM นี้มีข้อดีคือ สามารถส่งสัญญาณแสงได้จำนวนมากผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณที่จะทำการส่งจากต้นทางไปยังปลายทางได้จำนวนมากที่ขึ้น แต่ก็มีจำนวนแบนด์วิดท์ที่จำกัด เนื่องจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA (Erbium Dope Fiber Amplifier) ที่มีช่วงของความยาวคลื่นของสัญญาณอยู่ในช่วง 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จากแบนด์วิดท์ที่มีช่วงจำกัดนี้ก็ต้องมีการจัดสรรช่องสัญญาณให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการจัดช่องสัญญาณคือผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้น ทำให้ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM นี้จุช่องสัญญาณได้จำนวนที่น้อยลง ซึ่งผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดต่อระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM รุนแรงที่สุดนั้นก็คือผลกระทบจาก FWM (Four-Wave Mixing) ผลกระทบของ FWM เกิดขึ้นจากคลื่นของช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันเกิดการรบกวนกันเกิดขึ้นทำให้การโพลาไรซ์ของแสงเกิดการไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น ทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมาไปแทรกสอดความถี่ของช่องสัญญาณที่ส่งไปปลายทาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณลดลง ซึ่งผลกระทบจาก FWM นี้จะเกิดขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงที่ส่งสัญญาณไปนั้นมีค่าที่ลดลง (การลดลงของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณนี้จะทำให้จุช่องสัญญาณได้จำนวนมากขึ้น) ทำให้เกิดผลกระทบของ FWM สูงขึ้น

จากการสังเกตของปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ที่จะทำอย่างไรที่จะทำให้สามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากขึ้นและเกิดผลกระทบจาก FWM ให้มีค่าน้อยที่สุด ในระบบส่งสัญญาณ DWDM เพื่อที่จะเพิ่มสมรรถนะในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางให้ดีขึ้นในระบบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.2 ความหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของการเกิด FWM ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณ DWDM ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่มีจำนวนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ที่ส่งผลให้สมรรถนะในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางที่ลดลง จึงได้มีการศึกษาวิธีที่จะทำลดผลกระทบจาก FWM เกิดขึ้น โดยทำการ ศึกษาเกี่ยวกับการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆที่ส่งผลให้ผลกระทบของ FWM ลดลง และทำการปรับปรุงการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆนั้นให้ดีขึ้น ที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลงมากกว่าเดิม ที่ส่งผลให้ระบบในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางแบบ DWDM มีสมรรถนะที่ดีขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระบบการสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM นั้นข้อดีก็คือสามารถจุจำนวนของช่องสัญญาณได้จำนวนหลายช่องสัญญาณส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวทำให้เกิดผลดีคือสามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางได้ปริมาณมาก ในข้อดีนี้ก็ยังมีการพัฒนาให้สามารถจุช่องสัญญาณมากขึ้นอีก แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเพิ่มช่องสัญญาณนั้นก็คือผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นจาก FWM ที่ทำให้เป็นข้อจำกัดในการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดท์ที่จำกัด เพราะฉะนั้นเราจึงได้มีการศึกษาการเกิดผลกระทบของ FWM ในการส่งสัญญาณจำนวนหลายช่องสัญญาณ เพื่อนำมาซึ่งวิธีในการลดผลกระทบของ FWM ในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.4 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้เราทำการศึกษการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบระยะห่างไม่เท่ากัน (Unequally Spaced หรือ US) ในการจัดช่องสัญญาณ ซึ่งวิธีการแบบ US ความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ไปแทรกสอดความถี่ของความถี่ช่องสัญญาณที่ทำการส่งไปโดยตรง ทำให้ผลกระทบของ FWM ลดลงจากการจัดระยะห่างแบบเท่ากัน (Equally spaced หรือ ES) ที่ความถี่ของ FWM นั้นเกิดขึ้นไปแทรกสอดความถี่ของความถี่ช่องสัญญาณที่ทำการส่งไปโดยตรงทำให้เกิดผลกระทบจาก FWM ที่สูง จากการจัดช่องสัญญาณแบบ US ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการจัดระยะห่างแบบ US เป็นการจัดระยะห่างแบบ Repeated Unequally Spaced- Equally Base Unit (RUS-EBU) และ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced - Equally Base Unit (ERUS-EBU) ในการจัดช่องสัญญาณ แต่ในการจัดช่องสัญญาณแบบ US จะสามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่น้อยกว่าการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU ในช่วงของความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ในงานวิจัยนี้เราจึงไม่ได้นำมาทำการพิจารณา ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU จะมีช่วงของแบนด์วิดท์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระยะห่างแต่ละช่องสัญญาณที่แคบกว่าแบบ US ทำให้สามารถจุจำนวนช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากกว่าการจัดระยะห่างแบบ ES ทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลงน้อยกว่าการจัดระยะห่างแบบ ES ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU ให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลงอีก จากการสลับกันของระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงแบบไม่เท่ากันและลดจำนวน Bit Rat เรียกว่า Unequally Base Unit (UBU) และนำไปประยุกต์ใช้งานกับ RUS-EBU และ ERUS-EBU กลายเป็น Repeated Unequally Spaced – Unequally Base Unit (RUS-UBU) และ Equally Spaced Repeated Unequally spaced – Unequally Base Unit (ERUS-UBU) การจัดระยะห่างแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU นี้จะเกิดผลกระทบจาก FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU ดังนั้นเมื่อผลกระทบของ FWM ที่ลดลง จะทำให้สมรรถนะในการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางที่ดีขึ้น

1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการลดผลกระทบของ FWM (ในบทความวิจัยนี้เราพิจารณาผลกระทบของ FWM เป็นสิ่งสำคัญ เราจะไม่พิจารณาผลกระทบของ SPM (self-phase modulation), CPM (cross-phase modulation) และการเสื่อมลงของรูปคลื่น เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด) ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ ในระบบส่งสัญญาณแบบ 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) ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber (DSF) และ Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF) ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง (L) = 80 km สัมประสิทธิ์ของอัตราการลดทอน (α) = 0.2 dB/km ดิสเพอร์ชัน (D_{DSF}) = 0 ps/nm-km ดิสเพอร์ชัน (D_{NZDSF}) = 4.6 ps/nm-km ความชันของดิสเพอร์ชัน ($dD/d\lambda_{DSF}$) = 0.07 ps/km/nm² ความชันของดิสเพอร์ชัน ($dD/d\lambda_{NZDSF}$) = 0.045 ps/km/nm² พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (A_{eff}) = 50 μm^2 และกำหนดให้ประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของ Avalanche Photodiode (APD) = 80 % โดยแสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในรูปของประสิทธิภาพการรวม กันของความถี่ FWM กำลังของ FWM และความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลกระทบจาก FWM ที่ $f_{FWM} = f_i$ เมื่อ f_{FWM} คือความถี่ของแสง FWM และ f_i คือความถี่ของสัญญาณแสงของแต่ละช่องสัญญาณ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากลกระทบของ FWM ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ในช่วงของความยาวคลื่นที่ผลิตได้จากตัวขยายสัญญาณชนิด EDFA ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm (192.1 – 196 THz) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆที่นำมาวิเคราะห์รวมถึงวิธีที่เราทำการปรับปรุงขึ้นมา โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ต่างๆ ดังนี้

1. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความถี่ของ FWM ที่เกิดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ ที่ RUS-UBU และ ERUS-UBU $f_{FWM} = f_i$ ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF และ NZDSF
2. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ส่งผ่านเส้นใยแก้วชนิด DSF และ NZDSF
3. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จาก ที่ $f_{FWM} = f_i$ ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF และ NZDSF ของการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU, RUS-UBU และ ERUS-UBU ตามลำดับ
4. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลัง FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF และ NZDSF
5. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลัง FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ต่อกำลังอินพุตที่ได้จาก EDFA ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่าอินพุตสูงสุด $P_m(\max)$ ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF และ NZDSF ที่ $f_{FWM} = f_i$
6. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลกระทบของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ส่งผ่านเส้นใยแก้วชนิด DSF และ NZDSF

1.7 รายละเอียดเนื้อหาในบทต่างๆ

การศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงในระบบส่งสัญญาณ DWDM ประกอบด้วย Stimulated Brillouin Scattering (SBS), Stimulated Raman Scattering (SRS), Self-Phase Modulation (SPM), Cross-Phase Modulation (CPM) และ Four-Wave Mixing (FWM) และองค์ประกอบของระบบส่งสัญญาณ DWDM เช่น การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความยาวคลื่น (WDM), การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น (DWDM), ส่วนประกอบของระบบส่งสัญญาณ DWDM และการจัดแถบความยาวคลื่นแสง

บทที่ 3 กล่าวถึงผลกระทบที่เกิดจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM เช่น ผลกระทบที่เกิดจาก FWM, วิธีการลดผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM โดยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีคุณสมบัติเฉพาะ, การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ และวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงขึ้น

บทที่ 4 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากผลกระทบของ FWM โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU และวิธีที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DSF และ NZDSF ในระบบส่งสัญญาณ DWDM เช่น ความถี่ของ FWM ที่เกิดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ, ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM, กำลังของ FWM และความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลกระทบของ FWM ขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบผลกระทบของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

องค์ประกอบของระบบส่งสัญญาณ DWDM

2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความยาวคลื่น

2.1.1 กล่าวนำ

การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงโดยใช้ระบบส่งสัญญาณ Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจากผลของการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เรียกว่า Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงนี้ทำให้ระบบส่งสัญญาณ DWDM สามารถส่งสัญญาณแสงหลายช่องสัญญาณพร้อมกันได้ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วคือ ความยาวคลื่นจำนวนมากที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน สามารถส่งไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวพร้อมกันได้ ในแถบความยาวคลื่น 1300 – 1600 nm ทำให้สามารถส่งความยาวคลื่นหลายค่าไปพร้อมกันได้ เทคโนโลยีของการรวมค่าความยาวคลื่นจำนวนมากแล้วส่งไปบนเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียวถูกเรียกว่า การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่น Wavelength Division Multiplexing (WDM) ซึ่งโดยพื้นฐานแล้ว วิธี WDM ก็เหมือนกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความถี่ Frequency Division Multiplexing (FDM) ซึ่งถูกนำมาใช้งานก่อนหน้านี้ในระบบการรับส่งวิทยุ คลื่นไมโครเวฟและระบบการรับส่งสัญญาณผ่านดาวเทียม กล่าวคือในโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วที่อาศัยเทคนิค WDM (โครงข่าย WDM) นั้น ค่าความยาวคลื่นแสงต้องมีค่าห่างกันอย่างเหมาะสมเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน แต่ในการใช้งานของระบบนั้นจะพิจารณาค่าความยาวคลื่นในการรับส่งข้อมูลระหว่างกันแทนที่จะพิจารณาค่าความถี่คุณลักษณะที่สำคัญของการมัลติเพล็กซ์แบบ WDM เป็นดังนี้

1. สามารถเพิ่มความจุในการส่งข้อมูลให้แก่โครงข่ายได้ จุดประสงค์หลักของการใช้งานเทคนิค WDM ในปัจจุบันนี้ยังคงเป็นการเพิ่มความจุให้แก่โครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบจุดต่อจุด โดยแต่ละค่าความยาวคลื่นแสงสามารถรองรับ 1 ช่องสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลอย่างน้อยเท่ากับ 2 – 3 Gbps ได้ หรืออย่างน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับอัตราการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทาง เทคนิค WDM นี้เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มความจุของโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วได้สูงมาก เนื่องจากแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วมีขนาดหลายร้อย THz แต่ไม่สามารถใช้ความจุของเส้นใยแก้วได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากข้อจำกัดของความเร็วในการทำงานและอัตราการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทาง เรียกข้อจำกัดนี้ว่า “Electronic Bottleneck”

2. มีความโปร่งใสในการส่งข้อมูล ประเด็นที่สำคัญของเทคนิค WDM คือสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณแสงสามารถส่งข้อมูลที่มีรูปแบบการเข้ารหัสชนิดใดก็ได้ เนื่องจากมีการใช้ค่าความยาว

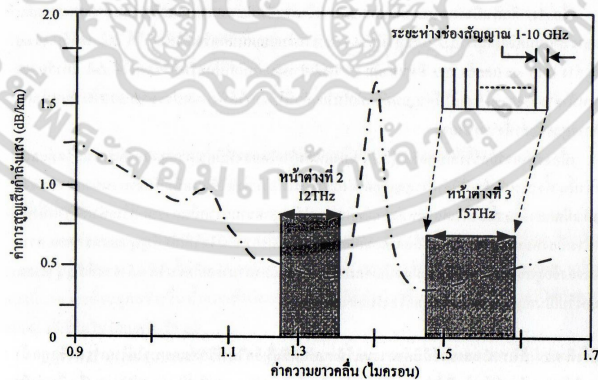
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่แตกต่างกันหรือกล่าวได้ว่ามีความโปร่งใสในการส่งข้อมูล (transparency) โดยข้อมูลดิจิทัล หรือสัญญาณแอนะล็อกชนิดต่างๆ สามารถถูกส่งไปพร้อมๆกันและอิสระต่อกันไปบนเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียวได้โดยไม่สนใจโครงสร้างของข้อมูลที่แตกต่างกัน

3. สามารถกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูลโดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่เป็นแบบไดนามิก และมีความยืดหยุ่นสูง นอกเหนือจากการใช้ความยาวคลื่นจำนวนมากในการเพิ่มความจุและเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ระบบแล้ว การใช้อุปกรณ์ในการกำหนดเส้นทาง (routing) โดยใช้ความยาวคลื่นนั้นก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ดีและเหมาะสมในการใช้งาน นอกเหนือจากการใช้เวลา (Time Division Multiplexing) และสเปซ (Space Division Multiplexing) ในการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย

โครงข่ายที่จัดสรรเส้นทางโดยใช้ความยาวคลื่นแสง (wavelength-routing networks) นั้นจะใช้ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณหนึ่งๆเสมือนเป็นแอดเดรสที่ใช้การรับส่งข้อมูลระหว่างกัน ซึ่งอาจจะมีการจัดเส้นทางของโครงข่ายใหม่ (reconfiguration) หรือมีการปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นในการติดต่อแบบไดนามิก (dynamic) ได้ด้วย โดยใช้ฟิลเตอร์แสงที่ปรับค่าความยาวคลื่นแสง สวิตช์แสง ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์เพิ่มและหรือปช่องสัญญาณแสงและตัวแปลงค่าความยาวคลื่น ฯลฯ ข้อดีที่ได้รับคือ ทำให้เราสามารถนำค่าความยาวคลื่นกลับมาใช้งานใหม่ (wavelength reuse) ได้และโครงข่ายมีความยืดหยุ่นสูงมาก เป็นต้น

ในโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบจุดต่อจุด เส้นใยแก้วหนึ่งเส้นถูกนำมาเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดแสงหนึ่งตัว และโฟโตดีเทคเตอร์หนึ่งตัว สัญญาณจากแหล่งกำเนิดแสงแต่ละตัว (1 ช่องสัญญาณ) จะรับส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแก้วที่ต่างกัน นอกจากนี้ แหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้งานมีเลเซอร์ที่แคบ การรับส่งข้อมูลแต่ละช่องสัญญาณดังกล่าวจึงใช้แบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วที่น้อยมาก



รูปที่ 2.1 แบนด์วิดท์หน้าต่างย่านความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm [15]

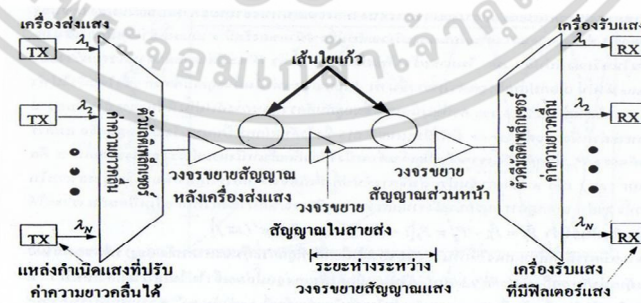
ในรูปที่ 2.1 แบนด์วิดท์ของการส่งสัญญาณแสงในหน้าต่าง 1310 nm และ 1550 nm จะยอมให้เกิดการใช้ช่องสัญญาณพร้อมกันจำนวนมากได้ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความกว้างสเปกตรัมที่แคบ (มาตรฐาน ITU-T สำหรับระบบ WDM ได้กำหนดระยะห่างของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GHz หรือ 0.4 nm) เนื่องจากโดยพื้นฐานแล้ว WDM เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นที่ตายตัวเนื่องจากการล็อกเลเซอร์ให้ทำงานในโหมดการใช้งานเฉพาะทั่วไปนั้น ความถี่ของเลเซอร์จะมีค่าตายตัวข้อกำหนดของ ITU-T G.694.1 ได้กำหนดการเลือกช่องสัญญาณจากช่วงของความถี่ที่เปรียบเทียบกับ 193.100 THz (1552.524 nm) และกำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz (0.8 nm ที่ 1552 nm) และค่าระยะห่างที่ถูกแนะนำอีกหลายค่า

ส่วนใหญ่วารสารทางวิชาการจะใช้คำว่า Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) มากกว่าที่ใช้คำว่า WDM เดี่ยวๆ เหนือมันไม่ได้หมายถึงบริเวณที่ใช้งานหรือเงื่อนไขการใช้งานที่ถูกต้อง แต่เป็นคำในอดีตที่นำมาใช้เรียกเพื่อบ่งถึงระยะห่างของช่องสัญญาณที่ถูกกำหนดไว้ตามข้อบังคับของ ITU-T G.694.1 การใช้งาน WDM ในยุคแรกๆ นั้นเป็นการเพิ่มความจุให้แก่โครงข่ายการส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุดที่มีการติดตั้งใช้งานอยู่ก่อนแล้ว โดยการเพิ่มความยาวคลื่นที่มีระยะห่างกันเป็นจำนวนเท่าของ 10 nm หรือ 100 nm เพื่อที่จะออกแบบเลเซอร์ทางด้านเครื่องส่งแสงและฟิลเตอร์แสงทางด้านเครื่องรับแสงที่ไม่ซับซ้อนจนกระทั่งปลายปี 1980 เลเซอร์ที่ปรับค่าความยาวคลื่นแสงที่มีระยะห่างใกล้เคียงกันมากในบริเวณย่านความยาวคลื่น 1550 nm ได้เป็นจำนวนมาก จึงเรียกว่า DWDM

คุณลักษณะที่สำคัญของ WDM คือว่าแต่ละค่าความยาวคลื่นสามารถที่จะสร้างเซตของคลื่นพาห่ที่อิสระต่อกัน (orthogonal) ซึ่งจะถูกแยกส่ง ถูกกำหนดเส้นทางหรือถูกสวิตช์โดยปราศจากการแทรกสอดซึ่งกันและกันได้ หลักการดังกล่าวยังคงเป็นจริงเสมอถึงแม้ว่าความเข้มแสงจะมีค่าต่ำเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นก็ตาม ยกตัวอย่างเช่น การกระเจิง Brillouin ที่ถูกกระตุ้น (Stimulated Brillouin Scattering หรือ SBS) และการผสมสี่คลื่น (Four-Wave Mixing หรือ FWM) ฯลฯ ซึ่งปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนั้นแย่งได้



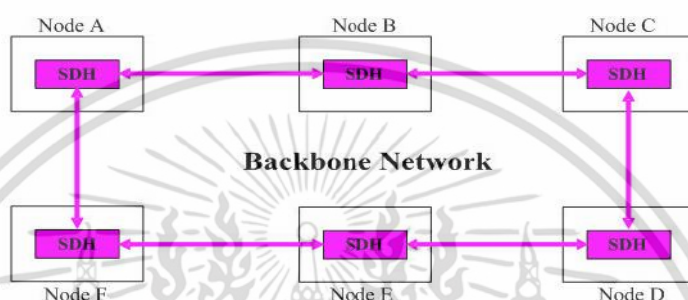
รูปที่ 2.2 โครงข่ายที่อาศัยการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความถี่ [15]

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของโครงข่ายที่อาศัยการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิง

ความยาวคลื่นและอุปกรณ์ต่างๆ ในโครงข่าย WDM ที่ด้านส่งมีแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกมอดูเลตที่อิสระเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

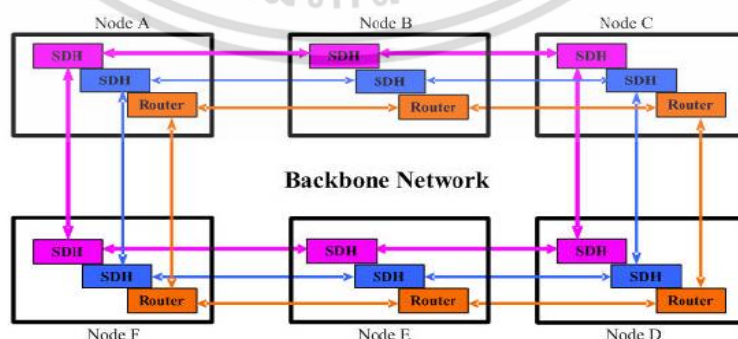
ต่อกันจำนวนมากซึ่งปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันซึ่งมัลติเพล็กซ์เซอร์ถูกนำมาใช้ในการรวมสัญญาณแสงเอาที่พุดเหล่านี้แล้วคัปปลิงส่งไปบนเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียว ในระหว่างทางจะมีสถานีขยายสัญญาณแสงหลายชนิด ทางด้านรับ ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์ถูกนำมาใช้งานเพื่อแยกสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆไปยังเครื่องรับแสงที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

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



รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสง [15]

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

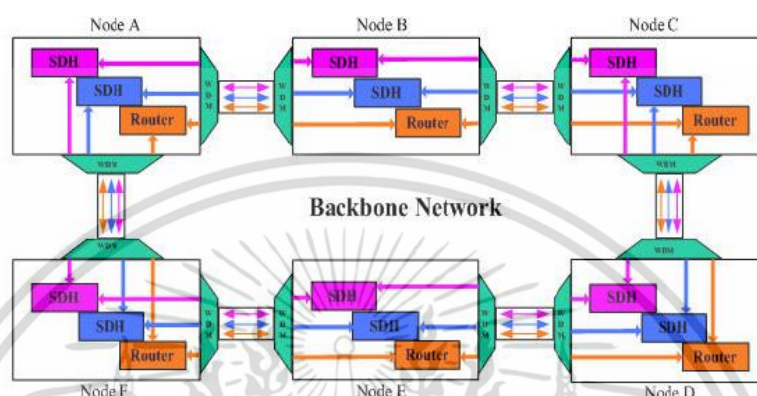


รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อมี

จำนวนของอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายด้วยระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM [15]

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

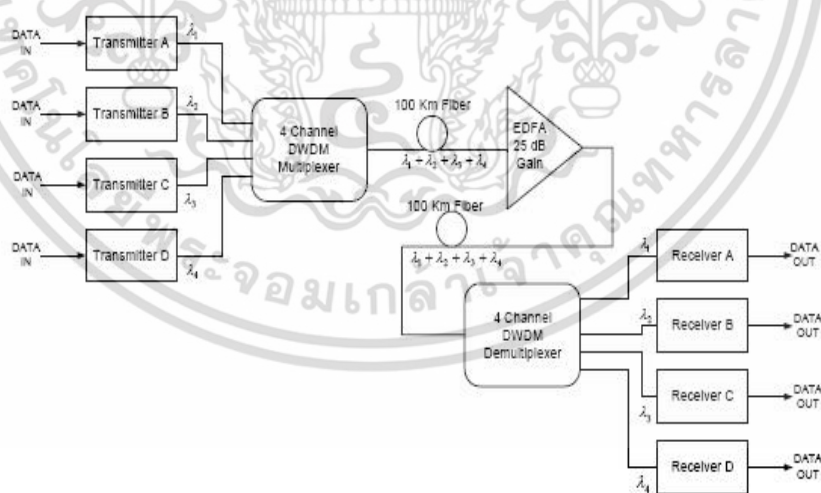
2.1.2 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น (DWDM) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเกี่ยวกับเทคโนโลยีของการสื่อสารข้อมูล ด้วยการเพิ่มจำนวนของสัญญาณแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีการกำหนดความยาวคลื่นแสงเฉพาะของแต่ละช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงความถี่ของเครือข่ายที่ออกแบบไว้ แล้วมัลติเพล็กซ์รวมกันเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน กระบวนการนี้สามารถรวมช่องสัญญาณที่เป็น ภาพ เสียง หรือข้อมูล แล้วส่งรวมกันไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันได้ โดยยังคงรักษาคุณภาพของแต่ละช่องสัญญาณไว้ได้ ทำให้สามารถส่งสัญญาณในเครือข่ายได้เพิ่มมากขึ้นโดยไม่ต้องลงทุนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่ม เทคโนโลยีนี้ตอบสนองกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นด้านประสิทธิภาพและความสามารถของระบบสื่อสารสัญญาณแบบเดิม เช่น SONET/SDH เนื่องจากความต้องการแบนด์วิดท์ที่เพิ่มสูงขึ้น

อุปกรณ์ในระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงขึ้นและทำให้ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายคืออุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นสามารถขยายสัญญาณแสงในช่วงกว้างที่ความยาวคลื่นย่าน 1550 นาโนเมตรโดยไม่มีการเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน สำหรับเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างโหนดไกลๆและต้องมีสถานีทวนสัญญาณระหว่างเส้นทาง ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นสามารถช่วยประหยัดจำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงได้ ตัวอย่างเช่นระบบที่มีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงจำนวน 16 ความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งสัญญาณรูปแบบเดิมสามารถลดจำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงได้จำนวน 16 ชุด ที่สถานีทวนสัญญาณแต่ละสถานี โดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเพียง 1 ชุดต่อสถานี ทำให้สมรรถนะของเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น



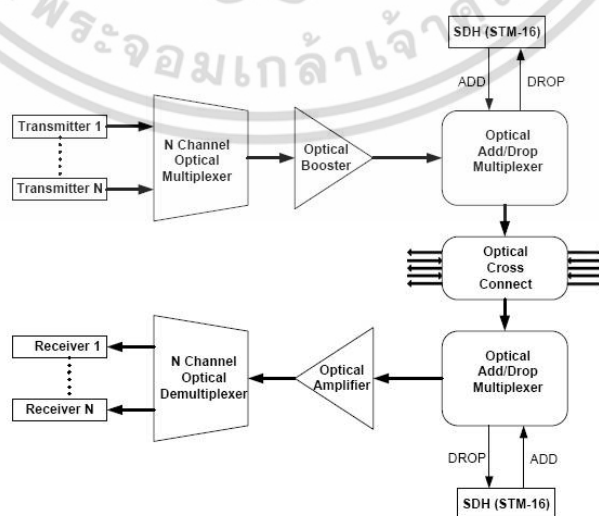
รูปที่ 2.6 ระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น [13]

หลักการการทำงานของระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่น เริ่มจากที่ภาคส่งจะนำช่องสัญญาณซึ่งอาจเป็นสัญญาณ ภาพ เสียง หรือข้อมูล จำนวนหลายๆ ช่องสัญญาณมัลติเพล็กซ์ตามความยาวคลื่นแสงเข้าด้วยกัน แต่เนื่องจากกำลังของสัญญาณที่ผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาจากอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ทางแสงยังต่ำจึงไม่สามารถส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปยังปลายทางที่ต้องการได้ จึงนำสัญญาณที่ผ่านออกมาจากอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ทางแสงไปทำการขยายกำลังของสัญญาณแสงให้สูงขึ้นด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) จากนั้นนำสัญญาณที่ได้รับการขยายสัญญาณแล้วส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปยังปลายทาง ซึ่งถ้าเครือข่ายมีระยะทางไกลมาก ๆ ระหว่างเส้นทางจะต้องติดตั้งสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) เพิ่ม เพื่อให้สัญญาณมีกำลังอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ เมื่อสัญญาณไปถึงปลายทางอุปกรณ์ที่ภาครับจะได้ตรวจจับสัญญาณที่ส่งมาได้ โดยเมื่ออุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ได้รับสัญญาณมาแล้วจะทำการถอดช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณออกตามความยาวคลื่นแสงและส่งต่อไปยังอุปกรณ์ของภาครับแต่ละประเภทเพื่อนำสัญญาณภาพ เสียง หรือข้อมูลที่ส่งมาไปประมวลผลต่อไป

2.2 ส่วนประกอบของระบบส่งสัญญาณ DWDM

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



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีการนำออกไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ อาจทำให้ผู้เผยแพร่เอกสารนี้ได้รับความเสียหายได้

2.2.1 อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแสง

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงทำหน้าที่ในการนำสัญญาณภาพ เสียง หรือข้อมูล ที่อยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล โดยแต่ละช่องสัญญาณอาจมีอัตราเร็วของบิตที่แตกต่างกัน หรือมีรูปแบบการเข้ารหัสของเฟรมที่แตกต่างกันเช่น เฟรมของ SDH/SONET หรือ เฟรมของ Internet Protocol เปลี่ยนเป็นรูปแบบของสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณแตกต่างกันตามที่ออกแบบไว้ในช่วงของแถบความยาวคลื่นที่เครือข่ายต้องการ ซึ่งแถบความยาวคลื่นส่วนใหญ่จะถูกกำหนดตามแถบความยาวคลื่นของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดจำนวนของช่องสัญญาณในเครือข่ายคือเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่ามาก จำนวนของช่องสัญญาณในเครือข่ายก็จะมีจำนวนน้อย แต่เมื่อระยะห่างของช่องสัญญาณมีค่าน้อย จำนวนของช่องสัญญาณในเครือข่ายก็จะมีจำนวนมาก โดยข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่งของอุปกรณ์รับ/ส่งสัญญาณแสงคือในวิวัฒนาการของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงต้องไม่มากกว่าระยะห่างของช่องสัญญาณ เพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดของช่องสัญญาณที่อยู่ข้างเคียงกัน อุปกรณ์รับ/ส่งสัญญาณแสงส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีของอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter)

2.2.2 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง

(Optical Multiplexers and Optical Demultiplexers)

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

อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงทำหน้าที่ในการรวมช่องสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเข้าด้วยกันและส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันยังปลายทางที่ต้องการ ที่ปลายทางจะมีอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงทำหน้าที่ในการถอดช่องสัญญาณแสงที่รวมกันมาตามความยาวคลื่นที่ออกแบบไว้ออกจากกันและส่งต่อไปยังเครื่องรับต่อไป อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงและดี

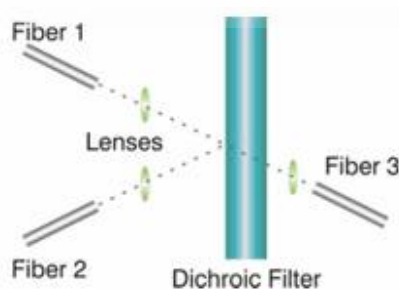
มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงต้องสามารถจัดสัญญาณรบกวนและการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ข้างเคียงได้ ซึ่งคัปเปอร์ (Couplers) และเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่น (diachronic fiber) เป็นอุปกรณ์พาสซีฟที่นิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงและดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง การออกแบบคัปเปอร์ของระบบมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นชนิดหนาแน่นในช่วงแรกจะอยู่บนพื้นฐานของตัวกรองสัญญาณชนิด Fiber Bragg Grating (FBG) ดังในรูปที่ 2.8 แบริกเกรตติง (Bragg gratings) มีหลักการคือดัชนีหักเหของแสงของคอร์ (Core) จะถูกทำให้ค่าดัชนีหักเหของคอร์ตามความยาวของเส้นใยแก้วมีค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงมากบ้างน้อยบ้างตามระยะทางซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตามคาบเวลา ผลคือ Fiber grating จึงมีการวางตัวความยาวคลื่นที่ขึ้นอยู่กับการสะท้อนกลับของดัชนีการหักเหแสงเพื่อการแบ่งแยกความยาวคลื่น



รูปที่ 2.8 Bragg Grating [13]

การออกแบบในรูปแบบที่สองจะขึ้นอยู่กับ การต่อเรียงเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.9 การกรองสัญญาณแสงด้วยเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นมีหลักการคือ ในตำแหน่งที่เส้นใยแก้วสองเส้นเชื่อมต่อกันจะเพิ่มเติมเส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นลงไประหว่างกลาง โดยจะวางเรียงต่อกันตามความยาวคลื่นจนกว่าความยาวคลื่นทั้งหมดถูกรวมเข้าด้วยกันหรือแยกออกจากกัน การใช้เส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นมีเสถียรภาพที่น่าเชื่อถือมากกว่าและสามารถแยกช่องสัญญาณได้ค่อนข้างดีกว่า



รูปที่ 2.9 เส้นใยแก้วชนิดส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่น [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Booster and Optical Amplifier)

เนื่องจากระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM นำไปใช้งานกับเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างสถานีที่ไกลๆ จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจากดิสเพอร์ชันและการลดทอนสัญญาณได้ แต่จากการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) สามารถลดผลกระทบเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณได้ โดย EDFA ก็คือเส้นใยแก้วชนิดซิลิกาที่ถูกโด๊ปด้วยสาร Erbium (Er_{3+}) ซึ่งเป็นธาตุที่มีระดับกำลังงานที่เหมาะสมในด้านโครงสร้างของอะตอมสำหรับการขยายสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 nm โดยใช้สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 980 nm เป็นตัวกระตุ้นกำลังงานในการโด๊ปเส้นใยแก้ว เมื่อนำสัญญาณแสงที่มีกำลังต่ำๆ ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ถูกใส่เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง สัญญาณแสงนี้จะกระตุ้นอะตอมของธาตุ Erbium ให้ปล่อยกำลังงานที่สะสมไว้เพิ่มให้กับสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 nm กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสัญญาณสิ้นสุดที่อีกด้านของเส้นใยแก้ว ทำให้สัญญาณมีความเข้มเพิ่มขึ้น โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงมีการใช้งานในสองลักษณะคือ Optical Booster ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ด้านส่งให้สูงขึ้นก่อนส่งผ่านไปบนเส้นใยแก้วนำแสง ส่วน Optical Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ภาครับเพื่อทำให้สัญญาณแสงที่ภาครับอยู่ในระดับที่อุปกรณ์ของภาครับสามารถประมวลผลสัญญาณที่รับมาได้ รูปที่ 2.10 แสดงเส้นใยแก้วชนิด Erbium-doped fiber amplifier

รูปที่ 2.10 เส้นใยแก้วชนิด Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) [13]

ตารางที่ 2.1 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 สำหรับระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz และ 100 GHz [13]

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
195.9375	–	–	–	1530.0413
195.9250	195.925	–	–	1530.1389
195.9125	–	–	–	1530.2365
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.3341

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
195.8875	–	–	–	1530.4318
195.8750	195.875	–	–	1530.5295
195.8625	–	–	–	1530.6271
195.8500	195.850	195.85	–	1530.7248
195.8375	–	–	–	1530.8225
195.8250	195.825	–	–	1530.9203
195.8125	–	–	–	1531.0180
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.1157
195.7875	–	–	–	1531.2135
195.7750	195.775	–	–	1531.3112
195.7625	–	–	–	1531.4090
195.7500	195.750	195.75	–	1531.5068
195.7375	–	–	–	1531.6046
195.7250	195.725	–	–	1531.7024
195.7125	–	–	–	1531.8003
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.8981
195.6875	–	–	–	1531.9960
195.6750	195.675	–	–	1532.0938
195.6625	–	–	–	1532.1917
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
193.2375	–	–	–	1551.4197
193.2250	193.225	–	–	1551.5200
193.2125	–	–	–	1551.6204
193.2000	193.200	193.20	193.2	1551.7208
193.1875	–	–	–	1551.8212
193.1750	193.175	–	–	1551.9216
193.1625	–	–	–	1552.0220
193.1500	193.150	193.15	–	1552.1225
193.1375	–	–	–	1552.2229
193.1250	193.125	–	–	1552.3234
193.1125	–	–	–	1552.4239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.5244
193.0875	–	–	–	1552.6249
193.0750	193.075	–	–	1552.7254
193.0625	–	–	–	1552.8259
193.0500	193.050	193.05	–	1552.9265
193.0375	–	–	–	1553.0270
193.0250	193.025	–	–	1553.1276
193.0125	–	–	–	1553.2282
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.3288
192.9875	–	–	–	1553.4294
192.9750	192.975	–	–	1553.5300
192.9625	–	–	–	1553.6307

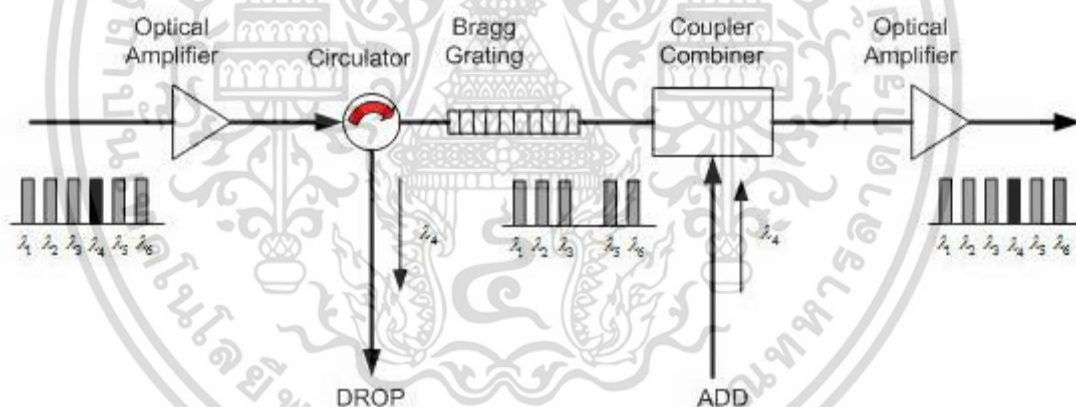
เนื่องจากความต้องการของแบนด์วิดท์ช่วงที่กว้างขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดความต้องการอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นคือมีแถบความยาวคลื่นในการขยายสัญญาณที่กว้างและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่ช่วงแถบความยาวคลื่นที่ใช้งานได้ของ EDFA มีเพียง 30 nm อยู่ในช่วง 1530 nm – 1560 nm ซึ่งการลดทอนของสัญญาณแสงต่ำสุดจะอยู่ในช่วง 1500 nm – 1600 nm อุปกรณ์ขยายสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงแบบคู่ (Dual-Band Fiber Amplifiers หรือ DBFA) ช่วยแก้ปัญหาแถบของความยาวคลื่นใช้งานได้เนื่องจากมีช่วงของแถบความยาวคลื่นที่กว้างมากขึ้นเป็น 75 nm อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิดนี้จะแบ่งการขยายสัญญาณออกเป็นแบนด์ย่อยสองแบนด์ โดยหลักการทั่วไปของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ DBFA จะคล้ายกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA แต่มีช่วงของแถบความยาวคลื่นที่กว้างกว่าคืออยู่ในช่วง 1528 nm – 1610 nm โดยแถบความยาวคลื่นในช่วงแรกจะเหมือนกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ EDFA และแถบความยาวคลื่นช่วงที่สองจะเรียกว่า Extended Band Fiber Amplifier (EBFA) ข้อดีของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ EBFA คือมีอัตราขยายคงที่, ถึงจุดอิ่มตัวช้า, สัญญาณรบกวนต่ำ เป็นต้น อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบ EBFA สามารถทำงานได้โดยมีอัตราขยายคงที่ในช่วงความยาวคลื่น 35 nm ซึ่งสามารถเทียบเท่าได้กับ EDFA มีอัตราขยายคงที่ในช่วงความยาวคลื่น 30 nm แต่เป็นคอนลชะช่วงความยาวคลื่น โดย EDFA มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าคือถึงจุดอิ่มตัวช้ากว่า และรักษาค่าของสัญญาณด้านเอทพุตให้คงที่แม้สัญญาณด้านอินพุตเพิ่มขึ้น

2.2.4 Optical Add/Drop Multiplexer (OADM)

Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเสริมสมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยทำให้เกิดความสะดวกมากขึ้นสำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบจุดต่อจุดที่ต้องการเชื่อมต่อทรานซิปิกผ่านเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยให้ระบบสื่อสารสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DWDM ทำหน้าที่ในการจัดการเส้นทางผ่านทรัพยากรของเครือข่ายรวมกัน โดย OADM ทำหน้าที่ในการนำสัญญาณจากจุดที่ต้องการจะเชื่อมต่อ ต่อเข้ากับระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM และส่งผ่านสัญญาณนั้นไปยังปลายทางที่ต้องการ ซึ่งที่ด้านปลายทางก็จะมีอุปกรณ์ OADM อีกชุดทำหน้าที่ในการนำสัญญาณที่ส่งผ่านระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM มา ออกจากระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM และนำสัญญาณนั้นส่งต่อไปยังเครือข่ายอื่นต่อไป โดยช่องสัญญาณที่นำมาใช้งานจะอยู่ภายในช่วงแถบความยาวคลื่นของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ซึ่งมีระยะห่างของช่องสัญญาณเป็นตัวกำหนดจำนวนช่องสัญญาณ โดยมีการกำหนดช่องสัญญาณที่จะใช้งานไว้แล้วในขั้นตอนของการออกแบบระบบ ดังนั้นสัญญาณที่จะนำเข้ามาและดึงออกที่จุดใดก็สามารถทำได้ตามช่องสัญญาณที่ออกแบบไว้ โดยไม่ต้องมีมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ทั้งหมดและมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณทั้งหมดที่รวมช่องสัญญาณที่ใส่เพิ่มแล้วกลับเข้าไปในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ตามเดิม การจัดการระบบการเชื่อมต่อของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM จะอยู่ในรูปของพอร์ตที่เป็นไปตามลำดับตามความยาวคลื่น ซึ่งถ้าช่องสัญญาณถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้วจะเรียกว่า Fixed OADM แต่ถ้าช่องสัญญาณถูกสร้างขึ้นโดยอัตโนมัติตามชนิดของเครือข่ายเรียกว่า Reconfigure OADM เมื่ออุปกรณ์ OADM ส่วนมากจะใช้หลักการของ Fiber Bragg Gratings ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ OADM ที่ใช้หลักการของ Fiber Bragg Gratings ในการ Add/Drop ช่องสัญญาณ [13]

2.2.5 Optical Cross Connect (OXC)

OXC เป็นอุปกรณ์ของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ในการสลับเส้นทาง (Cross Connect) ระหว่างพอร์ตอินพุตจำนวน N พอร์ตกับพอร์ตเอาต์พุตจำนวน N พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตรวมกันอยู่ในสัญญาณซึ่งถูกมัลติเพล็กซ์รวมกันมาในแถบความยาวคลื่นเดียวกัน ซึ่งการจัดการแบนด์วิดท์ให้ความยืดหยุ่นนั้นสามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์สลับเส้นทางด้วยแสง (Optical Cross Connect หรือ OXC) โดย OXC จะช่วยในการจัดการเครือข่ายให้สามารถรับ/ส่งและจัดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์ OXC จะมีอัตราเร็วของบิตเป็นอิสระกับรูปแบบของการสลับเส้นทาง โดยคุณสมบัติพิเศษนี้จะช่วยให้อุปกรณ์ OXC สามารถที่จะทำการสลับเส้นทางของสัญญาณที่มีอัตราเร็วของบิตที่มีความหลากหลายได้ เช่น OC-3, OC-12, OC-48, OC-192 หรือสัญญาณรูปแบบอื่นๆ เช่น SONET, ATM ด้วยการจัดการเครือข่ายในชั้นการทำงานด้วยแสง ตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของ OXC เช่นท่อนำคลื่นแสงแบบระนาบ (optical planar waveguide) โดยอาศัยการคับปลิง (coupling) ระหว่างท่อนำคลื่นแสงหนึ่งไปสู่อีกท่อนำคลื่นแสงหนึ่งที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

3.1 กล่าวนำ

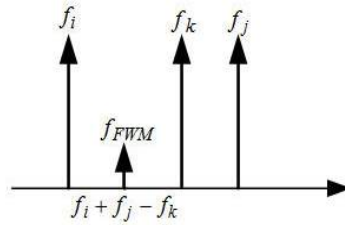
ปัจจุบันนี้มีการใช้เทคนิคต่างๆเพื่อลดผลกระทบของการเกิด Four-Wave Mixing (FWM) เช่น การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสงร่วมกันของสายหน่วงเทคนิคการผสมผสานกันของ wavelength time division multiplexing การผสมผสานกันของการมอดูเลต amplitude frequency shift keying โดยการใช้ prechirped pulses การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS)

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้เน้นไปที่ความสัมพันธ์ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ปัจจุบันนี้การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (ERUS-EBU) ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหาของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES) จะเกิดผลกระทบจาก FWM สูง ที่ $f_{FWM} = f_i$ เมื่อ f_{FWM} คือความถี่ของแสง FWM และ f_i คือความถี่ของสัญญาณแสงของแต่ละช่องสัญญาณ ในการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU จะทำให้ทุกๆช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากัน (US) จำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เราเรียกกลุ่มของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำว่า base unit) และเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ที่เท่ากัน โดย ERUS-EBU ใช้แบนด์วิดท์ที่แคบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ES ที่จำนวนช่องสัญญาณเท่ากัน โดยการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS จะทำให้ผลกระทบที่เกิดจาก FWM ลดลง จากการสังเกตนี้เราจึงได้มีการปรับปรุงการจัดระยะห่างช่องสัญญาณโดยอาศัยการเลือกและการสลับกันของช่องสัญญาณภายใน base unit ที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำเช่น Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (RUS-UBU) และ Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) เป็นต้น โดยวิธีการเหล่านี้จะทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ RUS-EBU และ ERUS-EBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ในการจัดช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ที่ได้จาก EDFA ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

3.2 ผลกระทบที่เกิดจาก Four-Wave Mixing

ระบบส่งสัญญาณ DWDM ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันและเป็นสาเหตุให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณ แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 เป็นรูปแบบการกระจายตัวของความถี่ของแสง เมื่อ f_i , f_j และ f_k เป็นสัญญาณความถี่ของแสงและ f_{FWM} เป็นความถี่ของแสงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสัญญาณทั้งสาม

ความถี่เนื่องจากผลกระทบของ FWM ซึ่งหาได้จาก $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ โดยสัญญาณที่ความถี่นี้จะไปซ้อนทับกับความถี่ของช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่ง ผลที่ตามมาคือจะเกิดการเสื่อมลงของสัญญาณ



รูปที่ 3.1 รูปแบบการกระจายของความถี่ของแสงจากผลกระทบของปรากฏการณ์ FWM [13]

การคำนวณค่าผลกระทบของ FWM ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM กำลังของสัญญาณที่ความถี่ f_{FWM} เป็นผลรวมของกำลังสัญญาณของ FWM ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ที่เป็นไปได้เมื่อมีช่องสัญญาณใช้งาน N_c ช่อง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ สามารถคำนวณได้จาก

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

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 คือกำลังของสัญญาณอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความถี่ f_i, f_j, f_k

λ คือความยาวคลื่นแสง

n คือดัชนีหักเหของคอร์

L คือความยาวเส้นใยแก้ว

A_{eff} คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (Effective Core Area)

L_{eff} คือระยะทางประสิทธิภาพ (Effective Length)

χ^3 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3

c คือความเร็วแสง

η_{ijk} คือประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right\} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\Delta\beta$ คือค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงหา
ค่าได้จาก

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

เมื่อ D คือค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน

$dD/d\lambda$ คือค่าความชันของดิสเพอร์ชัน

f_i, f_j, f_k คือความถี่ใดๆในระบบ

f_0 คือความถี่อ้างอิงหรือความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0

เมื่อใช้การประมาณค่าแบบเกาส์เซียนความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก
FWM ในระบบสี่สัญญาณ DWDM ที่ใช้การมอดูเลตแบบ On-Off Keying สามารถหาได้ดังนี้

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

เมื่อ Q คือ Quality Factor (SNR) หาค่าได้จาก

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

เมื่อ P_s คือกำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้

N_{th} คือ Thermal Noise Power

N_{sh} คือ Shot Noise Power

N_{FWM} คือ FWM Noise Power ซึ่งหาค่าได้จาก

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

b คือเรสพอนซีวิตี (นร) หาค่าได้จาก

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

เมื่อ η คือประสิทธิภาพควอนตัม

e คือประจุอิเล็กตรอน

h คือค่าคงที่ของพลังค์

เนื่องจากค่าการสูญเสียของ N_{th} และ N_{sh} มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ N_{FWM} ดังนั้นค่า
SNR ที่เกิดจากผลกระทบของ FWM สามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

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

เมื่อค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้ (P_s) หาได้จาก

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

เมื่อ L_r คือค่าสูญเสียในระบบสื่อสารก่อนถึงภาครับ

N_C คือจำนวนช่องสัญญาณ

P_0 คือค่ากำลังของสัญญาณแสงด้านอินพุต หาค่าได้ดังสมการที่ (3.11)

เมื่อ อัตราการลดทอน (α) เท่ากับ 0.2 dB/km

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

เมื่อ γ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Propagation Coefficient) หาค่าได้จาก

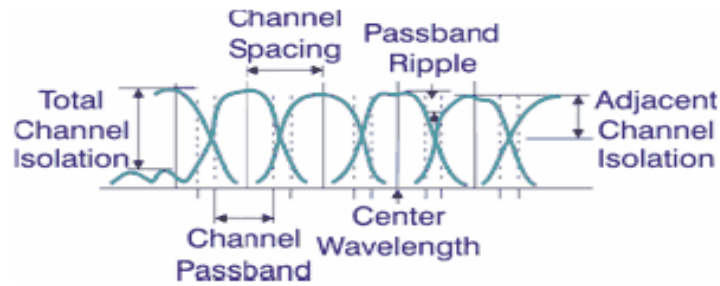
$$\gamma = \frac{2\pi \bar{n}}{\lambda A_{eff}} \quad (3.11)$$

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

3.3 การจัดการความยาวคลื่นแสง (Wavelength Management)

ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของระบบ โดยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐานของ ITU ที่ 50 GHz และ 100 GHz ดังแสดงในภาคผนวก ก. ในปัจจุบันนี้ระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เป็นระยะห่างที่ผู้ให้บริการระบบสื่อสารโทรคมนาคมนำมาใช้งานกันทั่วไป เนื่องจากเป็นระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่มีพัฒนาจนได้รับความน่าเชื่อถือ ซึ่งระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz ในระบบนี้ทำให้สามารถใช้งานช่องสัญญาณได้ทุกช่องสัญญาณที่อยู่ภายในช่วงอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง แต่อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณก็ยังขึ้นกับส่วนประกอบอื่นๆ ของระบบด้วย

ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นแถบของความถี่ต่ำสุด ที่สามารถแยกสองสัญญาณที่รวมกันให้ออกจากกันได้ ซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกันกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน ดังนั้นส่วนประกอบที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะประกอบไปด้วย ความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณ แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและความสามารถของเครื่องรับที่จะระบุความแตกต่างระหว่างสองความยาวคลื่น รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างข้อจำกัดของระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM



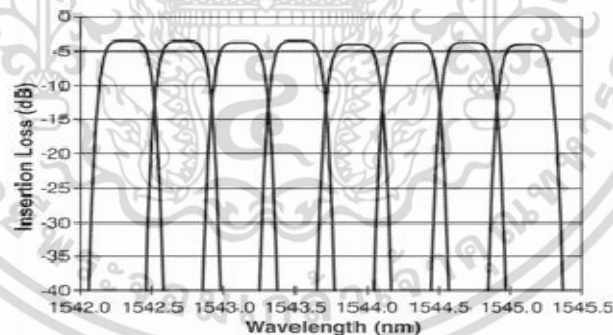
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสาร DWDM [13]

3.3.1 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Spacing)

ระบบสื่อสาร DWDM เป็นการส่งช่องสัญญาณแสงจำนวนมากไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน มาตรฐานนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย ITU (International Telecommunications Union) ซึ่งกำหนดความยาวคลื่นแสงที่แน่นอนสำหรับการใช้งานระบบสื่อสาร 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 แต่ก็ติดที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง EDFA ที่มีแถบความยาวคลื่นเพียง 35 nm แต่เมื่อพิจารณา ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในหน่วยของ 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 จะพบว่าช่องสัญญาณของทั้งสองระบบนี้ไม่มีความสอดคล้องกันกับระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz เนื่องจากระบบที่มีช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz จะมีลำดับของความถี่ของช่องสัญญาณลดลงไปจากระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz และเมื่อเลือกใช้ระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz (0.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nm) และแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 45 ช่องสัญญาณจะใช้แบนด์วิดท์เพียง 17.5 nm ซึ่งเป็นแบนด์วิดท์เพียงครึ่งเดียวของช่วงอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบทั่วไป ทำให้มีแบนด์วิดท์เหลือพอที่จะเพิ่มช่องสัญญาณแสงได้อีก และเมื่อพิจารณาการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเส้นใยแก้วนำแสงอาจจะนำระบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 25 GHz มาใช้ก็ได้ ก็จะยิ่งทำให้ระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมากขึ้น

การออกแบบอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่เครื่องรับปลายทางก็เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงที่สำคัญเพราะว่าความแตกต่างของแถบสปีท่างมากของแต่ละช่องสัญญาณแสง ทำให้อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ต้องมีสมรรถนะที่สูงและมีคุณสมบัติเฉพาะ 3 ประการคือ ประการที่ 1 อุปกรณ์ ต้องสามารถทำงานได้คงที่ในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด ประการที่ 2 ต้องมีขอบเขตของช่องสัญญาณที่แน่นอนตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และประการที่ 3 ต้องสามารถลดสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณแสงที่อยู่ติดกันได้ เมื่อมีจำนวนช่องสัญญาณแสงมากขึ้นจะเกิดความยากลำบากเพิ่มขึ้นในการแยกช่องสัญญาณแสงตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่กำหนด แต่ด้วยเทคโนโลยีของ Fiber Bragg Gratings ทำให้ได้จำนวนช่องสัญญาณตามระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่กำหนดได้ ทั้งนี้จำนวนของช่องสัญญาณแสงที่จะส่งต่อเส้นใยแก้วนำแสงต้องคำนึงถึงสมรรถนะของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ใช้ในระบบด้วย รูปที่ 3.3 แสดงสเปกตรัมของอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมของอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงด้วย Fiber Bragg Gratings ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.4 nm [13]

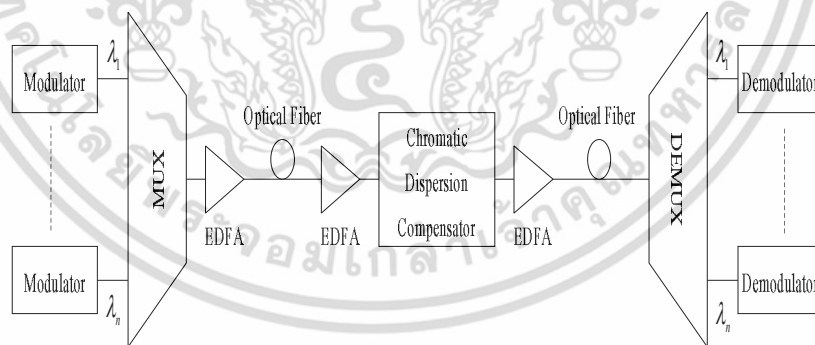
3.4 การลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

3.4.1 การใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเฉพาะ

เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของ Four-Wave Mixing ดังนั้นหากลดสาเหตุที่จะทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงลง การแทรกสอดของ Four-Wave Mixing ก็จะลดลงตาม เช่นลดผลกระทบของดีสเพอร์ชันในระบบลงด้วยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นเอกสารที่ส่งผ่านไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใยแก้วแบบ Dispersion Compensating Fiber ซึ่งจะมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบที่มาก เมื่อนำเส้นใยแก้วนี้ไปวางในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบเชื่อมโยง ค่าลบที่มากของดิสเพอร์ชันจะช่วยทำให้ดิสเพอร์ชันโดยรวมของระบบเชื่อมโยงมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ได้ แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงคุณภาพของสัญญาณในระบบด้วย โดยการชดเชยค่าไว้ในขั้นตอนของการออกแบบ ซึ่ง Dispersion Compensating ที่ทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์แสงที่บานออกเมื่อแสงเดินทางในสายส่งเส้นใยนำแสง เนื่องจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันให้มีความกว้างลดลงเท่ากับความกว้างพัลส์ เมื่อแรกเริ่มสื่อสัญญาณตัวชดเชยดิสเพอร์ชันอาจประกอบด้วยเส้นใยนำแสงเกรตติง (fiber grating) หรือใช้เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติของดิสเพอร์ชันเชิงลบ

เส้นใยแก้วชนิดต่อมาคือเส้นใยแก้วแบบ NZ-DSF ที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพขนาดใหญ่ การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของแสงในเส้นใยแก้วจะทำให้ความเข้มของแสงเฉลี่ยมีค่าลดลงสำหรับกำลังส่งค่าหนึ่ง ประโยชน์ของการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพประกอบด้วยความสามารถที่จะส่งกำลังสัญญาณได้สูงขึ้น, อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงกว่า, อัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำกว่า, ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่ไกลมากกว่า และที่สำคัญก็คือทำให้มีความจุของการส่งข้อมูลที่สูงกว่า โดยปกติเส้นใยแก้วจะมีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพประมาณ 50 ตารางไมครอนเท่านั้น แต่ในขณะนี้ก็ได้มีการผลิตเส้นใยแก้วที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่มากถึง 92 ตารางไมครอนเพื่อตอบสนองความต้องการที่มากขึ้นของระบบการส่งข้อมูลความเร็วสูงและมีการขยายสัญญาณแสงตามเส้นทาง เช่นระบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณ 10 Gb/s จำนวนหลายช่องสัญญาณกำลังมีการใช้งานกันมากอยู่ในขณะนี้ และเส้นใยแบบ NZ-DSF ที่มีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพขนาดใหญ่จะเป็น รูปแบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณขนาด 40 Gb/s ผ่านแถบขยายสัญญาณของ EDFA ได้ในอนาคต



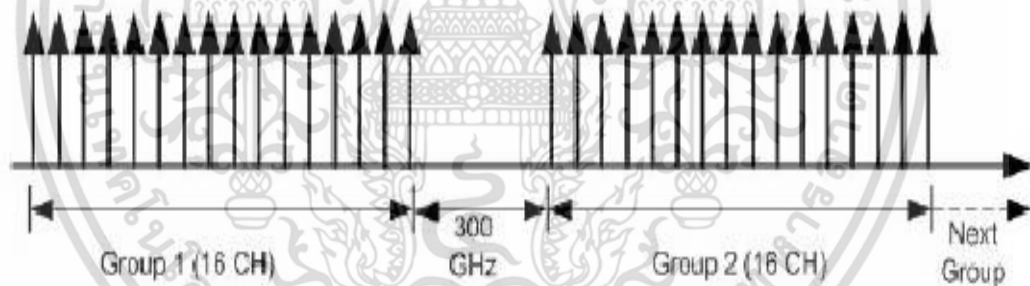
รูปที่ 3.4 รูปแบบการชดเชยค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันด้วย Dispersion Compensating Fiber [15]

3.4.2 เทคนิคการจัดกลุ่มช่องสัญญาณ (Channel Grouping Separation Technique)

เนื่องจากระยะห่างของช่องสัญญาณมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลกระทบของ Four-Wave Mixing คือถ้าช่องสัญญาณมีระยะห่างกันมากๆ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะมีค่าน้อยแต่ถ้าช่องสัญญาณมีระยะห่างกันน้อยๆ ผลกระทบของ Four-Wave Mixing จะมีค่ามาก และเนื่องจากความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการแบนด์วิดท์ของเครือข่ายเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงต้องทำการเพิ่มช่องสัญญาณของเครือข่ายด้วยการลดระยะห่างของช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้ผลกระทบเนื่องจาก Four-Wave Mixing สูงขึ้น จึงมีการนำเสนอการลดผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เพิ่มขึ้นด้วยการจัดกลุ่มช่องสัญญาณใหม่ โดยการแบ่งช่องสัญญาณทั้งหมดออกเป็นกลุ่ม ซึ่งภายในกลุ่มเดียวกันจะมีระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากัน ส่วนระหว่างกลุ่มจะมีระยะห่างของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดข้ามกลุ่มช่องสัญญาณได้ ทำให้ผลกระทบของ Four-Wave Mixing โดยรวมของทั้งเครือข่ายลดลง ตัวอย่างการจัดกลุ่มช่องสัญญาณเช่นในระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz แบ่งกลุ่มช่องสัญญาณออกเป็น 4 กลุ่ม ระยะห่างระหว่างกลุ่มเท่ากับ 300 GHz จำนวนช่องสัญญาณต่อกลุ่มเท่ากับ 16 ช่องสัญญาณโดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 50 GHz ทำให้หลังจากทำการจัดกลุ่มแล้วระบบใหม่มีช่องสัญญาณใช้งานจำนวน 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

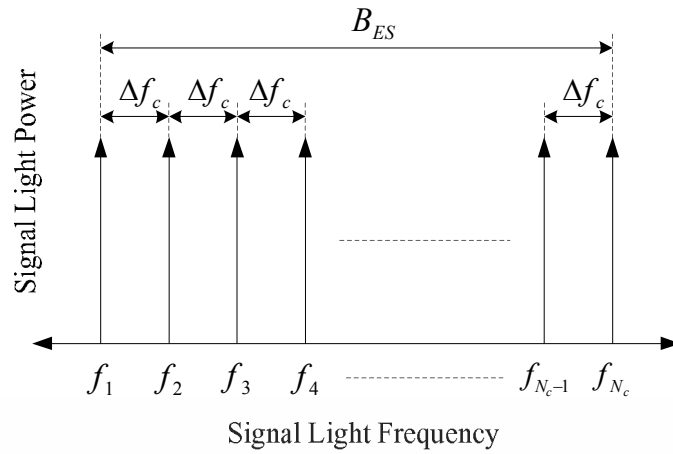


รูปที่ 3.5 รูปแบบการจัดช่องสัญญาณใหม่เพื่อลดผลกระทบจาก FWM [13]

3.4.3 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ

3.4.3.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES)

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

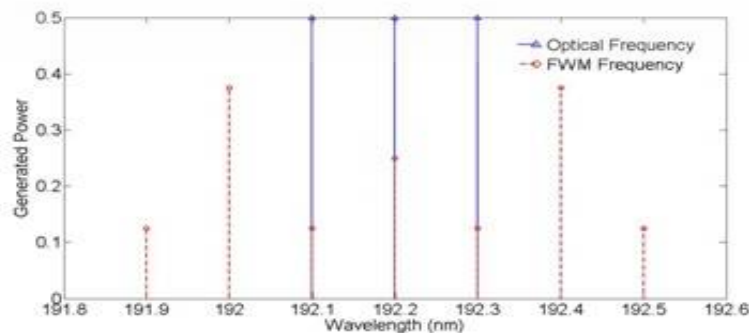


รูปที่ 3.6 การจัดช่องสัญญาณแบบ ES

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
Δf_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
Δf_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		
Δf_c (GHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100			

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

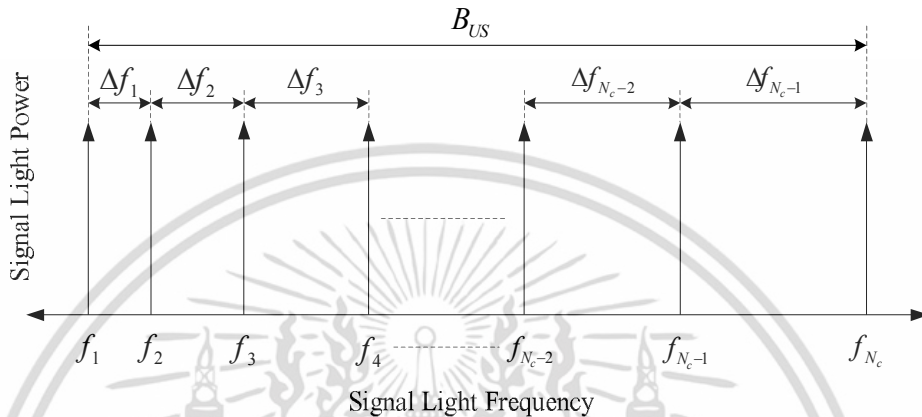


รูปที่ 3.7 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จะมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (Δf_i) ที่ไม่เท่ากันทุกๆ ช่องสัญญาณ (f_1 ถึง f_{N_c}) เมื่อ B_{US} คือผลรวมของแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ 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 การจัดช่องสัญญาณแบบ US

ตารางที่ 3.2 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ US ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

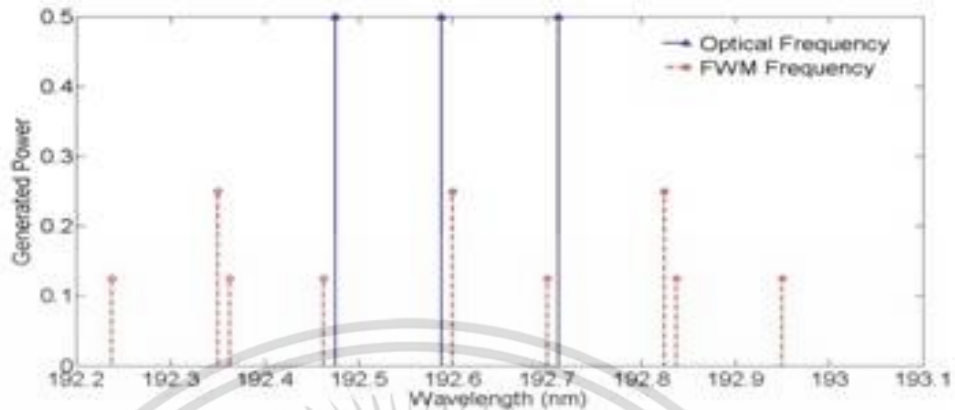
Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
f_i (THz)	192.1	192.15	192.2125	192.2875	192.375	192.475	192.5875	192.7125	192.85	193.0	193.1625
Δf_i (GHz)	50	62.5	75	87.5	100	112.5	125	137.5	150	162.5	175
Channel	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
f_i (THz)	193.3375	193.525	193.725	193.9375	194.1625	194.4	194.65	194.9125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

การเลือกจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน base unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ ๆ แล้วไม่เว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit และทำการเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน Base Unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

การจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) เมื่อความถี่ f_i , f_j และ f_k เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือ $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ โดยสัญญาณความถี่นี้จะไปซ้อนทับกับความถี่เดิมที่เราพิจารณาโดยตรง ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 แต่การจัดช่องสัญญาณแบบ US จะต้องใช้แบนด์วิดท์ที่มาก ทำให้ได้จำนวนของช่องสัญญาณที่ลดลง ถ้าหากมีช่องสัญญาณไม่มากนักก็สามารถลดผลกระทบของ FWM ให้เหลือน้อยลงได้ด้วยวิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ US คือการจัดการจัดระยะห่างไม่สม่ำเสมอกันนั่นเอง ซึ่งหลักการนี้จะง่ายสำหรับระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

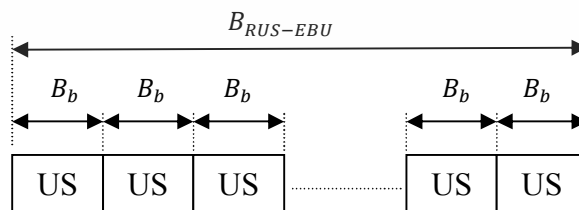
ที่มีช่องสัญญาณ 3 - 16 ช่องสัญญาณ แต่จะยากและซับซ้อนมากขึ้นสำหรับระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวนมาก



รูปที่ 3.9 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ US

3.4.3.3 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (RUS-EBU)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (RUS-EBU) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่งแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เรียกกลุ่มที่เกิดขึ้นใหม่แบบซ้ำว่า base unit) ดังรูปที่ 3.10 เมื่อ $B_{RUS-EBU}$ คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS หาได้จาก $B_{RUS-EBU} = nB_b + B_{res}$ เมื่อ n คือจำนวนของ base unit, B_b คือแบนด์วิดท์ของ base unit และ B_{res} คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยแบนด์วิดท์ของ base unit แรกครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 1-5, base unit ที่ 2 ครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 6-10 ไปจนถึง base unit สุดท้าย และรวมช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา ดังตารางที่ 3.3 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 $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$



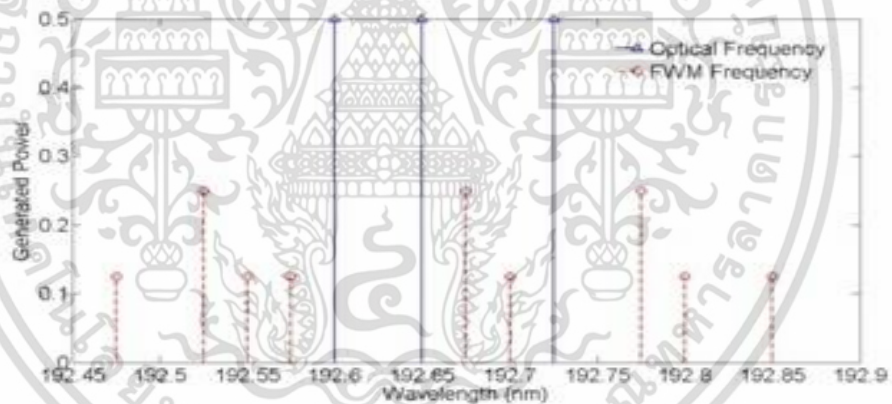
รูปที่ 3.10 การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU 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	192.23	192.33	192.45	192.6	192.65	192.73	192.83	192.95	193.1	193.15	193.23	193.33
Δf_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	193.73	193.83	193.95	194.1	194.15	194.23	194.33	194.45	194.6	194.65	194.73
Δf_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)	194.83	194.95	195.1	195.15	195.23	195.33	195.45	195.6	195.65	195.73	195.83	195.95		
Δf_i (GHz)	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	125		

การจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (RUS-EBU) จะทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลง และยังมีแบนด์วิดท์ที่แคบ ทำให้ได้จำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ f_i , f_j และ f_k เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือ $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ โดยสัญญาณความถี่นี้จะไม่ไปซ้อนทับกับความถี่เดิมที่พิจารณาโดยตรง ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.11



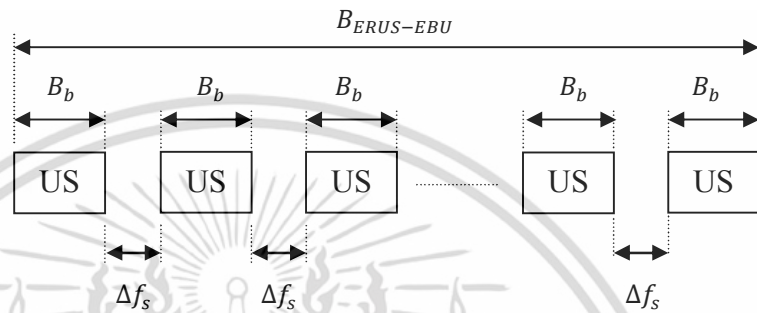
รูปที่ 3.11 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU

3.4.3.4 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (ERUS-EBU)

ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เราเรียกกลุ่มของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำว่า base unit) และเว้นให้มีระยะห่างระหว่าง base unit (Δf_s) ที่เท่ากัน โดยหาค่า Δf_s ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดย $\Delta f_s \neq \Delta f_i$ ดังนั้น จะทำการเลือกค่า $\Delta f_s = 62.5$ GHz เมื่อ Δf_s มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของ $\Delta f_i = 50$ GHz) และน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่น้อยสุดถัดมา $\Delta f_i = 75$ GHz เมื่อ $B_{ERUS-EBU}$ คือแบนด์วิธของการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU หาได้จาก $B_{ERUS-EBU} = nB_b + (n-1)\Delta f_s + B_{res}$ เมื่อ n คือจำนวนของ base unit, B_b คือแบนด์วิธของ base unit, Δf_s คือระยะห่างระหว่าง base unit ที่อยู่ข้างเคียง และ B_{res} คือแบนด์วิธของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยแบนด์วิธของ base unit แรกครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 1-6, base unit ที่ 2 ครอบคลุมช่องสัญญาณ 7-12 ไปจนถึง base unit สุดท้าย ดังในรูปที่ 3.12 ตารางที่ 3.4 เมื่อ f_1 เท่ากับ 192.1 THz โดย $f_{i+1} = f_1 + \Delta f_i$ และ $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$ ซึ่ง $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

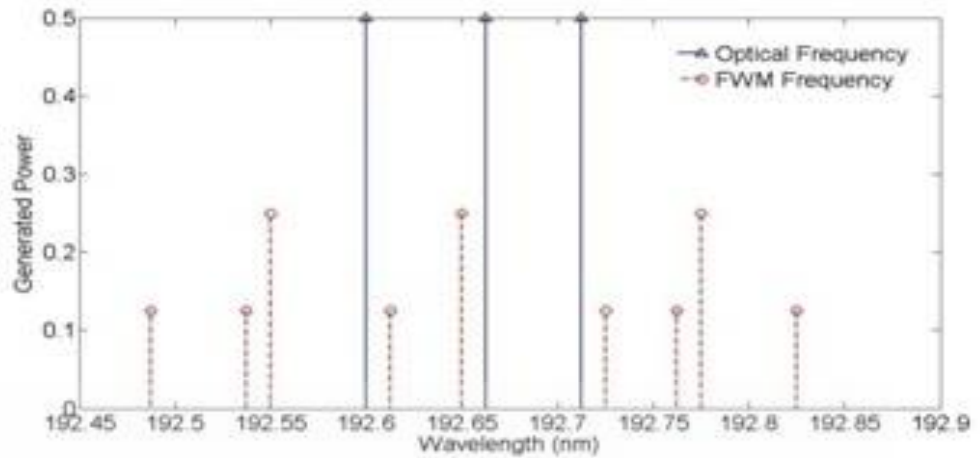


รูปที่ 3.12 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU

ตารางที่ 3.4 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU 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	192.23	192.33	192.45	192.6	192.66	192.71	192.79	192.89	193.01	193.16	193.23	193.33
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.35	193.45	193.58	193.73	193.79	193.84	193.91	194.01	194.14	194.29	194.35	194.40	194.48	194.58
Δf_i (GHz)	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
f_i (THz)	194.70	194.85	194.91	194.96	195.04	195.14	195.26	195.41	195.48	195.53	195.60	195.70	195.83	195.98
Δf_i (GHz)	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150

การจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (ERUS-EBU) จะทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ที่ลดลง และยังมีแบนด์วิธที่แคบ ทำให้ได้จำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ f_i , f_j และ f_k เกิดการเหนี่ยวนำกันทำให้เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาคือ $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ โดยสัญญาณความถี่นี้จะไม่ไปซ้อนทับกับความถี่เดิมที่เราพิจารณาโดยตรง ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.13



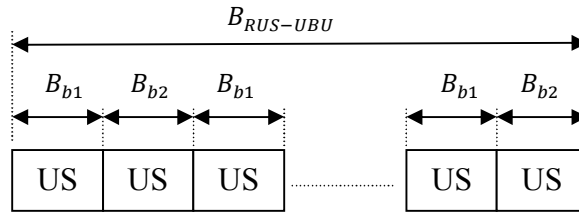
รูปที่ 3.13 ผลกระทบ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU

3.4.4 เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณของงานวิจัยที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมา

3.4.4.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (RUS-UBU)

การจัดช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (RUS-UBU) ได้ทำการปรับปรุงจากการหาระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) โดยใช้เทคนิคการจัดระยะห่างแบบ Unequally Spaced (US) ทำให้ระยะห่างของความถี่ที่อยู่ใน Base Unit สลับที่กันและไม่เว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ เรียก เทคนิคแบบนี้ว่า Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (RUS-UBU) การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU แสดงดังรูปที่ 3.14 เมื่อกำหนดให้ $B_{RUS-UBU}$ คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณ RUS-UBU ซึ่งภายใน $B_{RUS-UBU}$ จะมีอยู่ ซึ่งภายใน B_b จะมี B_b การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU โดยกำหนดให้แต่ละ Base Unit มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 6 ช่องสัญญาณ

การเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (RUS-UBU) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 กำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ (Δf_{i1}) ภายใน base unit เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz และ (Δf_{i2}) ภายใน base unit เท่ากับ 37.5GHz, 87.5GHz, 100GHz, 112.5GHz และ 165.5GHz ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามข้างต้น เพราะจะได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างว่าต่างจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES และการจัดช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 37.5 GHz เพราะเนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสง โดยขั้นตอนในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU นี้แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU

จากรูปที่ 3.14 การจัดระยะห่างแบบ Unequally Spaced (US) ทำให้ระยะห่างของความถี่ที่อยู่ภายใน Base Unit สลับที่กันระหว่าง B_{b1} กับ B_{b2} และไม่เว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ

ตารางที่ 3.5 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU 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	192.23	192.33	192.45	192.6	192.64	192.73	192.83	192.94	193.1	193.15	193.23	193.33
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	37.5	87.5	100	112.5	162.5	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	193.64	193.73	193.83	193.94	194.1	194.15	194.23	194.33	194.45	194.6	194.64	194.73
Δf_i (GHz)	125	150	37.5	87.5	100	112.5	162.5	50	75	100	125	150	37.5	87.5
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
f_i (THz)	194.83	194.94	195.1	195.15	195.23	195.33	195.45	195.6	195.64	195.73	195.83	195.94		
Δf_i (GHz)	100	112.5	162.5	50	75	100	125	150	37.5	87.5	100	112.5		

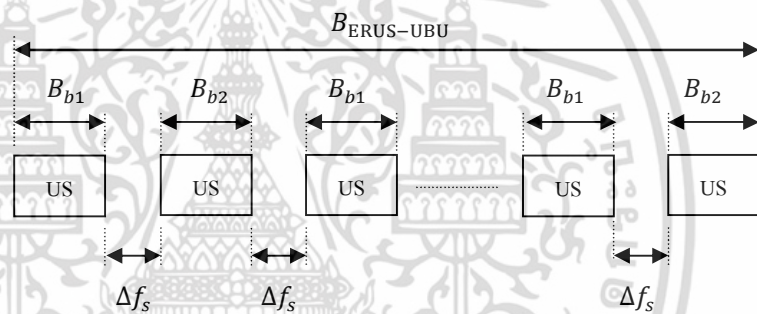
3.4.4.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU)

การจัดช่องสัญญาณแบบ Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) ได้ทำการปรับปรุงจากการหาระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced (RUS) โดยใช้เทคนิคการจัดระยะห่างแบบ Unequally Spaced (US) ทำให้ระยะห่างของความถี่ที่อยู่ภายใน Base Unit (B_{b1} และ B_{b2}) ที่ไม่เท่ากันสลับที่กันไปเรื่อยๆ และเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงแบบเท่าๆกัน เท่ากับ 62.5 GHz แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ เรียก เทคนิคแบบนี้ว่า Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) การจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU คล้ายกับการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยให้ค่า Δf_s มีค่าน้อยสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยที่ $\Delta f_s \neq \Delta f_i$ ดังนั้นจะทำการเลือกค่า $\Delta f_s = 62.5$ GHz คือเมื่อ Δf_s มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของ $\Delta f_i = 50$ GHz) และน้อยกว่าค่าที่น้อยสุดถัดมา $\Delta f_i = 75$ GHz เมื่อกำหนดให้ $B_{ERUS-UBU}$ คือแบนด์วิธของการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU ซึ่งภายใน B_{EDRUS} จะมี B_{b1} และ B_{b2} จะจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally spaced

Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) คือระยะห่างช่องสัญญาณภายใน B_{b1} โดยเลือกให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดและ B_{b2} จะจัดระยะห่างภายใน Base Unit ที่ลดน้อย และลงเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงแบบเท่าๆกัน เท่ากับ 62.5 โดยกำหนดให้แต่ละ base unit มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 6 ช่อง และช่องสัญญาณเริ่มต้นของแต่ละ base unit ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU ($N_{C_{\text{first-ERUS-UBU}}}$) ดังนี้

$$N_{C_{\text{first-ERUS-UBU}}} = (1,7,13,19,25,31,37)$$

วิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) ตามมาตรฐานของ ITU-T G.694.1 กำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ (Δf_i) ภายใน B_{b1} เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz และ Δf_i ภายใน B_{b2} เท่ากับ 37.5GHz, 87.5GHz, 100GHz, 112.5GHz และ 162.5GHz โดยขั้นตอนในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU นี้แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU

จากรูปที่ 3.15 การจัดระยะห่างแบบ Unequally Spaced (US) ทำให้ระยะห่างของความถี่ที่อยู่ใน Base Unit (B_{b1} และ B_{b2}) ที่ไม่เท่ากันสลับที่กันไปเรื่อยๆ และเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงแบบเท่าๆกัน เท่ากับ Δf_s แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ

ตารางที่ 3.6 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU 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	192.23	192.33	192.45	192.6	192.66	192.70	192.79	192.89	193.00	193.16	193.23	193.28
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.35	193.45	193.58	193.73	193.79	193.83	193.91	194.01	194.14	194.29	194.35	194.40	194.48	194.58
Δf_i (GHz)	75	100	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	75	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
f_i (THz)	194.70	194.85	194.91	194.95	195.04	195.14	195.25	195.41	195.48	195.53	195.60	195.70	195.83	195.98
Δf_i (GHz)	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	75	100	125	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

4.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณในระบบส่งสัญญาณ DWDM ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0THz) ที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์วิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (RUS-EBU) และ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (ERUS-EBU) เปรียบเทียบความแตกต่างกับวิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced – Unequally Base Unit (RUS-UBU) และ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced – Unequally Base Unit (ERUS-UBU) สังเกตผลลัพธ์ที่ได้ในรูปแบบของจำนวนของ FWM, ประสิทธิภาพของ FWM, กำลังของ FWM และ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของการเกิดผลกระทบจาก FWM เพื่อนำมาวิเคราะห์ให้เห็นความแตกต่าง ข้อดีและข้อเสียจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบเดิมและแบบที่ได้นำมาปรับปรุงที่เกิดขึ้น

4.2 การศึกษาผลกระทบของ Four-Wave Mixing

4.2.1 สมการและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณหาค่าผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.1) – (3.11) โดยระบบที่ได้ทำการวิเคราะห์นี้จะไม่ได้รับรวมถึงค่าสูญเสียอื่นๆเช่น 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 จะเป็นอิสระกับอัตราเร็วของบิด โดยในการหาผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์กำหนดให้ส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Shift Fiber (DSF) และพารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย

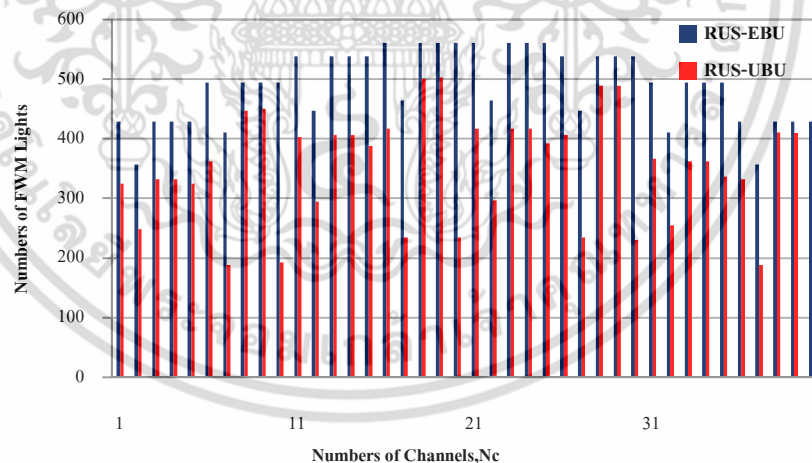
- ความยาวคลื่นใช้งานในช่วง 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0THz)
- กำลังของสัญญาณอินพุต (P_{in}) เท่ากับ 10 dBm
- โครมาติกดิสเพอร์ชัน (D) เท่ากับ 0 ps/nm-km
- ความชันของดิสเพอร์ชัน ($dD/d\lambda$) เท่ากับ 0.06 ps/nm²-km
- ดัชนีหักเหของคอร์ (n) เท่ากับ 1.45
- ความเร็วของแสงในอากาศ (c) เท่ากับ 3×10^8 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- องค์ประกอบที่แสดงภาวะความเสี่ยง ($d_{ijk} = 3$ เมื่อ $i = j$ และ $d_{ijk} = 6$ เมื่อ $i \neq j$)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความไม่เป็นเชิงเส้นลำดับที่สาม (χ^3) เท่ากับ 6×10^{-15} [esu]
- ความยาวเส้นใยแก้ว (L) เท่ากับ 80 km
- ระยะทางประสิทธิภาพ (L_{eff}) ประมาณ 20 km
- สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (α) เท่ากับ 0.2 dB/km
- พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (A_{eff}) เท่ากับ $50 \mu m^2$
- Avalanche Photodiode (APD) มีค่าประสิทธิภาพควอนตัม (η) เท่ากับ 80 %

4.2.2 จำนวนของ Four-Wave Mixing

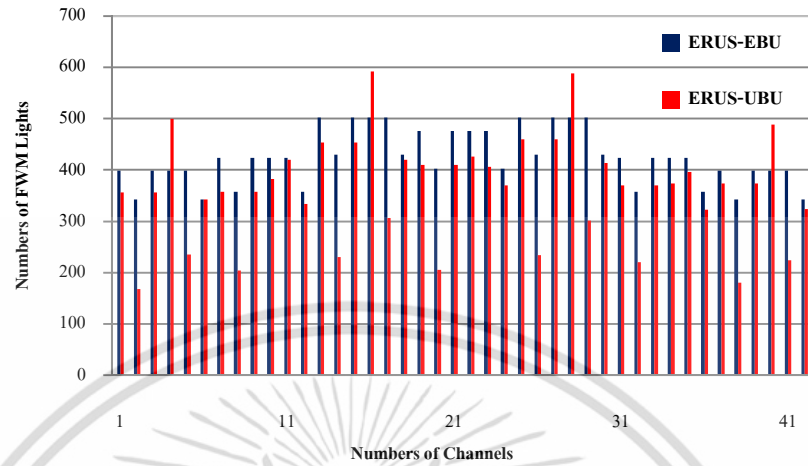
จำนวนของ Four-Wave Mixing เกิดจากการแทรกสอดกันระหว่างความถี่ข้างเคียงแล้วส่งผลให้เกิดเป็นความถี่ใหม่เกิดขึ้นมาแทรกสอดความถี่เดิมของช่องสัญญาณที่ทำการส่งไป ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง สามารถหาได้จากสมการความถี่ของ FWM คือ $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ เมื่อ i, j ไม่เท่ากับ k (i, j และ k คือจำนวนของช่องสัญญาณใดๆ) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องของสัญญาณแบบ RUS-EBU กับ RUS-UBU และ ERUS-EBU กับ ERUS-UBU ในช่วงความยาวคลื่นใช้งานในช่วง 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0THz) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นกับจำนวนช่องสัญญาณของความถี่แสงดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4



รูปที่ 4.1 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU กับ RUS-UBU

จากรูปที่ 4.1 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU ที่จำนวนของช่องสัญญาณ 40 ช่องสัญญาณ โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU มีจำนวนที่น้อยกว่าแบบ RUS-EBU โดยจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EBU มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 9756 และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 6980



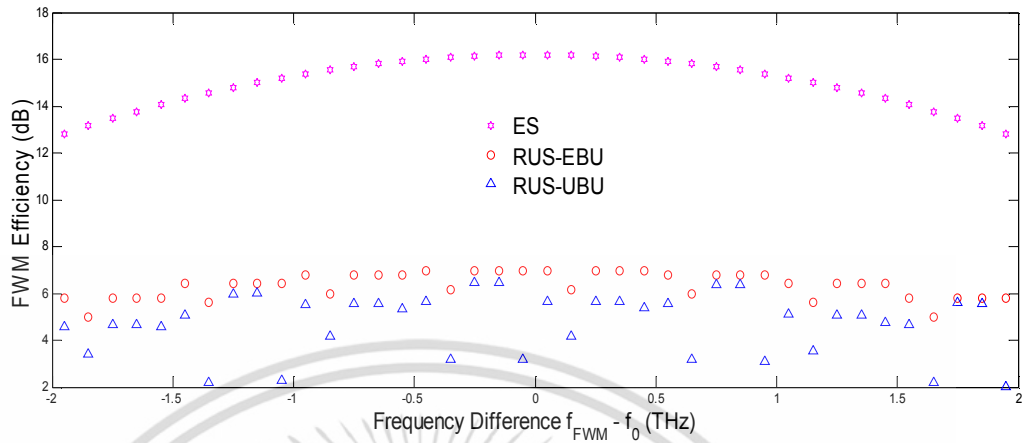
รูปที่ 4.2 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU กับ ERUS-UBU

จากรูปที่ 4.2 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU ที่จำนวนของช่องสัญญาณ 42 ช่องสัญญาณ โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีจำนวนที่น้อยกว่าแบบ ERUS-EBU โดยจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 8910 และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 7586

4.2.3 ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก Four-Wave Mixing

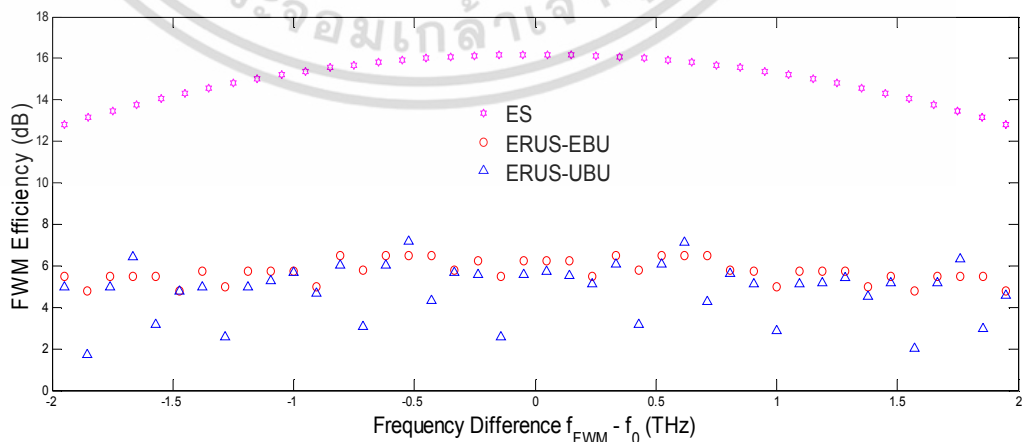
ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM (FWM Efficiency) วิเคราะห์โดยการเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างช่องสัญญาณที่ทำปฏิกิริยาต่อกัน เมื่อความยาวคลื่นที่ทำการส่งไปในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากๆ ทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างความถี่ที่อยู่ใกล้เคียงกัน จึงทำการวิเคราะห์ค่าของสัญญาณออกมาเป็นประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM ซึ่งประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM นี้เป็นตัวบอกถึงผลกระทบที่เกิดจาก FWM มากน้อยเพียงใด ในหัวข้อนี้เราได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU กับ RUS-UBU และ ERUS-EBU กับ ERUS-UBU ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นกับความแตกต่างของความถี่ เมื่อ f_{FWM} คือความถี่ของแสง FWM และ f_0 คือความถี่อ้างอิงหรือความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์ (zero-dispersion frequency) โดยกำหนดให้ f_0 อยู่ตรงกลางของแบนด์วิดท์เพราะที่ตรงกลางของแบนด์วิดท์มีจำนวนของไม่วาร์ณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FWM ที่มากที่สุดจากบริเวณช่องสัญญาณรอบข้าง ดังนั้นในการคำนวณประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM ใช้สมการที่ 3.3 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ RUS-UBU

จากรูปที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU เมื่อจำนวนของ FWM น้อยก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM น้อยตามไปด้วย ดังนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU มีค่าประสิทธิภาพของ FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ RUS-EBU โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ RUS-UBU มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 15.0044 dB, 6.3291 dB และ 4.7399 dB ตามลำดับ



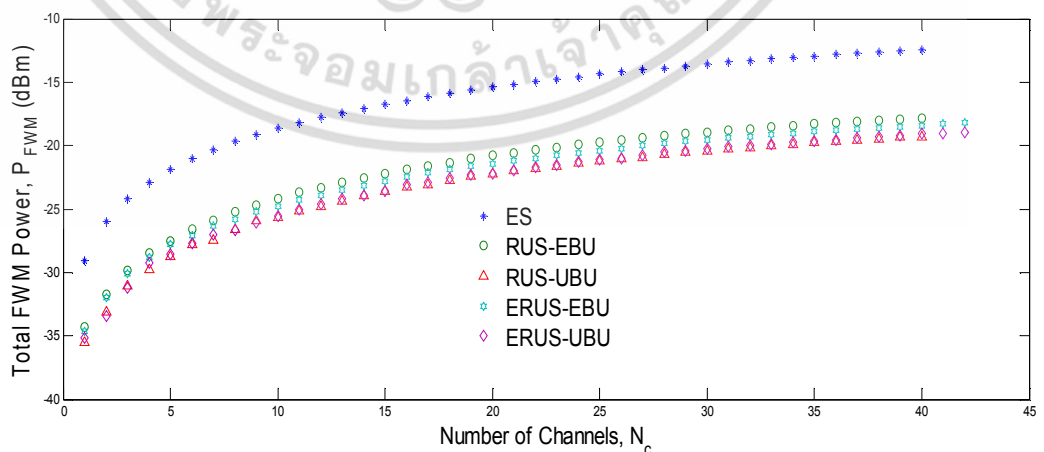
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS-EBU และ ERUS-UBU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีค่าประสิทธิภาพของ FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 5.7132 dB และการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 4.8617 dB

4.2.4 กำลังของ Four-Wave Mixing

กำลังของ FWM เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมกันของความถี่ทำให้เกิดสัญญาณความถี่เกิดขึ้นมาใหม่ จากการผสมกันของความถี่ที่อยู่ใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดเป็นกำลังที่ไปแทรกสอด หรือรบกวนเข้าไปในช่องกำลังหลักทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Polarization) เกิดขึ้น และยังกำลังของ FWM ยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้เกิดการโพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นง่ายขึ้นเท่านั้น จะทำให้เกิดการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ หรือดึงเอากำลังงานจากเดิมออกมาแล้วทำให้กำลังเดิมลดลงจนทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมคุณภาพของสัญญาณลงในการส่งสัญญาณได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์กำลังของ FWM โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลัง FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ RUS-UBU กับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU และ ERUS-UBU ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM ที่เกิดขึ้นกับจำนวนของช่องสัญญาณความถี่แสงที่มีค่ามากขึ้น ในการคำนวณค่ากำลังของ FWM ใช้สมการที่ 3.1 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, RUS-UBU, ERUS-

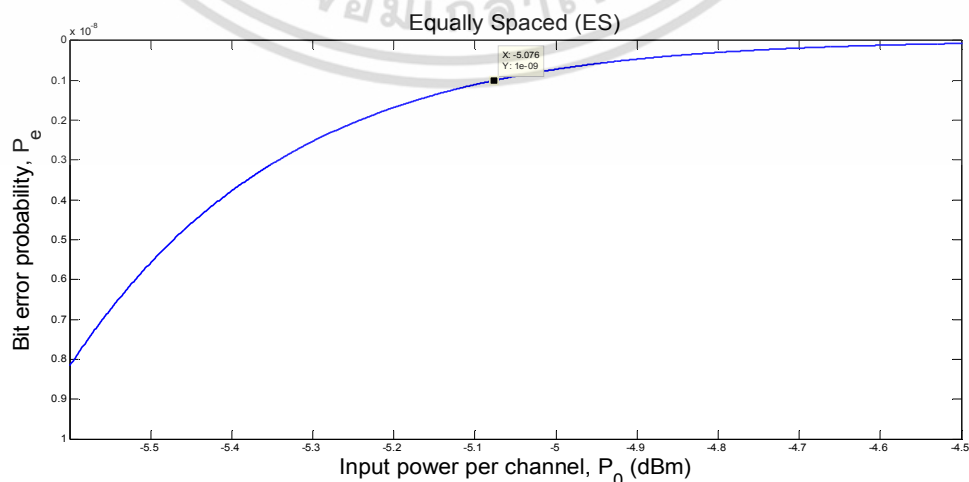
เอกสารนี้เป็นเอกสาร EBU และ ERUS-UBU ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงกำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU เมื่อประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM น้อยก็จะส่งผลให้กำลังของ FWM น้อยตามไปด้วย ดังนั้น จะเห็นว่ากำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU มีค่ากำลังของ FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, RUS-UBU, ERUS-EBU และ ERUS-UBU มีค่าผลรวมของกำลัง FWM เท่ากับ -15.2987 dBm, -20.7060 dBm, -22.1442 dBm, -21.1040 dBm และ -21.8212 dBm ตามลำดับ

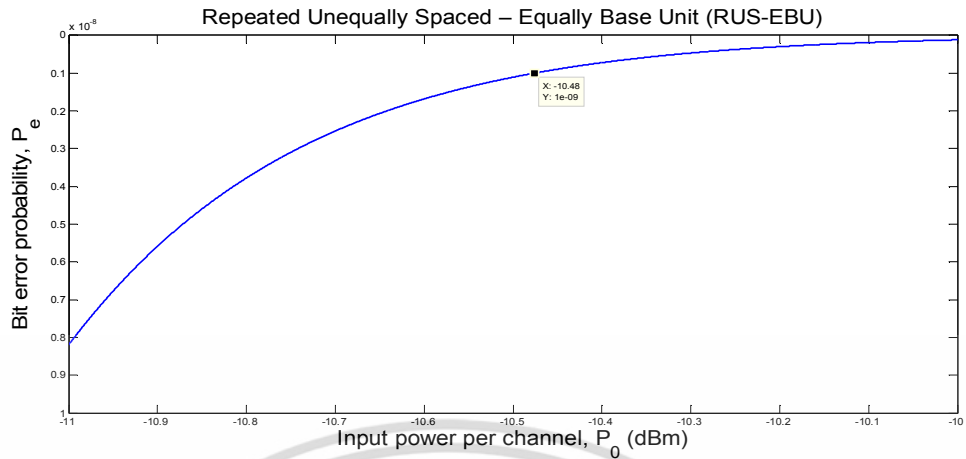
4.2.5 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก Four-Wave Mixing

เมื่อเราวิเคราะห์ค่ากำลังของ FWM แล้วเราจะนำค่ากำลังของ FWM ที่ได้มาทำการหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ตามค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (10^{-9}) ว่ามีกำลังอินพุตต่อช่องสัญญาณมากเท่าใดในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแต่ละรูปแบบความน่าจะเป็นความผิดพลาดจะเป็นตัววิเคราะห์วัดความน่าเชื่อถือของระบบในการส่งข้อมูล การที่เราจะรู้ค่าของความน่าจะเป็นความผิดพลาดนั้นเราจะต้องรู้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ตามสมการที่ 3.6

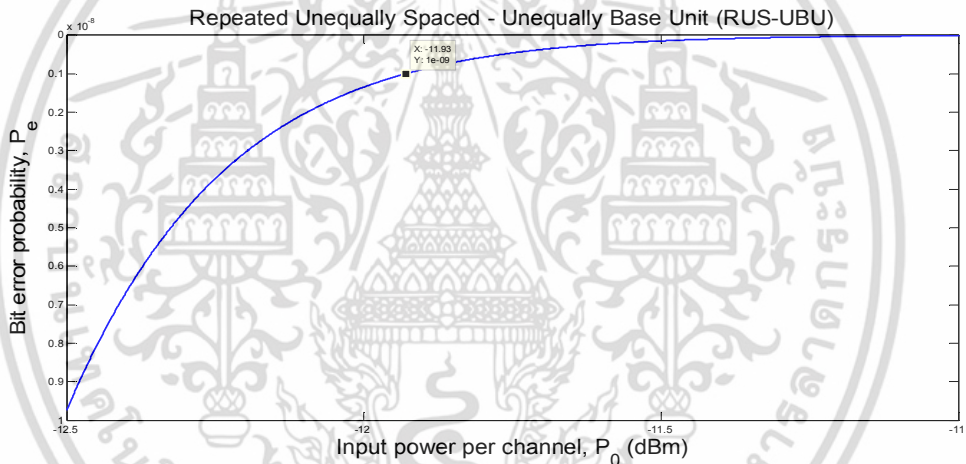
ในหัวข้อนี้เราได้ทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU กับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ที่เกิดขึ้นกับกำลังอินพุตต่อช่องสัญญาณ ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM ตามสมการที่ 3.5 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.10



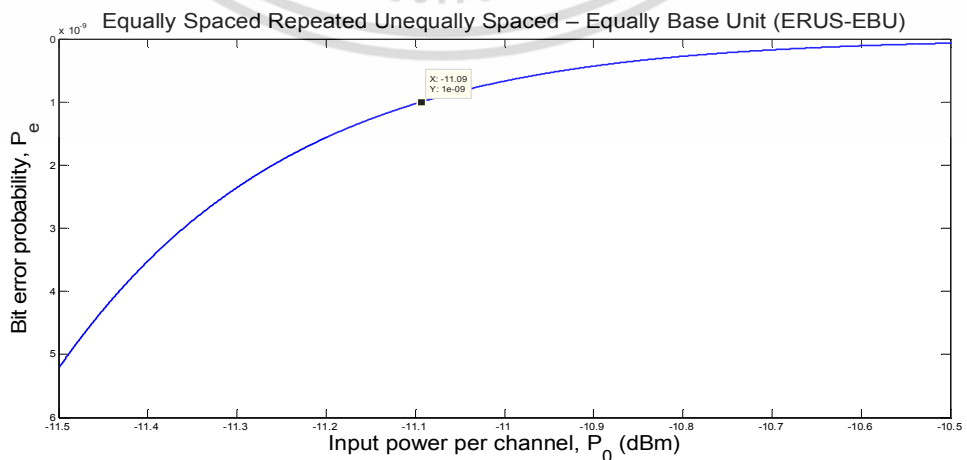
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้



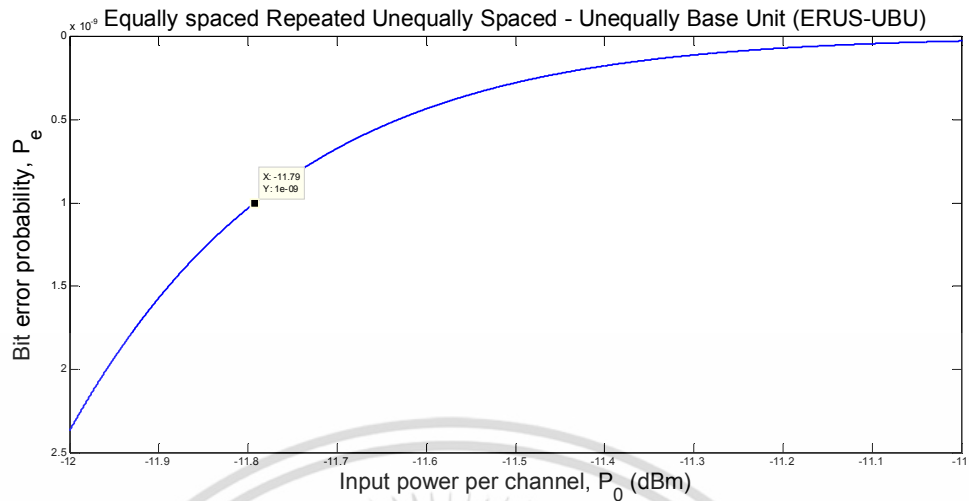
รูปที่ 4.7 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU



รูปที่ 4.8 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.9 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.10 แสดงความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU เมื่อกำลังของ FWM น้อยก็ส่งผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM น้อยตามกำลังของ FWM ไปด้วย โดยจะเห็นว่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU, RUS-UBU, ERUS-EBU และ ERUS-UBU มีค่ากำลังอินพุตต่อช่องสัญญาณเท่ากับ -5.076 dBm, -10.48 dBm, -11.93 dBm, -11.09 dBm และ -11.79 dBm ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM เท่ากับ 10^{-9} และจะเห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU มีค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU สาเหตุที่ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU มีความน่าจะเป็นที่น้อยกว่าแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU นั้นก็เพราะค่ากำลังของ FWM จะเป็นตัวกำหนดค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM คือเมื่อกำลังของ FWM น้อยก็จะส่งผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM มีค่าที่น้อยลงตามมา จึงทำให้การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.2.4

4.3 บทสรุป

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.10 เราได้ทำการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบเดิมคือ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU ซึ่งทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU จากผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU สามารถที่จะหลีกเลี่ยงความถี่ของ FWM ทำให้มีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ดังนั้นเทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU สามารถที่จะปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดและกำลังของ FWM ให้มีค่าลดลงกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิจัยผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น คือผลกระทบของ Four-Wave Mixing ที่เกิดจากการสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจาก Four-Wave Mixing และได้ทำการศึกษาวิธีการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาใหม่เป็นวิธีการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU ให้คุณภาพของสัญญาณและจำนวนของ FWM ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM, กำลังของ FWM และ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดของการเกิดผลกระทบจาก FWM ที่ดีกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS-EBU และ ERUS-EBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ดังนี้

วิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (RUS-EBU) ใช้เทคนิคของการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน base unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ ๆ แล้วเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit และทำการเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน Base Unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด เพิ่มอีก Base Unit แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ ๆ คล้ายกับการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU

วิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) ใช้เทคนิคของการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน Base Unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ ๆ แล้วเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ที่เท่า ๆ กันในช่องสัญญาณนั้น และทำการเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน Base Unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด เพิ่มอีก Base Unit แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ ๆ คล้ายกับการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU จะเห็นว่าจำนวนของ FWM จาก ERUS-UBU มีจำนวนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU เมื่อจำนวนของ FWM ที่น้อยจะส่งผลทำให้ความถี่ที่ไปแทรกสอดช่องสัญญาณข้อมูลน้อยลงตามมา และประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ FWM จาก ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU โดยจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM นั้นลดลงตามมา และกำลังของ FWM แบบ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU สาเหตุที่

กำลังของ FWM ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU นั่นก็เพราะค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จะเป็นตัวกำหนดค่ากำลังของ FWM

การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU และ ERUS-UBU มีความกว้างของแบนด์วิดท์ที่เท่ากันกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU และ ERUS-EBU จะเพิ่มระยะทางในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วให้มากขึ้นได้ จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.10 สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดผลกระทบของ Four Wave Mixing จากการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแบบต่างๆ

เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ	ผลรวมของจำนวนของ FWM	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของ FWM	ผลรวมของกำลัง FWM (dBm)	ค่าเฉลี่ยของกำลังอินพุตต่อช่องสัญญาณเมื่อ P_c เท่ากับ 10^{-9}
ES	33820	15.0044 dB	-15.2987	-5.076 dBm
RUS-EBU	9756	6.3291 dB	-20.7060	-10.48 dBm
RUS-UBU	6980	4.7399 dB	-22.1442	-11.93 dBm
ERUS-EBU	8910	5.7132 dB	-21.1040	-11.09 dBm
ERUS-UBU	7586	4.8617 dB	-21.8212	-11.79 dBm

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ข้อเสนอแนะในการศึกษาผลกระทบของ Four Wave Mixing ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ โดยกำหนดให้กำลังของสัญญาณอินพุตของทุกช่องสัญญาณเท่ากันซึ่งในระบบที่ใช้งานจริงนั้นค่ากำลังของสัญญาณอินพุตของแต่ละช่องสัญญาณอาจไม่เท่ากันและให้ผลกระทบของ Four Wave Mixing เปลี่ยนแปลงไป การเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีค่าต่ำสุดที่ 37.5 GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง ซึ่งในอนาคตอาจมีการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีระยะห่างช่องสัญญาณที่แคบกว่านี้อีกได้ ซึ่งจะทำให้สามารถที่จะเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณได้มากกว่าเดิมได้อีก และในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบระยะห่างไม่เท่ากันนี้ (Unequally Spaced, US) ในการออกแบบอุปกรณ์คั่นข้างซับซ้อนดังนั้นจึงมีราคาแพง โดยการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบระยะห่างไม่เท่ากันจะมีอุปกรณ์ที่การออกแบบอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter) เนื่องจากระยะห่างของช่องสัญญาณที่ไม่เท่ากันทำให้ยากที่จะกรองเอาความถี่ที่ต้องการออกมาได้ [1]

แนวทางในการพัฒนาในการศึกษาผลกระทบของ Four Wave Mixing วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้ช่วงของความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm ที่ได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณชนิด EDFA ตาม

มาตรฐานของ ITU-T G.694.1 ซึ่งในจำนวนของช่องสัญญาณใน base unit ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน 6 ช่องสัญญาณต่อกลุ่ม แต่ถ้าสามารถลดจำนวนของช่องสัญญาณต่อกลุ่มลงได้อีกจะทำให้สามารถลดจำนวนของ FWM ลงได้ และสามารถที่จะเพิ่มจำนวนของช่องสัญญาณได้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Inoue, "Suppression technique for fiber four-wave mixing using optical multi-/demultiplexers and a delay line," *J. Lightw. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 455-461, Mar. 1993.
- [2] 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*, pp. 289-290, 1998.
- [3] I. Neokosmidis, T. Kamalakis, A. Chipouras, and T. Sphicopoulos, "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, pp. 1137-1144, Mar. 2005.
- [4] F. Forghieri, R. Tkach, A. Chraplty, and D. Marcuse, "Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 6, pp. 754-756, Jun. 1994.
- [5] T. Numai and O. Kubota, "Analysis of repeated unequally spaced channels for FDM lightwave systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 656-664, May 2000.
- [6] 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, pp. 2786-2797, July 2006.
- [7] K. Inoue, "Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region," *J. Lightw. Technol.*, vol. 10, no. 11, pp. 1553-1561, Nov. 1992.
- [8] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan. (2002). "Optical Networks: A Practical Perspective," 2nd ed., Academic Press, 2002.
- [9] L. Zhang and J. Tang, "Label-switching architecture for IP traffic over WDM networks," *IEEE Proc - Commun*, vol. 147, no. 5, pp. 269-276, Oct. 2000.
- [10] 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.
- [11] 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 Photonic Technology Letters*, vol. 8, no. 7, pp. 882-884, July 1996.
- [12] S. Pinter, J. Jiang and X. Fernando, "A dynamic multi-wavelength simulink model for EDFA," *CCGEI 2004*, pp. 2077-2080, May. 2004.

- [13] สมบัติ เหมือนนาค และสุทธิชัย นพนาศิพงษ์, “การศึกษาผลกระทบของ Four Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 50 GHz” วิศวกรรมสาร มข.ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 321-331, พฤษภาคม – มิถุนายน, 2550
- [14] สมบัติ เหมือนนาค “การศึกษาผลกระทบของ Four Wave Mixing ในระบบสื่อสารสัญญาณ DWDM โดยการปรับระยะห่างของสัญญาณ” วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2550
- [15] วิศวิทย์ ราชณรงค์ และสุทธิชัย นพนาศิพงษ์, “เทคนิคการชดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERAUS ในระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM,” วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 4, หน้า 19-25, ธันวาคม, 2552
- [16] ชลธิ ศรีนิวล, อชิระ จำปาเทศ และสุทธิชัย นพนาศิพงษ์, “เทคนิคการชดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RS-URAUS ในระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM,” วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 32-36, ธันวาคม, 2556



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1
สำหรับระบบที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz
และ 100GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 สำหรับระบบที่มีระยะห่างช่องสัญญาณ 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz และ 100 GHz [13]

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
.
.
.
195.9375	–	–	–	1530.0413
195.9250	195.925	–	–	1530.1389
195.9125	–	–	–	1530.2365
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.3341
195.8875	–	–	–	1530.4318
195.8750	195.875	–	–	1530.5295
195.8625	–	–	–	1530.6271
195.8500	195.850	195.85	–	1530.7248
195.8375	–	–	–	1530.8225
195.8250	195.825	–	–	1530.9203
195.8125	–	–	–	1531.0180
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.1157
195.7875	–	–	–	1531.2135
195.7750	195.775	–	–	1531.3112
195.7625	–	–	–	1531.4090
195.7500	195.750	195.75	–	1531.5068
195.7375	–	–	–	1531.6046
195.7250	195.725	–	–	1531.7024
195.7125	–	–	–	1531.8003
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.8981
195.6875	–	–	–	1531.9960
195.6750	195.675	–	–	1532.0938
195.6625	–	–	–	1532.1917
.
.
.
.
.
.
193.2375	–	–	–	1551.4197
193.2250	193.225	–	–	1551.5200
193.2125	–	–	–	1551.6204
193.2000	193.200	193.20	193.2	1551.7208
193.1875	–	–	–	1551.8212
193.1750	193.175	–	–	1551.9216
193.1625	–	–	–	1552.0220
193.1500	193.150	193.15	–	1552.1225
193.1375	–	–	–	1552.2229
193.1250	193.125	–	–	1552.3234
193.1125	–	–	–	1552.4239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.5244
193.0875	–	–	–	1552.6249
193.0750	193.075	–	–	1552.7254
193.0625	–	–	–	1552.8259
193.0500	193.050	193.05	–	1552.9265
193.0375	–	–	–	1553.0270
193.0250	193.025	–	–	1553.1276
193.0125	–	–	–	1553.2282
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.3288
192.9875	–	–	–	1553.4294
192.9750	192.975	–	–	1553.5300
192.9625	–	–	–	1553.6307



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนของ FWM

1. จำนวนของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS และ ERUS ในแต่ละ Base Unit

จำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นใน base unit แต่ละกลุ่ม ดังในตารางได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 1 กลุ่มของ base unit ที่ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่ระยะห่างช่องสัญญาณเกิดขึ้น คือ ทำให้ทุกๆช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่เท่ากันจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ

ตารางที่ 1 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.23	192.33	192.45	192.6	192.65	192.73	192.83	192.95	193.1	193.15	193.23	193.33
Δf_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	193.73	193.83	193.95	194.1	194.15	194.23	194.33	194.45	194.6	194.65	194.73
Δf_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)	194.83	194.95	195.1	195.15	195.23	195.33	195.45	195.6	195.65	195.73	195.83	195.95		
Δf_i (GHz)	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	125		

ตารางที่ 2 กลุ่มของ base unit ที่ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่ระยะห่างช่องสัญญาณเกิดขึ้น คือ ทำให้ระยะห่างของความถี่ที่อยู่ภายใน Base Unit สลับที่กัน และไม่เว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ

ตารางที่ 2 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-UBU

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.23	192.33	192.45	192.6	192.64	192.73	192.83	192.94	193.1	193.15	193.23	193.33
Δf_i (GHz)		50	75	100	125	150	37.5	87.5	100	112.5	162.5	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	193.64	193.73	193.83	193.94	194.1	194.15	194.23	194.33	194.45	194.6	194.64	194.73
Δf_i (GHz)	125	150	37.5	87.5	100	112.5	162.5	50	75	100	125	150	37.5	87.5
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
f_i (THz)	194.83	194.94	195.1	195.15	195.23	195.33	195.45	195.6	195.64	195.73	195.83	195.94		
Δf_i (GHz)	100	112.5	162.5	50	75	100	125	150	37.5	87.5	100	112.5		

ตารางที่ 3 กลุ่มของ *base unit* ที่ทำการหาค่าความน่าจำเป็นที่ระยะห่างช่องสัญญาณเกิดขึ้น คือ ทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ และเว้นให้มีระยะห่างระหว่าง *base unit* (Δf_s) ที่เท่ากัน

ตารางที่ 3 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.23	192.33	192.45	192.6	192.66	192.71	192.79	192.89	193.01	193.16	193.23	193.33
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.35	193.45	193.58	193.73	193.79	193.84	193.91	194.01	194.14	194.29	194.35	194.40	194.48	194.58
Δf_i (GHz)	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
f_i (THz)	194.70	194.85	194.91	194.96	195.04	195.14	195.26	195.41	195.48	195.53	195.60	195.70	195.83	195.98
Δf_i (GHz)	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150

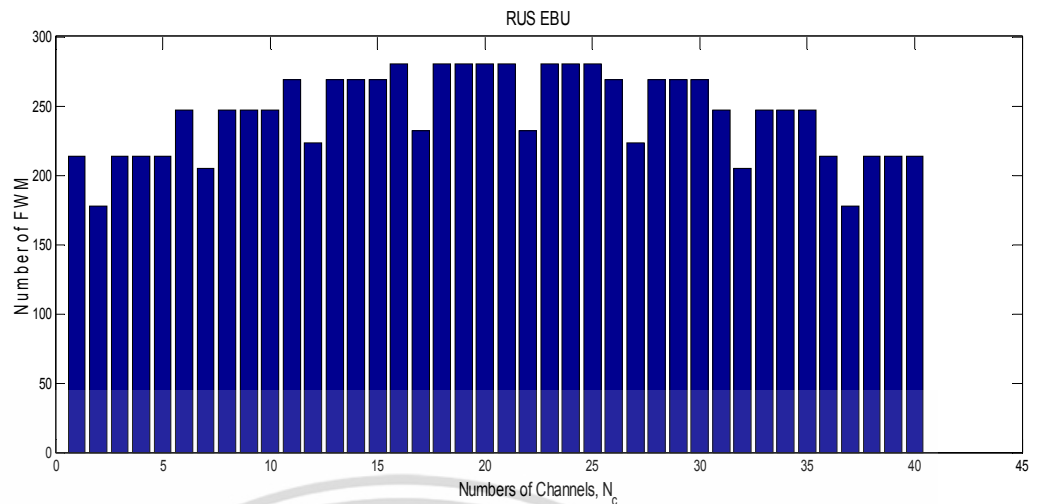
ตารางที่ 4 กลุ่มของ *base unit* ที่ทำการหาค่าความน่าจำเป็นที่ระยะห่างช่องสัญญาณเกิดขึ้น คือ ทำให้ระยะห่างของควมถี่ที่อยู่ภายใน Base Unit (B_{b1} และ B_{b2}) ที่ไม่เท่ากันสลับที่กันไปเรื่อยๆ และเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ข้างเคียงแบบเท่ากัน

ตารางที่ 4 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.23	192.33	192.45	192.6	192.66	192.70	192.79	192.89	193.00	193.16	193.23	193.28
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.35	193.45	193.58	193.73	193.79	193.83	193.91	194.01	194.14	194.29	194.35	194.40	194.48	194.58
Δf_i (GHz)	75	100	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	75	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
f_i (THz)	194.70	194.85	194.91	194.95	195.04	195.14	195.25	195.41	195.48	195.53	195.60	195.70	195.83	195.98
Δf_i (GHz)	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	75	100	125	150

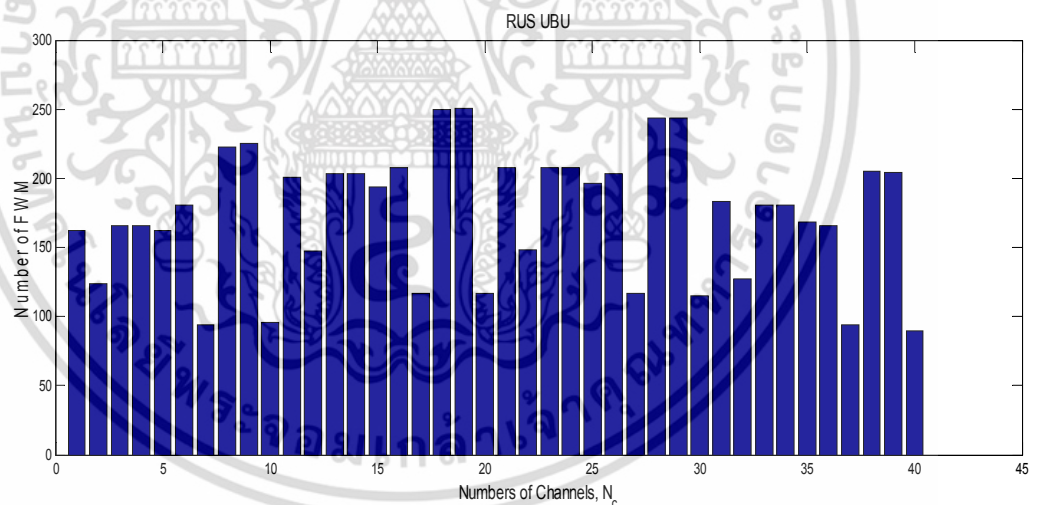
2. จำนวนของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS_EBU, RUS_UBU, ERUS_EBU และ ERUS_UBU

2.1 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS_EBU แสดงดังตารางที่ 4.1 มีจำนวนของ FWM โดยรวมเท่ากับ 9756 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS_EBU

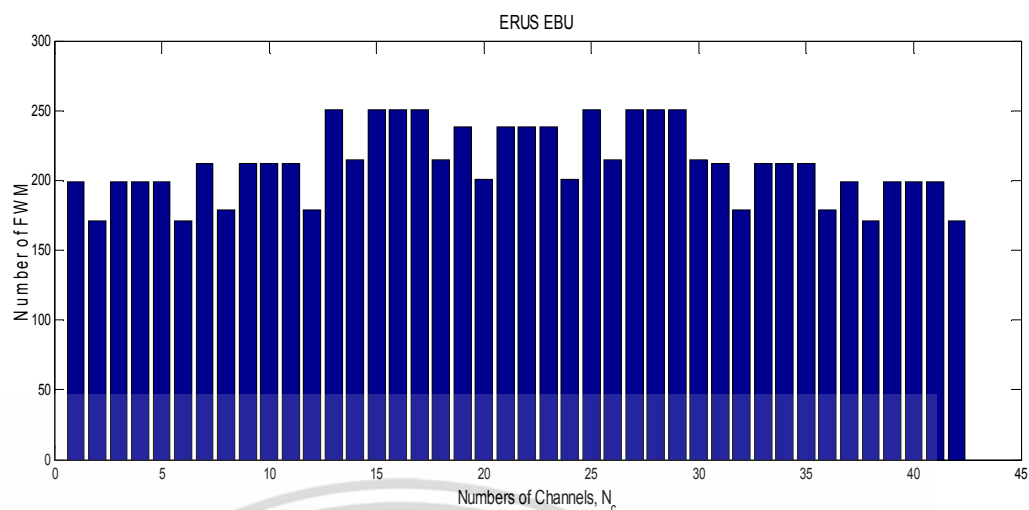
2.2 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS_UBU แสดงดังตารางที่ 4.1 มีจำนวนของ FWM โดยรวมเท่ากับ 6980 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS_UBU

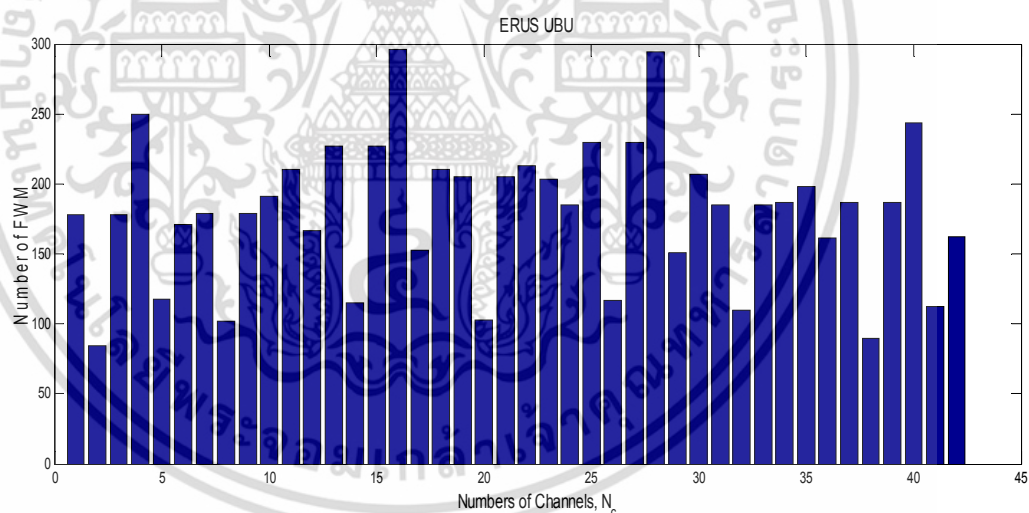
2.3 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS_EBU แสดงดังตารางที่ 4.2 มีจำนวนของ FWM โดย รวมเท่ากับ 8910 แสดงดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS_EBU

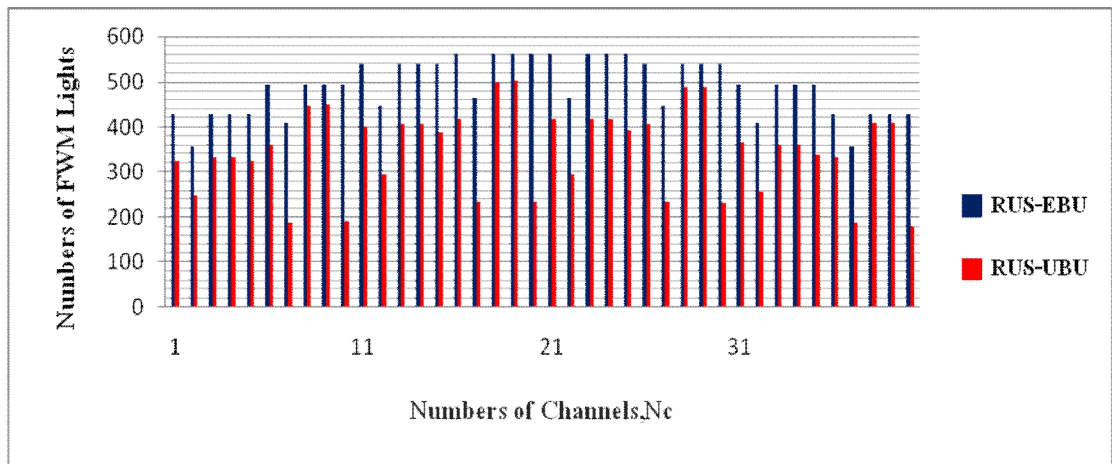
2.4 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS_UBU แสดงดังตารางที่ 4.2 มีจำนวนของ FWM โดย รวมเท่ากับ 7586 แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS_UBU

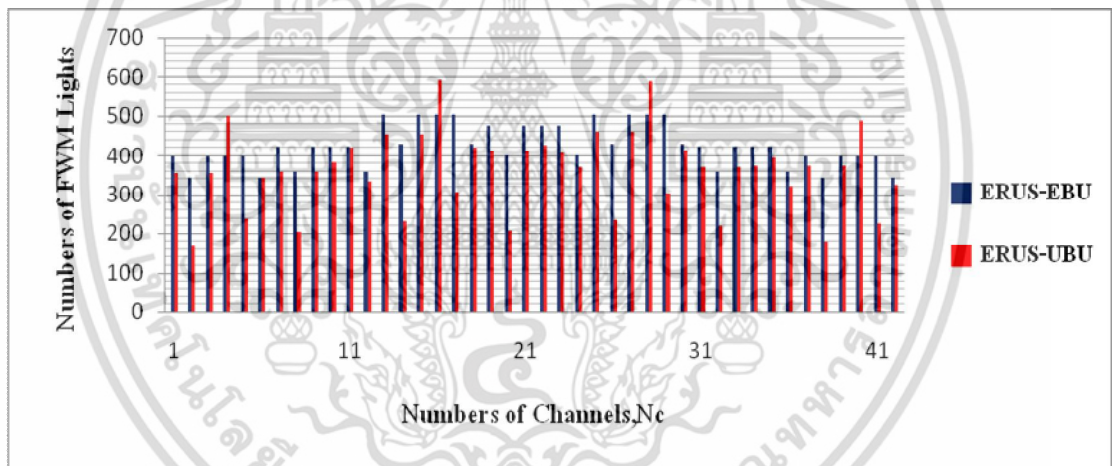
2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องของสัญญาณแบบ RUS-EBU กับ RUS-UBU แสดงดังรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 เปรียบเทียบจำนวนของ FWM การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS-EBU กับ RUS-UBU

2.6 เปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวนของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดระยะห่างช่องของสัญญาณแบบ ERUS-EBU กับ ERUS-UBU แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เปรียบเทียบจำนวนของ FWM การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU กับ ERUS-UBU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. พิษณุ รอดยัง, วิศรวิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาศิพงษ์, “เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจาก Four Wave Mixing,” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 33 ฉบับที่ 2, หน้า 22-27, เดือน มิถุนายน 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย พิษณุ รอดยัง
วัน เดือน ปีเกิด	25 กรกฎาคม 2528 จังหวัด พัทลุง
ที่อยู่	45 หมู่ 4 ตำบล ดอนทราย อำเภอ ควนขนุน จังหวัด พัทลุง รหัสไปรษณีย์ 9310
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้