

วิธีการจัดช่องสัญญาณให้ค่า FWM ต่ำสุดสำหรับระบบการส่งแบบ DWDM
หลายช่องสัญญาณ

FWM-MINIMIZING CHANNEL ALLOCATION ALGORITHM SCHEME FOR
MULTICHANNEL DWDM TRANSMISSION SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-D-018-018-221

วิธีการจัดช่องสัญญาณให้ค่า FWM ต่ำสุดสำหรับระบบการส่งแบบ DWDM
หลายช่องสัญญาณ

FWM-MINIMIZING CHANNEL ALLOCATION ALGORITHM SCHEME FOR
MULTICHANNEL DWDM TRANSMISSION SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-018-018-221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FWM-MINIMIZING CHANNEL ALLOCATION ALGORITHM SCHEME FOR
MULTICHANNEL DWDM TRANSMISSION SYSTEM



ASHIRA JUMPATES

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-D-018-018-221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

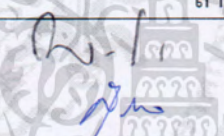

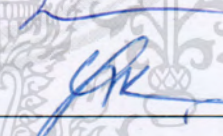
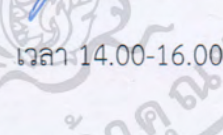

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการจัดช่องสัญญาณให้ค่า FWM ต่ำสุดสำหรับระบบการส่งแบบ DWDM หลายช่องสัญญาณ
Thesis Title FWM-Minimizing Channel Allocation Algorithm Scheme for Multichannel DWDM Transmission System
นักศึกษา นายอชิระ จำปาเทศ
รหัสประจำตัว 53610113
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-D-018-221

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	
รศ.ดร.สุวิมล สิทธิชีวภาค	
ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์	
ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ	
รศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการจัดช่องสัญญาณให้ค่า FWM ต่ำสุดสำหรับระบบการส่งแบบ DWDM หลายช่องสัญญาณ
นักศึกษา	นายอชิระ จำปาเทศ
รหัสประจำตัว	53610113
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS ใช้ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM และเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดผลกระทบของ FWM (Four-Wave Mixing) ระหว่างวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS และวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES เครื่องมือในการวิจัยประกอบไปด้วยโมเดลการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS และโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลอง FWM ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการลดผลกระทบของ FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS ดีกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES นอกจากนี้ประโยชน์ข้างเคียงที่ได้รับ คือจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเทียบเท่ากับการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนข้อมูลที่สูงขึ้นถึง 10 Gb/s

Thesis	FWM-Minimizing Channel Allocation Algorithm Scheme for Multichannel DWDM Transmission System
Student	Mr.Ashira Jumpates
Student ID.	53610113
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Yuttapong Rangsanseri

ABSTRACT

The purposes of this research were to develop the APRUS channel allocation methodology in DWDM optical network, and to compare the four-wave mixing effect reduction capability between APRUS channel allocation methodology and ES channel allocation methodology. The research tools consisted of the APRUS channel allocation model, and MATLAB programming language for simulation of four-wave mixing. The results of this research show that the four-wave mixing effect reduction capability of the APRUS channel allocation methodology is better than the ES channel allocation methodology. Moreover as a side benefit, an additional channel is gained which is equivalent to a gain of 10 Gbit/s higher data transfer rate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงษ์ รั้งสรรค์เสรี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะ และช่วยแก้ไข ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิพล สิริชีวะภาค และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ เนื่องจากข้าพเจ้าได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2557

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ ดร.พิชัย อรุณวิภาส ที่คอยให้คำแนะนำและให้การช่วยเหลือ ในการ เลือกรวบรวมสารในระดับนานาชาติที่มีคุณภาพสำหรับตีพิมพ์ผลงานวิจัยของข้าพเจ้า และเป็นกำลังใจ ที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดาและมารดาซึ่งเป็น ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถวายทอด ประสพการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อชิระ จำปาเทศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัย	4
1.5 ขอบจำกัดของการวิจัย	4
1.6 ความคาดหวังในการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM.....	5
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ DWDM	7
2.1.2 อุปกรณ์ของโครงข่าย DWDM	9
2.1.3 อุปกรณ์เครื่องส่ง	10
2.1.4 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์.....	11
2.1.5 สถานีขยายสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง.....	13
2.1.6 อุปกรณ์ขดเชยดิสเพอร์ชัน	15
2.1.7 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เพิ่มและดรอปช่องสัญญาณ	16
2.1.8 Optical Cross Connect	17
2.1.9 Optical Demultiplexer	17
2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสง.....	18
2.3 ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง.....	18
2.4 การลดทอนและดิสเพอร์ชันของแสงในตัวกลาง	24
2.4.1 Stimulated Brillouin Scattering	24
2.4.2 Stimulated Raman Scattering	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสง	29
2.5.1 การมอดูเลตแบบ SPM	29
2.5.2 การมอดูเลตแบบ CP	30
2.6 ผลกระทบจาก FWM ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	30
2.7 อัตราบิดผิดพลาด	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
3.1 ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบต่างๆ ในระบบ DWDM	38
3.1.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างเท่ากัน	38
3.1.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน	39
3.1.2.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Paired URAUS	39
3.1.2.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS	41
3.2 การออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่.....	42
3.2.1 ออกแบบโครงสร้างการจัดกลุ่มของช่องความถี่ของช่องสัญญาณภายใน Base Unit	42
3.2.2 ออกแบบระยะห่างระหว่าง Base Unit	45
3.2.3 ออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS	45
3.2.3.1 การออกแบบรูปแบบการจัดวาง Base Unit ชั้นที่ 1	45
3.2.3.2 การออกแบบรูปแบบการจัดวาง Base Unit ชั้นที่ 2	50
3.2.4 การกำหนดค่าความถี่ตามโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS	51
บทที่ 4 ผลการวิจัย	54
4.1 ผลการออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสง แบบ DWDM	54
4.2 ผลการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM	54
4.2.1 ผลการจำลอง ทนความถี่ของ FWM	55
4.2.2 ผลการจำลอง ทดลองประสิทธิภาพของ FWM	56
4.2.3 ผลการจำลอง ทดลองประสิทธิภาพของ FWM	57
4.2.4 ผลการจำลอง ทดลองหาอัตราบิดผิดพลาด	58
4.2.5 สรุปผลการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณ แบบ APRUS	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการวิจัย	60
5.1.1 ผลการออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบDWDM	60
5.1.2 ผลการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัด ช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS	60
5.1.2.1 ผลการจำลองงานความถี่ของ FWM	60
5.1.2.2 ผลการจำลองค่ากำลังประสิทธิภาพของ FWM	60
5.1.2.3 ผลการจำลองหาค่าประสิทธิภาพของความถี่ FWM	61
5.1.2.4 ผลการจำลองหาค่าอัตราบิดเบือนผลพลได้	61
5.2 การอภิปรายผล.....	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม	62
ประวัติผู้เขียน	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES.....	39
3.2 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS	40
3.3 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ IRBUS	41
3.4 ค่าผลกระทบจาก FWM ของ Base Unit ทั้ง 120 รูปแบบ	43
3.5 การจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน	46
3.6 การออกแบบรูปแบบการจัดวาง Base Unit ชั้นที่ 2	51
3.7 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS	51
3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแก้วนำแสงที่ก าหนดไว้ส าหรับการจ าลองการท างานของระบบ	53
4.1 ประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ตามปัจจัยที่ก หนด เปรียบเทียบกับเป้าหมาย	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบนด์วิดท์หน้าต่างความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm	6
2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง	8
2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM	8
2.4 อุปกรณ์โครงข่าย DWDM ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน	9
2.5 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบ DWDM	10
2.6 การมอดูเลตภายนอก	11
2.7 คัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสงแบบ 2x2 สําหรับมัลติเพล็กซ์แสง 2 ช่องสัญญาณ	11
2.8 โครงสร้างพื้นฐานของคัปเปิลอร์แบบระนาบ	12
2.9 หลักการทํางานของออปติคัลคอลลีเนเตอร์และ MUX.....	13
2.10 การเกิดแสงของสสารเมื่อถูกกระตุ้น	14
2.11 หลักการทํางานของ EDFA	14
2.12 โครงสร้างสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDFA	15
2.13 โครงสร้างพื้นฐานของเกรตติงเส้นใยแก้วนำแสง	16
2.14 ส่วนประกอบของ Dispersion Compensator ที่ใช้ Fiber Grating	16
2.15 โครงสร้างพื้นฐาน OADM	17
2.16 โครงสร้าง OXC ที่ใช้ Optical Planar Waveguide	17
2.17 ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง.....	20
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง.....	21
2.19 กําลังของสัญญาณเปรียบเทียบกับระยะทางของระบบสื่อสารสัญญาณ.....	22
2.20 ระยะทางประสิทธิผลของระบบสื่อสารสัญญาณเปรียบเทียบกับในแต่ละช่วงระยะทาง.....	22
2.21 การเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกําลังของสัญญาณและระยะทางประสิทธิผล	23
2.22 ผลกระทบของ SRS เมื่อกําลังของสัญญาณแสงจากช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำ.....	26
2.23 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS	27
2.24 ค่ากําลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก SRS	28
2.25 รูปแบบการกระจายตัวของความถี่แสงของ FWM ที่มาจากการสอดแทรกระหว่างกัน	31
2.26 การจัดช่องสัญญาณแบบ ES ที่มีจำนวน 12 ช่องสัญญาณ	31
2.27 องค์ประกอบของสัญญาณแสงที่จุด N-channel DWDM MUX	33
3.1 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES	38
3.2 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS	39
3.3 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS	41
3.4 โครงสร้างการจัดกลุ่มความถี่ของช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit	43
3.5 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS	51
4.1 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS	54
4.2 จำนวนความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS IRBUS และ APRUS	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพรังสีของ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสง แบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS	56
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของควมถี่ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสง แบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS	57
4.5 การเปรียบเทียบอัตราบิดเบือนที่ผลึกที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS	58
5.1 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (ICT) เป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ และประเทศชาติ ซึ่งยังต้องการพัฒนาให้เท่าเทียมต่อการเปลี่ยนแปลงทาง เทคโนโลยี และการแข่งขันกับนานาประเทศ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564) ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำโมเดลพัฒนาเศรษฐกิจของรัฐบาล ได้แก่ ประเทศไทย 4.0 เข้ามาบริหารประเทศ การขับเคลื่อนปฏิรูปประเทศด้านต่าง ๆ เพื่อปรับแก้ จัดระบบ ปรับทิศทาง และ สร้างหนทางพัฒนาประเทศให้เจริญ สามารถรับมือกับโอกาสและภัยคุกคามแบบใหม่ ๆ ที่ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และรุนแรงในศตวรรษที่ 21 ได้ โดยโมเดลประเทศไทย 4.0 จะปรับเปลี่ยน โครงสร้างเศรษฐกิจแบบเดิม ไปสู่ยุคเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนและสร้างมูลค่าเพิ่มด้วยเทคโนโลยีและ นวัตกรรม (Value-added Economy) เปลี่ยนจากการผลิตสินค้าโภคภัณฑ์ไปสู่สินค้าเชิงนวัตกรรม เปลี่ยนจากการขับเคลื่อนประเทศด้วยภาคอุตสาหกรรมไปสู่การขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี ความคิด สร้างสรรค์ และนวัตกรรม และเปลี่ยนจากการเน้นภาคการผลิตสินค้าไปสู่ภาคบริการมากขึ้น เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ ในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม ผู้ประกอบการ เพื่อการบริหารงานในองค์กรธุรกิจ กระบวนการทางธุรกิจรูปแบบใหม่ถูกสร้างและ ควบคุมโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นหลัก ในการเชื่อมโยงสารสนเทศทั้งภายในและภายนอกองค์กร ส่งผลให้ความสามารถในการสื่อสาร ตลอดจนการประมวลผลเพื่อตัดสินใจเป็นไปอย่างถูกต้อง รวดเร็ว และยังสามารถสร้างความแตกต่างให้กับสินค้าหรือบริการ ตลอดจนสร้างคุณค่าและลดต้นทุน การผลิตได้อีกด้วย ซึ่งนโยบายของประเทศได้ให้ความสำคัญกับการยกระดับคุณภาพชีวิตของ ประชาชนโดยการพัฒนาอุตสาหกรรมต่อเนื่องเพื่อสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจให้กับประเทศ ดัง แผนพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2560-2564) ตามยุทธศาสตร์ที่ 7 ของ แผนพัฒนา กล่าวถึงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน และระบบโลจิสติกส์ของประเทศ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัย สำคัญในการสนับสนุนเศรษฐกิจและสังคม การกระจายความเจริญ และการพัฒนาเมืองและพื้นที่ รวมทั้งการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน อย่างไรก็ตาม ที่ผ่านมา การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน และระบบโลจิสติกส์ของประเทศ ประสบปัญหาความต่อเนื่อง ในการดำเนินการ และปัญหาเชิง ปริมาณ คุณภาพ และการบริหารจัดการการให้บริการที่สอดคล้องกับ มาตรฐานสากล ทำให้มี ข้อจำกัดในการสนับสนุนการพัฒนาประเทศให้มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการพัฒนา โครงสร้างพื้นฐาน และระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 จะมุ่งเน้น การขยายขีดความสามารถและพัฒนาคุณภาพการให้บริการ เพื่อรองรับการขยายตัวของเมือง และ พื้นที่เศรษฐกิจหลัก ส่งเสริมการพัฒนาคุณภาพชีวิตของทุกกลุ่มในสังคม สนับสนุนให้เกิดความ เชื่อมโยง ในอนุภูมิภาคและในอาเซียนอย่างเป็นระบบ โดยมีโครงข่ายเชื่อมโยงภายในประเทศที่ สนับสนุนการพัฒนา พื้นที่ตามแนวระเบียงเศรษฐกิจต่างๆ การพัฒนาระบบการบริหารจัดการ และ การกำกับดูแลให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินการ สร้างความเป็น ธรรมในการเข้าถึงบริการพื้นฐาน และ การคุ้มครองผู้บริโภค การพัฒนาอุตสาหกรรมต่อเนื่องเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างโอกาสทางเศรษฐกิจให้กับประเทศ และการพัฒนาผู้ประกอบการ ในสาขาโลจิสติกส์และหน่วยงานที่มีศักยภาพเพื่อไปทำธุรกิจในต่างประเทศ

การบริหารจัดการโลจิสติกส์ภายในองค์กรธุรกิจให้เป็นอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องนำเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม ซึ่งเทคโนโลยีที่นิยมนำมาใช้เรียกว่า เทคโนโลยีทางโลจิสติกส์ เช่น ระบบหาจุดพิกัดบนโลก (Global Positioning System: GPS) บาร์โค้ด/บาร์โค้ด 2 มิติ (Barcode/QR code) การระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID) ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบสารสนเทศทางโลจิสติกส์แบบออนไลน์ (e-Logistics) เพื่อใช้ในการบริหารจัดการด้านการขนส่งและจัดเก็บสินค้า เช่น ระบบการจัดการขนส่งทางรถ (Parking Management System: PMS) ระบบบริหารคลังสินค้า (Warehouse Management System: WMS) ระบบบริหารจัดการลานตู้คอนเทนเนอร์ (Container Yard Management System: CMS) ระบบจัดการการขนส่งสินค้าทางเรือ (Ship Management System: SMS) ระบบบริหารจัดการโลจิสติกส์แบบเบ็ดเสร็จ (Logistics Management System: LMS) ระบบพิธีการศุลกากรส่งออกทางอิเล็กทรอนิกส์ (e-Import/e-Export) การวางแผนทรัพยากรวิสาหกิจ (Enterprise Resource Planning: ERP) ระบบการจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management System: WMS) และระบบการจัดการการขนส่ง (Transportation Management System: TMS) เป็นต้น ซึ่งระบบสารสนเทศเพื่อโลจิสติกส์ดังกล่าวข้างต้น เป็นระบบที่ต้องอาศัยระบบการสื่อสารข้อมูลและโทรคมนาคม ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสารสนเทศดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของโครงสร้างพื้นฐานด้านการสื่อสารข้อมูลและโทรคมนาคมด้วยเช่นกัน การออกแบบ การเลือกใช้อุปกรณ์ สายสื่อสาร และเทคโนโลยีด้านการสื่อสารข้อมูลที่เหมาะสมกับงานและสภาพแวดล้อมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารโดยผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางนั้น ยังเป็นที่นิยมแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากข้อเด่นของเส้นใยแก้วนำแสงที่เหนือกว่าตัวกลางประเภทอื่นๆ ในกลุ่มเดียวกัน ได้แก่ แบนด์วิธกว้าง ความสามารถในการส่งข้อมูลได้ในระยะทางไกลๆ มีอัตราการสูญเสียของสัญญาณต่ำ ตัวส่งมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ไม่ถูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และมีความปลอดภัยในการส่งข้อมูลสูง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้กับเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูล เพิ่มจำนวนแบนด์วิธได้อีกอย่างมหาศาล เทคโนโลยีดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า “ระบบเครื่องส่งแบบ DWDM (Dense wavelength division multiplexing)” มีคุณสมบัติเด่นคือสามารถส่งสัญญาณแสงได้หลายความยาวคลื่นพร้อมๆ กัน ผ่านลงในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว หมายความว่า ถ้ากรณีของสัญญาณแสง 1 ความยาวคลื่น (λ) มีอัตราเร็วในการขนส่งข้อมูล 10 Gb/s เมื่อส่งผ่านระบบ DWDM จำนวน 40 ความยาวคลื่น จะสามารถส่งข้อมูลที่อัตราความเร็ว 400 Gb/s นั้นเอง แต่ปัญหาที่พบในปัจจุบันได้แก่ การเกิดคลื่นแสง FWM (Four Wave Mixing) ขึ้นในระหว่างที่มีการส่งข้อมูล เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบ “ความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 3” (Third-Order Nonlinear Optic) [1] ซึ่งมีผลโดยตรงต่อระบบเครื่องส่งแบบ DWDM และกรณีที่มีการส่งสัญญาณแสงที่มีระยะทางไกล สัญญาณแสงดังกล่าวจะมีค่าลดลงเมื่อถึงปลายทาง เพื่อแก้ไขปัญหานี้จึงมีการใช้ EDFA (Erbium Dope Fiber Amplifier) ที่มีความยาวคลื่นแสงในช่วง 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0 THz) เป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 เพื่อเพิ่มความเข้มของสัญญาณแสง แต่ผลที่เกิดขึ้นตามมาก็คือ เป็นการขยายคลื่นแสง FWM ด้วยเช่นกัน ซึ่งปัจจุบันผู้ผลิตอุปกรณ์ระบบเครื่องส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ DWDM แก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter) ที่ด้านเครื่องรับปลายทาง เพื่อลดคลื่นแสง FWM ที่เกิดขึ้น

จากความเป็นมาและปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญของการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาคลิ้งแสง FWM ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการวิจัย เรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM เพื่อออกแบบและนำเสนอวิธีการใหม่ที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ที่เกิดขึ้น บนพื้นฐานของคุณภาพการส่งข้อมูลดีขึ้นเร็วขึ้น สามารถลดคลื่นแสง FWM ได้ดีกว่า และประหยัดค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ได้

1.2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ที่ได้จากการวิจัย

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS กับวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาวิจัยไว้ ดังนี้

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาและออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM เป็นสำคัญ โดยไม่พิจารณาผลกระทบของ SPM (Self-phase Modulation) CPM (Cross-phase Modulation) และการเสื่อมลงของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากแบนด์วิดท์ที่จำกัด

ในงานวิจัยมีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความยาวคลื่น 1529.55-1560.61 nm (192.1-196.0 THz) กำลังส่งสัญญาณแสงอินพุต (P_{in}) เท่ากับ 10 dBm ความถี่ที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน ได้แก่ 50 75 100 125 และ 150 GHz ตามลำดับ

คุณสมบัติและประเภทของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการวิจัยเป็นชนิด DSF (Dispersion Shift Fiber) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง (L) = 80 km ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการลดทอน (α) = 0.02 dB/km ค่าความชันของดิสเพอร์ชัน $\left(\frac{dD}{d\lambda_{DSF}}\right)$ = 0.06 ps/km/nm² ค่าโครมาติคดิสเพอร์ชัน (D) = 0 ps/km/nm ค่าดัชนีหักเหของคอร์ (n) = 1.45 ค่าความเร็วแสงในอากาศ (c) = 3×10^8 m/s องค์ประกอบ ที่แสดงสถานะเสื่อม ($d_{ijk}=3$ เมื่อ $i=j$ และ $d_{ijk}=6$ เมื่อ $i \neq j$) ความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 3 (χ^3) = 6×10^{-15} ระยะทางประสิทธิผล (L_{eff}) ประมาณ 20 km พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล (A_{eff}) = $50 \mu\text{m}^2$ ประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของ APD (Avalanche Photodiode) = 80% โดยแสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในรูปแบบของประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่คลื่นแสง FWM และค่าความน่าจะเป็นที่เกิดผลกระทบจากคลื่นแสง FWM ที่ $f_{FWM} = f_i$ เมื่อ f_{FWM} คือค่าความถี่คลื่นแสง FWM และ f_i คือความถี่ของสัญญาณส่งของแต่ละช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยไว้ ดังนี้

1.4.1 ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบต่างๆ ในระบบเครื่องส่งแบบ DWDM

1.4.2 ออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่ ชื่อ APRUS

1.4.3 หาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS กับวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

1.4.4 สรุปผลการวิจัย

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM นั้น ในขั้นตอนการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณที่ออกแบบมา เป็นการหาประสิทธิภาพโดยการจำลองการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยสมการสำหรับการทำงานของระบบ โดยใช้รูปแบบอัลกอริทึม

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงที่ไม่เท่ากันเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ที่ออกแบบขึ้นมา เป็นเพียงแนวคิดเชิงทฤษฎี ที่ยังไม่สามารถนำไปใช้จริงได้ เนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

APRUS มาจากคำว่า Asymmetrical Paired Repeated Unequally Spaced คือวิธีการจัดช่องสัญญาณรูปแบบใหม่ที่ได้จากงานวิจัย เป็นแนวคิดเชิงทฤษฎีที่ออกแบบมาเพื่อนำเสนอวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงที่ไม่เท่ากัน ที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ได้ดีกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ที่ใช้อยู่จริงในปัจจุบัน

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่อง วิธีการจัดช่องสัญญาณให้ค่า FWM ต่ำสุดสำหรับระบบการส่งแบบ DWDM หลายช่องสัญญาณนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ได้ดีกว่าวิธีที่ใช้อยู่เดิม ผู้วิจัยจึงศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปสู่การออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนี้

2.1 ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM

โครงข่าย DWDM หรือ “Dense Wavelength Division Multiplexing” หมายถึงโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว สามารถส่งสัญญาณแสงที่มีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันจำนวนมากไปพร้อมกัน มักนิยมใช้แสงที่มีค่าความยาวคลื่น 1.33-1.55 ไมครอน ซึ่งพื้นฐานที่สำคัญของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความยาวคลื่น (WDM หรือ Wavelength Division Multiplexing) นั้น จะเหมือนกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความถี่ (FDM หรือ Frequency Division Multiplexing) ซึ่งถูกนำมาใช้งานประเภทระบบการรับ-ส่งคลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ และระบบการรับ-ส่งสัญญาณดาวเทียม สิ่งที่สำคัญคือในโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิค WDM นั้นค่าความยาวคลื่นแสงต้องมีระยะห่างกันอย่างเหมาะสม ซึ่งต้องการที่จะหลีกเลี่ยงการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน โดยค่าสัญญาณที่เกิดจากการแทรกสอดนี้ เป็นสัญญาณหรือความถี่ที่เกิดขึ้นมาใหม่ซึ่งเราไม่ต้องการ ผลกระทบที่เกิดขึ้นของสัญญาณดังกล่าวนี้ เป็นผลทำให้สัญญาณที่ปลายทางมีค่าลดลง

ในโครงข่าย WDM แบบมาตรฐานนั้น มักจะนิยมใช้สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1.33 และ 1.55 ไมครอนแทนช่องสัญญาณอิสระรวมกันทางแสง แล้วจึงส่งออกไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งวิธีนี้จะไม่สามารถเพิ่มช่องสัญญาณที่มีอยู่เดิมของความยาวคลื่นแสงได้มากนัก เนื่องจากข้อจำกัดต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่นสัญญาณแสงในแต่ละช่องสัญญาณที่มีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกันมาก จึงมีค่าการลดทอนของสัญญาณไม่เท่ากัน เป็นผลทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้นั้นมีค่าไม่เท่ากันด้วยประเด็นที่สำคัญคือในระบบสื่อสารที่ไกลมากๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (Repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่น จึงเป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และระบบมีความยุ่งยากเกิดขึ้น การแก้ไขปัญหาสามารถทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้ๆ กัน โดยเลือกใช้ค่าของสัญญาณแสงค่าหนึ่ง เช่นในระบบปัจจุบันมักเลือกค่าความยาวคลื่นแสงในช่วง 1.55 ไมครอน และค่าความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีระยะห่างกัน (Channel Spacing) เท่ากับ 1 ไมครอนหรือมากกว่า 1 ไมครอนเล็กน้อย เช่นระบบ DWDM ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจจะถูกประกอบด้วยความยาวคลื่นแสง 1500, 1551, 1552, ... และ 1557 nm ซึ่งหมายถึงมีช่วงของช่องสัญญาณจะมีระยะห่างกันเท่ากับ 1 ไมครอนเป็นต้น การที่กำหนดให้ ระยะห่างของช่องสัญญาณมีค่าน้อยๆ นั้นหมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งหมายความว่าเราจะได้โครงข่าย DWDM เชิงพาณิชย์ที่สามารถส่งข้อมูลได้เร็วขนาดเทอราบิตต่อวินาที หรือ Tb/s (Terabit per Sec) สามารถสรุปคุณลักษณะที่สำคัญของการมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM ได้ดังนี้

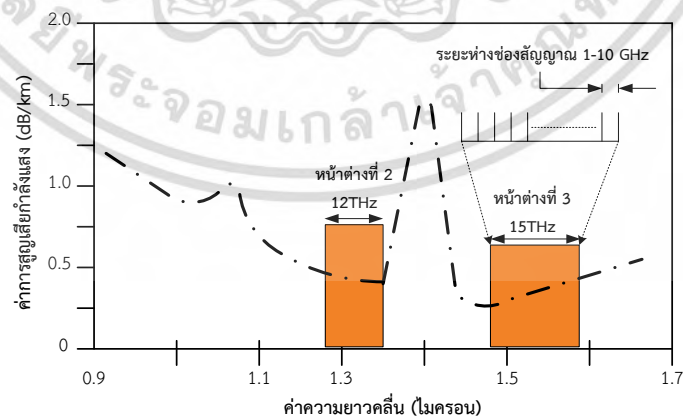
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สามารถเพิ่มความจุในการส่งข้อมูลให้แก่โครงข่ายได้ จุดประสงค์หลักของการใช้งานเทคนิค WDM ในปัจจุบันนี้ยังคงเป็นการเพิ่มความจุให้แก่โครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบจุดต่อจุด โดยแต่ละค่าความยาวคลื่นแสงสามารถรองรับ 1 ช่องสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลอย่างน้อยเท่ากับ 10 Gb/s หรืออย่างน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับอัตราการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทาง เทคนิค WDM นี้เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มความจุของโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้สูงมาก เนื่องจากแบนด์วิธ ของเส้นใยแก้วนำแสงมีขนาดหลายร้อยเทอราเฮิร์ตซ์ (Terahertz) แต่ไม่สามารถใช้ความจุของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากข้อจำกัดของความเร็วในการทำงาน และอัตราการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทาง เราเรียกข้อจำกัดนี้ว่า “Electronic Bottleneck”

2. มีความโปร่งใสในการส่งข้อมูล (Transparency) จุดประสงค์หลักอีกข้อหนึ่งของเทคนิค WDM นี้คือแต่ละช่องสัญญาณแสง สามารถส่งข้อมูลที่มีรูปแบบการเข้ารหัสชนิดใดก็ได้ เนื่องจากมีการใช้ค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน หรือกล่าวได้ว่ามีความโปร่งใสในการส่งข้อมูล โดยข้อมูลดิจิทัลของแต่ละช่องสัญญาณที่ถูกการเข้ารหัสรูปแบบที่ต่างกัน สามารถถูกส่งไปพร้อมๆ กันและอิสระต่อกันไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยจะไม่สนใจโครงสร้างของข้อมูลที่แตกต่างกัน

3. สามารถกำหนดเส้นทาง (Routing) ในการส่งข้อมูลโดยใช้ค่าความยาวคลื่นจำนวนมากในการเพิ่มความจุ และเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ระบบแล้ว การใช้อุปกรณ์ในการกำหนดเส้นทางโดยใช้ความยาวคลื่นนั้นก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ดี และเหมาะสมในการใช้งาน นอกเหนือจากการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเวลา (Time Division Multiplexing) และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกช่องว่าง (Space Division Multiplexing) ในการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย

โครงข่ายที่จัดสรรเส้นทางโดยใช้ค่าความยาวคลื่นแสง (Wavelength Routing Network) นั้นจะใช้ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณหนึ่ง เสมือนเป็นแอดเดรสที่ใช้การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างกัน ซึ่งอาจจะมีการจัดเส้นทางของโครงข่ายใหม่ (Reconfiguration) หรือมีการปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นในการติดต่อแบบไดนามิก (Dynamic) ได้ด้วย โดยใช้การกรองแสง (Optical Filter) ที่ปรับค่าความยาวคลื่นแสง สวิตช์แสง อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เพิ่มและดรอปช่องสัญญาณแสง (Optical Add/Drop Multiplexer) และตัวแปลงค่าความยาวคลื่น ฯลฯ ข้อดีที่ได้รับคือ ทำให้เราสามารถนำค่าความยาวคลื่นกลับมาใช้งานได้ใหม่ (Wavelength Reuse) ได้ และโครงข่ายที่มีความยืดหยุ่นสูงมาก เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แบนด์วิธหน้าต่างย่านความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm [1]

จากรูปที่ 2.1 แสดงแบนด์วิธของการส่งสัญญาณแสงในหน้าต่าง 1310 nm และ 1550 nm ซึ่งจะยอมให้เกิดการใช้ช่องสัญญาณพร้อมกันจำนวนมากได้ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความกว้างเอกซาร์นี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมที่แคบ โดยมาตรฐาน ITU-T สำหรับ WDM ได้กำหนดระยะห่างของแต่ละช่องสัญญาณแสงไว้เท่ากับ 50 GHz หรือ 0.4 nm โดยพื้นฐานแล้ว WDM เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นที่ตายตัว เนื่องมาจากการล็อกเลเซอร์ให้ทำงานในโหมดการใช้งานเฉพาะทั่วไป ความถี่ของเลเซอร์จึงมีค่าตายตัว จากข้อกำหนดของ ITU-T G.694.1 ได้กำหนดความถี่เริ่มต้นของช่องสัญญาณแสงไว้ที่ 192.10 THz และระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz

ในโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบจุดต่อจุด เส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นถูกนำมาเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดแสง 1 ตัวและโฟโตดีเท็กเตอร์ 1 ตัว สัญญาณจากแหล่งกำเนิดแสงแต่ละตัว (1 ช่องสัญญาณ) จะรับส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ต่างกัน นอกจากนี้แหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้งานมีไลน์วิคต์ที่แคบ การรับ-ส่งข้อมูลแต่ละช่องสัญญาณดังกล่าว จึงใช้แบนด์วิคต์ของเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยมาก

ในวารสารทางวิชาการที่มีชื่อเสียงมักจะใช้คำว่า DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) มากกว่าที่ใช้คำว่า WDM ในส่วนของคำนี้มีได้หมายถึงบริเวณที่ใช้งานหรือเงื่อนไขการใช้งานที่ถูกต้อง แต่เป็นคำในอดีตที่นำมาใช้เรียก เพื่ออ้างถึงระยะห่างของช่องสัญญาณที่ถูกกำหนดไว้ตามข้อบังคับของ ITU-T G.694.1 การใช้งาน WDM ในยุคต้นๆ เป็นการเพิ่มแบนด์วิคต์ให้แก่โครงข่ายการส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุดที่มีการติดตั้งใช้งานอยู่ก่อนนี้แล้ว โดยการเพิ่มความยาวคลื่นที่มีระยะห่างกันเป็นจำนวนเท่าของ 10 nm หรือ 100 nm เพื่อที่จะออกแบบเลเซอร์ทางด้านเครื่องส่งแสงและฟิลเตอร์แสงทางด้านเครื่องรับที่ไม่ซับซ้อน จนกระทั่งปลายปี 1980 เลเซอร์สามารถปรับค่าความยาวคลื่นแสง ที่มีระยะห่างใกล้เคียงกันมากๆ ในบริเวณย่านความยาวคลื่น 1550 nm ได้เป็นจำนวนมาก จึงเรียกว่า “DWDM” และคุณลักษณะที่สำคัญของ WDM คือแต่ละค่าความยาวคลื่นสามารถที่จะสร้างค่าของคลื่นพหุที่อิสระต่อกัน (Orthogonal) ซึ่งสามารถกำหนดเส้นทางอย่างอิสระได้โดยปราศจากการแทรกสอดซึ่งกันและกัน แม้ว่าความเข้มแสงจะมีค่าเท่าก็ตาม ซึ่งเมื่อเกิดภาวะความเข้มแสงมีค่าต่ำนั้นหมายถึงว่าจะไม่สามารถส่งข้อมูลไปในระยะทางไกลๆ ได้ จึงต้องใช้อุปกรณ์ EDFA เพื่อขยายสัญญาณแสงให้มีความเข้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลกระทบที่ตามมา คือการเกิดปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสง เช่น เกิดการกระเจิง บริลลูอินที่ถูกกระตุ้น (SBS หรือ Stimulated Brillouin Scattering) และการผสมสี่คลื่น (FWM หรือ Four Wave Mixing) เป็นต้น ซึ่งปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้ จะส่งผลกระทบทำให้การติดต่อสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงนั้นแย่ง

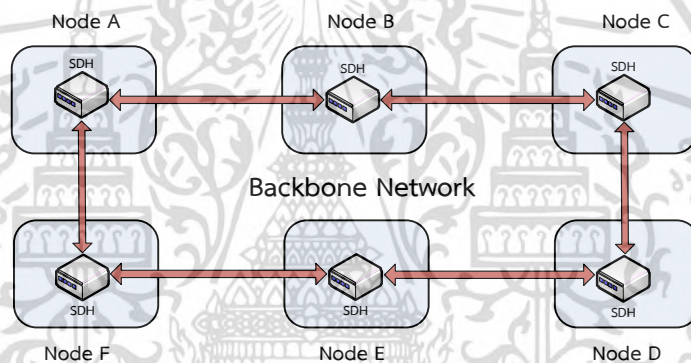
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ DWDM

ในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพสูง เรามักจะนึกถึงระบบ SDH/SONET ซึ่งโครงข่ายนี้จะถูกจัดให้มีโครงสร้างเป็นลูป (Loop) โดยในช่วงระหว่างสถานี ระบบสามารถขยายการติดต่อเข้ากับสถานีอื่นได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Add/Drop ซึ่งระบบ DWDM เองก็ต้องมีอุปกรณ์ชนิดนี้เช่นกัน เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับระบบเดิมที่มีใช้อยู่ก่อนหน้านี้ได้ โดยการทำงานของอุปกรณ์ตัวนี้ จะเป็นระบบทางแสงล้วนๆ อุปกรณ์ตัวนี้จึงมีชื่อเรียกเฉพาะว่า “Optical Add/Drop” หรือเรียกย่อๆ ว่า OADM ซึ่งย่อมาจาก “Optical Add/Drop Multiplexer” ในทำนองเดียวกัน สถานีสื่อสารบางสถานีทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่ จึงต้องมีอุปกรณ์ทำหน้าที่ติดต่อหรือเลือกเส้นทาง (Routing) เติมนข้อมูลในระบบให้ไปสู่ปลายทางอื่นๆ ในโครงข่ายที่ซับซ้อนได้ อุปกรณ์ตัวนี้เรียกว่า “Cross Connect” ซึ่งในระบบ DWDM ก็จะมีอุปกรณ์ตัวนี้เหมือนกัน แต่จะทำงานในเชิงแสงทั้งหมดเรียกว่า “Optical Cross Connect” หรือที่เรียกย่อๆ ว่า “OXC”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

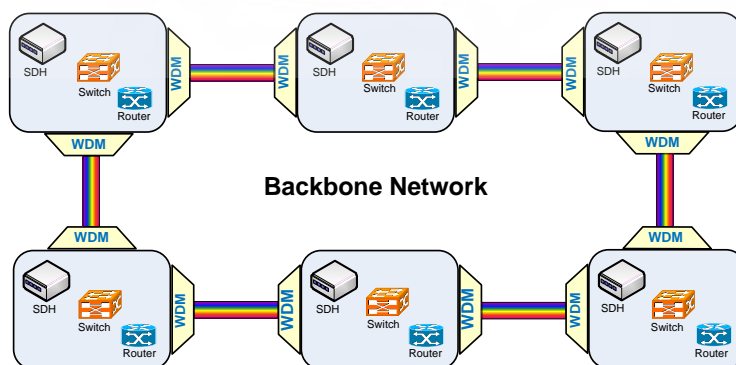
เมื่อข้อมูลเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงที่รวมกันทุกช่องสัญญาณมาก็จะถูกแยกออกให้เป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์เชิงแสง ที่เรียกว่า Optical Demultiplexer ซึ่งมีหลักการทำงานตรงข้ามกับ Optical Multiplexer หรือทำงานเหมือนกันก็ได้ เพียงแต่จะเพิ่มอุปกรณ์บางอย่างเข้าไปเพื่อให้ได้ฟังก์ชันทำงานตามต้องการ

เมื่อพิจารณาในระบบสื่อสารสัญญาณแบบเดิมที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่อยู่ต่างสถานที่กันเข้าเป็นเครือข่ายเดียวกัน จะพบว่ามีความเหมาะสมกับเครือข่ายที่มีความจุของข้อมูลจำนวนหนึ่งเท่านั้นเช่น 2.5 Gb/s (STM-16) หรือ 10 Gb/s (STM-64) แต่เมื่อเครือข่ายมีความต้องการความจุของข้อมูลในเครือข่ายเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ในเครือข่ายก็ไม่สามารถรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นได้เกินความสามารถที่อุปกรณ์จะทำได้ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แบบเดิมเพิ่มอีกหนึ่งชุด ทำให้ต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มอีกหนึ่งชุดเช่นกัน และนอกจากนั้นหากเครือข่ายเมื่ออุปกรณ์ต่างชนิดกันเช่นอุปกรณ์สื่อสารสัญญาณแบบ SDH และ Router แต่ติดตั้งในสถานที่เดียวกัน ก็ต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มอีกหนึ่งชุด ดังนั้นเมื่อเครือข่ายมีความจุของข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก็ทำให้ความต้องการเส้นใยแก้วนำแสงมีมากตามไปด้วย จนถึงจุดที่เกิดความขาดแคลนเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง [1]

เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงมีช่วงแบนด์วิธที่ใช้งานได้กว้างมาก ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นไปพร้อมกัน บนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันโดยไม่ให้มีการรบกวนกัน ซึ่งเรียกระบบแบบนี้ว่า “Wavelength Division Multiplexing (WDM)” ซึ่งสามารถช่วยให้เส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นสามารถส่งสัญญาณได้มากกว่า 1 ช่องสัญญาณ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากเส้นใยแก้วนำแสงเดิมได้มากขึ้น



รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในเครือข่ายของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM ซึ่งเทคโนโลยี WDM ในช่วงแรกจะเรียกว่า “Wideband WDM” เนื่องจากสัญญาณแสง มีความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ห่างกัน จากนั้นก็มีการพัฒนาเทคโนโลยี WDM ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (กริด) ที่แคบลงเรียกว่า “Narrowband WDM” และหลังจากนั้น เมื่อเทคโนโลยีของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) มีการพัฒนาจนมีอัตราการขยายสัญญาณแสงได้สูงขึ้น ประกอบกับการพัฒนาของอุปกรณ์กรองสัญญาณแสง (Optical Filter) ทำให้สามารถลดระยะระหว่างช่องสัญญาณให้แคบลงมากๆได้ เทคโนโลยีในลำดับต่อมาจึงถูกเรียกว่าเทคโนโลยี DWDM โดยสามารถส่งสัญญาณออกไปได้พร้อมๆกัน 16-40 ช่องสัญญาณมีระยะระหว่างช่องสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 100-200 GHz ซึ่งเทคโนโลยี DWDM ก็ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถส่งสัญญาณ ออกไปได้พร้อมกันประมาณ 64-160 ช่องสัญญาณ ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราเร็วในการขนส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Gb/s โดยระยะระหว่างช่องสัญญาณที่แคบลง จนอยู่ที่ประมาณ 25-50 GHz แต่ช่องสัญญาณก็จะได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณเป็นจำนวนมาก เมื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ถูกผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าว เพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้มากขึ้น และเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าให้มากที่สุดนั่นเอง



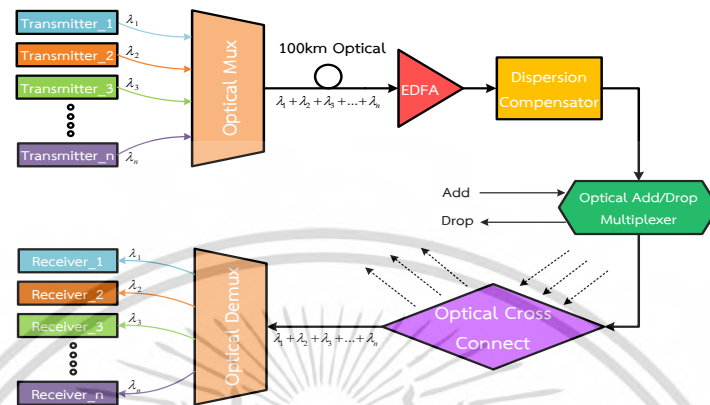
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์โครงข่าย DWDM ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

จากรูปที่ 2.4 เป็นภาพการใช้งานจริงของอุปกรณ์โครงข่าย DWDM ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์เครื่องส่งและอุปกรณ์เครื่องรับ ซึ่งในภาพเป็นการใช้งาน DWDM Alcatel-lucent 1626 LM ภายใต้มาตรฐาน ITU-T G.694.1

2.1.2 อุปกรณ์ของโครงข่าย DWDM

โครงข่าย DWDM เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถใช้กับระบบสื่อสารได้ทั้งระบบเล็กและใหญ่ สามารถสื่อสารได้ทั้งแบบ Point-to-Point หรือแบบ LAN ก็ได้ หรือจะใส่เข้าไปในโครงข่ายขนาดใหญ่อย่าง SDH/SONET ก็สามารทำได้ โดยในการใช้งานแต่ละงานอาจมีอุปกรณ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Component) ที่ประกอบมากน้อยต่างกัน ทั้งที่เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive Component) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องมีการป้อนพลังงานจากภายนอก และอุปกรณ์ประเภทแอ็กทีฟ (Active Component) ที่สามารถทำงานได้เลยโดยไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก โครงสร้างพื้นฐานของระบบ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบ DWDM [2]

2.1.3 อุปกรณ์เครื่องส่ง (Transmitter)

ในส่วนของผู้ส่งสัญญาณแสง คงจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ ซึ่งก็คือเลเซอร์ไดโอด (LD : Laser Diode) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเดินทางด้วยสัญญาณแสง ซึ่งเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ต้องมีค่าความกว้างแถบสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกหรือที่เรียกว่า “ไลน์วิธ (line width)” แคบๆ ทั้งนี้เพื่อลดผลของการเกิด Chromatic Dispersion ในระบบ DWDM ไลน์วิธของเลเซอร์ไดโอดต้องแคบมากๆ โดยจะต้องไม่มากไปกว่าระยะ Channel Spacing ของระบบมีค่า 1 nm แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีไลน์วิธน้อยกว่า 1 nm ด้วยซึ่งเลเซอร์ไดโอดขนาดดังกล่าวนี้จะมีราคาที่สูงมาก และหาได้ยาก จากความต้องการดังกล่าว ทำให้เกิดการพัฒนาคอนกรีตของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) สำหรับเลเซอร์ไดโอดแบบใหม่ๆ ร่วมกับเทคโนโลยีของการกรองแสงด้วยฟิลเตอร์ทางแสง (Optical Filter) ทำให้ได้ไลน์วิธแคบๆ ได้ตามต้องการ เพื่อสำหรับใช้กับระบบ DWDM ที่มีประสิทธิภาพสูงในเชิงพาณิชย์ได้

การมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้ากับแสง เป็นการใช้เทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์จะเรียกเทคนิคนี้ว่า “การมอดูเลตแบบภายใน (Internal Modulation)” ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตเพื่อรวมข้อมูลเข้ากับแสง ในรูปของสัญญาณแสงโดยตรง จะเรียกเทคนิคนี้ว่า “การมอดูเลตแบบภายนอก (External Modulate)” เมื่อแสงเดินทางอยู่ในตัวกลางหนึ่งซึ่งอาจเป็นอากาศ หรือภายในเส้นใยแก้วนำแสง หรือท่อแก้วแบนระนาบ (Optical Planar Waveguide) ในช่วงหนึ่งที่ถูกกระทำให้ตำแหน่งที่แสงเดินทางในช่วงนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพบางประการ ทำให้ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางในช่วงที่แสงเดินทางนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของแสงที่เดินทางถูกเปลี่ยนแปลงไปด้วย หากเมื่อเราสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหได้ ก็จะสามารถควบคุมคุณสมบัติของแสงที่เดินทางได้ด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้สัญญาณข้อมูลไฟฟ้าที่ต้องการเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห ผลลัพธ์ก็คือแสงถูกมอดูเลตเข้ากับข้อมูลทาง

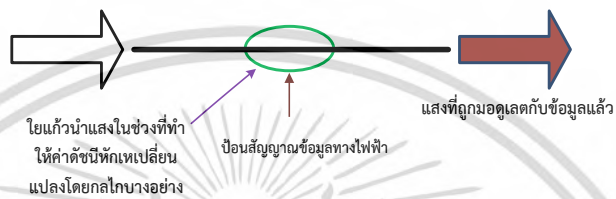
ไฟฟ้านั้นหลังจากที่แสงเดินทางผ่านออกจากส่วนของตัวกลางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อตัวกลางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปขอปรับแก้ไขเนื้อหา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงเดินทางช่วงหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห ซึ่งควบคุมโดยสัญญาณข้อมูล แสงที่เดินทางออกจากตัวกลางในช่วงนั้น จะมีสัญญาณข้อมูลผสมรวมเข้ามาด้วย โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ในการมอดูเลตแบบภายนอกนี้จะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1. อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์โทรออปติกส์ (Electro Optic Devices) ซึ่งอาศัยสนามไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของท่อนำสัญญาณแสงโดยตรง
2. อุปกรณ์ประเภทอะคูสโตออปติกส์ (Acousto-optic Devices) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของท่อนำสัญญาณแสง โดยที่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลนี้ถูกควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง

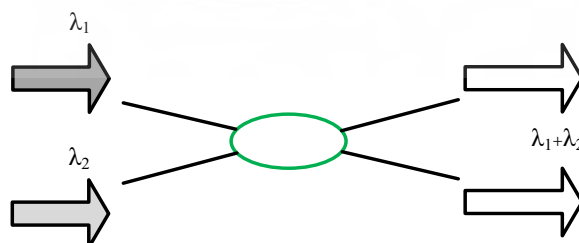


รูปที่ 2.6 การมอดูเลตภายนอก (External Modulation) [2]

2.1.4 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (Multiplexer)

มัลติเพล็กซ์ (MUX) ที่ใช้ในการรวมแสงหลายช่องสัญญาณมีหลายลักษณะเช่น

ก. คัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Coupler) เป็นการรวมแสงจากแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงโดยตรง จากรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างของคัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสงแบบ 2x2 สัญญาณแสงสองสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จะถูกส่งเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงต่างเส้นกัน เมื่อแสงเดินทางผ่านคัปเปิลอร์ แสงทั้งสองความยาวคลื่นจะถูกรวมกันหลังจากเดินทางออกจากคัปเปิลอร์ ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้แสงขาออกเพียงเส้นเดียว ในกรณีที่ต้องการรวมแสงหลายช่องสัญญาณ ก็ออกแบบให้คัปเปิลอร์มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงด้านอินพุตให้เท่ากับจำนวนช่องสัญญาณตามต้องการ โดยอาจกำหนดให้เส้นใยแสงขาออกมีเพียงเส้นเดียวก็ได้ อุปกรณ์ชนิดคัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสงนี้ ถือว่าเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive Device) คือสามารถทำงานได้เลยทันที



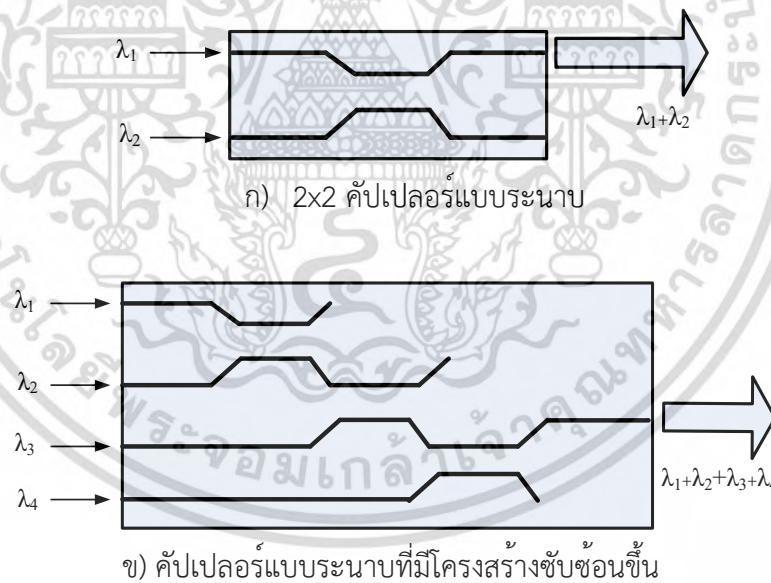
รูปที่ 2.7 คัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสงแบบ 2x2 สำหรับมัลติเพล็กซ์แสง 2 ช่องสัญญาณ [2]

ข. คัปเปิลอร์แบบระนาบ (Optical Planar Coupler) มีหลักการทำงานเหมือนคัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสง เพียงแต่ท่อนำสัญญาณแสงจะเป็นแบบระนาบ ไม่ได้เป็นเส้นใยแก้วนำแสงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

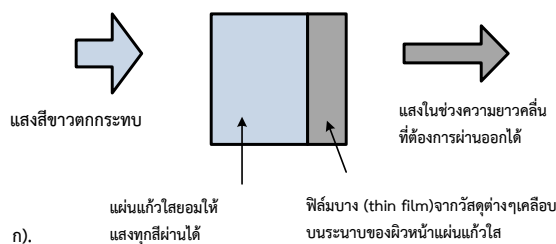
ดังตัวอย่างที่ 2.8 ซึ่งจะแสดงท่อนำคลื่นสัญญาณเป็นเส้นหนา ผังตัวอยู่บนแผ่นรูปสี่เหลี่ยมที่อาจเป็นแผ่นแก้วสไลด์ หรือเวเฟอร์ จากรูปจะเห็นว่าการทำงานของมัน เพื่อคัปปลิงสัญญาณแสงหลายช่อง อาจเพิ่มโครงสร้างของมันให้มีความซับซ้อนขึ้น ดังในรูปที่ 2.8

ค. ออปติคอลฟิลเตอร์ (Optical Filter) เป็นการรวมแสงแสงเมื่อตัวกลางแสงเป็นอากาศ หลักการทำงานพื้นฐานของมันแสดงดังรูปที่ 2.9ก ซึ่งใช้เทคโนโลยีของฟิล์มบาง (Thin Film) ที่ทำจากวัสดุที่กำหนด เคลือบลงบนผิวระนาบของแผ่นแก้วใส ซึ่งการเคลือบฟิล์มบางนี้อาจมีหลายชั้น แต่ละชั้นอาจใช้วัสดุที่ไม่เหมือนกัน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ ทำให้แสงเดินทางผ่านบางความยาวคลื่น ถูกบล็อกกั้นไว้ ในขณะที่แสงบางความยาวคลื่นสามารถเดินทางผ่านออกไปได้ จะมีลักษณะคล้ายกับหลักการทำงานของตัวดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexer) นั่นเอง จากคุณสมบัติตรงนี้ ถ้านำมาจัดโครงสร้างเป็นกล่องเล็กๆดังรูปที่ 2.9ข โดยภายในกล่องนี้แสงทุกความยาวคลื่นผ่านได้ และข้างกล่องจะมีช่องให้แสงผ่าน โดยจะมีออปติคอลฟิลเตอร์ปิดกั้นไว้ ฟิลเตอร์นี้ออกแบบให้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการผ่านได้เท่านั้น ถ้าเป็นแสงย่านความยาวคลื่นอื่นจะเกิดการสะท้อน ทำให้เอาที่พุดสุดท้ายเกิดเป็นแสงรวมที่มีทุกความยาวคลื่น (ทุกช่องสัญญาณ) ส่งออกและพร้อมที่จะเดินทางสู่ปลายทางต่อไป เทคโนโลยีฟิล์มบางนี้ อาจใช้เคลือบที่หน้าตัดตอนปลายของเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อให้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นฟิลเตอร์ไปด้วยก็ได้

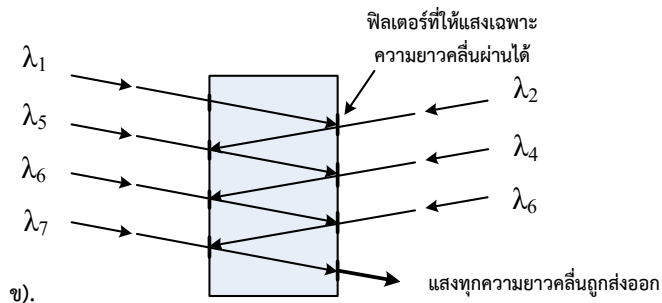
ง. อื่นๆ เช่น เกรตติ้งเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Grating) ท่อนำแสงระนาบแบบอาร์เรย์ (Array Planar Optical Waveguides) เป็นต้น



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของคัปเปิลเลอร์แบบระนาบ [2]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

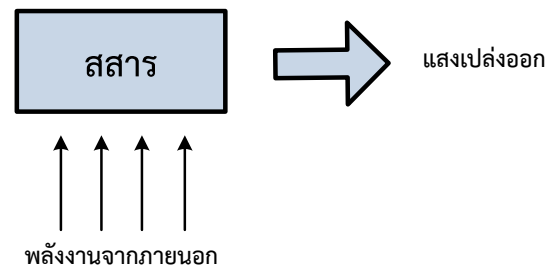


รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของออปติคคอลลฟิลเตอร์ในรูป ก) และ MUX ในรูป ข) [2]

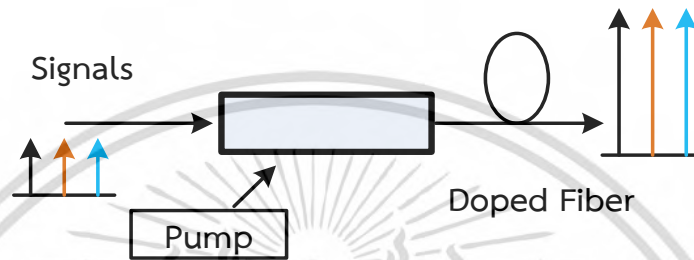
2.1.5 สถานีขยายสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง (Optical Amplifier (OA))

หลักการทำงานของสถานีขยายสัญญาณแสง หรือ Optical Amplifier มีหลักการทำงานองเดียวกับการสร้างแสงเลเซอร์ ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่ใช้การกระตุ้นพลังงานจากภายนอกเข้าไปในสสาร แล้วทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของมันเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากธรรมชาติของอิเล็กตรอน มันจะไม่สามารถคงอยู่สถานะเดิมของมันได้ และจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกที่ป้อนให้ก่อนหน้านั้น มันจะคายพลังงานส่วนเกินนั้นออกมาในรูปของพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสสารเพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลับสู่สถานะเดิมได้ หากเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม พลังงานส่วนเกินที่อิเล็กตรอนคายออก ก็จะกลายเป็นพลังงานของแสงตามที่เราต้องการได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 หากเราสร้าง Optical Amplifier ให้เกิดขึ้นบนเส้นใยแก้วนำแสงได้เลย จะเรียกว่าเป็น “OFA (Optical Fiber Amplifier)” หรือเรียกสั้นๆ ว่า “Fiber Amplifier” วัสดุที่สามารถแปลงแสงสีเขียวกับแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงในกระบวนการของ Fiber Amplifier มีหลายชนิด เช่น ธาตุเออร์เบียม (Erbium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน และธาตุนีโอดีเมียม (Neodymium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.33 ไมครอน

ในทางปฏิบัติเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษจะถูกสร้างขึ้น ให้มีส่วนประกอบของสารเหล่านี้ในส่วนหนึ่งของคอร์ของเส้นใยแก้วนำแสง ในระบบสื่อสารปัจจุบันมักเลือกใช้ธาตุเออร์เบียมผสมเข้ากับเนื้อแก้วในส่วนหนึ่งของคอร์ของเส้นใยแก้วนำแสง ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ถูกเรียกว่า “EDF หรือ Erbium-Doped Fiber” ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยแก้วนำแสงธรรมดาทั่วไป และเมื่อนำ EDF มาใช้ในการขยายสัญญาณแสงจะเรียกว่า “EDFA หรือ Erbium-Doped Fiber Amplifier” แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิด EDF จะมีพฤติกรรมเหมือนเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงทั่วไป คือเกิดการลดทอนสัญญาณและเกิด Dispersion ตามปกติ โดยจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ กับสัญญาณข้อมูล แต่ถ้าทำการกระตุ้นเส้นใยแก้วนำแสงพิเศษนี้ ด้วยการป้อนพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น 980 nm ให้กับ EDF ข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน ที่เดินทางผ่านเข้าไปใน EDF จะถูกทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากการรวมกันทางความเข้มแสงของสัญญาณเดิมที่นำข้อมูลกับสัญญาณแสง ที่เปล่งออกมาใหม่ จากการกระตุ้นพลังงานเข้าไป (ซึ่งแสงทั้งสองนี้ต้องมีขนาดความยาวคลื่นที่ตรงกัน) จึงเสมือนกับการขยายสัญญาณข้อมูลแสง ที่เดินทางในระบบสายส่งให้มีความเข้มแข็งแสงเพิ่มขึ้น และพร้อมที่จะเดินทางไปในระยะทางที่ไกลออกไปได้



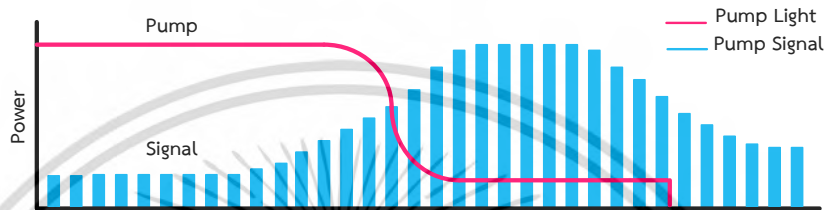
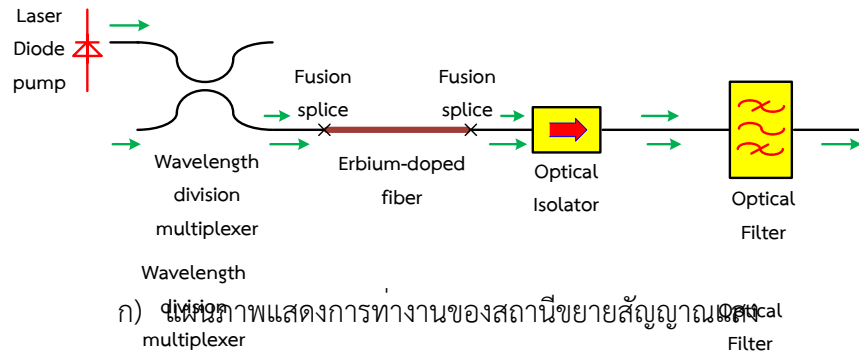
รูปที่ 2.10 การเกิดแสงของสสารเมื่อถูกกระตุ้น [2]



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของ EDFA [2]

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณที่ใช้ EDF ต่อแทรกเข้าไปในระบบสายส่ง ข้อมูลแสงในระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน จะเดินทางผ่านคัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Coupler) ออกไป ในขณะที่สัญญาณอินพุตอีกทางหนึ่งของคัปเปิลอร์เส้นใยแก้วนำแสง จะถูกป้อนด้วยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 980 nm ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้น EDF แสงทั้งสองที่เดินทางรวมกัน ออกจากคัปเปิลอร์ในช่วงของเส้นใยแก้วนำแสงธรรมดาจะไม่มีอะไรเกิดขึ้น ข้อมูลแสงเดิมก็ยังคงมีความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อแสงเดินทางเข้าไปในส่วนของ EDF แสงที่มีความยาวคลื่น 980 nm จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่าการปั๊ม (Pump) และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาเพื่อรักษาสภาวะของตัวมัน จะได้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน เมื่อรวมกับข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน ก็จะทำให้สัญญาณพัลส์แสงมีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นตามความยาวของ EDF และสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงธรรมดาที่เป็นสายส่งได้ต่อไป ในขณะที่เดียวกันพลังงานของแสงที่นำมาปั๊ม (ที่ 980 nm) ก็จะมีค่าลดลงและจางหายไปมากที่สุด อย่างไรก็ตามขนาดความยาวของ EDF ที่มีค่ามากๆ มิได้หมายความว่าจะทำให้ความสามารถในการขยายสัญญาณแสงเพิ่มขึ้นเสมอด้วย แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดความยาวที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น อุปกรณ์ Optical Isolator ที่เห็นในรูป ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของแสงให้เดินทางไปในทิศทางที่ต้องการ และไม่สะท้อนกลับมารบกวนกับระบบ Isolator นี้จะมีหรือไม่มีก็ได้แต่สภาพโดยรวมของระบบ และการใช้งานในทางปฏิบัติ ระบบ OFA ที่เป็น EDFA มักจะมีขนาดเล็กเพียงแค่อุปกรณ์กล่องใส่ดินสอเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สัญญาณแสงที่ถูกการขยายโดย EDFA
รูปที่ 2.12 โครงสร้างสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDFA [2]

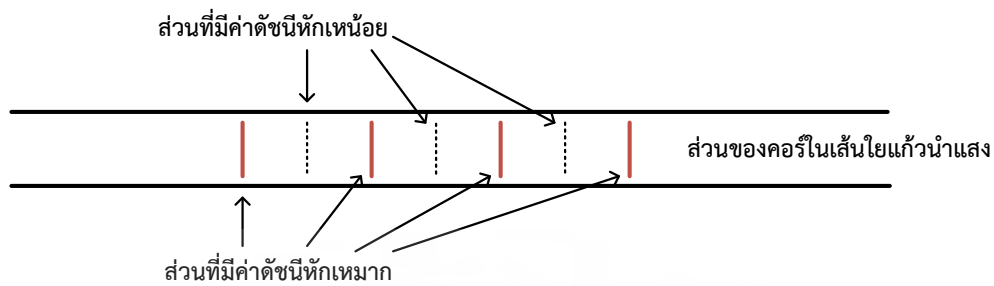
2.1.6 อุปกรณ์ชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion Compensator)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับชดเชยปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นกับสัญญาณพัลส์แสง ที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงถือเป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างใหม่ และมีหลักการที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งจะยกตัวอย่างดังนี้

ก) การใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่างชนิดกันแทรกไปในระหว่างระยะสายส่ง วิธีการนี้จะอาศัยหลักการ การเกิดดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงมีทั้งที่เป็นบวกและลบ (ทางคณิตศาสตร์) กล่าวได้คือเป็นสัญญาณพัลส์แสงเล็กๆ ที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งสัญญาณพัลส์แสงเดินทางไปได้ระยะทางหนึ่ง สัญญาณจะบานออก ก็คือเกิดดิสเพอร์ชันที่เป็นบวกและลบ ซึ่งไม่ว่าสัญญาณพัลส์จะเป็นบวกหรือลบ ก็ทำให้พัลส์บานออกด้วยกันทั้งคู่ ถ้าเรานำเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นมาต่อเข้าด้วยกัน โดยเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้น มีคุณสมบัติการเกิดดิสเพอร์ชันตรงข้ามกัน ผลลัพธ์ก็คือค่าดิสเพอร์ชันเกิดการชดเชยหรือคอมเพนเสต (Compensate) คือทำให้ขนาดความกว้างพัลส์มีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์เลยทีเดียว

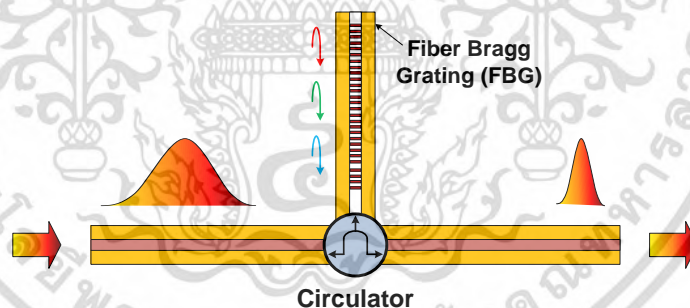
ข) การใช้เกรตติ้งเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Grating) จะมีโครงสร้างเหมือนกับเส้นใยแก้วนำแสงธรรมดาทุกประการ แต่ถูกทำให้ค่าดัชนีหักเหของคอร์ตามความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามระยะทาง แต่จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งในช่วงระหว่างจุดที่มีค่าดัชนีหักเหมากที่สุดและน้อย ค่าดัชนีหักเหของคอร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากมากมาน้อยและจากน้อยมามาก ช่วงระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่มีค่าดัชนีหักเหมากที่สุดที่อยู่ใกล้กันเรียกว่า “คาบของเกรตติ้ง หรือ Grating Period” ซึ่งจะมีค่าไม่มากคือในเทอมของนาโนเมตรถึงไมโครเมตร สำหรับความยาวของช่วงที่ดัชนีหักเหของคอร์ มีโครงสร้างเป็นเกรตติ้งเรียกว่า “ความยาวเกรตติ้ง หรือ Grating Length” เกรตติ้งเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีโครงสร้าง

ดังกล่าวนี้ถือเป็นเกรตติงเส้นใยแก้วนำแสงแบบแบร็ก ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า “Fiber Bragg Grating (FBG)”



รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของเกรตติงเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Grating) [2]

เกรตติงเส้นใยแก้วนำแสง มีคุณสมบัติพื้นฐานคล้ายกับระนาบกระจก คือสามารถปล่อยให้แสงที่มีความยาวคลื่นแสงบางค่า เดินทางผ่านออกไปได้ ในขณะที่เดียวกันแสงในช่วงของความยาวคลื่นที่เหลือจะสะท้อนกลับออกมา เมื่อนำ FBG มาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ทางแสงบางอย่าง ดังรูปที่ 2.14 จะทำให้ได้อุปกรณ์ที่เป็น Dispersion Compensator สำหรับอุปกรณ์ที่เป็น Circulator ที่เห็นในรูปนั้น มีหลักการทางานคล้ายกับวงเวียน ให้แสงเดินทางตามเข็มนาฬิกา เมื่อวนไปเจอทางออกใดก่อน แสงก็จะเดินทางออกไปทางนั้น สำหรับหลักการของ Circulator พัฒนามาจาก Isolator คือมักใช้หลักการเดินทางผ่านของแสงผ่านตัวกลางตามทิศทางโพลาไรเซชันของแสงตามที่กำหนด

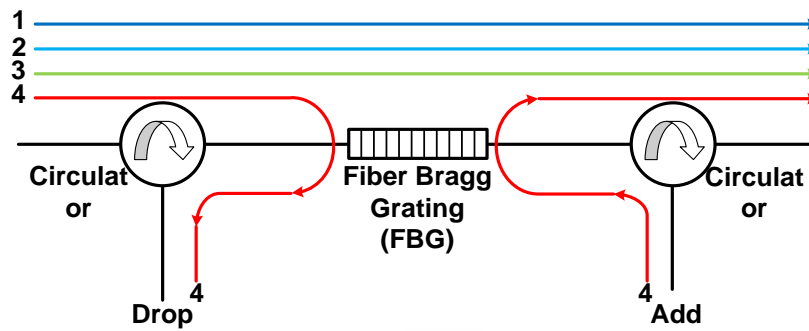


รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของ Dispersion Compensator ที่ใช้ Fiber Grating [2]

2.1.7 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เพิ่มและดรอปช่องสัญญาณ (Optical Add/Drop Multiplexer)

OADM ทำหน้าที่ให้สถานีในระบบสื่อสารสามารถรับรู้ข้อมูลแสงเฉพาะของสัญญาณที่กำหนด และใส่ข้อมูลไปยังปลายทาง โดยใช้ช่องสัญญาณ (ความยาวคลื่นแสง) ที่กำหนดด้วยเช่นกัน อีกทั้ง OADM ยังสามารถแทรกเพิ่มเข้าไปในสายส่งเดิม ในช่วงระหว่างสถานีได้อีกด้วย หลักการทางานพื้นฐานของ OADM แสดงด้วยรูปอุปกรณ์จริง ซึ่งจะใช้ FBG เป็นทำนองเดียวกัน ข้อมูลในช่องสัญญาณจะถูกส่งออกหรือเพิ่มเข้าไปใน FBG แล้วสะท้อนกลับผ่าน Circular ส่งออกไปยังปลายทาง ลักษณะของ FBG และ Circulator ที่เป็นเส้นใยแก้วนำแสง มีขนาดเล็กประมาณมิลลิเมตร และความยาวของอุปกรณ์เพียง 5-15 เซนติเมตร เท่านั้น

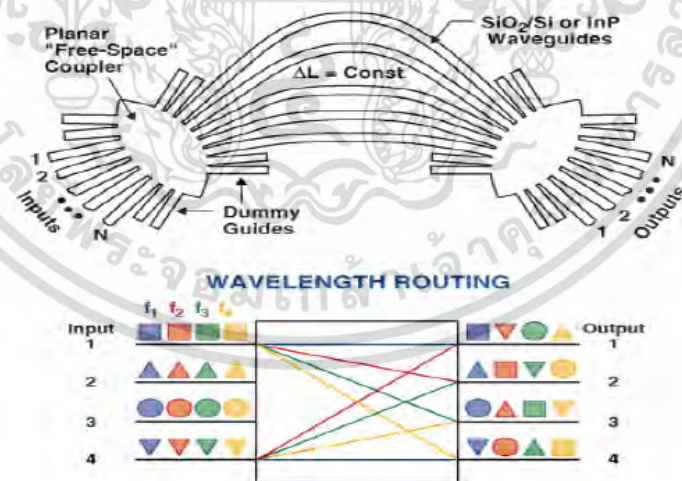
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างพื้นฐาน OADM [2]

2.1.8 Optical cross connect (OXC)

OXC เปรียบเสมือนกับสถานีรถไฟโดยสารตามต่างจังหวัด ตามหัวเมืองใหญ่ๆ (เมื่อเปรียบเสมือนเส้นใยแก้วนำแสง) ซึ่งเป็นจุดที่ผู้โดยสารสามารถเลือกเปลี่ยนเส้นทางรถไฟโดยสาร เพื่อเดินทางไปยังปลายทางที่ต้องการได้ โครงสร้างของ OXC แบบหนึ่งในลักษณะของท่อนำแสงแบบระนาบ (Optical Planar Waveguide) ที่มีทางเดินแสงขาเข้า (ด้านซ้าย) หลายช่องสัญญาณ เมื่อแสงเดินทางผ่านไปในช่วงกลางที่โค้งและมีลักษณะขนานกัน แสงจะเกิดการคัปปลิง (Coupling) ระหว่างท่อนำแสงหนึ่งไปสู่อีกท่อนำแสงหนึ่งที่ต้องการแล้วออกไปยังปลายทางได้ ทั้งนี้คุณสมบัติการคัปปลิงแสงจะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อนำแสง ลักษณะความโค้ง ระยะที่ท่อนำแสงห่างกันไปจนถึงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่เป็นท่อนำแสงและฐาน (Substrate) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบ OXC แบบนี้ให้ทำงานตามที่กำหนด ต้องใช้ความรู้และทักษะอย่างสูง



รูปที่ 2.16 โครงสร้าง OXC ที่ใช้ Optical Planar Waveguide [2]

2.1.9 Optical Demultiplexer (DeMux)

หลักการทำงานของ Demultiplexer มีลักษณะเช่นเดียวกับ Multiplexer โดยปกติอุปกรณ์ที่เป็น Multiplexer มักสามารถทำงานเป็น Demultiplexer ได้ด้วย เช่น Optical Filter ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ระบบ Multiplexer ที่กล่าวมาแล้ว ถ้าแยกออกมาใช้ก็จะทำหน้าที่เป็น Demultiplexer นั้นเอง [2-3]

2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแก้วนำแสง (Non-linear Fiber Optic)

ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง เป็นสิ่งที่มีความสำคัญของระบบสื่อสารด้วยแสง ทั้งในด้านคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ และลักษณะที่ต้องหลีกเลี่ยง ซึ่งจะต้องนำมาพิจารณา เมื่อมีการออกแบบระบบสื่อสารระยะทางไกลและมีอัตราการส่งข้อมูลสูง ซึ่งหมายความรวมถึง ระดับพลังงานแสงที่สูงขึ้นด้วย และในกรณีที่มีการส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่นหลายๆ ค่าไปพร้อมๆ กัน ผลกระทบที่ตามมาจากการสื่อสารไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่

1. มีแบนด์วิดธ์เพิ่มขึ้น
2. เฟสและรูปร่างของสัญญาณเปลี่ยนไป
3. การสร้างสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นอื่นๆ เมื่อมีการใช้กำลังของสัญญาณในจุดเริ่มต้น
4. สัญญาณรบกวนข้างเคียง (Cross Talk) ระหว่างสัญญาณที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน และการโพลาไรซ์ของสัญญาณแสง

ซึ่งผลกระทบจากสองกรณีแรก เกิดจากการมอดูเลตแบบ Self-phase สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างโซลิตอน การใช้พัลส์ในรูปแบบของโซลิตอนในการส่งข้อมูล โซลิตอนเป็นพัลส์แสงที่เกิดจากสมดุลระหว่างดิสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงหักล้างกับผลที่เกิดขึ้นจากดิสเพอร์ชันแบบโครมาติก (Chromatic Dispersion) ทำให้ได้พัลส์ที่ส่งผ่านเข้าไปในใยแก้วที่ประกอบด้วยความไม่เป็นเชิงเส้น แต่ไม่มีความผิดเพี้ยน หรือเปลี่ยนรูปร่าง ในกรณีที่ 3 และ 4 เป็นผลกระทบที่เกิดจาก Stimulated Raman Scattering หรือ Stimulated Brillouin Scattering หรือ Four Wave Mixing ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เมื่อต้องการสร้างหรือขยายความยาวคลื่นเพิ่มเติม แต่ผลกระทบดังกล่าวมักจะเป็นสิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้นในระบบโดยทั่วไป

ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง (Nonlinear Optic) จะเกิดขึ้นกับสัญญาณแสงที่มีค่าระดับพลังงานที่สูง และแพร่กระจายไประยะทางไกล เมื่อผ่านกระบวนการขยายสัญญาณแสงให้มีความเข้มสูงขึ้นจากอุปกรณ์ EDFA ดังนั้นการสื่อสารที่มีระยะทางไกล เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นวิธีการที่สำคัญสำหรับการหลีกเลี่ยงจากผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น ในเส้นใยแก้วนำแสงก็คือกระบวนการที่ทำให้เฟสตรงกัน หรือใกล้เคียงกันซึ่งจะเกี่ยวข้องกับขีดจำกัดของพลังงานในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเช่นกัน [1]

2.3 ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ในเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อระบบ DWDM เป็นผลทำให้สัญญาณที่เครื่องรับปลายทางมีค่าอ่อนลง

ท่อนำคลื่น (Waveguide) เส้นใยแก้วนำแสงที่ผลิตจากแก้วที่ไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการของความไม่เป็นเชิงเส้นนั้น สามารถเกิดขึ้นได้กับค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความเข้มสูง และการแพร่กระจายในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีระยะทางไกล ถึงแม้ว่าระดับพลังงานจะมีค่าเป็นปกติ (เพียงไม่กี่ 10 มิลลิวัตต์) ภายในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความเข้มสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีขนาดเล็กอยู่ระหว่าง 10^{-7} และ 10^{-8} cm^2 จึงนำไปสู่ความเข้มที่มีขนาด MW/cm^2 ใดๆก็ตาม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารที่มีระยะทางไกล คือปัจจัยหลักสำคัญ ที่เป็นผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง ดังนั้นกระบวนการที่ทำให้เฟสมีค่าตรงกัน หรือใกล้เคียงกัน วิธีหลีกเลี่ยงผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่ต้องการนั้น มักจะเกี่ยวข้องกับขีดจำกัดของพลังงานในเส้นใยแก้วนำแสง ให้เลือกพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น เฟสที่เกิดขึ้นไม่ตรงกัน ดังนั้นอาจรวมไปถึงการเลือกค่าความยาวคลื่น หรือระยะระหว่างความยาวคลื่นในระบบ WDM หรืออาจจะเกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อนำคลื่นเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง

ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง คือปรากฏการณ์ที่ทำให้สัญญาณแสงผิดรูปร่างไป กล่าวคือแสงที่มีความเข้มในสภาวะปกติเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง จะส่งผลให้ดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) ของเส้นใยแก้วนำแสงตอบสนองเป็นแบบเส้นตรง (Linear) แต่เมื่อแสงมีความเข้มสูงจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (จากการส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นไปพร้อมกัน) จะส่งผลให้ Refractive Index เกิดความไม่เป็นเชิงเส้น และการแพร่กระจายของแสง (Polarize) เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเช่นกัน

ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นเกิดจาก 2 สาเหตุหลักได้แก่ เกิดจากการลดทอนและดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ของแสงในตัวกลาง และการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของแสง ที่เกิดจาก Self Phase Modulation (SPM) Cross Phase Modulation (CPM) และ Four Wave Mixing (FWM)

ปัญหาผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง ที่เกิดขึ้นในระบบเครื่องส่งแบบ DWDM จากการส่งสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสงไปเป็นระยะทางไกลๆ มาจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง “Erbium Dope Fiber Amplifier” (EDFA) เพื่อกระตุ้นให้สัญญาณแสงให้มีความเข้มสูงขึ้น ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับระบบเครื่องส่งที่มีอัตราส่งข้อมูลสูงกว่า 10 Gb/s [4]

ในระบบ DWDM ปัญหาดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่จุดหลังจาก EDFA ขยายสัญญาณด้านเครื่องรับปลายทางนั่นเอง (แสดงในรูปที่ 2.17) เมื่อสัญญาณแสงถูกส่งออกมาพร้อมๆ กันหลายช่องสัญญาณ จะเกิด FWM ที่ทำให้สัญญาณผิดรูปร่างไปที่จุด N-channel DWDM MUX ดังนั้นเมื่อมีการขยายสัญญาณแสงด้วย EDFA จะยิ่งส่งผลให้เกิด ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงเป็นทวีคูณ

จุดกำเนิดของแสงที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกผสมกันแล้วส่งผ่านไปยังตัวกลาง ซึ่งเกิดจากการรวมกันกับแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้ม การแพร่กระจายประกอบไปด้วยอาเรย์ของเฟสที่มีค่าลดลง ในขณะที่ไดโพล คือฟังก์ชันความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดจากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่นำไปใช้งานในสภาวะปกติ ไดโพลจะเกิดขึ้นเพียงอันเดียว กรณีของแสงที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นถูกส่งออกไป การแพร่กระจายในตัวกลางที่เหมาะสม ภายในผลที่เกิดขึ้นจริงของสนามไฟฟ้า

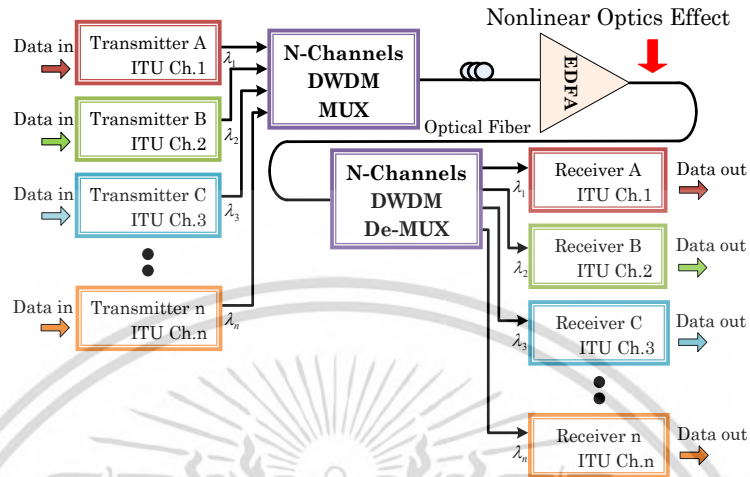
$$\rho = \epsilon_0 [\chi^{(1)} \cdot \zeta + \chi^{(2)} \cdot \zeta\zeta + \chi^{(3)} \cdot \zeta\zeta\zeta + \dots] = \rho_L + \rho_{NL} \quad (2.1)$$

ซึ่งในเทอมของ χ ที่เป็นเชิงเส้นอันดับ 2 และอันดับ 3 กระบวนการของความไม่เป็นเชิงเส้นได้อธิบายผลที่เกิดขึ้นให้เห็นทั้ง 2 ชั้น หรือมากกว่าขอบเขตเส้นใยแก้ว จากโพลาริซความไม่เป็นเชิงเส้น ρ_{NL} ประกอบด้วยเทอมทั้งหมดของอันดับ 2 และอันดับที่สูงขึ้นไป ตามสมการที่ (2.1)

เทอมอันดับ 2 ในสมการที่ (2.1) (ที่เกี่ยวข้องกับ $\chi^{(2)}$) จะอธิบายถึง 3 ปรากฏการณ์คลื่นที่ผสมกัน เช่นการเกิดขึ้นของฮาร์โมนิกที่ 2 เทอมอันดับ 3 จะอธิบายถึงกระบวนการของ FWM และ Stimulated Scattering Phenomena (ปรากฏการณ์การกระเจิงที่ถูกกระตุ้น) ในกรณีของเส้น

เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใยแก้วนำแสง กระบวนการอันดับ 2 โดยทั่วไปมักจะเป็นไปไม่ได้ แต่ผลกระทบดังกล่าวเหล่านี้ต้องการความเป็นสมมาตร ในท่อนำคลื่นชนิดที่ไม่มีรูปทรง ผลกระทบอันดับ 3 (ที่เกี่ยวข้องกับ $\chi^{(3)}$) แม้ว่าการเกิดขึ้นของฮาร์โมนิกที่ 2 สามารถสังเกตได้



รูปที่ 2.17 ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสง [1]

การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างขอบเขตและการโพลาไรซ์ สามารถอธิบายโดยสมการคลื่นที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$$\nabla^2 \zeta + n_0^2 \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \rho_{NL}}{\partial t^2} \tag{2.2}$$

เมื่อ ζ และ ρ คือผลรวมของสนามไฟฟ้า และการโพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ไดนาเมอ และเมื่อ n_0 คือค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง สมการเชิงอนุพันธ์อันดับ 2 จะมีคำตอบลงเมื่อผ่านอันดับแรกด้วย Slowly Varying Envelope Approximation (SVEA)

$$\left| \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right| \ll \left| \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial E}{\partial z} \right| \tag{2.3}$$

เมื่อ E คือ Complex Field Amplitude ความหมายของ SVEA คือการเปลี่ยนแปลงระยะความกว้างที่เกิดขึ้นในระยะความยาวคลื่น ที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงในอัตราการเปลี่ยนแปลงในระยะเดียวกัน สมการของคลื่นจะแยกตามค่าความถี่หรือทิศทาง การแพร่กระจาย ดังนั้นผลลัพธ์คือสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสองนั่นเอง ภายใต้ SVEA เป็นอันดับแรก สิ่งเหล่านี้เป็นการอธิบายการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระยะ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผสมกันของคลื่นแสงนั่นเอง

ความต้องการสำหรับเฟสที่ตรงกันเป็นคลื่นโพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และสนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างคลื่นแพร่กระจายที่เป็นเฟสเดียวกัน ค่าความเร็วของเฟสมีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระบวนการที่ทำให้เฟสตรงกันในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น จะเกี่ยวข้องกับสมการที่ (2.1) การปฏิสัมพันธ์ของคลื่นที่มีความยาวและการโพลาไรซ์ทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกับการมอดูเลตแบบ Self Phase และ Cross Phase เช่นเดียวกับการเสื่อมของการปฏิสัมพันธ์ชนิด “Kerr” และสมการที่ (2.2) การ

บวนการกระเจิงแบบ Stimulated (Raman and Brillouin) นอกเหนือจากการมอดูเลตแบบ Cross เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกพันไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase เกี่ยวข้องกับ 2 ความยาวคลื่น กระบวนการของ FWM เกี่ยวข้องกับความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน สามารถเกิดขึ้นได้กับเฟสที่ไม่ตรงกัน แต่ยังคงสามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นความไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างกัน สามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งผลกระทบแต่ละชนิด มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวอื่นๆ ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นมักเกิดขึ้นในรูปพัลส์ ดังนั้นค่ากำลังสูงสุดสามารถหาค่าประสิทธิผลด้วยการเทียบกับค่ากำลังเฉลี่ย ของการผสมกันระหว่างสัญญาณพัลส์ที่มีประสิทธิภาพ

การเกิดผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น จะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโนดในเครือข่ายที่มีการเชื่อมโยงเข้าหากัน และพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อระยะทางระหว่างโนดมีค่าสูงมาก ก็จะทำให้เกิดผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความรุนแรงขึ้น แม้ว่าจะสามารถส่งสัญญาณได้เป็นปกติทั้งเครือข่าย แต่สิ่งที่ได้ก็คือคุณภาพของสัญญาณที่อ่อนลง เนื่องจากการลดทอนจากค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง การพิจารณาผลกระทบดังกล่าว จะสามารถจำลองค่ากำลังของสัญญาณมีค่าคงที่ตลอดระยะทางประสิทธิผล (Effective Length : L_e) ซึ่งแสดงผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 2.19

เมื่อกำหนดให้ P แทนกำลังของสัญญาณแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง และอีกค่าที่สำคัญคือ $P(z) = Pe^{-\alpha z}$ แทนกำลังของสัญญาณแสง ที่ระยะทาง z ใดๆ ระหว่างโนดในเครือข่าย เมื่อ α แทนค่าการลดทอน เนื่องจากสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสงและ L แทนระยะทางจริงระหว่างโนดในเครือข่าย จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

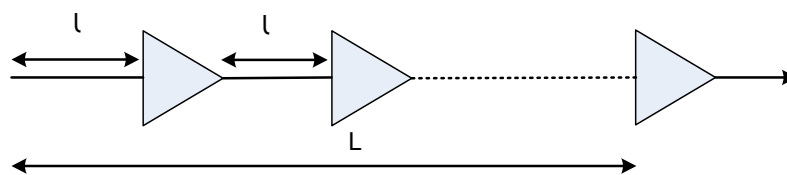
$$PL_e = \int_{z=0}^L P(z) dz \tag{2.4}$$

ซึ่งจะได้ระยะทางประสิทธิผล คือ

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \tag{2.5}$$

ในระบบที่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณด้วยแสง สัญญาณที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในแต่ละจุดขยายสัญญาณจะไม่มีผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจากช่วงที่ผ่านมา ดังนั้นระยะทางประสิทธิผลของเครือข่าย จะเป็นผลรวมของระยะทางประสิทธิผล แต่ละช่วง เช่นในเครือข่ายที่มีระยะทาง L และมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงทุกๆ ระยะ l จะสามารถประมาณความยาวประสิทธิผลได้ดังนี้

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \frac{L}{l} \tag{2.6}$$



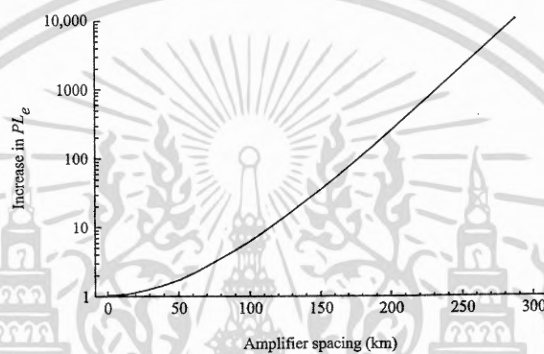
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (L) กับระยะทางของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา[1]เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดจริง (A) และความเข้มของแสงที่กระจายอยู่บนพื้นที่หน้าตัด (r, θ) โดย A_e หาได้จาก

$$A_e = \frac{\left\{ \iint_{\theta} r dr d\theta I(r, \theta) \right\}^2}{\iint_{\theta} r dr d\theta I^2(r, \theta)} \quad (2.7)$$

เมื่อ r และ θ เป็นค่าพิกัดและ I แทนค่าความเข้มของแสงในที่นี้ A_e แทนพื้นที่หน้าตัดของคอร์ สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวจะมีค่า A_e ประมาณ $50 \mu\text{m}^2$ เมื่อคอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $8 \mu\text{m}$ ส่วนเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Dispersion Compensating Fiber นั้นจะมีพื้นที่ของคอร์ที่เล็กกว่า จึงมีผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่สูงกว่า



รูปที่ 2.21 การเพิ่มขึ้นของค่าผลคูณระหว่างกำลังของสัญญาณและระยะทางประสิทธิผล (PL_e) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ [1]

ผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังงานจากความยาวคลื่นแสงหนึ่งไปยังอีกความยาวคลื่นแสงหนึ่งที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า (กำลังงานต่ำกว่า) กำลังงานที่สูงจะถูกลดด้วยกระบวนการสันสเทือนของโมเลกุลในตัวกลาง (ชนิดของการสันสเทือนของโมเลกุลจะมีความแตกต่างกันสำหรับ SBS และ SRS) คลื่นลำดับที่สองที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าคลื่นกระตุ้น (Stokes Wave) ซึ่งสัญญาณที่สามารถพิจารณาการแพร่กระจายด้วยการขยายสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดการสูญเสียกำลังงานและอัตราขยายกำลังของคลื่นกระตุ้นในที่นี้เราจะพิจารณาว่าคลื่นขยายคือคลื่นของสัญญาณ และคลื่นกระตุ้นเป็นคลื่นที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสง โดยทั่วไปผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่เกิดจากสัมประสิทธิ์ของอัตราขยาย (g) ซึ่งวัดในหน่วย mW และความกว้างของสเปกตรัม (Δf) สำหรับอัตราขยายขณะนั้น

ผลกระทบจากการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ PL_e ที่เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของกำลังของสัญญาณ ด้านอินพุทของเส้นใยแก้วนำแสง และระยะทางระหว่างโนดของเครือข่ายโดยเครือข่ายที่มีระยะทางระหว่างโนดที่ไกลมากๆ ต้องใช้กำลังของสัญญาณด้านอินพุทของเส้นใยแก้วนำแสงที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดคู่ของสัญญาณเนื่องจากสัญญาณกระตุ้นขึ้น สำหรับการกำหนดระยะทางระหว่างโนดสามารถประมาณได้จากการวัดระดับกำลังของสัญญาณแสงที่จุด ซึ่งเริ่มมีผล กระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงมาเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งเราเรียกว่าค่ากำลังของสัญญาณที่จุดนั้นว่า “ค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น

(Threshold Power)” ซึ่งถูกกำหนดด้วยความเข้มของกำลังงานแสงต่อช่อง สัญญาณภายในเส้นใย แก้วนำแสงที่มีกำลังของสัญญาณขยาย และสัญญาณกระตุ้นที่ด้านเอาต์พุทของเส้นใยแก้วนำแสงที่ เท่ากัน ในระบบที่มีการขยายสัญญาณแสงค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น Threshold Power จะ ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะทางประสิทธิผล ซึ่งทำให้ระบบที่มีการขยายสัญญาณ มีความ อ่อนไหวมากกว่าที่จะได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น ในเส้นใยแก้วนำแสง

2.4 การลดทอนและดิสเพอร์ชันของแสงในตัวกลาง

ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น สาเหตุหลักเกิดจากการลดทอน และดิสเพอร์ชันของแสงใน ตัวกลางซึ่งจะประกอบไปด้วย Stimulated Brillouin Scattering และ Stimulated Raman Scattering ซึ่งจะอธิบายสาเหตุการเกิดผลกระทบดังกล่าว ดังนี้

2.4.1 Stimulated Brillouin Scattering (SBS)

SBS เกิดขึ้นจากผลกระทบของการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งกรณีของ SBS นั้นความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาของคลื่นแสง กับตัวกลาง ของเส้นใยแก้วนำแสง จะ เป็นแบบ Acoustic Phonons โดยปฏิกิริยานี้ จะเกิดขึ้นกับช่องสัญญาณที่มีแถบความกว้างของ สเปกตรัมแคบมากๆ ประมาณ Δf_B มีค่า 20 MHz ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu m$ ซึ่งการกระจายของ แสงจากสัญญาณคลื่นขยาย และสัญญาณคลื่นกระตุ้นจะอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังนั้น SBS จะ ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างช่องสัญญาณ ที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันมากๆ จนกว่าระยะห่างระหว่าง ช่องสัญญาณ จะมีความยาวคลื่นแคบมากกว่า $\Delta f_B = 20$ MHz ซึ่งเป็นขอบเขตที่จำกัดของ SBS โดย ที่ SBS ทำให้เกิดอัตราขยายของสัญญาณในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางในการแพร่กระจายแสงของ สัญญาณ พุดังๆ ก็คือการย้อนสู่แหล่งกำเนิดของสัญญาณ ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปมีกำลัง ของสัญญาณลดลง ส่งผลให้เกิดความเสื่อมลงในช่องสัญญาณ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยาย สัญญาณของ SBS (gB) โดยปกติมีค่าประมาณ $4 \times 10^{11} m/w$ ซึ่งเป็นอิสระจากกันของแต่ละความยาว คลื่น

ความเข้มของสัญญาณคลื่นขยาย I_p และ I_s มีความสัมพันธ์กันตามสมการคลื่นทั้งสอง สมการนี้

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (2.8)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p \quad (2.9)$$

ความเข้มของสัญญาณแสงมีความสัมพันธ์กับกำลังของสัญญาณดังนี้ $P_s = A_e \cdot I_s$ และ

$$P_p = A_e \cdot I_p$$

สำหรับในกรณีนี้กำลังของสัญญาณคลื่นกระตุ้น P_s จะมีค่าน้อยกว่ากำลังของสัญญาณ คลื่นขยาย P_p มากๆ เราสามารถอ้างอิงได้จากสัญญาณคลื่นขยายไม่ได้ถึงทำให้ลดลงเลย ดังนั้นอาจ ไม่ต้องสนใจเทอม $-g_B I_p I_s$ ในด้าน ขวาของสมการที่ (2.8) และ สมการที่ (2.9) ด้วยสมมุติฐานนี้ สมการที่ (2.8) และ สมการที่ (2.9) สามารถแก้ปัญหาของสมการสำหรับเครือข่ายที่มีความยาว L ได้

ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_s(0) = P_s(L) \cdot e^{-\alpha L} \cdot e^{\frac{g_B P_p(0) L_e}{A_e}} \quad (2.10)$$

$$P_p(L) = P_p(0) \cdot e^{-\alpha L} \quad (2.11)$$

ข้อสังเกตเมื่อเอาที่พุทของคลื่นขยายอยู่ที่ $Z=L$ แต่เอาที่พุทของคลื่นกระตุ้นอยู่ที่ $Z=0$ เนื่องจาก คลื่นทั้งสองนี้มีการแพร่กระจายแสงในทิศทางตรงข้ามกัน การคำนวณค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (P_{th}) สามารถประมาณในรูปแบบอย่างง่ายด้วยความสัมพันธ์นี้

$$P_{th} = \frac{21bA_e}{g_B L_e} \quad (2.12)$$

ค่าของ b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันของคลื่นขยายและคลื่นกระตุ้น สมมติในกรณีที่แย่สุดของ $b=1$ เราจะได้ $P_{th} = 1.3 \text{ mw}$ เนื่องจากค่านี้เป็นค่าต่ำสุด ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบของ SBS การออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณแสงควรอ้างอิงที่ค่านี้

ที่ผ่านมาจะกำหนดให้สัญญาณของคลื่นขยายมีไลน์วิดธ์ที่แคบมากๆ และมีอัตราขยายช่วงแคบๆ ภายในช่วงแบนด์วิดธ์ของ SBS ค่ากำลังของสัญญาณเริ่มต้น (P_{th}) จะพิจารณาว่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณมีไลน์วิดธ์ที่กว้างออก และมีค่ากำลังของสัญญาณคลื่นขยายสูงขึ้นจนอยู่นอกช่วงแบนด์วิดธ์ของ SBS การประมาณค่าของการกระจายออก ซึ่งรวมผลกระทบนี้เข้าไปด้วย หาได้จาก

$$P_{th} = \frac{21bA_e}{g_B L_e} \left(1 + \frac{\Delta f_{source}}{\Delta f_B}\right) \quad (2.13)$$

เมื่อ $\Delta f_{source} = 200 \text{ MHz}$ และ $b = 1$ จะได้ค่า P_{th} ของ SBS เพิ่มขึ้นเป็น $P_{th} = 14.4 \text{ mw}$ โดยผลกระทบ เนื่องจาก SBS สามารถลดลงได้ ด้วยวิธีการดังนี้

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

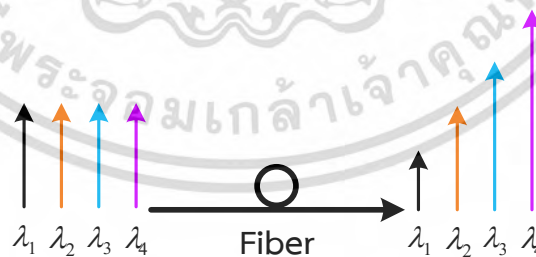
(2) เนื่องจากอัตราขยายแบนด์วิดธ์ของ SBS มีค่าน้อยมาก ผลกระทบนี้สามารถลดลงได้ด้วย การเพิ่มไลน์วิดธ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงด้วยการใช้เลเซอร์มอดูเลชันแบบโดยตรง ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เกิดดิสเพอร์ชันสูงขึ้น แต่ค่าดิสเพอร์ชันนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการจัดการดิสเพอร์ชันที่เหมาะสม ส่วนวิธีการอื่นๆ ในการเพิ่มไลน์วิดธ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสง คือการสันสะเทือนโมเลกุลของเลเซอร์ด้วยความถี่เล็กน้อยที่มีความเหมาะสม ประมาณ 200 MHz วิธีการนี้จะไม่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสูงขึ้น แต่จะทำให้ค่า P_{th} ของ SBS สูงขึ้น เมื่อพิจารณาในเทอมของขนาดวิธินี้ถูกนำมาใช้กับระบบต่างๆ ไป ที่มีอัตราเร็วของบิตสูงๆ และส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งของสัญญาณสูงๆ

(3) วิธีการมอดูเลตทางเฟสดีกว่าการมอดูเลตทางแอมพลิจูด อันเนื่องมาจากการลดกำลังของสัญญาณแสงในตัวกลางทำให้ผลกระทบของ SBS ลดลงได้ ซึ่งในกรณีนี้ไลน์วิดธ์ของแหล่งกำเนิดสามารถทำให้เหมาะสมกับอัตราเร็วของบิตได้ แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถนำไปใช้กับระบบต่างๆ ได้ทั้งหมด

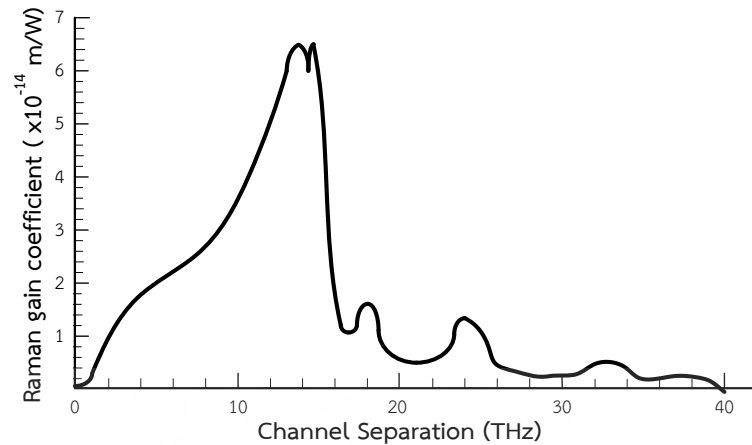
2.4.2 Stimulated Raman Scattering (SRS)

ใน SRS ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการแพร่กระจายคลื่นแสง ที่มีความถี่อยู่ที่บริเวณใกล้เคียงของการเรโซแนนซ์ บางโหมดของโมเลกุลที่มีการสั่น ในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกา การเรโซแนนซ์จากการสั่นทำให้ขยายตัว จะเกิดขึ้นระหว่าง S_i และ O ในอะตอมที่เป็นไปได้หลายโหมดภายในเมทริกซ์ของแก้ว ในกระบวนการของ Stroke แสงที่มีความถี่ ω_2 (คลื่นที่ปั๊ม) เลื่อนลงเข้าสู่ ω_1 (Stokes Wave) กับพลังงานส่วนเกินที่ถูกดูดซึมโดยตารางโหมดการสั่น

เมื่อสัญญาณสองสัญญาณหรือมากกว่านั้น และมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันส่งรวมเข้าไปด้วยกันในเส้นใยแก้วนำแสง การเปลี่ยนแปลงกำลังงานจากสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด SRS ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ข้อแตกต่างระหว่าง SBS กับ SRS คือผลกระทบจากแถบความถี่แถบกว้างรูปที่ 2.23 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS (GR) มีค่าประมาณ $6 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$ ซึ่งมีความน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS แต่อย่างไรก็ตามช่องสัญญาณแต่ละช่องจนถึงที่ความถี่ 150 THz (125 nm) จะถูกคับปลิงด้วย SRS ซึ่งจะคับปลิงทั้งสองทิศทางของการแพร่กระจายแสง และส่งสัญญาณย้อนกลับในทิศทางตรงกันข้ามโดยการคับปลิงระหว่างช่องสัญญาณจะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณทั้งสองช่องส่งสัญญาณมีบิต 1 เหมือนกัน ด้วยเหตุนี้ SRS ที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ลดลงได้ ตามค่าของดิสเพอร์ชันที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณที่แตกต่างกัน จะส่งผ่านด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ทำให้โอกาสที่จะเกิดการซ้อนทับกันของพัลส์ของแสงระหว่างความยาวคลื่นที่แตกต่างกันที่ทุกๆ จุดในเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลง ซึ่งเหมือนกับปรากฏการณ์ Pulse Walk-Off ในกรณีของ Cross Phase Modulation



รูปที่ 2.22 ผลกระทบของ SRS เมื่อกำลังของสัญญาณแสงจากช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่ำ ถูกถ่ายเทไปยังช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นสูง [1]



รูปที่ 2.23 ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS เปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ [1]

การคำนวณผลกระทบของ SRS ในระบบสื่อสารแบบหลายช่องสัญญาณ เมื่อกำหนดรูปร่าง Raman Gain เป็นรูปสามเหลี่ยมสามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS ในรูปความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ ได้จาก

$$g(\Delta\lambda) = g_R \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_c} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \Delta\lambda \leq \Delta\lambda_c$$

$$g(\Delta\lambda) = 0 \quad \text{ที่ค่าอื่นๆ} \quad (2.14)$$

กำหนดให้ g_R แทนค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SRS และแบนด์วิดท์ของ Raman Gain $\lambda_c = 125 \text{ nm}$ พิจารณาระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวน W ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยช่องสัญญาณที่ $0, 1, \dots, W-1$ และแทนระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณด้วย $\Delta\lambda_s$ โดยสมมติให้ทุกช่องสัญญาณอยู่ภายใต้ช่วงแบนด์วิดท์ของ Raman Gain ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีแบนด์วิดท์ของ Raman Gain อยู่ที่ 125 nm นั่นคือระบบจะมีแบนด์วิดท์เท่ากับ $\Delta = (W-1) \Delta\lambda_s \leq \Delta\lambda_c$ ในระบบสื่อสารสัญญาณแบบ DWDM ปกติจะมีแบนด์วิดท์ ประมาณ 30 nm ซึ่งถูกกำหนดมาจากแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขยายทางแสง โดยช่องสัญญาณ ที่ได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุด คือ ช่องสัญญาณที่ตรงกับความยาวคลื่นต่ำสุดคือ ช่องสัญญาณช่องที่ศูนย์ เมื่อมีการส่งบิต 1 ในทุกๆ ช่องสัญญาณ สมมติว่ากำลังส่งทุกช่องสัญญาณเท่ากันและไม่มีการแทรกสอดจากช่องสัญญาณอื่นๆ ในทางปฏิบัติเนื่องจากระบบมีการรบกวนกันของการโพลาไรซ์ ซึ่งมีการแก้ไขด้วยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถแก้ไขและปรับปรุงการโพลาไรซ์ได้ แต่ก็จะทำให้ผลกระทบของ Raman สูงขึ้น และสมการที่นำมาใช้ก็จะไม่ได้มีแค่เตอร์เพียง 2 ตัวเท่านั้น ในสมการโดยกำลังของสัญญาณที่เกิดจากการรวมตัวกันของช่องสัญญาณ และทำให้ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบที่รุนแรงที่สุดจากช่องสัญญาณช่องที่ 0 ถึงช่องสัญญาณช่องที่ i สามารถประมาณได้จาก

$$P_o(i) = g_R \frac{i\Delta\lambda_s \cdot PL_e}{\Delta\lambda_c 2A_e} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายสมการข้างต้นนี้เริ่มต้นจากการรวมสมการของคลื่น จาก SRS ซึ่งคล้าย กับรูปแบบ ของสมการที่ (2.8) และ สมการที่ (2.9) ดังนั้นกำลังของช่องสัญญาณช่องที่ 0 ที่เกิด จากการเหนี่ยวนำจากช่องสัญญาณอื่นๆ ทั้งหมดในระบบหาได้จาก

$$P_o = \sum_{i=12}^{w-1} P_o(i) = g_R \frac{g_R \Delta \lambda_s P L_e}{2 \Delta \lambda_c A_e} \frac{W(W-1)}{2} \tag{2.16}$$

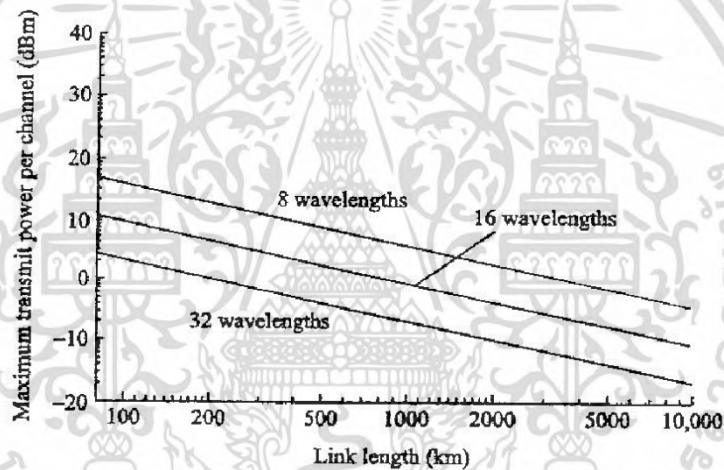
สำหรับกำลังของสัญญาณของช่องสัญญาณคือ $-10 \log(1 - P_0)$

ถ้าหากต้องการรักษากำลังของสัญญาณให้ต่ำกว่า 0.5 dB เราจะต้องมีค่า $P_0 < 0.1$

ตามการคำนวณในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า $WP(W-1)\Delta\lambda_s L_e < 40,000 \text{ mW.nm.km}$.

แบนด์วิดธ์รวมทั้งหมดของระบบคือ $P_{tot} = WP$

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



รูปที่ 2.24 ค่ากำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก Stimulated Raman Scattering (SRS) [1]

จากรูปที่ 2.24 แสดงค่ากำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุด ต่อช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจาก Stimulated Raman Scattering (SRS) เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm และระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่ากับ 80 km

ที่ผ่านมาสมมติให้ในระบบไม่มีการสูญเสียจากการกระจายออกของแสง แต่เมื่อมีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการกระจายออกของแสง ค่าคงที่ด้านขวาของสมการสามารถประมาณค่าได้เป็น 80,000 mW.nm.km. ถ้าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณถูกกำหนดให้คงที่ กำลังของสัญญาณที่สามารถนำมาใช้ได้ จะลดลงตามค่า W คือมีค่า $1/W^2$ เช่น ในระบบที่มีช่องสัญญาณจำนวน 32 ช่องสัญญาณมีความยาวคลื่น ระหว่างช่องสัญญาณ เท่ากับ 0.8 nm (100 GHz) และมีค่า $L_e = 20 \text{ km}$ จะมีค่า $P = 2.5 \text{ mW}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 แสดงกำลังของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้งานได้สูงสุดต่อช่องสัญญาณในฟังก์ชันของระยะทางที่เชื่อมโยงระบบเครือข่าย

2.5 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสง

ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้น สาเหตุหลักอีกสาเหตุหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสงซึ่งจะประกอบไปด้วย การมอดูเลตแบบ Self Phase (SPM) และ Cross Phase (CP) ซึ่งจะอธิบายสาเหตุการเกิดผลกระทบดังกล่าว ดังนี้

2.5.1 การมอดูเลตแบบ SPM

สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อไหร่ก็ตาม ที่มีสัญญาณที่มีความกว้างและเวลาที่แตกต่างกัน แต่การแพร่กระจายในวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น ต้นกำเนิดของผลกระทบ คือดัชนีหักเหของตัวกลาง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มของสัญญาณทันที ค่าเชิงซ้อนของการโพลาไรซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีกระบวนการดังนี้

$$P_{NL} = \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi^{(3)} |E_0(z,t)|^2 E_0(z,t) \exp[i(\omega t - \beta z)] \quad (2.17)$$

เมื่อ $E_0(t)$ คือค่าสนามไฟฟ้าที่มีความกว้างของเวลาที่ต่างกัน ที่อธิบายด้วยพัลส์หรือสัญญาณที่ถูกหุ้ม และเมื่อความถี่ ω เป็นเช่นเดียวกับแสงที่เข้า การรวมกันของโพลาไรซ์ และขอบเขต เป็นสมการคลื่นจะนำไปสู่การปรับปรุงดัชนีหักเหมากกว่าค่า Original Zero Field โดยที่ n_0 คือค่าดัชนีสุทธึกลายเป็น

$$n = n_0 + n_2 |E_0(z,t)|^2 \quad (2.18)$$

เมื่อความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีดัชนีหักเหเป็น $n_2 = \text{Re}\{3\chi^{(3)}/8n_0\}$ ในซิลิกาผสมโดยค่าดังกล่าวมีค่า $n_2 = 6.1 \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ดังนั้นสมการที่ (2.18) ยังสามารถแสดงในเทอมของค่าความเข้มแสงตลอด โดยที่ $n(I) = n_0 + n_2 I(z,t)$ เมื่อ $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหเป็นการปรับปรุงจากประสิทธิภาพดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว n_{eff}

ค่าเชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า (Complex Field) ที่แพร่กระจายผ่านตัวกลาง สามารถเขียนในรูป

$$E = E_0(z,t) \exp\{i[\omega_0 t - [n_0 + n_2 I(z,t)]k_0 z]\} \quad (2.19)$$

ซึ่งแสดงการมอดูเลตแบบเฟสที่เป็นไปตามรูปทรงของค่า Intensity Envelope ค่าความถี่ในปัจจุบัน พบว่าเป็นอนุพันธ์ใดๆ ของเฟส

$$\omega = \omega_0 - n_2 k_0 z \frac{\partial I}{\partial t} \quad (2.20)$$

ผลกระทบจากการมอดูเลตแบบ Self Phase บนพัลส์ที่มีความสามารถจากการแพร่กระจายที่ดี จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) นอกจากนี้องค์ประกอบความถี่แรก คือตำแหน่งบนพัลส์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความกว้างพัลส์อันดับ 2 ความถี่ผ่าน (Chirp) ไปอย่างรวดเร็วแสดงบนพัลส์ ทิศทางซึ่งขึ้นอยู่กับสัญลักษณ์ $\partial/\partial t$ คือคุณลักษณะเด่นที่สำคัญ โดยเฉพาะในเส้นใยแก้วนำแสง ตั้งแต่การกวาดความถี่จากการมอดูเลตแบบ Self Phase อาจจะมีหรือลดจาก Chirp กำหนดโดยดิสเพอร์ชันเป็นกลุ่มแบบเชิงเส้น ถ้าทิศทางของ Chirp สำหรับการมอดูเลตแบบ Self Phase และดิสเพอร์ชันเป็นกลุ่ม ในทางกลับกันนั้น มีผลต่อประสิทธิภาพทำให้ดีขึ้น เป็นการนำไปสู่การสร้าง Optical Soliton ในระบบธรรมดาที่ไม่ได้ใช้ Soliton การมอดูเลตแบบ Self Phase จะต้องนำมาพิจารณาความเป็นไปได้ ที่จะเกิดประโยชน์หรือความเสียหายต่อประสิทธิภาพการทำงาน การสร้างพัลส์ (ซึ่งอาจรวมถึงการบีบอัด หรือการขยาย) สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวในทางทฤษฎี สามารถให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยม นอกจากนั้นในระบบการขยายสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Amplifier) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในดัชนีหักเหของแสง ที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณต่างๆ รวมกันในเออร์เบียม (Erbium) จะแสดงให้เห็นว่า ผลที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยของประสิทธิภาพที่นำเข้ามา ผลกระทบที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อกลุ่มพัลส์สเปคตรัมมีดิสเพอร์ชันแบบผิดปกติในเส้นใยแก้วนำแสง พัลส์ที่กระเจิงสามารถเกิดขึ้นได้เป็นผลจากการมอดูเลตที่ไม่แน่นอน ซึ่งการทำงานร่วมกันระหว่างดิสเพอร์ชัน และผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่สร้างพัลส์ จะก่อให้เกิดความไม่เสถียรนั่นเอง

2.5.2 การมอดูเลตแบบ CP (Cross Phase)

จะคล้ายกับ SPM ที่สำคัญคือทั้ง 2 แบบนี้ จะมีลักษณะซ้อนทับกัน แต่พัลส์จะมีลักษณะแตกต่างกัน (เช่น ความถี่แตกต่างกัน หรือการแพร่กระจาย) พัลส์ 1 รูป จะปรับค่าดัชนีของตัวกลาง ซึ่งเป็นการนำไปสู่การมอดูเลตเฟสของพัลส์ที่ซ้อนกัน XPM จึงกลายเป็นกลไกที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนข้างเคียง (Cross Talk) ระหว่าง 2 ช่องสัญญาณ

$$\frac{\partial E_{0a}}{\partial z} + \beta_{1a} \frac{\partial E_{0a}}{\partial t} = -\frac{i}{2} \beta_{2a} \frac{\partial^2 E_{0a}}{\partial t^2} + i\gamma_a |E_{0a}|^2 E_{0a} + i\delta\gamma |E_{0b}|^2 E_{0a} - \frac{\alpha_a}{2} E_{0a} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial E_{0b}}{\partial z} + \beta_{1b} \frac{\partial E_{0b}}{\partial t} = -\frac{i}{2} \beta_{2b} \frac{\partial^2 E_{0b}}{\partial t^2} + i\gamma_b |E_{0b}|^2 E_{0b} + i\delta\gamma |E_{0a}|^2 E_{0b} - \frac{\alpha_b}{2} E_{0b} \quad (2.22)$$

ในสมการนี้ $\beta_{1j}(j=a,b)$ เป็นกลุ่มการประวิงของพัลส์ที่ 2 ความถี่หรือโพลาริซชันบนหน่วยระยะทาง β_{2j} เป็นพารามิเตอร์การกระจายกลุ่ม ที่เกี่ยวข้องกันของพัลส์ทั้งสอง $\gamma_j = n_2 \omega_j / (cA_{eff})$ เมื่อ A_{eff} คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของโหมดเส้นใยแก้วนำแสง ค่าสัมประสิทธิ์ δ มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับพัลส์ที่มีโพลาริซชันร่วมกันของความถี่ที่แตกต่างกัน และมีค่า $2/3$ เมื่อพัลส์เป็นโพลาริซชันแบบข้าม (Cross Polarized) ลักษณะค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายด้วยค่าสัมประสิทธิ์ α_j เป็นการสันนิษฐานรูปแบบสมการที่อธิบายการแพร่กระจายด้วย SPM จากพัลส์เดี่ยว E_{0a} เป็นรูปแบบตัวอย่างโดยหาได้จากสมการที่ (2.21) โดยการกำหนดค่า $E_{0a} = 0$ ในเทอมด้านขวาของสมการที่ (2.21) และ (2.22) อธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้น ของการกระจายตัวของกลุ่ม SPM XPM และค่าสูญเสีย สมการดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยใช้เทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลข

วิธีการหนึ่งที่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงได้ก็คือ การลด FWM โดยวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่ ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2

2.6 ผลกระทบจาก FWM ในเส้นใยแก้วนำแสง

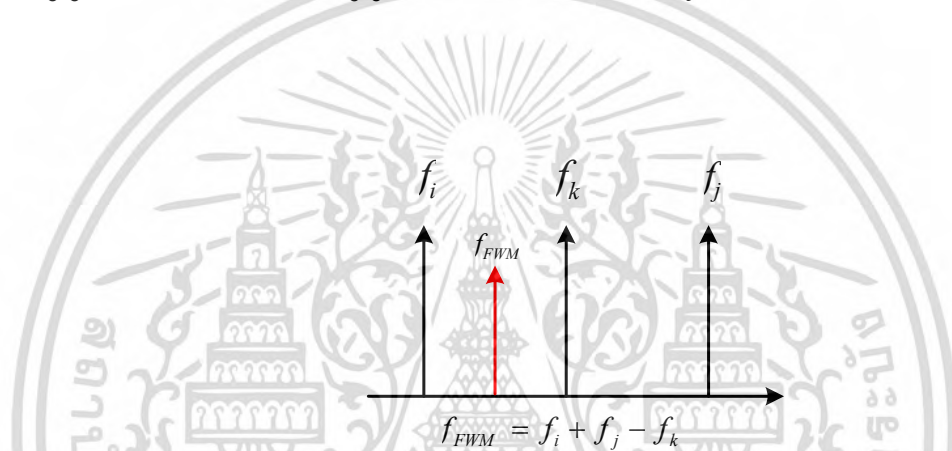
FWM คือ ความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจากการสอดแทรกระหว่างกัน เป็นความถี่ที่เราไม่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ค่าความถี่แสง f_{FWM} ที่เกิดมาจากการแทรกสอดระหว่างกันของช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน 3 ความถี่ จะสัมพันธ์กับความถี่แสงของช่องสัญญาณ 3 ความถี่ f_i , f_j และ f_k ดังรูปที่ 2.26 และเป็นไปตามสมการ

$$f_{FWM} = f_i + f_j - f_k, k \neq i, j \quad (2.23)$$

สมการความสัมพันธ์ของคลื่นความถี่สมการที่ (2.23) นี้สามารถแยกตัวประกอบการเกิด FWM ขึ้นมาใหม่ได้ทั้งหมด 12 ความถี่ ดังนี้

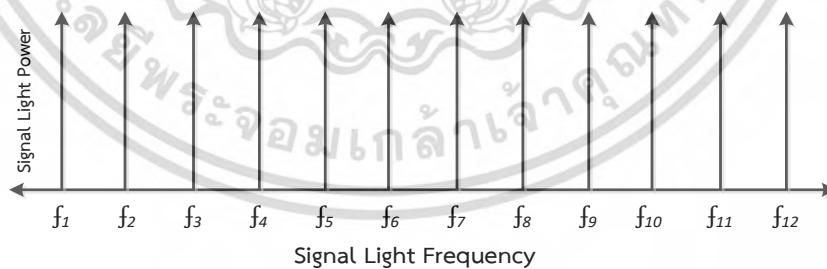
$$\begin{aligned} f_1 &= f_i + f_i - f_k, f_2 = f_j + f_i - f_k, f_3 = f_i + f_i - f_j, f_4 = f_j + f_j - f_k, f_5 = f_i + f_k - f_j, \\ f_6 &= f_j + f_j - f_i, f_7 = f_j + f_k - f_i, f_8 = f_k + f_k - f_j, f_9 = f_k + f_k - f_i, f_{10} = f_i + f_j - f_k, \\ f_{11} &= f_k + f_i - f_j, f_{12} = f_k + f_j - f_i. \end{aligned}$$

จากตัวอย่างของการใช้ช่องสัญญาณ 3 ความถี่ทำให้เกิด f_{FWM} จะเห็นได้ว่ายังมีการเพิ่มใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นกว่า 2 ช่องสัญญาณขึ้นไป จะส่งผลให้ยังเกิด f_{FWM} ได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.25 รูปแบบการกระจายตัวของความถี่แสงของ FWM ที่มาจากการสอดแทรกระหว่างกัน

ตัวอย่างการหาจำนวนผลรวมความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นแล้วซ้อนทับบนช่องสัญญาณหลัก เป็นผลทำให้สัญญาณอ่อนลง จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES จำนวน 12 ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การจัดช่องสัญญาณแบบ ES ที่มีจำนวน 12 ช่องสัญญาณ

จากสมการ 2.23 สามารถกระจายตัวแปรความถี่ที่เกิดขึ้น แล้วนำมาหาจำนวนความถี่ FWM รวมทั้งหมดที่เกิดขึ้น ได้ดังนี้

$$\circ \{f_1, f_2, f_3\}, \{f_1, f_2, f_4\}, \{f_1, f_2, f_5\}, \{f_1, f_2, f_6\}, \{f_1, f_2, f_7\}, \{f_1, f_2, f_8\}, \{f_1, f_2, f_9\}, \{f_1, f_2, f_{10}\}, \{f_1, f_2, f_{11}\}, \{f_1, f_2, f_{12}\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\{f_2, f_3, f_4\}, \{f_2, f_3, f_5\}, \{f_2, f_3, f_6\}, \{f_2, f_3, f_7\}, \{f_2, f_3, f_8\}, \{f_2, f_3, f_9\}, \{f_2, f_3, f_{10}\}, \{f_2, f_3, f_{11}\}, \{f_2, f_3, f_{12}\}$

$\{f_3, f_4, f_5\}, \{f_3, f_4, f_6\}, \{f_3, f_4, f_7\}, \{f_3, f_4, f_8\}, \{f_3, f_4, f_9\}, \{f_3, f_4, f_{10}\}, \{f_3, f_4, f_{11}\}, \{f_3, f_4, f_{12}\}$

$\{f_4, f_5, f_6\}, \{f_4, f_5, f_7\}, \{f_4, f_5, f_8\}, \{f_4, f_5, f_9\}, \{f_4, f_5, f_{10}\}, \{f_4, f_5, f_{11}\}, \{f_4, f_5, f_{12}\}$

$\{f_5, f_6, f_7\}, \{f_5, f_6, f_8\}, \{f_5, f_6, f_9\}, \{f_5, f_6, f_{10}\}, \{f_5, f_6, f_{11}\}, \{f_5, f_6, f_{12}\}$

$\{f_6, f_7, f_8\}, \{f_6, f_7, f_9\}, \{f_6, f_7, f_{10}\}, \{f_6, f_7, f_{11}\}, \{f_6, f_7, f_{12}\}$

$\{f_7, f_8, f_9\}, \{f_7, f_8, f_{10}\}, \{f_7, f_8, f_{11}\}, \{f_7, f_8, f_{12}\}$

$\{f_8, f_9, f_{10}\}, \{f_8, f_9, f_{11}\}, \{f_8, f_9, f_{12}\}$

$\{f_9, f_{10}, f_{11}\}, \{f_9, f_{10}, f_{12}\}$

$\{f_{10}, f_{11}, f_{12}\}$

○ $\{f_1, f_{11}, f_{12}\}, \{f_2, f_{11}, f_{12}\}, \{f_3, f_{11}, f_{12}\}, \{f_4, f_{11}, f_{12}\}, \{f_5, f_{11}, f_{12}\}, \{f_6, f_{11}, f_{12}\}, \{f_7, f_{11}, f_{12}\}, \{f_8, f_{11}, f_{12}\}, \{f_9, f_{11}, f_{12}\}$

$\{f_1, f_{10}, f_{11}\}, \{f_2, f_{10}, f_{11}\}, \{f_3, f_{10}, f_{11}\}, \{f_4, f_{10}, f_{11}\}, \{f_5, f_{10}, f_{11}\}, \{f_6, f_{10}, f_{11}\}, \{f_7, f_{10}, f_{11}\}, \{f_8, f_{10}, f_{11}\}$

$\{f_1, f_9, f_{10}\}, \{f_2, f_9, f_{10}\}, \{f_3, f_9, f_{10}\}, \{f_4, f_9, f_{10}\}, \{f_5, f_9, f_{10}\}, \{f_6, f_9, f_{10}\}, \{f_7, f_9, f_{10}\}$

$\{f_1, f_8, f_9\}, \{f_2, f_8, f_9\}, \{f_3, f_8, f_9\}, \{f_4, f_8, f_9\}, \{f_5, f_8, f_9\}, \{f_6, f_8, f_9\}$

$\{f_1, f_7, f_8\}, \{f_2, f_7, f_8\}, \{f_3, f_7, f_8\}, \{f_4, f_7, f_8\}, \{f_5, f_7, f_8\}$

$\{f_1, f_6, f_7\}, \{f_2, f_6, f_7\}, \{f_3, f_6, f_7\}, \{f_4, f_6, f_7\}$

$\{f_1, f_5, f_6\}, \{f_2, f_5, f_6\}, \{f_3, f_5, f_6\}$

$\{f_1, f_4, f_5\}, \{f_2, f_4, f_5\}$

$\{f_1, f_3, f_4\}$

○ $\{f_1, f_3, f_{12}\}, \{f_1, f_4, f_{12}\}, \{f_1, f_5, f_{12}\}, \{f_1, f_6, f_{12}\}, \{f_1, f_7, f_{12}\}, \{f_1, f_8, f_{12}\}, \{f_1, f_9, f_{12}\}, \{f_1, f_{10}, f_{12}\}$

$\{f_1, f_3, f_{11}\}, \{f_1, f_4, f_{11}\}, \{f_1, f_5, f_{11}\}, \{f_1, f_6, f_{11}\}, \{f_1, f_7, f_{11}\}, \{f_1, f_8, f_{11}\}, \{f_1, f_9, f_{11}\}$

$\{f_1, f_3, f_{10}\}, \{f_1, f_4, f_{10}\}, \{f_1, f_5, f_{10}\}, \{f_1, f_6, f_{10}\}, \{f_1, f_7, f_{10}\}, \{f_1, f_8, f_{10}\}$

$\{f_1, f_3, f_9\}, \{f_1, f_4, f_9\}, \{f_1, f_5, f_9\}, \{f_1, f_6, f_9\}, \{f_1, f_7, f_9\}$

$\{f_1, f_3, f_8\}, \{f_1, f_4, f_8\}, \{f_1, f_5, f_8\}, \{f_1, f_6, f_8\}$

$\{f_1, f_3, f_7\}, \{f_1, f_4, f_7\}, \{f_1, f_5, f_7\}$

$\{f_1, f_3, f_6\}, \{f_1, f_4, f_6\}$

$\{f_1, f_3, f_5\}$

○ $\{f_2, f_4, f_{12}\}, \{f_2, f_5, f_{12}\}, \{f_2, f_6, f_{12}\}, \{f_2, f_7, f_{12}\}, \{f_2, f_8, f_{12}\}, \{f_2, f_9, f_{12}\}, \{f_2, f_{10}, f_{12}\}$

$\{f_2, f_4, f_{11}\}, \{f_2, f_5, f_{11}\}, \{f_2, f_6, f_{11}\}, \{f_2, f_7, f_{11}\}, \{f_2, f_8, f_{11}\}, \{f_2, f_9, f_{11}\}$

$\{f_2, f_4, f_{10}\}, \{f_2, f_5, f_{10}\}, \{f_2, f_6, f_{10}\}, \{f_2, f_7, f_{10}\}, \{f_2, f_8, f_{10}\}$

$\{f_2, f_4, f_9\}, \{f_2, f_5, f_9\}, \{f_2, f_6, f_9\}, \{f_2, f_7, f_9\}$

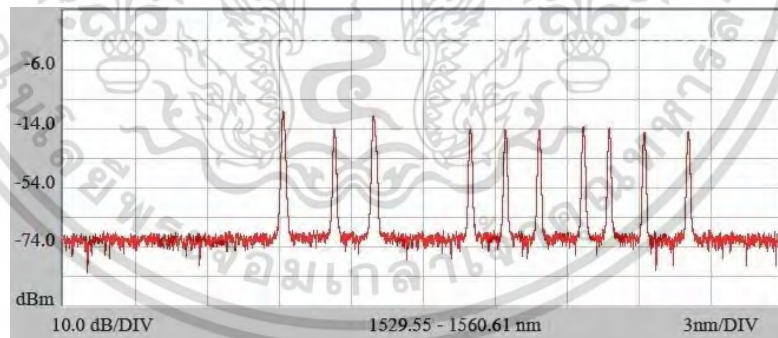
$\{f_2, f_4, f_8\}, \{f_2, f_5, f_8\}, \{f_2, f_6, f_8\}$

$\{f_2, f_4, f_7\}, \{f_2, f_5, f_7\}$

$\{f_2, f_4, f_6\}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\{f_3, f_5, f_{12}\}, \{f_3, f_6, f_{12}\}, \{f_3, f_7, f_{12}\}, \{f_3, f_8, f_{12}\}, \{f_3, f_9, f_{12}\}, \{f_3, f_{10}, f_{12}\}$
 $\{f_3, f_5, f_{11}\}, \{f_3, f_6, f_{11}\}, \{f_3, f_7, f_{11}\}, \{f_3, f_8, f_{11}\}, \{f_3, f_9, f_{11}\}$
 $\{f_3, f_5, f_{10}\}, \{f_3, f_6, f_{10}\}, \{f_3, f_7, f_{10}\}, \{f_3, f_8, f_{10}\}$
 $\{f_3, f_5, f_9\}, \{f_3, f_6, f_9\}, \{f_3, f_7, f_9\}$
 $\{f_3, f_5, f_8\}, \{f_3, f_6, f_8\}$
 $\{f_3, f_5, f_7\}$
- $\{f_4, f_6, f_{12}\}, \{f_4, f_7, f_{12}\}, \{f_4, f_8, f_{12}\}, \{f_4, f_9, f_{12}\}, \{f_4, f_{10}, f_{12}\}$
 $\{f_4, f_6, f_{11}\}, \{f_4, f_7, f_{11}\}, \{f_4, f_8, f_{11}\}, \{f_4, f_9, f_{11}\}$
 $\{f_4, f_6, f_{10}\}, \{f_4, f_7, f_{10}\}, \{f_4, f_8, f_{10}\}$
 $\{f_4, f_6, f_9\}, \{f_4, f_7, f_9\}$
 $\{f_4, f_6, f_8\}$
- $\{f_5, f_7, f_{12}\}, \{f_5, f_8, f_{12}\}, \{f_5, f_9, f_{12}\}, \{f_5, f_{10}, f_{12}\}$
 $\{f_5, f_7, f_{11}\}, \{f_5, f_8, f_{11}\}, \{f_5, f_9, f_{11}\}$
 $\{f_5, f_7, f_{10}\}, \{f_5, f_8, f_{10}\}$
 $\{f_5, f_7, f_9\}$
- $\{f_6, f_8, f_{12}\}, \{f_6, f_9, f_{12}\}, \{f_6, f_{10}, f_{12}\}$
 $\{f_6, f_8, f_{11}\}, \{f_6, f_9, f_{11}\}$
 $\{f_6, f_8, f_{10}\}$
- $\{f_7, f_9, f_{12}\}, \{f_7, f_{10}, f_{12}\}$
 $\{f_7, f_9, f_{11}\}$
- $\{f_8, f_{10}, f_{12}\}$



รูปที่ 2.27 องค์ประกอบของสัญญาณแสงที่จุด N-channel DWDM MUX ที่ค่าความยาวคลื่น 1529.55-1560.61 nm

FWM ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เกิดขึ้นจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ที่ทำให้ FWM ทวีความรุนแรงสูงขึ้น เนื่องจากการส่งจำนวนช่องสัญญาณเป็นจำนวนมากที่จุด N-channel DWDM MUX แสดงให้เห็นเป็นฮาร์มอนิกในรูปที่ 2.27

FWM จะกลายเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) ดังนั้นความถี่ของ Noise ซึ่ง f_n ก็คือผลรวมของความถี่ f_{FWM} ที่มีจำนวน n นั้นเองดังสมการที่ 2.24

$$f_n = f_{FWM(i)}^n \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มบวก

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรวัดความรุนแรงของผลกระทบจาก FWM ของสัญญาณแสง 2 ตัว ได้แก่ Total FWM Power และ Total FWM Efficiency อีกทั้งยังใช้เป็นตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบของวิธีการจัดช่องสัญญาณที่น่าเสนอกับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่แล้ว สามารถอธิบายมาตรวัดดังกล่าวได้ดังนี้

Total FWM Power (TP) หมายถึง กำลังของ FWM ทุกๆ ความถี่ที่เกิดขึ้น จากการสอดแทรกระหว่างกันของช่องสัญญาณ การแปลความหมายของค่า TP นั้นคือ ยังมีค่าน้อยยิ่งแสดงถึงความรุนแรงน้อย แต่มีคุณภาพสูง สามารถอธิบาย TP ได้จากสมการนี้ [5-6]

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (2.25)$$

โดยที่ $P_{FWM}(f_m)$ คือ พลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากความถี่ f_m และ $P_{FWM}(f_{ijk})$ คือพลังงานที่ได้จาก FWM เกิดจากความถี่ f_{ijk} ดังนั้น Total FWM Power ($P_{FWM}(f_m)$) สามารถหาได้จาก

$$P_{FWM}(f_m) = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left(\frac{d_{ijk} \chi^{(3)} L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 \times P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (2.26)$$

เมื่อ P_i , P_j และ P_k คือกำลังอินพุตที่ความถี่ f_i , f_j และ f_k ตามลำดับ n คือ ค่าดัชนีหักเหของคอร์ λ คือ ค่าความยาวคลื่น c คือ ค่าความเร็วแสงในอากาศ A_{eff} คือ พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ α คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน L คือ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง d_{ijk} คือ องค์ประกอบที่แสดงสถานะเสื่อม ($d_{ijk}=3$ เมื่อ $i=j$ และ $d_{ijk}=6$ เมื่อ $i \neq j$) $\chi^{(3)}$ คือ ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 3

Total FWM Efficiency (TE) หมายถึง ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM กับช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกหนึ่งถึงระดับความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก FWM จะคล้ายกับ TP โดยที่ค่า TE มีค่าน้อยลงเท่าไร ย่อมหมายถึงความรุนแรงน้อยลงเท่านั้น และในแง่มุมมองของการเปรียบเทียบคุณภาพในการจัดช่องสัญญาณแล้ว ค่าผลกระทบดังกล่าวมีค่าน้อยลง แสดงว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณนั้นๆ มีคุณภาพสูงนั่นเอง

TE หาได้จากสมการนี้ [5-6]

$$\eta_{FWM}^n = \sum_{i=1}^m \eta_{FWM(i)}^n \quad (2.27)$$

เมื่อ η_{FWM}^n คือ Total FWM Efficiency, และ $i = 1, 2, \dots, m$ หมายถึง ค่าดัชนีของจำนวนปัจจัย ของการเกิด FWM และประสิทธิภาพ FWM (η_{FWM}^n) จากแต่ละ Source หาได้จาก

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

ค่า $\Delta\beta$ คือผลรวมของค่าความแตกต่างของความถี่ทั้งหมดในการแพร่กระจายในเส้นใยแก้วนำแสง

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \left[D + \frac{\lambda^2}{2c} \frac{dD}{d\lambda} (|f_i - f_o| + |f_j - f_o|) \right] \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ f_i , f_j และ f_k คือ ค่าความถี่ใดๆ ในระบบ f_0 คือ ความถี่อ้างอิง D คือ ค่าโครมาตคิสเพอร์ชัน $dD/d\lambda$ คือ ค่าความชันของดิสเพอร์ชัน α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการลดทอน λ คือ ค่าความยาวคลื่น และ c คือ ค่าความเร็วแสงในอากาศ

เมื่อนำสมการนี้มาใช้กับ Nonzero Dispersion Shift Fiber (NZDSF) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

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

การลด FWM ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ที่มีวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันนั้น ทำโดยการนำตัวกรองสัญญาณแสง (Optical Filter) มากรอง FWM ที่จุด N-channel Demux ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่ จะสามารถลดการใช้ตัวกรองสัญญาณแสงได้นั่นเอง

2.7 อัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate)

อัตราบิตผิดพลาด คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตผิดพลาดทั้งหมดของอัตราการส่งข้อมูลต่อจำนวนบิตทั้งหมดของอัตราการส่งข้อมูล ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของอัตราบิตผิดพลาดคือ 10^{-9} เนื่องจากค่าความผิดพลาดในการสื่อสารสัญญาณแสงที่ส่งผ่านในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น มีค่าผิดพลาดน้อยมาก ในการจำลอง BER นั้นหาได้จากทฤษฎีการประมาณค่าแบบเกาส์เซียน (Gaussian Approximation) ซึ่งการทำ BER นั้น เราจะต้องทราบค่า P_e ก่อน

P_e คือ ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ที่ใช้การมอดูเลต แบบ On-Off Keying (OOK) คำนวณได้จากสมการนี้ [5-6]

$$P_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (2.31)$$

เมื่อ t คือ เวลา Q คือ ปัจจัยด้านคุณภาพ (Quality Factor) ซึ่งหาได้จาก [5,6]

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM} + \sqrt{N_{th}}}} \quad (2.32)$$

เนื่องจากการสูญเสียของ Thermal Noise (N_{th}) และ Shot Noise (N_{sh}) มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ N_{FWM} ในระบบการส่งสัญญาณแบบ DWDM ดังนั้นค่า Q ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของ FWM สามารถแสดงให้เห็นดังสมการดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2bP_s}{\sqrt{b^2P_sP_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_0e^{-\alpha L}}}{\sqrt{P_{FWM}}} \quad (2.33)$$

เมื่อ P_s คือ กำลังของสัญญาณแสงที่รับได้ และ N_{FWM} คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจาก FWM สามารถหาได้จากสมการนี้

$$N_{FWM} = 2b^2P_s \left(\frac{P_{FWM}}{8} \right) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ b คือ เรสพอนซิวิตี ซึ่งสามารถหาได้จากสมการนี้

$$b = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad (2.35)$$

เมื่อ η คือประสิทธิภาพควอนตัม e คือ ประจุอิเล็กตรอนและ h คือค่าคงที่ของพลังค์กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $(6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ Avalanche Photo Diode (APD) $\eta = 80\%$ [7-8]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนและชนิด ำเนินการวิจัย ไว้ดังนี้

- 3.1 ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบต่างๆ ในระบบ DWDM
- 3.2 ออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่

3.1 ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบต่างๆ ในระบบ DWDM

วิธีการจัดช่องสัญญาณแสง มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ซึ่งวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่ใช้อยู่จริงในปัจจุบัน คือวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบที่มีระยะห่างเท่ากัน (Equally Spaced Channel : ES) แต่วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงดังกล่าวยังได้รับผลกระทบจาก FWM อยู่มาก โดยการเกิด FWM นั้นมักเกิดในกรณีที่มีการส่งสัญญาณ หลายๆ ช่องสัญญาณเป็นจ านวนมากพร้อมๆ กัน

เนื่องจากผลกระทบจาก FWM เป็นปัญหาที่นักวิชาการจำนวนมากให้ความสำคัญ และได้มีการวิจัยเพื่อค้นหาวิธีการที่จะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าว จึงพบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอเทคนิคการแก้ปัญหาคู่ที่แตกต่างกันไป และมีการนำมาเผยแพร่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยภาพรวมแล้วสามารถแก้ปัญหาคู่ได้ดีกว่าเดิมในระดับหนึ่ง จากการศึกษาพบว่า มีหลายงานวิจัยพิสูจน์แล้วว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน (Unequally Spaced Channel : US) [9-14] สามารถลดปัญหาผลกระทบจาก FWM ได้ดีกว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบที่มีระยะห่างเท่ากัน (ES)

ตัวอย่างงานวิจัยที่อาศัยเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน (US) จุดประสงค์เพื่อต้องการลดจำนวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้น เป็นผลทำให้ไปซ้อนทับช่องสัญญาณหลัก ทำให้สัญญาณแสงที่เครื่องรับปลายทางมีค่าอ่อนลง ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการที่มีชื่อเสียงสำหรับใช้ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM นั้น [13] ใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีชื่อว่า URUS ซึ่งเป็นเทคนิคการนา Base Unit ที่มีชื่อว่า “RUS” ที่มีความถี่ภายในจำนวน 5 ความถี่และภายใน Base Unit มีระยะระหว่างช่องสัญญาณจำนวน 4 ช่องสัญญาณ จากนั้นเป็นการนาเอา Base Unit มาเรียงต่อกัน โดยมีระยะห่างระหว่าง Base Unit จำนวน 3 ค่า คือ Δf_1 , Δf_2 และ Δf_3 ตามลำดับ จนครบแบนด์วิดท์ โดยคานวนที่ 24 ช่องสัญญาณ ดังนั้นผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีรายละเอียดดังนี้

- จ านวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้น 2555
- Total FWM Efficiency -3.57 dB
- Bit Error Rate -20.51 dBm
- Power Penalty 0.378 dB

ผู้วิจัยจึงมุ่งประเด็นศึกษาเฉพาะวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน เพื่อหาวิธีที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหา โดยผู้วิจัยได้วิจัยเพื่อออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่ๆ อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอและเผยแพร่ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงรวม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

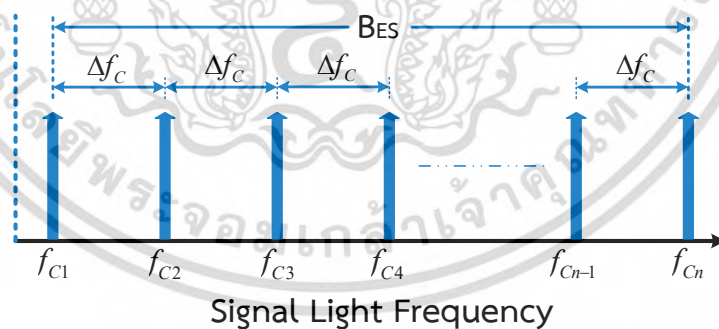
ทั้งสิ้นเป็นจำนวน วิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีการเหล่านี้เป็นเพียงวิธีการเชิงทฤษฎีที่เป็นผลลัพธ์จากการวิจัย ในภาคปฏิบัติแล้วยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ได้แก่ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Equally Spaced Repeated Alternate Unequally Space (ERAUS) [15], Paired Unequally Repeated Alternate Unequally Space (Paired URAUS) [21], Symmetrical Paired Repeated Unequally Spaced (SPRUS) [16], Repeated Base-unit Unequally Spaced (RBUS) [17], Base-unit Repeated Unequally Spaced (BRUS) [18] และ Symmetrical Unequally Spaced Repeated Unequally Spaced (SURUS) [19], Invert Repeated Base Unit Unequally Spaced (IRBUS) [22] แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ

จากการศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบต่างๆ ในระบบ DWDM สามารถสรุปประเด็นสำคัญใน 2 ส่วนคือ

- 1) วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างเท่ากัน ซึ่งได้แก่ วิธีจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES และ
- 2) ตัวอย่างผลงานวิจัยที่ใช้วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน ได้แก่ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS และ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ IRBUS

3.1.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างเท่ากัน

วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES (ES Channel Allocation) คือวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างเท่ากัน ที่ใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนาแสงแบบ DWDM โดยจากการศึกษางานวิจัย พบว่ามีหลายผลการวิจัยที่ชี้ให้เห็นชัดว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ซึ่งเป็นวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบที่มีระยะห่าง (Space) ระหว่างแต่ละช่องสัญญาณ (Δf_c) ในขนาดที่เท่าๆ กันนั้น ยังทำให้เกิดผลกระทบของ FWM ในระดับสูง สามารถแสดงโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

จากรูปที่ 3.1 $f_{C1} - f_{Cn}$ คือช่องสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนาแสง จำนวน 40 ช่องสัญญาณ [20] Δf_c คือระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสง ที่มีขนาดเท่าๆ กัน คือ 100 GHz ที่ทำให้ระบบ DWDM ทำงานได้อย่างเสถียรภาพมากที่สุด

B_{ES} คือ แบนด์วิดธ์รวมทั้งหมด จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$B_{ES} = (N_c - 1)\Delta f_c \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง FWM จะเกิดขึ้นในทุกๆ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสง (Δf_c) โดย FWM ดังกล่าวจะแทนด้วย $f_{FWM} = f_i$ ในระบบที่ใช้งานจริงอยู่ในปัจจุบันใช้วิธีแก้ปัญหาโดย การใช้อุปกรณ์ Optical Filter ในฝั่งเครื่องรับปลายทาง (Receiver) เป็นตัวกรองสัญญาณ FWM ออก สามารถแสดงค่าความถี่จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

Channels	1	2	3	=>	38	39	40
Δf_c (GHz)	100	100		=>	100	100	
f_i (THz)	192.1	192.2	192.3	=>	195.8	195.9	196.0

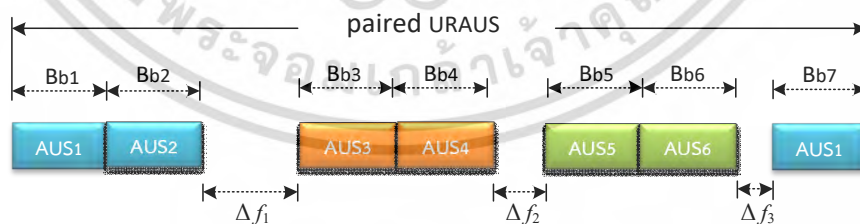
จากตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ที่ใช้ความถี่สำหรับช่องสัญญาณแรกคือ 192.1 THz จนถึงความถี่ที่ใช้สำหรับช่องสุดท้ายคือ 196.0 THz ซึ่งมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงแต่ช่องในขนาดที่เท่ากัน (Δf_c) คือ 100 GHz มีจำนวนช่องสัญญาณแสงทั้งหมด 40 ช่องสัญญาณ ตามมาตรฐาน ITU-TG.694.1 [20]

จากการศึกษาปัญหาการเกิด FWM ที่ได้อธิบายมาแล้วนั้น พบว่าในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ที่ใช้วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ยังเกิดผลกระทบจาก FWM ในระดับสูง เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแสงแบบต่างๆ จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อหาวิธีจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้ดีกว่า

3.1.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน

3.1.2.1 วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS

วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS [21] เป็นวิธีการที่ได้จากงานวิจัยเพื่อลดผลกระทบจาก FWM ภายใต้แนวคิดการจัดช่องสัญญาณแสงแบบไม่เท่ากัน (US) ซึ่งเป็นแนวคิดที่แตกต่างจากวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ซึ่งจากผลวิจัยสรุปไว้ว่าสามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้ดีกว่าการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES สามารถแสดงโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงเทคนิควิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS โดยการนำแต่ละ Base Unit มาจับคู่กัน โดยที่ AUS₁, AUS₂, AUS₃, AUS₄, AUS₅ และ AUS₆ คือ Base Unit ที่ประกอบด้วยชุดความถี่ภายในเท่ากับ {75 50 150 125 100}, {125 150 50 75 100}, {50 150 125 100 75}, {125 100 75 50 150}, {100 75 50 150 125} และ {75 100 125 150 50}

ตามลำดับ และ Δf_1 , Δf_2 และ Δf_3 คือ ระยะห่างระหว่าง Base Unit มีค่าเท่ากับ 62.5 GHz, 56.25 GHz และ 50 GHz ตามล าดับ

การกำหนดวิธีการจัดช่องสัญญาณแสง ทำได้โดยการจับคู่ระหว่าง AUS_1 กับ AUS_2 , AUS_3 กับ AUS_4 และ AUS_5 กับ AUS_6 โดยแต่ละคู่จะวางต่อกัน และคั่นด้วยระยะห่างระหว่าง Base Unit ซึ่งแทนด้วย Δf_1 , Δf_2 และ Δf_3 ตามลำดับ ไปจนครบตามจำนวนแบนด์วิดท์ เป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยแบนด์วิดท์รวมของ Paired URAUS จะหาได้จากสมการ

$$B_{paired_URAUS} = n(B_{b1} + B_{b2} + \dots + B_{bn}) + \sum_{d=1}^{n-1} \Delta f d + B_{res} \quad (3.2)$$

เมื่อ n คือ จำนวน Base Unit

B_{bn} คือ แบนด์วิดท์ของ Base Unit

B_{res} คือ แบนด์วิดท์ที่เพิ่มเข้ามา

ซึ่งแสดงค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ Paired URAUS

Channels	1	2	3	4	5
Δf_c (GHz)	75	50	150	125	100
f_i (THz)	192.1	192.17	192.22	192.37	192.5
Channels	6	7	8	9	10
Δf_c (GHz)	125	150	50	75	100
f_i (THz)	192.6	192.72	192.87	192.92	193.0
Channels	11	12	13	14	15
Δf_c (GHz)	62.5	50	150	125	100
f_i (THz)	193.1	193.16	193.21	193.36	193.48
Channels	16	17	18	19	20
Δf_c (GHz)	75	125	100	75	50
f_i (THz)	193.58	193.66	193.78	193.88	193.96
Channels	21	22	23	24	25
Δf_c (GHz)	150	56.25	100	75	50
f_i (THz)	194.01	194.16	194.21	194.31	194.39
Channels	26	27	28	29	30
Δf_c (GHz)	150	125	75	100	125
f_i (THz)	194.44	194.59	194.71	194.79	194.89
Channels	31	32	33	34	35
Δf_c (GHz)	150	50	50	75	50
f_i (THz)	195.02	195.16	195.21	195.26	195.34
Channels	36	37	38	39	40
Δf_c (GHz)	150	125	100	50	
f_i (THz)	195.39	195.54	195.66	195.76	195.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

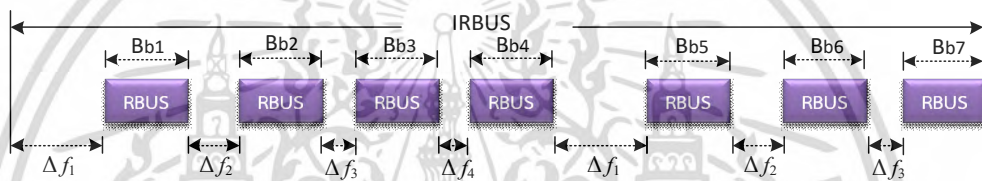
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.2 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแบบ Paired URAUS ความถี่สำหรับช่องสัญญาณแรกคือ 192.1 THz จนถึงความถี่สุดท้ายคือ 195.81 THz จะได้จำนวนช่องสัญญาณรวมทั้งหมดคือ 40 ช่องสัญญาณ โดยกำหนดให้ Δf_1 มีค่า 62.5 GHz Δf_2 มีค่า 56.25 GHz และ Δf_3 มีค่า 50 GHz

จากปัญหาการเกิด FWM ที่ได้อธิบายมาแล้ว การจัดช่องสัญญาณแบบ Paired URAUS ยังไม่สามารถลด FWM ได้ดีพอ ยังคงมี จำนวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 4211 [21] ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS ต่อไป

3.1.2.2 วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ Invert Repeated Base Unit Unequally Spaced (IRBUS) [22] เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อลดผลกระทบจาก FWM ภายใต้แนวคิดการจัดช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากัน (US) สามารถแสดงโมเดลการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงเทคนิควิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS โดยการนำ Base Unit มาจัดเรียงแบบวนซ้ำ ซึ่งผู้วิจัยได้ค้นพบว่าการเริ่มต้นที่การเว้นระยะห่างก่อนถึง Base Unit แรก เป็นจุดเริ่มต้นของการลด FWM จึงออกแบบให้มีการจัดวางแต่ละ Base Unit โดยเว้นระยะห่างระหว่าง Base Unit ที่แตกต่างกันตามโมเดลที่นำเสนอไปเรื่อยๆ ในลักษณะของการวนซ้ำไปจนครบจำนวนแบนด์วิธ ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าระยะห่างระหว่าง Base Unit (Δf_1 Δf_2 Δf_3 และ Δf_4) ที่เหมาะสม ได้แก่ 62.5 GHz 58.34 GHz 54.18 GHz และ 50 GHz ตามลำดับ

สามารถแสดงค่าความถี่จากการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS

Channels	1	2	3	4	5
Δf_c (GHz)	62.5	150	125	100	75
f_i (THz)	192.1	192.16	192.31	192.43	192.53
Channels	6	7	8	9	10
Δf_c (GHz)	50	58.34	150	125	100
f_i (THz)	192.61	192.66	192.72	192.87	192.99
Channels	11	12	13	14	15
Δf_c (GHz)	75	50	54.18	150	125
f_i (THz)	193.09	193.17	193.22	193.27	193.42

ตารางที่ 3.3 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแบบ IRBUS (ต่อ)

Channels	16	17	18	19	20
Δf_c (GHz)	100	75	50	50	150
f_i (THz)	192.55	193.65	193.72	193.77	193.82
Channels	21	22	23	24	25
Δf_c (GHz)	125	100	75	50	62.5
f_i (THz)	193.97	194.10	194.20	194.27	194.32
Channels	26	27	28	29	30
Δf_c (GHz)	150	125	100	75	50
f_i (THz)	194.38	194.53	194.66	194.76	194.83
Channels	31	32	33	34	35
Δf_c (GHz)	58.34	150	125	100	75
f_i (THz)	194.88	194.94	195.09	195.22	195.32
Channels	36	37	38	39	40
Δf_c (GHz)	50	54.18	150	125	100
f_i (THz)	195.39	195.44	195.50	195.65	195.77
Channels	41	42	43		
Δf_c (GHz)	75	50			
f_i (THz)	195.87	195.95	196.0		

จากตารางที่ 3.3 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ IRBUS จากงานวิจัยกำหนดความถี่สำหรับช่องสัญญาณแรกคือ 192.1 THz จนถึงความถี่สุดท้าย 196.0 THz จะได้จำนวนช่องสัญญาณรวมทั้งหมด 43 ช่องสัญญาณ ซึ่งกำหนดค่าให้กับ $\Delta f_1 - \Delta f_4$ เท่ากับ 62.5 GHz, 58.34 GHz, 54.18 GHz และ 50 GHz ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ IRBUS ก็ยังไม่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้ทั้งหมด ยังคงมีจำนวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1658 [22] ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่ที่มีชื่อว่า APRUS เพื่อให้สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้ดียิ่งขึ้น

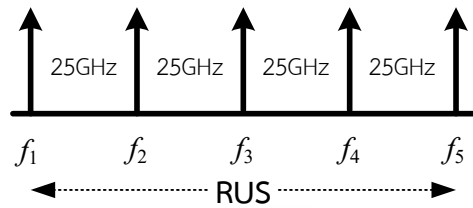
3.2 การออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่

วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่ที่นำเสนอ มีชื่อเรียกว่า Asymmetrical Paired Repeated Unequally Spaced (APRUS) นี้เป็นการพัฒนาสืบเนื่องมาจากวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน ตามหัวข้อ 3.1.2 ดังกล่าวแล้วข้างต้น โดยมีเป้าหมายให้มีจำนวน FWM น้อยกว่า 1658 total FWM power น้อยกว่า -28.3 dBm Total FWM Efficiency น้อยกว่า -0.2 dB และ Bit Error Rate น้อยกว่า -1.8 dBm [23] ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบ ดังนี้

3.2.1 ออกแบบโครงสร้างการจัดกลุ่มความถี่ของช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีผลการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า การกำหนดจำนวนช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit ที่มีค่าเท่ากับ 5 ช่องสัญญาณ ส่งผลให้ค่า FWM ที่เกิดขึ้นน้อยลง [12-14, 20] ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ Base Unit แทนด้วยชื่อ RUS ที่ประกอบด้วยความถี่ของช่องสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง จำนวน 5 ช่องสัญญาณ แทนด้วย f_1 - f_5 ได้แก่ 50 75 100 125 และ 150 GHz ตามลำดับ โดยมีช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit จำนวน 4 ช่อง แต่ละช่องมีขนาด 25 GHz ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างการจัดกลุ่มความถี่ของช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit

หลังจากที่ได้โครงสร้างการจัดกลุ่มความถี่ของช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit แล้ว จึงคำนวณหาค่าผลกระทบจาก FWM ที่เกิดขึ้น โดยนำค่าความถี่ของช่องสัญญาณแสงทั้ง 5 ค่ามาคำนวณหาความน่าจะเป็นผลรวมของจำนวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นที่ไปซ้อนทับช่องสัญญาณหลัก ซึ่งจะได้รูปแบบการจัดกลุ่มความถี่ของช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit ที่ไม่ซ้ำกัน เมื่อนำค่าความถี่ของสัญญาณแสงทั้ง 5 ค่ามาวางสลับกันไปมา โดยคำนวณจากสูตร $5!$ ได้รูปแบบที่เป็นไปได้จำนวน 120 รูปแบบที่ไม่ซ้ำกัน หลังจากนั้นนำค่าความถี่ของสัญญาณแสงในแต่ละ Base Unit มาคำนวณตาม สมการที่ 2.23 เพื่อหาผลกระทบจาก FWM ของทั้ง 120 รูปแบบ โดยสามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้จาก บทที่ 2 สามารถสรุปค่าผลกระทบจาก FWM ของ Base Unit ทั้ง 120 รูปแบบ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าผลกระทบจาก FWM ของ Base Unit ทั้ง 120 รูปแบบ

รูปแบบที่	ความถี่ภายใน Base Unit	FWM	รูปแบบที่	ความถี่ภายใน Base Unit	FWM
1.	50 75 100 125 150	4	61.	100 125 50 75 150	9
2.	50 75 100 150 125	4	62.	100 125 50 150 75	4
3.	50 75 125 100 150	10	63.	100 125 75 50 150	10
4.	50 75 125 150 100	10	64.	100 125 75 150 50	10
5.	50 75 150 100 125	9	65.	100 125 150 50 75	4
6.	50 75 150 125 100	9	66.	100 125 150 75 50	9
7.	50 100 75 125 150	4	67.	100 150 50 75 125	15
8.	50 100 75 150 125	4	68.	100 150 50 125 75	10
9.	50 100 125 75 150	9	69.	100 150 75 50 125	10
10.	50 100 125 150 75	9	70.	100 150 75 125 50	5
11.	50 100 150 75 125	5	71.	100 150 125 50 75	10
12.	50 100 150 125 75	5	72.	100 150 125 75 50	10
13.	50 125 75 100 150	10	73.	125 50 75 100 150	15
14.	50 125 75 150 100	5	74.	125 50 75 150 100	10
15.	50 125 100 75 150	10	75.	125 50 100 75 150	9
16.	50 125 100 150 75	5	76.	125 50 100 150 75	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การหาค่าผลกระทบจาก FWM ที่เกิดขึ้นภายใน RUS (ต่อ)

รูปแบบที่	ความถี่ภายใน Base Unit	FWM	รูปแบบที่	ความถี่ภายใน Base Unit	FWM
17.	50 125 150 75 100	4	77.	125 50 150 75 100	4
18.	50 125 150 100 75	4	78.	125 50 150 100 75	4
19.	50 150 75 100 125	5	79.	125 75 50 100 150	15
20.	50 150 75 125 100	10	80.	125 75 50 150 100	15
21.	50 150 100 75 125	4	81.	125 75 100 50 150	9
22.	50 150 100 125 75	4	82.	125 75 100 150 50	4
23.	50 150 125 75 100	5	83.	125 75 150 50 100	10
24.	50 150 125 100 75	0	84.	125 75 150 100 50	5
25.	75 50 100 125 150	8	85.	125 100 50 75 150	12
26.	75 50 100 150 125	9	86.	125 100 50 150 75	9
27.	75 50 125 100 150	10	87.	125 100 75 50 150	4
28.	75 50 125 150 100	10	88.	125 100 75 150 50	5
29.	75 50 150 100 125	4	89.	125 100 150 50 75	4
30.	75 50 150 125 100	4	90.	125 100 150 75 50	4
31.	75 100 50 125 150	9	91.	125 150 50 75 100	4
32.	75 100 50 150 125	5	92.	125 150 50 100 75	5
33.	75 100 125 50 150	5	93.	125 150 75 50 100	8
34.	75 100 125 150 50	0	94.	125 150 75 100 50	4
35.	75 100 150 50 125	4	95.	125 150 100 50 75	9
36.	75 100 150 125 50	4	96.	125 150 100 75 50	4
37.	75 125 50 100 150	10	97.	150 50 75 100 125	4
38.	75 125 50 150 100	10	98.	150 50 75 125 100	10
39.	75 125 100 50 150	9	99.	150 50 100 75 125	9
40.	75 125 100 150 50	4	100.	150 50 100 125 75	9
41.	75 125 150 50 100	10	101.	150 50 125 75 100	10
42.	75 125 150 100 50	5	102.	150 50 125 100 75	5
43.	75 150 50 100 125	9	103.	150 75 50 100 125	12
44.	75 150 50 125 100	4	104.	150 75 50 125 100	9
45.	75 150 100 50 125	5	105.	150 75 100 50 125	9
46.	75 150 100 125 50	5	106.	150 75 100 125 50	10
47.	75 150 125 50 100	4	107.	150 75 125 50 100	4
48.	75 150 125 100 50	9	108.	150 75 125 100 50	9
49.	100 50 75 125 150	9	109.	150 100 50 75 125	15
50.	100 50 75 150 125	8	110.	150 100 50 125 75	10
51.	100 50 125 75 150	4	111.	150 100 75 50 125	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การหาค่าผลกระทบจาก FWM ที่เกิดขึ้นภายใน RUS (ต่อ)

52.	100 50 125 150 75	4	112.	150 100 75 125 50	10
53.	100 50 150 75 125	10	113.	150 100 125 50 75	10
54.	100 50 150 125 75	10	114.	150 100 125 75 50	10
55.	100 75 50 125 150	10	115.	150 125 50 75 100	10
56.	100 75 50 150 125	4	116.	150 125 50 100 75	9
57.	100 75 125 50 150	10	117.	150 125 75 50 100	9
58.	100 75 125 150 50	5	118.	150 125 75 100 50	4
59.	100 75 150 50 125	4	119.	150 125 100 50 75	8
60.	100 75 150 125 50	4	120.	150 125 100 75 50	4

จากตารางที่ 3.4 ผู้วิจัยเลือกรูปแบบการจัดกลุ่มความถี่ของช่องสัญญาณแสงภายใน Base Unit ที่มีค่าผลกระทบจาก FWM น้อยที่สุดคือ รูปแบบที่ 24 ($RUS_1 = 50\ 150\ 125\ 100\ 75$) ซึ่งมีค่า FWM = 0 และรูปแบบที่ 34 ($RUS_2 = 75\ 100\ 125\ 150\ 50$) ที่มีค่า FWM = 0 เช่นกัน เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ในข้อ 3.1.3 ต่อไป

3.2.2 ออกแบบระยะห่าง (Channel Spacing) ระหว่าง Base Unit

จากมาตรฐาน ITU-T G.694.1 กำหนดให้ใช้สัญญาณแสงในช่วง 1539.55-1560.61 nm หรือ 192.1-196.0 THz ผู้วิจัยจึงกำหนดให้วิธีการการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS มีขนาดแบนด์วิดท์ที่ประกอบด้วย Base Unit จำนวน 4 ชุด คือ RUS_1 จำนวน 2 ชุด และ RUS_2 จำนวน 2 ชุด และกำหนดให้มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ที่มีค่าไม่เท่ากันจำนวน 2 ค่าคือ Δf_1 และ Δf_2 เพื่อให้ครบตามจำนวนแบนด์วิดท์ที่กำหนด

พิจารณาค่า Δf_1 และ Δf_2 ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งส่งผลให้ผลกระทบจาก FWM มีค่าน้อยที่สุดคือ จากการกำหนดให้ $RUS = \{f_1 f_2 f_3 f_4 f_5\}$ โดยเรียงจากความถี่น้อยสุด $\{f_1\}$ ไปหาความถี่ มากสุด $\{f_5\}$ จึงกำหนดคุณลักษณะของ Δf_1 และ Δf_2 ไว้ดังนี้

1. Δf_1 จะต้องมีความไม่น้อยกว่า f_1
2. Δf_2 จะต้องมีความไม่มากกว่า f_2

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดค่า Δf_1 และ Δf_2 เท่ากับ 58.3 GHz และ 62.5 GHz ตามลำดับ สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ในข้อ 3.1.1 ต่อไป

3.2.3 ออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

3.2.3.1 การออกแบบรูปแบบการจัดวาง Base Unit ชั้นที่ 1

เพื่อหารูปแบบการจัดวาง Base Unit ทั้งหมดที่เป็นไปได้ และเลือกรูปแบบการจัดวาง Base Unit ที่มีค่าผลกระทบจาก FWM มีค่าน้อยที่สุด จำนวน 2 รูปแบบ

ผู้วิจัยได้แบ่งช่วงแบนด์วิดท์ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน โดยที่แต่ละส่วนจะประกอบด้วย 4 Base Unit ได้แก่ RUS_1 จำนวน 2 ชุด และ RUS_2 จำนวน 2 ชุด จัดเรียงแตกต่างกัน จากนั้นหารูปแบบการจัดวาง 4 Base Unit และ 2 ระยะห่าง (Δf_1 และ Δf_2) ที่เป็นไปได้ ทั้งหมด 156 รูปแบบ ดังตารางที่ 3.5 ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน

รูปแบบที่	การจัดรูปแบบ Base Unit						จำนวนของ FWM
1.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	349.5
2.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	<u>248.5</u>
3.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	402.5
4.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	316.5
5.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	461.5
6.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	370.5
7.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	369.5
8.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	<u>242.5</u>
9.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	433.5
10.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	326.5
11.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	422.5
12.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	352.5
13.	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	376.5
14.	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	376.5
15.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	548.5
16.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	548.5
17.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	562.5
18.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	562.5
19.	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	346.5
20.	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	346.5
21.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	538.5
22.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	538.5
23.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	564.5
24.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	564.5
25.	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	272
26.	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	318
27.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	354
28.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	400
29.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	391
30.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	388
31.	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	268
32.	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	284
33.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	339
34.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	364
35.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน (ต่อ)

รูปแบบที่	การจัดรูปแบบ Base Unit						จำนวนของ FWM
36.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	418
37.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	587.5
38.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	676
39.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	651.5
40.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	740
41.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	603.5
42.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	416
43.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	587.5
44.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	676
45.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	651.5
46.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	740
47.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	465.5
48.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	676
49.	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	350.5
50.	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	704
51.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	454.5
52.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	872
53.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	590.5
54.	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	792
55.	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	684
56.	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	704
57.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	542.5
58.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	872
59.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	590.5
60.	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	792
61.	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	490
62.	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	676
63.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	566
64.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	622
65.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	518
66.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	676
67.	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	490
68.	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	676
69.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	566
70.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	740

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน (ต่อ)

รูปแบบที่	การจัดรูปแบบ Base Unit						จำนวนของ FWM
71.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	518
72.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	676
3.	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	Δf_2	1116
4.	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	Δf_1	1116
5.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	Δf_2	1276
6.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	Δf_1	1276
.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	Δf_2	1116
8.	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	Δf_1	1116
9.	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	Δf_2	1116
80.	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	Δf_1	1116
81.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	Δf_2	1276
82.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	Δf_1	1276
83.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	Δf_2	1116
84.	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	Δf_1	1116
85.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	425
86.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	400
8 .	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	428
88.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	398
89.	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	390
90.	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	308
91.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	446
92.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	364
93.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	446
94.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	364
95.	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	368
96.	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	338
97.	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	486.5
98.	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	554.5
99.	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	536.5
100.	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	597.5
101.	Δf_1	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	517.5
102.	Δf_2	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	583.5
103.	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	533.5
104.	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	579.5
105.	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	603.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน (ต่อ)

รูปแบบที่	การจัดรูปแบบ Base Unit						จำนวนของ FWM
106.	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	643.5
107.	Δf_1	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	449
108.	Δf_2	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	531
109.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	401
110.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	356.5
111.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	490.5
112.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	536.5
113.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	538.5
114.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	518.5
115.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	470
116.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	326.5
117.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	590
118.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	518.5
119.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	475
120.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	520.5
121.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₂	381
122.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₂	510
123.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	434
124.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	606
125.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	418
126.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	506
127.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	RUS ₁	351
128.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	RUS ₁	490
129.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	RUS ₁	526.5
130.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	RUS ₁	566
131.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	RUS ₂	389.5
132.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	RUS ₂	544
133.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_2	773
134.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	Δf_1	1116
135.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	885.5
136.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	1276
137.	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	751.5
138.	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	1116
139.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_2	774
140.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	Δf_1	1116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน (ต่อ)

รูปแบบที่	การจัดรูปแบบ Base Unit						จำนวนของ FWM
141.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_2	897
142.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	Δf_1	1276
143.	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_2	763
144.	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	Δf_1	1116
145.	Δf_1	Δf_2	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	718.5
146.	Δf_2	Δf_1	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	718.5
147.	Δf_1	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	850
148.	Δf_2	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	850
149.	Δf_1	Δf_2	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	827.5
150.	Δf_2	Δf_1	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	827.5
151.	Δf_1	Δf_2	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	819.5
152.	Δf_2	Δf_1	RUS ₂	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	819.5
153.	Δf_1	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	965.5
154.	Δf_2	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₂	RUS ₁	965.5
155.	Δf_1	Δf_2	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	715.5
156.	Δf_2	Δf_1	RUS ₂	RUS ₁	RUS ₁	RUS ₂	715.5

จากตารางที่ 3.5 แสดงการจัดวาง Base Unit ที่มีระยะห่างระหว่าง Base Unit ไม่เท่ากัน โดยคำนวณหาค่าผลกระทบจาก FWM ของแต่ละรูปแบบ ตามสมการที่ 2.23 แล้วนำค่าที่ได้มาเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก โดยใช้ตัวแปรความถี่ของสัญญาณแสงเท่ากับ 20 ความถี่ที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน โดยสามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.8

ผลการคำนวณหาค่าผลกระทบจาก FWM ผู้วิจัยเลือกรูปแบบการจัดเรียง Base Unit ที่มีค่าผลกระทบจาก FWM มีค่าน้อยที่สุดคือ รูปแบบที่ 2 (RUS₁ + Δf_2 + RUS₁ + Δf_1 + RUS₂ + RUS₂) ผลลัพธ์คือ FWM = 248.5 และ รูปแบบที่ 8 (RUS₂ + Δf_2 + RUS₂ + Δf_1 + RUS₁ + RUS₁) ผลลัพธ์คือ FWM = 242.5

3.2.3.2 การออกแบบรูปแบบการจัดวาง Base Unit ขั้นที่ 2

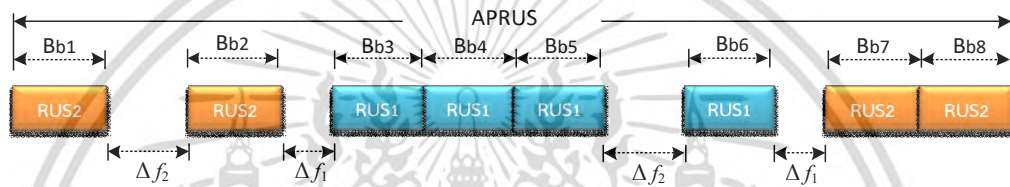
เพื่อหารูปแบบการจัดวาง Base Unit ที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลกระทบจาก FWM น้อยที่สุด

ผู้วิจัยเลือกรูปแบบการจัดวาง Base Unit ที่มีจำนวนความถี่ FWM น้อยที่สุด ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [20] จากตารางที่ 3.5 มาจำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 2 และ รูปแบบที่ 8 จากนั้นจึงนำ Base Unit รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 8 มาหาหาค่าผลกระทบการจัดวางแบบใหม่ที่เป็นไปได้ โดยไม่ซ้ำกัน ได้รูปแบบการจัดเรียงออกมาจำนวน 2 รูปแบบใหม่ คือรูปแบบ A และรูปแบบ B หลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่าผลกระทบจาก FWM ตามสมการ 2.23 ของทั้ง 2 รูปแบบใหม่ที่ได้ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การออกแบบรูปแบบการจัดวาง Base Unit ชั้นที่ 2

รูปแบบ	การจัดรูปแบบ		จำนวนของ FWM
A	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 8	594
B	รูปแบบที่ 8	รูปแบบที่ 2	569

จากตารางที่ 3.6 แสดงการออกแบบรูปแบบการจัดเรียง Base Unit ในชั้นตอนสุดท้าย จำนวน 2 รูปแบบ ผู้วิจัยเลือกรูปแบบที่มีค่าผลกระทบจาก FWM น้อยที่สุด นั่นก็คือ รูปแบบ B โดยการจัดวาง Base Unit ตามรูปแบบที่ 8 วางตำแหน่งครั้งแรก และวาง Base Unit ตามรูปแบบที่ 2 วางตำแหน่งครั้งหลัง ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ คือ รูปแบบการจัดวาง Base Unit รูปแบบ B มีค่า FWM เท่ากับ 569 ซึ่งน้อยกว่ารูปแบบ A หลังจากนั้นจึงนำรูปแบบการจัดวาง Base Unit รูปแบบ B ไปออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

3.2.4 การกำหนดค่าความถี่ตามโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

จากการออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มต้น ตั้งแต่ข้อ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 และ 3.2.4 จะเห็นได้ว่า ในแต่ละขั้นตอนผู้วิจัยได้มีการออกแบบการจำลองค่าและคำนวณ เพื่อหารูปแบบที่ได้ผลลัพธ์เป็นค่า FWM น้อยที่สุด ดังนั้นจึงขอสรุปค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

1. $RUS_1 = \{50 \ 150 \ 125 \ 100 \ 75\}$ GHz
2. $RUS_2 = \{75 \ 100 \ 125 \ 150 \ 50\}$ GHz
3. $\Delta f_1 = 58.3$ GHz
4. $\Delta f_2 = 62.5$ GHz

ผู้วิจัยนำค่าตัวแปรดังกล่าว มาจัดวางตามโครงสร้างของโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ตามรูปที่ 3.5 โดยสามารถแสดงค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสง ดังตารางที่ 3.

ตารางที่ 3.7 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

Channels	1	2	3	4	5
Δf_c (GHz)	75	100	125	150	50
f_i (THz)	192.1	192.17	192.27	192.40	192.55
Channels	6	7	8	9	10
Δf_c (GHz)	62.5	75	100	125	150
f_i (THz)	192.60	192.66	192.73	192.83	192.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ค่าความถี่ที่ได้จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS (ต่อ)

Channels	11	12	13	14	15
Δf_c (GHz)	50	58.3	50	150	125
f_i (THz)	193.11	193.16	193.22	193.27	193.42
Channels	16	17	18	19	20
Δf_c (GHz)	100	75	50	150	125
f_i (THz)	192.54	193.64	193.72	193.77	193.92
Channels	21	22	23	24	25
Δf_c (GHz)	100	75	50	150	125
f_i (THz)	194.04	194.14	194.22	194.27	194.42
Channels	26	27	28	29	30
Δf_c (GHz)	100	75	62.5	50	150
f_i (THz)	194.54	194.64	194.72	194.78	194.83
Channels	31	32	33	34	35
Δf_c (GHz)	125	100	75	58.3	75
f_i (THz)	194.98	195.10	195.20	195.28	195.34
Channels	36	37	38	39	40
Δf_c (GHz)	100	125	150	50	75
f_i (THz)	195.41	195.51	195.64	195.79	195.84
Channels	41				
Δf_c (GHz)					
f_i (THz)	195.91				

จากตารางที่ 3.7 เป็นการกำหนดค่าความถี่ของช่องสัญญาณส สำหรับใช้งานในระบบเครื่องส่งแบบ DWDM ตามโมเดลการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS ที่ได้เสนอแล้วนั้น โดยเฉพาะช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ 192.1-196.0 THz มีทั้งสิ้นจำนวน 41 ช่องสัญญาณ ที่น่าสนใจคือสามารถเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ซึ่งมีเพียง 40 ช่องสัญญาณ สำหรับช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมาจากการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS นั้น ทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอีก 10 Gb/s ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีที่ได้เพิ่มเติม นอกเหนือจากการลดผลกระทบจาก FWM อีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแก้วนาแสง เพื่อใช้ในการจำลองการท งานของระบบ ดังตารางที่ 3.8

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในลำดับถัดไป ดังแสดงในบทที่ 4 เป็นการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบของ FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบของ FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS กับวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบัน

ตารางที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแก้วนำแสง ที่กำหนดไว้สำหรับการจำลองการทางานของระบบ

ลำดับที่	พารามิเตอร์	ข้อมูลเฉพาะ
1.	ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง	Dispersion shift fiber (DSF)
2.	ย่านความถี่ที่ใช้งาน	1526.55 -1560.61 nm /192.1 – 192.6 THz
3.	กำลังของสัญญาณคานอินพุต (P_{in})	10 dBm
4.	โครมาติกดิสเพอร์ชัน (D)	0 ps/km/nm
5.	ดัชนีของดิสเพอร์ชัน ($dD/d\lambda$)	0.06 ps/km/nm ²
6.	ดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง (n)	1.45
7.	ความเร็วของแสงในอากาศ (c)	3×10^8 m/s
8.	ความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 3	6×10^{-15}
9.	องค์ประกอบที่แสดงสภาวะเสื่อม (d_{ijk})	3 เมื่อ $i=j$ และ 6 เมื่อ $i \neq j$
10.	ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง (L)	80 km
11.	ระยะทางประสิทธิผล (L_{eff})	20 km
12.	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (α)	0.2 dB/km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัย

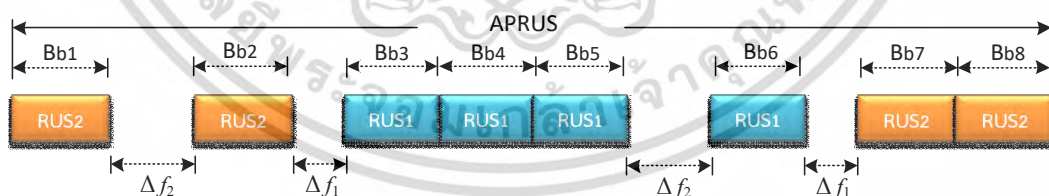
จากการวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีชื่อเรียกว่า “Asymmetrical Paired Repeated Unequally Spaced” (APRUS) นี้ใช้เทคนิควิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน โดยมีเป้าหมายให้มีจำนวน FWM น้อยกว่า 1658 total FWM power น้อยกว่า -28.3 dBm Total FWM Efficiency น้อยกว่า -0.2 dB และ Bit Error Rate น้อยกว่า -17.8 dBm [23]

ผู้วิจัยได้จำลองค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยสมการ ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแก้วนำแสง ตามตารางที่ 3.8 ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาเฉพาะผลกระทบจาก FWM (Four Wave Mixing) เป็นสำคัญ จะไม่พิจารณาผลกระทบจาก SPM (Self-phase Modulation) และ ผลกระทบจาก CPM (Cross-phase Modulation)

งานวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM มีผลการวิจัย ดังนี้

4.1 ผลการออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM

ผู้วิจัยได้ออกแบบโมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ขึ้นมาเพื่อลดผลกระทบจาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ดังรูปที่ 4.1 (รายละเอียดในการออกแบบปรากฏอยู่ในบทที่ 3)



รูปที่ 4.1 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

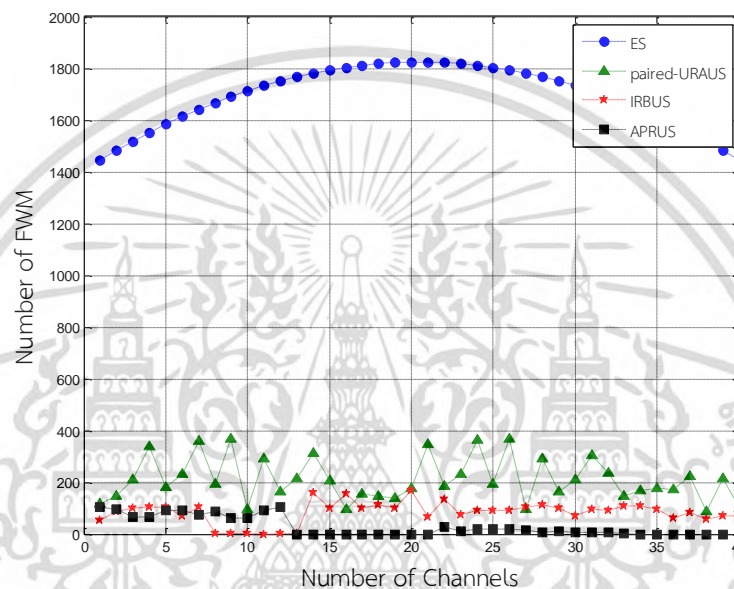
4.2 ผลการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM

การหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM นั้น ผู้วิจัยกำหนดให้หาจาก 4 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนความถี่ของ FWM (Number of FWM) ค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM (Total Power of FWM) ค่าประสิทธิภาพของความถี่ FWM (Total Efficiency of FWM) และ ค่าอัตราบิดผิดพลาด (Bit Error Rate) โดยมีผลจากการจำลองระบบตามปัจจัยที่กำหนดไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการจำลองจำนวนความถี่ของ FWM (Number of FWM)

จากทฤษฎีในบทที่ 2 ได้กล่าวถึง FWM คือความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจากการสอดแทรกระหว่างกัน ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ความถี่ดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะไปซ้อนทับช่องสัญญาณหลัก แทนด้วย f_{FWM} ผลกระทบจากความถี่ดังกล่าวทำให้สัญญาณที่ส่งไปยังปลายทางมีค่าอ่อนลง โดยสามารถเปรียบเทียบจำนวนความถี่ของ FWM ในแต่ละช่องสัญญาณแสง ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS กับวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS, IRBUS ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 จำนวนความถี่ของ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS

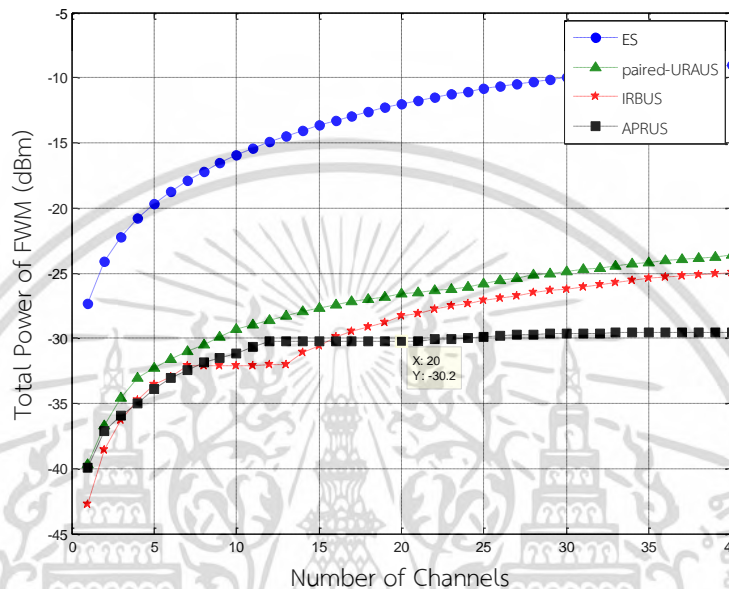
จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนความถี่ของ FWM ที่จำลองไว้ภายใต้มาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยมีจำนวน 40 ช่องสัญญาณ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น ผู้วิจัย คำนวณหาค่า จำนวนความถี่ FWM โดยใช้ตัวแปร f_i (THz) จำนวน 40 ความถี่ จากตารางที่ 3.1, 3.2, 3.3 และ 3.7 มาคำนวณหาจำนวนความถี่ของ FWM ตามสมการ 2.23 ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยสามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.8

ตามรูปที่ 4.2 พบว่าจำนวนความถี่ของ FWM จากหลายๆ ช่องสัญญาณของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS นั้นอยู่ต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ สำหรับการอ่านค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.2 ผลรวมทั้งหมดของจำนวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องสัญญาณ ทั้งหมดจำนวน 40 ช่องสัญญาณ โดยที่แกนนอน (x) แทนด้วยจำนวนช่องสัญญาณ และแกนตั้ง (y) แทนด้วยจำนวนความถี่ FWM ที่เกิดขึ้น อันได้แก่วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS นั้น พบว่าผลรวมของตัวเลขที่ได้คือ 33820, 4211, 1658 และ 569 ตามล ดับ แสดงให้เห็นว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS นั้นมีจำนวนความถี่ของ FWM น้อยที่สุด สามารถสรุปได้ว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสง แบบ APRUS สามารถลดจำนวนความถี่ของ FWM ได้มากกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการจำลองค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM (Total Power of FWM)

กำลังประสิทธิผลของ FWM เกิดขึ้นจาก การรวมกันของความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจากการสอดแทรกระหว่างกัน เป็นความถี่ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ทำให้เกิดเป็นกำลังไปสอดแทรกกำลังหลัก ส่งผลให้เกิด Nonlinear Polarization ทำให้การส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนาแสงแบบ DWDM ไม่มีประสิทธิภาพ สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, paired URAUS, IRBUS และ APRUS ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า กำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, paired URAUS, IRBUS และ APRUS

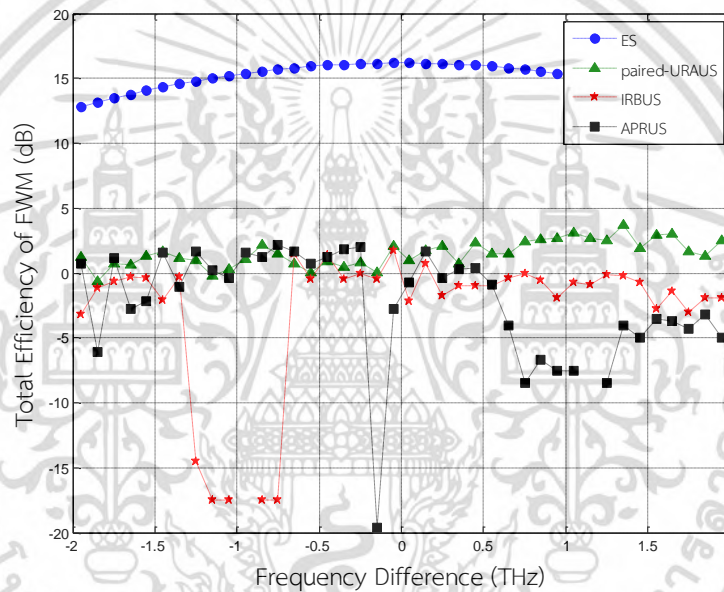
จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังประสิทธิผลของ FWM ที่จำลองไว้ภายใต้ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยมีจำนวน 40 ช่องสัญญาณ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น ผู้วิจัยนำค่าจำนวนความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นบนตำแหน่งของช่องสัญญาณทั้งหมดจำนวน 40 ช่องสัญญาณ นามาคำนวณ หาค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ตามสมการที่ 2.25 ด้วยโปรแกรม MATLAB

สำหรับการอ่านค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.3 จะใช้วิธีการวิเคราะห์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแบนด์วิดธ์ช่องสัญญาณทั้งหมดจำนวน 40 ช่องสัญญาณ โดยที่แกนนอน (x) แทนด้วยจ นวนช่องสัญญาณ และแกนตั้ง (y) แทนด้วยค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดขึ้น นั่นคือค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดขึ้นบนช่องสัญญาณที่ 20 นั่นเอง ค่าก ำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดช่องสัญญาณแสงรูปแบบต่างๆ เท่ากับ -12.0, -26.61, -28.3 และ -30.2 dBm ตามลำดับ จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถทำให้ค่าก ำลังประสิทธิผลของ FWM ลดลง ได้มากกว่าวิธีการ จัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนา แสงแบบ DWDM

4.2.3 ผลการจำลองหาประสิทธิภาพของควมถี่ FWM (Total Efficiency of FWM)

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของควมถี่ FWM จะวิเคราะห์โดยความสัมพันธ์ของเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างช่องสัญญาณที่ทาปฏิกริยาต่อกัน ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนาแสงแบบ DWDM นั้น มีการส่งสัญญาณแสงที่มีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากๆ และมีจำนวนหลายช่องสัญญาณเป็นผลทาให้เกิดการรบกวนกัน จึงสามารถวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดขึ้น จากค่าประสิทธิภาพการรวมกันของควมถี่ FWM

การหาประสิทธิภาพของควมถี่ FWM นั้น เกิดจากความแตกต่างของควมถี่ที่ส่งมาพร้อมๆ กันในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนาแสงแบบ DWDM เมื่อ f_{FWM} แทนด้วย ควมถี่ของ FWM และ f_0 แทนด้วย ควมถี่ดิสเพอร์ชันมีค่าเท่ากับ 0 กำหนดให้ f_0 อยู่กึ่งกลางแบนด์วิดธ์ ซึ่งจะมีจนวนของควมถี่ FWM สูงสุด สามารถแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของควมถี่ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของควมถี่ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การรวมกันทางควมถี่ของ FWM ที่จำลองไว้ภายใต้ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยมีจำนวน 40 ช่องสัญญาณ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น ผู้วิจัยนำค่าจนวนควมถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นบนตาแหน่งของช่องสัญญาณแสงทั้งหมดจนวน 40 ช่องสัญญาณ นามาคำนวณหาค่ากึ่งประสิทธิภาพของควมถี่ FWM ซึ่งผู้วิจัยใช้สมการที่ 2.27 ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลลัพธ์ของเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแสงทั้งหมด 4 รูปแบบคือ ES, Paired URAUS, IRBUS และ APRUS

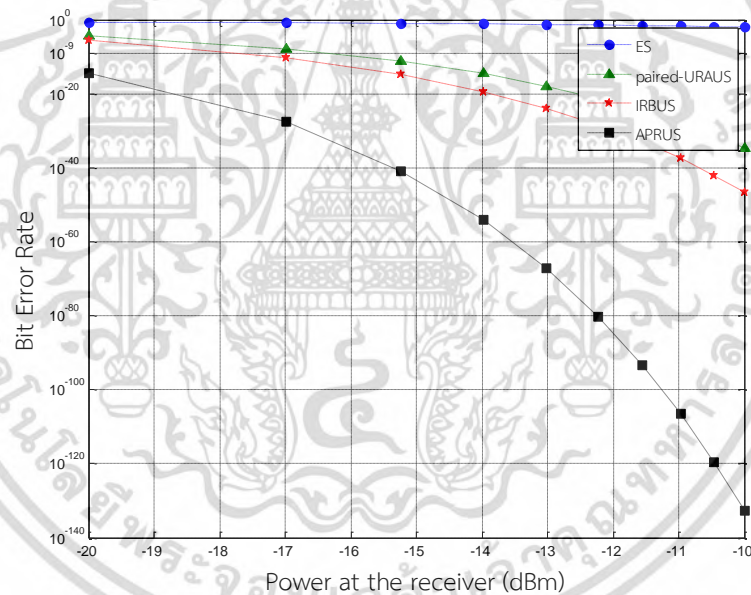
วิธีการอ่านค่ากึ่งประสิทธิภาพของควมถี่ FWM ที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 4.4 นั้น ทาโดยการวิเคราะห์ที่ตาแหน่งกึ่งกลางแบนด์วิดธ์ โดยที่ควมถี่ดิสเพอร์ชันมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดควมถี่ FWM สูงสุด โดยที่แกนนอน (x) แทนด้วยควมถี่ดิสเพอร์ชันและแกนตั้ง (y) แทนด้วยค่ากึ่งประสิทธิภาพของควมถี่ FWM ที่เกิดขึ้น ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้คือประสิทธิภาพการรวมกันทางควมถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดช่องสัญญาณแสงรูปแบบต่างๆ ตามลำดับเท่ากับ 16.20, 1.5, -0.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ -1.7 dB จากผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งให้เห็นว่าวิธีการการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถทำให้ประสิทธิภาพของความถี่ FWM ลดลงได้มากกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

4.2.4 ผลการจำลองหาอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate)

การหาอัตราบิตผิดพลาดนั้น หาได้โดยการนำค่ากำลังของ FWM มาวิเคราะห์ โดยค่าอัตราบิตผิดพลาดในระบบสื่อสารทั่วไปจะใช้เท่ากับ 10^{-6} เปรียบเทียบกำลังอัตราอินพุตต่อช่องสัญญาณ แต่สำหรับการสื่อสารด้วยสัญญาณแสงผ่านระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ซึ่งมีอัตราบิตผิดพลาดน้อยมาก ผู้วิจัยจึงใช้เกณฑ์การวัดค่าอัตราบิตผิดพลาดใช้เท่ากับ 10^{-9} [12-14] ซึ่งค่าอัตราบิตผิดพลาดนั้น ได้มาจากค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

การเปรียบเทียบอัตราบิตผิดพลาดที่จ าสงไว้ อยู่ภายใต้ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยมีจำนวน 40 ช่องสัญญาณ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น ผู้วิจัย ทาจำนวนความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นบนตาแหน่งของช่องสัญญาณทั้งหมดจำนวน 40 ช่องสัญญาณ มาคำนวณหาอัตราบิตผิดพลาด ซึ่งผู้วิจัยใช้สมการที่ 2.31 ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยสามารถแสดงการเปรียบเทียบอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, Paired URAUS IRBUS และ APRUS ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES, Paired URAUS IRBUS และ APRUS

จากรูปที่ 4.5 เนื่องมาจากค่าอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดจากการสื่อสารเชิงแสงนั้นมีค่าอัตราบิตผิดพลาดน้อยมาก วิธีการอ่านค่าอัตราบิตผิดพลาด โดยที่แกนนอน (x) แทนด้วยค่ากำลังที่เครื่องรับและแกนตั้ง (y) แทนด้วยค่าอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงใช้เกณฑ์การวัดค่าอัตราบิตผิดพลาดจุดตัดเท่ากับ 10^{-9} ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ค่าอัตราบิตผิดพลาดที่คำนวณได้ ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบต่างๆ เท่ากับ -5, -16.3, -17.8 และ -20.6 dBm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถลดการเกิดอัตราบิตผิดพลาดได้มากกว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

4.2.5 สรุปผลการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

จากผลการวิเคราะห์ผลจากการจำลองระบบเพื่อหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ข้างต้นนั้น สามารถสรุปผลการหาประสิทธิภาพตามปัจจัยที่ก าหนดเปรียบเทียบกับเป้าหมายที่ก าหนดไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ตามปัจจัยที่ก าหนด เปรียบเทียบกับเป้าหมาย

วิธีการจัดช่องสัญญาณแสง	Number of FWM	Total Power of FWM (dBm)	Total Efficiency of FWM (dB)	Bit Error Rate (dBm)
เป้าหมาย	น้อยกว่า 1658	-28.3	น้อยกว่า -0.2	-17.8
ES	33820	-12.0	16.20	-5
APRUS	569	-30.2	-1.7	-20.6

จากตารางที่ 4.1 พบว่า มีจากผลการวิเคราะห์หาจำนวนความถี่ของ FWM (Number of FWM) ค่าก ลัประสิทธิภาพของ FWM (Total Power of FWM) ค่าประสิทธิภาพของความถี่ FWM (Total Efficiency of FWM) และค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate) ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ของทุกปัจจัยมีค่าดีกว่าเป้าหมายที่ก าหนดไว้ และ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถทำให้ค่าต่างๆ ที่เป็นตัวแปรทำให้เกิดผลกระทบจาก FWM ลดลง สามารถสรุปได้ว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS นั้นมีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ได้ดี

สามารถสรุปได้ว่าวิธีการการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้มากกว่า วิธีการการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

บทที่ 5

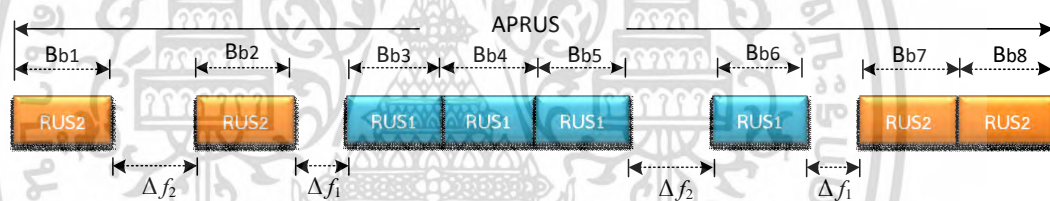
บทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ครั้งนี้ เป็นการวิจัยเพื่อออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถเพื่อลดผลกระทบ จาก FWM ในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM และเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS กับวิธีการ ที่ใช้อยู่จริงในปัจจุบัน ได้แก่วิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ซึ่งเป็นวิธีที่ยังไม่สามารถลดผลกระทบ จาก FWM ได้ทั้งหมด

สามารถสรุปประเด็นสำคัญของงานวิจัยเรื่อง ศึกษาวิธีการจัดช่องสัญญาณเพื่อลด FWM ใน ระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำ แสงแบบDWDM ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการออกแบบวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่สามารถลดผลกระทบจาก FWM ใน ระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM



รูปที่ 5.1 โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS

5.1.2 ผลการหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณ แสงแบบ APRUS

การหาประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM ทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนความถี่ ของ FWM (Number of FWM) ค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM (Total Power of FWM) ค่า ประสิทธิภาพของความถี่ FWM (Total Efficiency of FWM) และ ค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate) สามารถสรุปผลจากการจ าลองค่าดังกล่าว ได้ดังนี้

5.1.2.1 ผลการจ าลองจ านวนความถี่ของ FWM (Number of FWM) ของวิธีการจัด ช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS เท่ากับ 569 และค่าจ านวนความถี่ของ FWM รวม 40 ช่องสัญญาณ แสงของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES เท่ากับ 33820

5.1.2.2 ผลการจ าลองค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM (Total Power of FWM) จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS เท่ากับ -30.2 dBm และค่าก ึ่งประสิทธิผลของ FWM ที่ เกิดขึ้นจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES เท่ากับ -12.0 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.3 ผลการจำลองหาค่าประสิทธิภาพของควมถี่ FWM (Total Efficiency of FWM) จากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS เท่ากับ -1.7 dB และ ค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นจากการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES เท่ากับ 16.20 dB

5.1.2.4 ผลการจำลองหาค่าอัตราบิดผิดพลาด (Bit Error Rate) ของการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS เท่ากับ -20.6 dB และค่าอัตราบิดผิดพลาดของวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES เท่ากับ -5 dB

สรุปได้ว่าวิธีการการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้มากกว่า วิธีการการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES

5.2 การอภิปรายผล

ด้วยวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบใหม่ที่มีชื่อว่า APRUS (Asymmetrical Paired Repeated Unequally Spaced) ซึ่งเป็นการพัฒนาจากการจัดช่องสัญญาณแบบ Paired URAUS และ IRBUS โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบจาก FWM ให้ได้มากที่สุด โดยเมื่อนามาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก FWM กับวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ ES ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน แล้วพบว่ามีส่วนของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น ตามปัจจัยที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพ ดังนี้

ความสามารถในการลดจำนวนความถี่ FWM ได้ถึง 60 เท่า
 ความสามารถในการลดค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ได้ถึง 66 เท่า
 ความสามารถในการลดค่าประสิทธิภาพของควมถี่ FWM 62 เท่า
 ความสามารถในการลดอัตราบิดผิดพลาด 36 เท่า

ประเด็นที่น่าสนใจคือ การจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS สามารถลดจำนวนความถี่ FWM ได้ถึง 60 เท่า นั้นหมายความว่าในระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM จะสามารถลดการใช้ตัวกรองแสง (Optical Filter) ที่ด้านเครื่องรับปลายทางได้นั่นเอง นอกจากนี้ระบบเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DWDM ที่มีการจัดช่องสัญญาณแบบ APRUS ยังสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอีก 10 Gb/s

5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีผลการวิจัยอยู่ในรูปของ โมเดลการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ APRUS ซึ่งเป็นผลการวิจัยเชิงแนวคิด และการดำเนินการหาประสิทธิภาพด้วยการจำลองการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยสมการ วิธีการจัดช่องสัญญาณแสง โดยใช้รูปแบบอัลกอริทึม ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงตามโมเดลที่ออกแบบมานั้น สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองแสง (Optical Filter) ซึ่งจากผลการวิจัยนี้ ถ้ามีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพิ่มเติม จะได้เทคโนโลยีใหม่สำหรับใช้ในวงการสื่อสารทางแสง ในระบบ DWDM ที่น่าสนใจไม่น้อยไปกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael B, Eric W Van S. **Fiber Optics Handbook**. New York, USA : McGraw-Hill Telecom, OSA, 2002.
- [2] อธิคม ฤกษ์บุตร. “เทคโนโลยี DWDM : เส้นทางขนานสำหรับการเพิ่ม Bit rate” **วารสารสื่อสารของคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ**. 2546.
- [3] อธิคม ฤกษ์บุตร. **เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น** พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพฯ : ซีดับบลิวซี พรินติ้ง. 2546.
- [4] Rajiv R., Kumar N.S. and Galen H.S. **Optical Networks**. 2nd ed. Burlington, MA, USA : A Practical Practical (Networking), Morgan Kaufmann Publishers, 2009.
- [5] Tang J., Kheong S.C. and Zhang L. “Optical nonlinear effects on the performance of IP traffic over GMPLS-base DWDM networks” **J. Computer Commu.** vol.26, 2003. pp.1330 -1340.
- [6] Chin T.S., Abbou F.M. and Tat E.H. “Impact of four wave mixing (FWM) in routing and wavelength assignment” **American J. Applied Sci.** vol.5, 2008. pp.1059-1063.
- [7] Fujita S., Kitamura M., Torikai T., Henmi N., Yamada H., Suzaki T., Takano I., and Shikada M. “10Gb/s 100km optical fiber transmission experiment using high-speed MQW DFB-LD and backilluminated GaInAs APD” **American Electron Lett.** vol.5, 1989. pp.702-703.
- [8] Fujita S., Suzaki T., Masuoka A., Miyasaki S., Torikai T., Nakata T. and Shikada M. “High sensitivity 5Gb/s optical receiver module using Si IC and GaInAs APD” **Electron Lett.** vol.26, 1990. pp.175-176.
- [9] Forghieri F., Tkach R., Chraplyvy A.R. and Marcuse D. “Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM system using unequally spaced channels” **IEEE Photon. Technol. Lett.** vol.6, 1994. pp.754-756.
- [10] Forghieri F., Tkach R. and Chraplyvy A.R. “WDM systems with unequally spaced channels” **J. Lightw. Technol.** vol.13, 1995. pp.889-897.
- [11] Okada A., Curri V., Gemelos S.M. and Kazovsky L.G. “Reduction of four-wave mixing crosstalk using a novel hybrid WDM TDM technique” in **ECOC'98 Proc. Eur. Conf. Opt. Commu.** 1998. pp.289-290.
- [12] Kojima S. and Numai T. “Theoretical analysis of modified repeated unequally/spaced frequency allocation in FDM lightwave transmission systems” **J. Lightw. Technol.** vol.24, 2006. pp.2796-2797.
- [13] Nagatani Y., Lto Y., Onishi J., Kojima S. and Numai T. “Theoretical analysis of frequency allocation in FDM lightwave transmission systems” **J. Lightw. Technol.** vol.26, 2008. pp.1993-2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Kojima S. and Numai T. “Reduction of four wave mixing noise in FDM optical fiber transmission system in unequally spaced frequency allocation using base units” **J. Opt. commu.** vol.294, 2013. pp.305-310.
- [15] Ashira J., Vissavavit R, and Suthichai N. 2010. “The effect of four wave mixing in DWDM transmission system by spaced channel allocation” pp.66-67. in **ICT 2010**. Bangkok : Thailand.
- [16] Ashira J., Suthichai N. and Nainapas I. 2011 “The analysis of symmetrical PRUS (Paired repeated unequally spaced) chaneels allocation for FDM lightwave system” pp.269-272. in **ISTS 2011**. Bangkok : Thailand.
- [17] Ashira J., Suthichai N. and Nainapas I. 2012 “The analysis of RBUS (Repeated Base unit unequally spaced) channels allocation for FDM lightwave system” 236-240. in **ISTS 2012**. Bangkok : Thailand.
- [18] Ashira J., Suthichai N., and Nainapas I. 2012 “The analysis of BRUS (Base unit repeated unequally spaced) channels allocation for FDM lightwave system.” pp.62-65. in **ICEAST 2012**. Bangkok : Thailand.
- [19] Ashira J., and Suthichai N. “The SURUS channels allocation for decrease four wave mixing in DWDM system.” **IJECT**, vol.3, no.4 2012. pp.192-195.
- [20] ITU-T G.694.1. **Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid**. ITU-T Study Group 15; 2012.
- [21] Ashira J., Vissavavit R., and Suthichai N. 2011. “The analysis of paired unequally spaced repeated alternate unequally spaced allocation channels for FDM lightwave.” pp.754-758. in **PIERS 2011**. Suzhou : China.
- [22] Ashira J., Suthichai N., and Nainapas I. “The analysis of IRBUS channels allocation for FDM lightwave system.” **Proc. SPIE**. vol.8883. 888304-1 - 888304-7. in **ICPS 2012**. Chonburi : Thailand.
- [23] Ashira J., Yuttapong R., Suthichai N., and Nainapas I. “FWM-Minimizing channel allocation algorithmic scheme for multichannel DWDM transmission system.” **Journal of Signal Processing**. vol.21, 2017. pp.257-264.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายอชิระ จาปาเทศ
วัน เดือน ปีเกิด 8 เมษายน 2519 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ 85/1055 หมู่ 1 ซอยประชาอุทิศ 79 หมู่บ้านวิเศษสุข 18
แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทร.080-4466-384
ประวัติการศึกษา 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
2547 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบโทรคมนาคมทั้งแบบมีสายและแบบไร้สาย
2.) ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
3.) ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกความยาวคลื่น DWDM
4.) ระบบโครงข่ายบรอดแบนด์ไอพี

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2540-ปัจจุบัน ผู้จัดการศูนย์อุปกรณ์พิเศษ ส่วนปฏิบัติการวิศวกรรมสื่อสารที่ 3.2 ฝ่ายขายและ
บริการลูกค้านครหลวงที่ 3.2 บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน)
- ออกแบบและวิเคราะห์ การให้บริการวงจรเช่า-คู่สายเช่า ระบบ Analog และ
Digital
- ออกแบบและวิเคราะห์ การให้บริการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบดาวเทียม (IP-Star)
- ออกแบบและวิเคราะห์ การให้บริการสื่อสารข้อมูล IP-MPLS ผ่านเส้นใยแก้วนำ
แสง บนโครงข่ายบรอดแบนด์ไอพี
พ.ศ.2552-ปัจจุบัน อาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา (สาขาวิชาเทคโนโลยี
สารสนเทศและการสื่อสาร) กรุงเทพฯ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. A. Jumpates, V. Rachnarong and S. Noppanakeepong, "The Effect of Four-Wave Mixing in DWDM Transmission System by Spaced Channel Allocation", ICT 2010, Bangkok, Thailand, August 24-25, 2010.
2. A. Jumpates, V. Rachnarong and S. Noppanakeepong, "The Analysis of Paired Unequally Spaced Repeated Alternate Unequally Spaced Allocation Channels for FDM Lightwave System", PIERS 2011, Suzhou, China, September 12-16, 2011, pp. 754-758.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **A. Jumpates**, N. Injougjirakit and S. Noppanakeepong, “*The Analysis of Symmetrical PRUS (Paired Repeated Unequally Spaced) Channels Allocation for FDM Lightwave System*”, ISTS 2011, Bangkok, Thailand, November 23-26, 2011, pp. 269-272.
4. P. Amneaychaiwat, **A. Jumpates** and S. Noppanakeepong, “*The Analysis of XOR PRUS Allocation Channels for FDM Lightwave System*”, NCOA-7, Bangkok, Thailand, March 16, 2012, pp. 57-61.
5. **A. Jumpates**, S. Noppanakeepong and N. Injougjirakit, “*The Analysis of RBUS (Repeated Base-unit Unequally Spaced) Channels Allocation for FDM Lightwave System*”, ISTS 2012, Bangkok, Thailand, November 21-22, 2011, pp. 236-240.
6. **A. Jumpates**, S. Noppanakeepong and N. Injougjirakit, “*The Analysis of BRUS (Base-unit Repeated Unequally Spaced) Channels Allocation for FDM Lightwave System*”, ICEAST 2012, Bangkok, Thailand, November 21-24, 2011, pp. 62-65.
7. **A. Jumpates** and S. Noppanakeepong, “*The SURUS Channel Allocation Model for Decrease Four-Wave Mixing in DWDM System*”, IJECT, Vol. 3, no.4 2012. pp. 192-195.
8. **A. Jumpates**, C. Srinuan, S. Noppanakeepong, V. Rachnarong and N. Injougjirakit, “*The Analysis of IRBUS Channels Allocation for decrease Four-Wave Mixing in DWDM System*”, ICPS 2013, Chonburi, Thailand, May 26-28, 2013.
9. **A. Jumpates**, Y. Rangsanseri, S. Noppanakeepong and N. Injougjirakit, “*FWM-Minimizing Channel Allocation Algorithmic Scheme for Multichannel DWDM Transmission System*”, Journal of Signal Processing, Vol.21, No.6, November, 2017, pp. 257-264.

FWM-Minimizing Channel Allocation Algorithmic Scheme for Multichannel DWDM Transmission System

Ashira Jumpates¹, Yuttapong Rangsanseri², Suthichai Noppanakeepong³
and Nainapas Injoungjirakit⁴

^{1,2,3}Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

⁴Department of Information Technology, Faculty of Science and Technology
Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok, 10600, Thailand

E-mail: ¹ashiratot@gmail.com, ²yuttapong.ra@kmitl.ac.th, ³suthi_123@hotmail.com, ⁴injoung2004@hotmail.com

Abstract In this paper, we propose a novel channel allocation scheme, i.e., the asymmetrically paired repeated unequally spaced (APRUS) scheme, for the dense wavelength division multiplexing (DWDM) transmission system. The APRUS scheme is capable of virtually eliminating the four-wave mixing (FWM) noise in the DWDM system, thus effectively addressing the FWM problem plaguing the conventional equally spaced (ES) channel allocation scheme. The APRUS allocation scheme was simulated and validated on four performance metrics; the number of FWM frequencies, total FWM power, total FWM efficiency and bit error rate. The simulation results revealed that the APRUS scheme outperforms the conventional ES regime on all four metrics. In addition, the FWM noise under the APRUS scheme is negligible such that no optical filters are required to filter out the noise at the DWDM's receiving end. Moreover, an extra signal channel is accommodated under the APRUS allocation scheme, which is equivalent to a gain of 10Gbit/s data transfer rate.

Keywords: dense wavelength division multiplexing, four-wave mixing, nonlinear optics, erbium dope fiber amplifier, non-zero dispersion shift fiber

1. Introduction

The four-wave mixing (FWM) phenomenon contributes to the third-order nonlinear optical effects in the DWDM transmission system [1], and the situation is further compounded in the long-distance data transmission as the signals are significantly weakened upon arriving at the destination. To address the issue, the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) is normally deployed to enhance the signal intensity, which in turn exacerbates the four-wave mixing effect. The optical filters are thus required to mitigate the FWM.

A typical DWDM transmission system operates based on the conventional equally spaced (ES) channel allocation scheme, which is in accordance with the ITU-T G.694.1 standard [2]. The standard specifies the use of light in the wavelength range of 1539.55-1560.61nm (192.1-196.0THz) to transmit signals along 40 channels separated by fixed 100GHz spaces. The ES channel allocation scheme nevertheless suffers from a large number of FWM light waves and, despite numerous research attempts to minimize the FWM using alternative channel allocation schemes, e.g. the unequally spaced (US) allocation schemes [3-8], the re-

sults have been less than satisfactory.

To efficiently tackle the issue of FWM, this research has thus proposed a novel channel allocation algorithmic scheme (i.e. the asymmetrical paired repeated unequally spaced (APRUS) channel allocation scheme). In fact, the APRUS scheme is an improved version of the invert repeated base-unit unequally spaced (IRBUS) channel allocation scheme [9]. In the simulations, this research assumed that the transmission was carried out via the dispersion shift fiber (DSF) which is free of the self-phase modulation (SPM) and cross phase modulation (CPM) noises and thereby only the FWM noise would be of concern [10,11]; and that the spaces between channels must be at least 50GHz, which is one of the limitations of the optical multiplexer and de-multiplexer [12].

The organization of this research is as follows: Section 1 is the introduction. Section 2 details the theoretical concepts, while Section 3 discusses the proposed APRUS channel allocation scheme. Section 4 deals with the simulation results and discussion. The concluding remarks are provided in Section 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำไปทำซ้ำ, ลิขสิทธิ์ทางปัญญาสงวนไว้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Theoretical Concepts

The ultimate aim of the proposed APRUS channel allocation scheme is to minimize the four-wave mixing (FWM) noise. It is thus necessary to establish an understanding of the fundamental principles of nonlinear optics: the general nonlinear effects and FWM effects in optical fiber transmission.

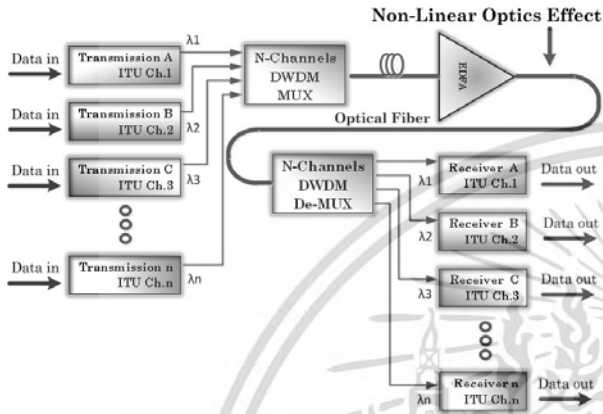


Fig. 1 A geometry of the DWDM transmission system afflicted by the nonlinear optical effect

2.1 General nonlinear effect in optical fiber transmission

The nonlinear effect pollutes the light signal in the DWDM transmission system by distorting the shape of the light signal. A normal-intensity light travelling through an optical fiber exhibits a linear refractive index response and thus the light signal is neither affected nor weakened. On the other hand, the simultaneous transmission of high-intensity lights of multiple wavelengths from a light amplifier could induce a nonlinear refractive index response as well as nonlinear polarization. These nonlinear effects originate from two sources: the dispersion and attenuation of light in the media; and changes in the refractive index attributable to SPM, CPM or FWM noises [13].

The nonlinear effect in the DWDM transmission system, particularly those with a transfer rate above 10Gbit/s, could be attributed to the requirement for an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) to amplify the high-intensity lights of multiple wavelengths. As seen in Figure 1, the problem develops immediately beyond the EDFA when a small amount of FWM noise associated with the output of the N-channels DWDM MUX is inadvertently amplified hundreds of times by the EDFA. This current research has thus proposed a solution to address the issue whereby the FWM is suppressed from development using the novel channel allocation algorithmic scheme (i.e. the APRUS scheme).

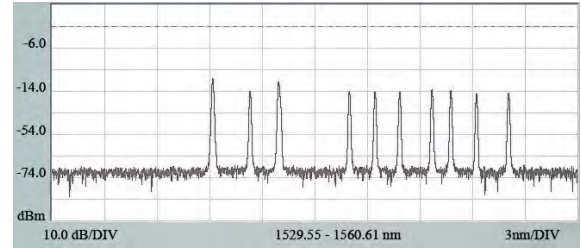


Fig. 2 The real spectrum of light signals at the output end of an N-channel DWDM MUX

2.2 FWM effect in optical fiber transmission

The FWM phenomenon contributes to the unwanted frequencies from the interference between adjacent signal frequencies. Specifically, an FWM frequency (f_{FWM}) originating from the interference between three-adjacent signal frequencies (i.e. f_i , f_j and f_k) can be expressed as

$$f_{FWM} = f_i + f_j - f_k, k \neq i, j \quad (1)$$

Given the equation, a total of 12 FWM frequencies are generated as follows: $f_1 = f_i + f_i - f_k$, $f_2 = f_j + f_i - f_k$, $f_3 = f_i + f_i - f_j$, $f_4 = f_j + f_j - f_k$, $f_5 = f_i + f_k - f_j$, $f_6 = f_j + f_j - f_i$, $f_7 = f_j + f_k - f_i$, $f_8 = f_k + f_k - f_j$, $f_9 = f_k + f_k - f_i$, $f_{10} = f_i + f_j - f_k$, $f_{11} = f_k + f_i - f_j$, $f_{12} = f_k + f_j - f_i$.

Notably, Equation (1) is applicable to the instances with three adjacent frequencies. Meanwhile, if more light signals of multiple frequencies are being simultaneously transmitted, a larger number of FWM frequencies would be generated.

The FWM frequencies are illustrated in Figure 2 as the high baseline noise. Specifically, this noise (f_n) is the summation of n FWM frequencies (f_{FWM}), as expressed in Equation (2)

$$f_n = f_{FWM}^n \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

where m is a positive integer.

In this current research, the severity of the FWM effect is quantified in terms of total FWM power and total FWM efficiency. Both metrics are subsequently deployed to evaluate the performance of the proposed APRUS channel allocation scheme against other allocation schemes.

Total FWM power (TP) is the total power of all FWM frequencies generated from the interference of all adjacent signal frequencies. Typically, the lower the total FWM power is, the less severe the FWM effect and thus the higher the transmission quality. Essentially, TP can be calculated by the following equation [14,15]

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (3)$$

where $P_{FWM}(f_m)$ is the total power of FWM at frequency f_m and $P_{FWM}(f_{ijk})$ is the power of FWM generated from the interference of a combination of adjacent frequencies

f_{ijk} . Specific to this current research, Equation (3) is rewritten as

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

where P_i , P_j , and P_k are the input power at f_i , f_j , and f_k respectively, n is the fiber refractive index, λ is the wavelength of FWM noise, c is velocity of light in vacuum, A_{eff} is the effective core area of fiber, α is fiber coefficient, L is the fiber length, d_{ijk} is the degeneracy factor ($d_{ijk} = 3$ for $i = j$ and $d_{ijk} = 6$ for $i \neq j$), and $\chi^{(3)}$ is the third order nonlinear susceptibility.

Meanwhile, total FWM efficiency (TE) is the combined efficiency of all FWM sources. Similar to TP, the lower the TE, the less severe the FWM effect and thus the higher the transmission quality. In addition, TE can be calculated by the following equation [14,15]

$$\eta_{FWM}^n = \sum_{i=1}^m \eta_{FWM(i)}^n \quad (5)$$

where η_{FWM}^n is TE and $i = 1, 2, \dots, m$ is the index of n sources of FWM. Specifically, the efficiency of an FWM source can be calculated by the following equation

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha l} \cdot \sin^2(\Delta\beta l/2)}{(1 - e^{-\alpha l})^2} \right) \quad (6)$$

and $\Delta\beta$ is the sum of all different frequencies propagating in the optical fiber, i.e.

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} \cdot |f_i - f_k| \cdot |f_j - f_k| \cdot \left[D + \frac{\lambda^2}{2c} \cdot \frac{dD}{d\lambda} (|f_i - f_0| \cdot |f_j - f_0|) \right] \quad (7)$$

where f_i , f_j , and f_k are any given frequencies in the transmission system, f_0 is the reference frequency, D is the chromatic dispersion, $dD/d\lambda$ is the derivative of the dispersion coefficient of the fiber, α is the fiber loss coefficient, λ is the wavelength of FWM noise, and c is the velocity of light in vacuum. Given the non-zero dispersion shift fiber, Equation (7) is rewritten as

$$\Delta\beta = -\frac{\pi\lambda^4}{c^2} \cdot \frac{dD}{d\lambda} (|f_i - f_0| + |f_j - f_0|) \cdot (|f_i - f_k| \cdot |f_j - f_k|) \quad (8)$$

To address the FWM noise in the DWDM system, under the conventional ES channel allocation scheme, the optical filters, one for each channel, are incorporated into the system at the input end of the N-channels De-MUX. By contrast, the proposed channel allocation scheme (APRUS) generates virtually no FWM and thereby no optical filters are required.

2.3 Bit error rate

The bit error rate (BER) is a measure of transmission quality at the receiving. Specifically, BER is the ratio of the number of erroneous bits to the total number of transmitted bits. The current standard for acceptable BER in optical fiber transmission is below 10^{-9} . In a transmission simulation, BER is calculated by the Gaussian approximation (P_e) of the probability that the signal is affected by FWM in a transmission modulated by on-off keying (OOK). In other words, BER can be calculated by the following equation [14,15]

$$P_e = \frac{1}{2\pi} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (9)$$

where t is time, Q is the quality factor, and α is the fiber coefficient. Q , in turn, can be calculated by the equation below

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM} + \sqrt{N_{th}}}} \quad (10)$$

Since the thermal noise (N_{th}) and the shot noise (N_{sh}) are low relative to N_{FWM} in a DWDM setting, Equation (10) can be approximated as

$$\begin{aligned} Q &= \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2bP_s}{\sqrt{b^2P_sP_{FWM}}} \\ &= \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_0e^{-\alpha L}}}{\sqrt{P_{FWM}}} \end{aligned} \quad (11)$$

where P_s is the received optical signal strength, N_{FWM} is the power of FWM noise, i.e.

$$N_{FWM} = 2b^2P_s \left(\frac{P_{FWM}}{8} \right) \quad (12)$$

and b is the responsivity that can be calculated by the following equation

$$b = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad (13)$$

where η is the quantum efficiency of detector, e is the elementary electric charge, λ is the wavelength of the FWM noise, and h is Planck's constant ($6.626 \times 10^{-34} J.s$). In the simulation, this current research assumes an avalanche photo diode detector, for which $\eta = 80\%$ [16,17].

3. APRUS Channel Allocation Scheme

Channel allocation exerts a direct influence on the optical transmission of the DWDM system. Under the conventional ES allocation scheme, the FWM noise

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการถือลิขสิทธิ์ สิ่งนี้หมายถึงผู้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

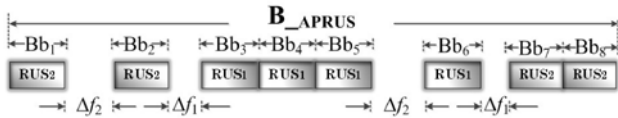


Fig. 3 The optimal configuration given the APRUS channel allocation scheme

is inevitable, and numerous attempts have been made to mitigate or address the FWM issue. To this end, this current research has proposed the APRUS channel allocation scheme that is capable of virtually eliminating the FWM noise.

In fact, the proposed APRUS channel allocation scheme is an improved version of the paired URAUS and IRBUS channel allocation schemes [9,18]. Specifically, the APRUS scheme is expected to satisfy the following performance metrics [6-8]: the number of FWM less than 4,211, the total FWM power less than -28.6dBm, the total FWM efficiency less than 1.4dB and the bit error rate below -16.3dBm.

The working principle of the APRUS scheme is first to divide the bandwidth of ITU-T G.694.1 standard into two bands, each consisting of four base units of two types ($RUS_1 \times 2$ and $RUS_2 \times 2$), each base unit of which has five fixed unequal channel spaces (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5), acceptable in [8]; and then allocate two empirically determined unequal spaces (Δf_1 and Δf_2) between the four base units of each band. The two arrangements of all five-factorial arrangements of the five fixed unequal channel spaces (50, 75, 100, 125 and 150GHz) in a given base unit whose FWM noise is the lowest are subsequently determined [9,18], as tabulated in Table 1.

Table 1 All possible five-factorial arrangements associated with the five fixed unequal spaces in a given base unit

No.	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Number of FWM
1.	50	75	100	125	150	4
2.	50	75	100	150	125	4
3.	50	75	125	100	150	10
4.	50	75	125	150	100	10
:	:	:	:	:	:	:
<u>24.</u>	50	150	125	100	75	<u>0</u>
:	:	:	:	:	:	:
<u>34.</u>	75	100	125	150	50	<u>0</u>
:	:	:	:	:	:	:
120.	150	125	100	75	50	4

The values of Δf_1 and Δf_2 with the lowest FWM noise are then empirically determined under two constraints: first, Δf_1 cannot be smaller than the smallest space of the five fixed unequal channel spaces in a base unit (RUS) due to the limitation of DWDM De-MUX, and, second, Δf_2 cannot be larger than the next smallest space. The optimal

Δf_1 and Δf_2 are respectively 58.3 and 62.5GHz. The two arrangements of all possible arrangements associated with four base units and Δf_1 and Δf_2 , given half the entire bandwidth, whose FWM noise is the lowest are determined.

Table 2 Possible arrangements of unequal spaces between base units

No.	Arrangement						Number of FWM
1.	RUS1	Δf_1	RUS1	Δf_2	RUS2	RUS2	345.9
<u>2.</u>	RUS1	Δf_2	RUS1	Δf_1	RUS2	RUS2	<u>248.5</u>
3.	RUS1	Δf_1	RUS2	Δf_2	RUS1	RUS2	402.5
4.	RUS1	Δf_2	RUS2	Δf_1	RUS1	RUS2	316.5
5.	RUS1	Δf_1	RUS2	Δf_2	RUS2	RUS1	461.5
6.	RUS1	Δf_2	RUS2	Δf_1	RUS2	RUS1	370.5
7.	RUS2	Δf_1	RUS2	Δf_2	RUS1	RUS1	369.5
<u>8.</u>	RUS2	Δf_2	RUS2	Δf_1	RUS1	RUS1	<u>242.5</u>
:	:	:	:	:	:	:	
23.	RUS2	RUS1	Δf_1	Δf_2	RUS1	RUS2	564.5
24.	RUS2	RUS1	Δf_2	Δf_1	RUS1	RUS2	564.5
:	:	:	:	:	:	:	
35.	RUS2	RUS1	Δf_1	RUS1	Δf_2	RUS2	400.0
36.	RUS2	RUS1	Δf_2	RUS1	Δf_1	RUS2	418.0
:	:	:	:	:	:	:	
47.	RUS2	Δf_1	RUS1	RUS1	RUS2	Δf_2	465.5
48.	RUS2	Δf_2	RUS1	RUS1	RUS2	Δf_1	676.0
:	:	:	:	:	:	:	
95.	RUS2	Δf_1	RUS1	RUS1	Δf_2	RUS2	368.0
96.	RUS2	Δf_2	RUS1	RUS1	Δf_1	RUS2	338.0
:	:	:	:	:	:	:	
155.	Δf_1	Δf_2	RUS2	RUS1	RUS1	RUS2	715.5
156.	Δf_2	Δf_1	RUS2	RUS1	RUS1	RUS2	715.5

Table 2 presents a total of 156 possible arrangements and the two arrangements with the least numbers of FWM, i.e. arrangements #2 (248.5) and #8 (242.5). Both arrangements are individually applied to the first and second halves of the bandwidth and then subsequently alternated to identify the configuration with the lower FWM noise.

Table 3 Two possible configurations associated with two optimal base unit arrangements

Type	Configuration		Number of FWM
1.	No.2	No.8	594
<u>2.</u>	<u>No.8</u>	<u>No.2</u>	<u>569</u>

In Table 3, the minimum FWM noise is achieved under the condition that arrangement #8 is applied to the first half of the bandwidth,

Table 4 Channel frequencies and space allocation under the APRUS channel allocation scheme

Channels	1	2	3	4	5	6
Δf_c (GHz)	75	100	125	150	50	<u>62.5</u>
f_i (THz)	192.10	192.17	192.27	192.40	192.55	192.60
Channels	7	8	9	10	11	12
Δf_c (GHz)	75	100	125	150	50	<u>58.3</u>
f_i (THz)	192.66	192.73	192.83	192.96	193.11	193.16
Channels	13	14	15	16	17	18
Δf_c (GHz)	50	150	125	100	75	50
f_i (THz)	193.22	193.27	193.42	193.54	193.64	193.72
Channels	19	20	21	22	23	24
Δf_c (GHz)	150	125	100	75	50	150
f_i (THz)	193.77	193.92	194.04	194.14	194.22	194.27
Channels	25	26	27	28	29	30
Δf_c (GHz)	125	100	75	<u>62.5</u>	50	150
f_i (THz)	194.42	194.54	194.64	194.72	194.78	194.83
Channels	31	32	33	34	35	36
Δf_c (GHz)	125	100	<u>75</u>	<u>58.3</u>	75	100
f_i (THz)	194.98	195.10	195.20	195.28	195.34	195.41
Channels	37	38	39	40	41	
Δf_c (GHz)	125	150	50	75		
f_i (THz)	195.51	195.64	195.79	195.84	195.91	

Table 5 The simulation parameters specific to this research

Parameters	Specifics/Value
Transmission	Dispersion shift fiber(DSF)
Wavelength range(λ)/ frequency range	1,526-1,560.61nm/ 192.1-196.0THz
Input Power(P_{in})	10dBm
Chromatic dispersion(D)	0ps/km/nm
Derivative dispersion coefficient of fiber	0.06ps/km/nm ²
Fiber refractive index(n)	1.45
Velocity of light in vacuum(c)	3×10^8 m/s
Third-order nonlinearity(χ^3)	6×10^{-15}
Degeneracy factor(d_{ijk})	3 for $i = j$ and 6 for $i \neq j$
Fiber length(L)	80km
Fiber effective length(L_{eff})	20km
Fiber coefficient(α)	0.2dB/km
Effective core area of fiber(A_{eff})	$50 \mu\text{m}^2$
Avalanche photo diode (η) quantum efficiency	of 80%

Table 4 tabulates the target signal channel frequencies and the allocated spaces between the frequencies, according to the proposed APRUS channel allocation scheme. Specifically, the target frequency range of 192.1-196.0THz contains 41 frequency channels. Interestingly, an additional channel is made available with the implementation of the APRUS allocation scheme, compared with the number of channels (40) allocated by the conventional ES allocation scheme. The extra channel under the APRUS

scheme translates into the enhanced data transfer rate by another 10Gbit/s, which could be regarded as a windfall in addition to the FWM noise elimination.

The following paragraphs encapsulate the steps algorithmically undertaken under the APRUS channel allocation scheme to determine the optimal allocation and arrangement of signal frequencies and interval spaces.

The first step involves identifying the two arrangements, whose FWM noises are the smallest, of all possible arrangements of the five fixed unequal channel spaces within a base unit. In this research, the results are arrangement #24 (i.e. RUS1= 50, 150, 125, 100, 75) whose FWM is equal to 0 and arrangement #34 (i.e. RUS2 = 75, 100, 125, 150, 50) whose FWM noise is also 0 (Table 1).

The next step is to determine the arrangements of the two base units identified in the previous step and two unequal spaces (Δf_1 and Δf_2) between these base units, which collectively result in the least FWM numbers. The findings point to arrangement #2 (RUS1+ Δf_2 +RUS1+ Δf_1 +RUS2+RUS2) whose FWM is 248.5; and arrangement #8 (RUS2+ Δf_2 +RUS2+ Δf_1 +RUS1+RUS1) with the FWM number of 242.5 (Table 2).

The final step is to identify the optimal configuration of the two arrangements determined in the second step (i.e. arrangements #2 and #8) by alternating between both arrangements. The optimal result with regard to the lowest number of FWM (i.e. 569) is achieved with the application of arrangement #8 to the first half of the bandwidth and arrangement #2 to the second half (Table 3).

Figure 3 illustrates the optimal configuration subsequent to the aforesaid steps, and Table 4 tabulates the channel frequencies and space allocation under such an optimal configuration.

4. Simulation Results and Discussion

The simulations were carried out on four performance metrics, i.e. the FWM number, total FWM power, total FWM efficiency and BER, under three channel allocation schemes using MATLAB. The three channel allocation schemes under investigation include the ES, IRBUS and APRUS schemes. The allocated signal channel frequencies and the spaces between channels associated with the allocation schemes were simulation inputs. The simulation results were graphically compared in Figures 4, 5, 6 and 7, corresponding to the performance metrics.

Table 5 lists the simulation parameters specific to this research.

Figure 4 compares the simulated numbers of FWM frequencies under the three channel allocation schemes (ES, IRBUS and APRUS) in relation to the number of channels (40 channels). The simulated numbers of FWM frequencies under the ES, IRBUS and APRUS channel allocation schemes were respectively 33,820; 1,658; and 569. By comparison, the number of FWM under the

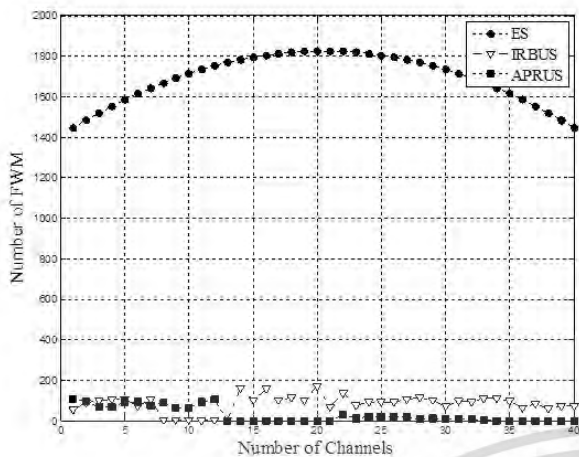


Fig. 4 Numbers of FWM frequencies under the ES, IRBUS and APRUS channel allocation schemes

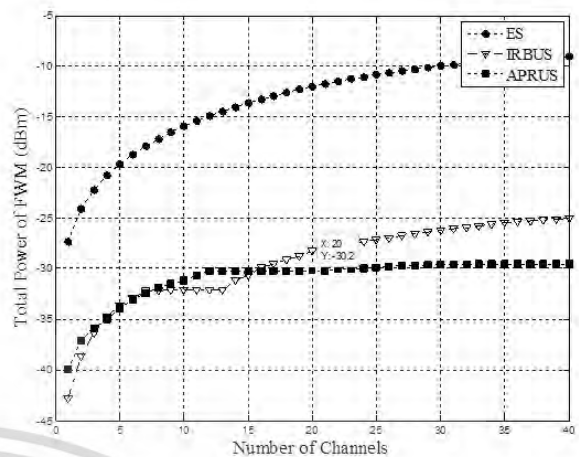


Fig. 5 Total FWM powers under the ES, IRBUS and APRUS channel allocation schemes

proposed APRUS scheme was 60 times as few as those under the ES regime.

Figure 5 compares the total FWM power under the three allocation schemes in relation to the number of channels. The total FWM powers under the ES, IRBUS and APRUS allocation schemes at the mean number of channels (i.e. 20) were respectively -12, -28.3, and -30.2 dBm. By comparison, the APRUS scheme generated over 300 times less total FWM power than did the conventional ES scheme.

Figure 6 depicts the total FWM efficiencies under the three allocation schemes relative to the difference between the FWM frequency and the reference zero-dispersion frequency. The total efficiencies of FWM under the ES, IRBUS and APRUS allocation schemes were respectively 16.20, -0.2 and -1.7dB. The proposed APRUS scheme exhibited over 4,600,000 times less total FWM efficiency vis-à-vis the conventional ES scheme.

Figure 7 compares the bit error rates (BER) under the three allocation schemes in relation to the transmitted power at the receiver. The acceptable bit error rate for optical transmission is below 10^{-9} . The BERs under the ES, IRBUS and APRUS allocation schemes were respectively -5, -17.8 and -20.6dBm. By comparison, the proposed APRUS scheme exhibited a BER 30 times lower than did the conventional ES regime.

Interestingly, the FWM noise and the total FWM power and efficiency under the APRUS channel allocation scheme were negligible such that no optical filter is required at the input end of the N-Channels DWDM De-MUX. In addition, with the implementation of the APRUS channel allocation scheme, an additional signal channel could be accommodated while strictly adhering to the ITU-T G.694.1 optical transmission standard.

This phenomenon is attributable to the fact that under the proposed APRUS scheme the entire allocated space

is smaller than that under the conventional ES scheme. Furthermore, given the same optical fiber, the extra channel enhances the DWDM transmission rate by another 10Gbit/s.

5. Conclusion

This research has proposed the asymmetrically paired repeated unequally spaced (APRUS) channel allocation scheme to minimize the four-wave mixing (FWM) phenomenon in the DWDM transmission system. In the simulation, the APRUS allocation scheme could reduce the number of FWM frequencies by more than 30 times and the total FWM power more than 300 times, vis-à-vis the conventional ES channel allocation scheme, thereby eliminating the need for optical fibers to filter out the FWM noise at the DWDM's receiving end. In addition, an extra signal channel could be accommodated under the APRUS scheme, leading to a gain of another 10Gbit/s in the data transfer. In fact, the decrease in the FWM noise is in large measure attributable to the asymmetrical pairing of two base units, i.e. $\Delta f_1 \neq \Delta f_2$.

References

- [1] B. Michael, W. Eric and S. Van: Fiber Optics Handbook, New York, USA: McGraw Hill, OSA, 2002.
- [2] ITU-T Recommendation G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, ITU-T Study Group 15.
- [3] F. Forghieri, R. Tkach, A.R. Chraplyvy and D. Marcuse: Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM system using unequally spaced channels, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.6, pp.754-756, 1994.

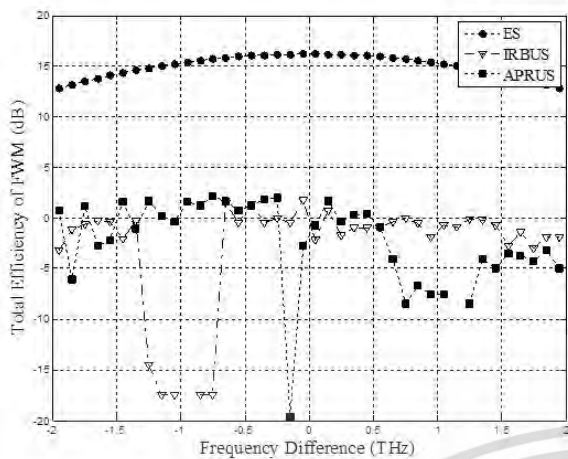


Fig. 6 Total FWM efficiencies under the ES, IRBUS and APRUS channel allocation schemes

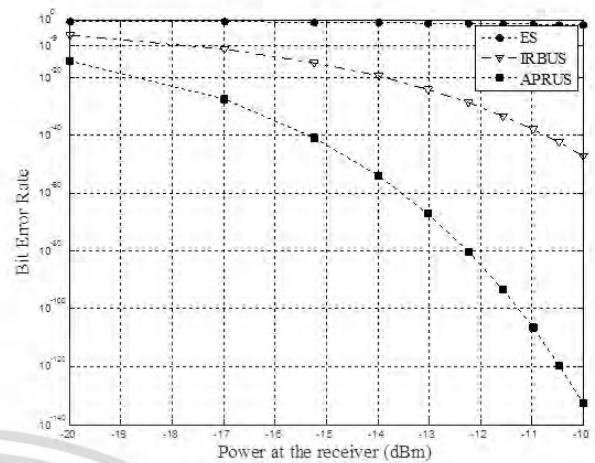


Fig. 7 The bit error rates (BER) under the ES, IRBUS and APRUS channel allocation schemes

[4] F. Forghieri, R. Tkach and A.R. Chraplyvy: WDM systems with unequally spaced channels, *J. Lightw. Technol.*, Vol.13, pp.889-891, 1995.

[5] A. Okada, V. Curri, S.M. Gemelos and L.G. Kazovsky: Reduction of four-wave mixing crosstalk using a novel hybrid WDM/TDM technique, *ECOC'98, Proc. Eur. Conf. Opt. Commu.*, pp.289-290, 1998.

[6] S. Kojima and T. Numai: Theoretical analysis of modified repeated unequally spaced frequency allocation in FDM lightwave transmission systems, *J. Lightw. Technol.*, Vol.24, pp.2796-2797, 2006.

[7] Y. Nagatani, Y. Lto, J. Onishi, S. Kojima and T. Numai: Theoretical analysis of frequency allocation in FDM lightwave transmission systems, *J. Lightw. Technol.*, Vol.26, pp.1993-2001, 2008.

[8] S. Kojima and T. Numai: Reduction of four-wave-mixing noise in FDM optical fiber transmission system in unequally spaced frequency allocation using base units, *J. Opt. Commu.*, Vol.294, pp.305-310, 2013.

[9] A. Jumpates, C. Srinuan, S. Noppanakepong, V. Rachnarong and N. Injounjirakit: The analysis of IRBUS channel allocation for decrease four-wave mixing in DWDM system, *ICPS 2013, Pattaya, Thailand: Proc.of SPIE*, Vol.8883 (2013), pp.888304-1-888304-7, May 2013.

[10] K.O. Hill, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki and R.I. MacDonald: CW three-wave mixing in single-mode optical fibers, *J. Applied Physics*, Vol.49, pp.5098-5106, 1978.

[11] A.R. Chraplyvy: Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities, *J. Lightw. Technol.*, Vol.8, pp.1548-1557, 1990.

[12] P.A. Govind: *Fiber-Optic Communication Systems*, New York, NY, USA: John Wiley&Sons, Inc., 2010.

[13] R. Rajiv, N.S. Kumar and H.S. Galen: *Optical Networks*, 2nd ed. Burlington, MA, USA: A Practical Perspective (Networking), Morgan Kaufmann Publishers, 2009.

[14] J. Tang, S.C. Kheong and L. Zhang: Optical nonlinear effects on the performance of IP traffic over GMPLS-base DWDM networks, *J. Computer Commu.*, Vol.26, pp.1330-1340, 2003.

[15] T.S. Chin, F.M. Abbou and E.H. Tat: Impact of four wave mixing (FWM) in routing and wavelength assignment, *American J. Applied Sci.*, Vol.5, pp.1059-1063, 2008.

[16] S. Fujita, M. Kitamura, T. Torikai, N. Henmi, H. Yamada, T. Suzaki, I. Takano and M. Shikada: 10Gb/s 100km optical fiber transmission experiment using high-speed MQW DFB-LD and backillumined GaInAs APD, *Electron. Lett.*, Vol.25, pp.702-703, 1989.

[17] S. Fujita, T. Suzaki, A. Matsuoka, S. Miyazaki, T. Torikai, T. Nakata and M. Shikada: High sensitivity 5Gb/s optical receiver module using Si IC and GaInAs APD, *Electron. Lett.*, Vol.26, pp.175-176, 1990.

[18] A. Jumpates, V. Rachnarong and S. Noppanakepong: The analysis of paired unequally spaced repeated alternate unequally spaced allocation channels for FDM lightwave system, *PIERS Proceeding*, pp.754-758, Sep. 2011, Suzhou, China.



Ashira Jumpates received his B.Eng. degree in telecommunication engineering from Mahanakorn University of Technology (MUT), Thailand in 1998, his M.Eng. degree in telecommunication engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand in 2004, and since 2010, he has been pursuing his Ph.D. degree in electrical engineering at KMUTL, Thailand. He currently works at TOT Public Company Limited. His research interests include optical fiber communication and computer network.



Yuttapong Rangsanseri received his B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand, in 1985 and 1987, respectively, and his Ph.D. degree from the Institute National Polytechnique de Grenoble, France, in 1992. He is currently an Associate Professor in the Department of Telecommunications Engineering at KMUTL. His research interests include image processing, pattern recognition, and communication system simulations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการถือลิขสิทธิ์ ลิขสิทธิ์ทางปัญญาสงวนไว้กับคุณและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Suthichai Noppanakepong received his B.Eng. degree in telecommunication engineering in 1984 and his M.Eng. degree in telecommunication engineering in 1989 from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. He received his Ph.D. degree in electrical engineering from Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan in 1996. His research interests include optical fiber communication, radio wave propagation, and satellite communication.

He currently works as an Assistant Professor at the Department of Telecommunication, Faculty of Engineering, KMITL.



Nainapas Injongjirakit received her B.Ed. degree in computer education from Phetchaburi Teacher College in 1989, her M.S. degree in computer and information technology from King Mongkut's University of Technology Thonburi in 2002, and her Ph.D. degree in quality information technology from Phetchaburi Rajabhat University in 2013. She currently works as a Lecturer at Bansomdejchaopraya Rajabhat University. Her research interests include optical fiber communication and software development

methodology design.

(Received March 23, 2017; revised July 12, 2017)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า