

การสื่อสารสัญญาณระบบมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่นที่ใช้วิธีส่งยุคเฟสแอสแตง
โดยไม่มีการเลื่อนความยาวคลื่น

นางสาวภัทรกมล รั้งษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXED TRANSMISSION USING OPTICAL PHASE
CONJUGATION WITHOUT WAVELENGTH SHIFT



Miss Pattarakamon Rangsee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสื่อสารสัญญาณระบบมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่นที่ใช้
วิธีสังยุคเฟสแสงโดยไม่มี การเลื่อนความยาวคลื่น

โดย

นางสาวภัทรกมล รังษี

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

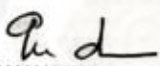
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

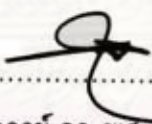
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

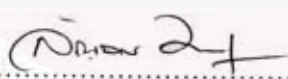
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

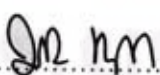

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนิริญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทธาฤทธิกุลกิจ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

ศูนย์วิจัยระบบขยายการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภัทรกมล รัชชี : การสื่อสารสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นที่ใช้วิธีสังยุคเฟสแลงโดย
ไม่มีการเลื่อนความยาวคลื่น. (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXED
TRANSMISSION USING OPTICAL PHASE CONJUGATION WITHOUT WAVELENGTH
SHIFT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พลุ แก้วปลั่ง, จำนวนหน้า 110 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจากปัญหา
ดิสเพอร์ชัน (Dispersion) และปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) ด้วยวิธีสังยุคเฟสแลงโดยอาศัย
เครื่องสังยุคเฟสแลง (Optical Phase Conjugator: OPC) แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น ที่มีโครงสร้าง
แบบ Sagnac Interferometer สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM จากนั้นจะทำการ
ออกแบบ OPC สำหรับนำมาใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ซึ่งจากคุณสมบัติของ OPC ชนิด
ไม่เลื่อนความยาวคลื่นเมื่อใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณเพียงสัญญาณเดียวจะเปลี่ยนเป็น OPC ชนิดไม่
เลื่อนแบนด์วิดท์เมื่อใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ทั้งนี้เมื่อนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์
จำนวน 2 ตัวมาต่ออนุกรมกัน จะทำให้ความยาวคลื่นปลายทางของสัญญาณแสงก่อนเข้าภาครับ
สัญญาณมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงที่ออกจากภาคส่งสัญญาณแสงต้นทาง ซึ่งในขั้น
แรกจะเริ่มออกแบบ OPC ที่มีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเพียงสัญญาณ
เดียว โดยจะต้องคำนวณหาค่าความยาวและชนิดของเส้นใยแสงที่นำมาใช้ทำ OPC ระยะห่างของ
สัญญาณบีมกับสัญญาณแสง และค่ากำลังของสัญญาณทั้งหมดในระบบ หลังจากนั้นจะนำ OPC ที่
ออกแบบได้มาใช้กับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ทั้งนี้การนำ OPC ดังกล่าวมาใช้กับสัญญาณ
แบบ WDM จะต้องทำการหาระยะห่างของสัญญาณบีมที่เหมาะสมกับจำนวนช่องสัญญาณใหม่อีก
ครั้ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบ OPC สำหรับสัญญาณแบบ WDM จำนวน 4 8 10
และ 15 ช่องสัญญาณ เมื่อได้ระยะห่างของสัญญาณบีมที่เหมาะสมจึงจะทำการหาระบบสื่อสารสัญญาณ
แสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ได้ระยะ
ทางไกลที่สุดต่อไป

จากผลการศึกษาพบว่า OPC ที่ใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีเพียงสัญญาณแสง
เดียว จะเลือกใช้เส้นใยแสงชนิด highly nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) ความยาว 120
m ในการทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM อีกทั้งเมื่อนำ OPC มาใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
แบบ WDM แล้ว ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณที่มีระยะทาง 900 km
สามารถผ่าน OPC จำนวน 2 เครื่อง ได้สำเร็จ โดยอาศัยค่าชี้วัด Q factor มากกว่า 7 หรือ ค่าอัตราบิด
ผิดพลาดน้อยกว่า 10^{-12}

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา2552.....

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

..... รัชชี รัชชี

..... 

5070597221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL PHASE CONJUGATION / WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING / WAVELENGTH-SHIFT-FREE / DISPERSION / KERR EFFECT

PATTARAKAMON RANGSEE : WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXED TRANSMISSION USING OPTICAL PHASE CONJUGATION WITHOUT WAVELENGTH SHIFT. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 110 pp.

This thesis studies the compensation of both dispersion and Kerr effect in WDM transmission using the wavelength-shift-free optical phase conjugator (OPC) which is implemented on the Sagnac fiber interferometer. For WDM transmission, we explore the characteristics of the wavelength-shift-free OPC when it is applied for the simultaneous conjugation of WDM signal. In this case, the wavelength-shift-free OPC (single channel) acts as the "band-shift-free" OPC (WDM), because the wavelengths are unavoidably shifted in this scheme. The analysis results of some important parameters and their relations such as the conversion efficiency and the supported bandwidth are used for designing the OPC to achieve the maximum performance. First, we design the optimal OPC for single signal transmission. We optimize the length of fiber, the type of fiber, the pump separation, signal power and pumps power. Then, we apply the optimally designed Sagnac-based optical phase conjugator in WDM transmission. In WDM transmission, the new pump separation varies when the number of signals changes. In this thesis, we design the OPC for using in 4-channel, 8-channel, 10-channel, and 15-channel WDM transmission systems. Finally, we find the maximum channel and distance that completely compensates the signal distortion.

According to the obtained results, we achieve the optimal design of the Sagnac-based optical phase conjugator, constructed with the 120-m-long highly-nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) for generating FWM effect. Also, we use 2 OPCs for WDM transmission that has 15 channels through 900 km with Q factor larger than 7 and BER less than 10⁻¹².

Department: ...ELECTRICAL ENGINEERING
Field of Study: ...ELECTRICAL ENGINEERING
Academic Year: ...2009

Student's Signature ...
Advisor's Signature ...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง ซึ่งมีส่วนช่วยในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำต่าง ๆ รวมไปถึงหลักการคิดเชิงวิเคราะห์และเชิงวิพากษ์ ตลอดจนคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์เปรียบเสมือนรากฐานและแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว และน้องสาว ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณ TRIDI ที่สนับสนุนซอฟต์แวร์ OptiSystem 8.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมหลักสำหรับการทดสอบผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สิ่งที่ได้รับจากทุกคนล้วนเป็นส่วนสำคัญในการรังสรรค์ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จ ดังนั้นจึงไม่มีคำกล่าวใด ๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

ศูนย์วิทยุโทรพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบหลายความยาวคลื่น.....	17
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงรวมทั้งปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง ...	18
2.2.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (Attenuation).....	19
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)	21
2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity).....	23
2.3 เครื่องส่งยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugator : OPC).....	25
2.3.1 การกำเนิดสัญญาณของสัญญาณ (conjugated signal)	27
2.3.2 การเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อความถี่ของสัญญาณมีเท่ากัน.....	28
2.3.3 การเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อความถี่ของสัญญาณมีแตกต่างกัน.....	31

2.3.4 ชนิดของ OPC	37
2.4 โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer.....	39
2.4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของ Sagnac interferometer.....	40
2.4.2 หลักการทำงานของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ Sagnac interferometer.....	41
3 การออกแบบเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น	44
3.1 กำลังของสัญญาณคอนจูเกตที่เกิดจาก OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer	44
3.2 การวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อออกแบบ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer	45
3.2.1 การหาชนิดของเส้นใยแสงที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency มากที่สุด....	45
3.2.2 การหาความยาวของเส้นใยแสงที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency มากที่สุด	49
3.2.3 การหาระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มทั้งสองที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency มากที่สุด.....	51
3.3 การทดสอบผลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0	53
3.4 การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณทางทฤษฎีและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	56
3.5 การออกแบบ OPC ที่มีสมรรถนะดีที่สุด.....	58
3.5.1 การหาค่ากำลังของสัญญาณแสงที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	58
3.5.2 การหาค่ากำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสองที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	60
4 การทดสอบ OPC ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM.....	61
4.1 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์.....	61
4.2 ผลของระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มกับการสื่อสารสัญญาณแบบ WDM.....	63

4.3 ผลของจำนวนช่องสัญญาณต่อการทำ phase conjugation ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์.....	66
4.4 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ OPC ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ระยะทางต่าง ๆ.....	72
5 การทดสอบ OPC ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM.....	78
5.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่อาศัยเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 เครื่อง.....	78
5.2 ผลของระยะทางต่อการทำ phase conjugation ของ OPC แบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัว.....	82
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	89
6.1 บทสรุป	89
6.2 ข้อเสนอแนะ	90
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	110

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับเส้นใยแสงที่ใช้ทำ OPC ในการทดลอง.....46

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์.....58



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ตัวอย่างโครงสร้างของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง	8
รูปที่ 1.2	สเปกตรัมของคลื่นใน OPC ตัวอย่างตามโครงสร้างในรูปที่ 1.1	8
รูปที่ 1.3	ตัวอย่างโครงสร้างของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง	9
รูปที่ 1.4	สเปกตรัมของคลื่นใน OPC ตัวอย่างตามโครงสร้างในรูปที่ 1.3 โดยมีการเลื่อนความยาวคลื่นของสัญญาณแสงเดิมเล็กน้อยเพื่อให้สังเกตสเปกตรัมของสัญญาณแสงเดิมและสัญญาณคอนจูเกตแยกจากกันได้	10
รูปที่ 1.5	สเปกตรัมของคลื่นแบบ WDM ใน OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น	11
รูปที่ 1.6	สเปกตรัมของคลื่นแบบ WDM ใน OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น	12
รูปที่ 1.7	ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM กับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer	13
รูปที่ 1.8	ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM กับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer จำนวน 2 เครื่อง เพื่อให้สัญญาณของสัญญาณมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิม	14
รูปที่ 2.1	องค์ประกอบของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีการขยายสัญญาณแสง แก้ไขปัญหาดิสเพอร์ชันและปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง	18
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น	21
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่มในแต่ละความยาวคลื่น	22
รูปที่ 2.4	ภาพแสดงการเกิด inter-symbol interference	23
รูปที่ 2.5	ภาพแสดงกระบวนการสังยุคเฟสแสง	26
รูปที่ 2.6	รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	26
รูปที่ 2.7	การสร้างสัญญาณคอนจูเกตเดิมด้วยปรากฏการณ์ FWM	28
รูปที่ 2.8	ประสิทธิภาพของ OPC ในกรณีที่สัญญาณปั๊มมีความถี่หรือความยาวคลื่นเดียวกัน ..	29
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างความสัมพันธ์ของ conversion efficiency กับผลต่างระหว่างความยาวคลื่นของสัญญาณแสงและสัญญาณปั๊มในกรณีที่ GVD parameter (β_2) มีค่าเป็นบวก ลบ และ ศูนย์	31
รูปที่ 2.10	การสร้างสัญญาณคอนจูเกต	32

รูปที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณสัญญาณปั๊มทั้งสองคลื่นกับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต.....	34
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณแสงกับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต.....	35
รูปที่ 2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการสร้าง OPC กับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต.....	35
รูปที่ 2.14	ตัวอย่างการเปรียบเทียบ refractive index (n_2) profile ของเส้นใยแสงชนิด HNLF กับเส้นใยแสงชนิด DSF.....	36
รูปที่ 2.15	การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบเลื่อนความยาวคลื่น.....	37
รูปที่ 2.16	การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น.....	38
รูปที่ 2.17	แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของ Sagnac interferometer.....	40
รูปที่ 2.18	สเปกตรัมของคลื่นภายใน OPC ที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer.....	43
รูปที่ 3.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสงในช่วง C-band ของเส้นใยแสงชนิด SSMF DCF DSF NZ-DF NZ-DSF HNLF และ HNL-PCF.....	48
รูปที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสงในช่วง C-band ของเส้นใยแสงชนิด DSF, NZ-DF, NZ-DSF, HNLF และ HN-PCF.....	48
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวของเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่นำมาใช้สร้าง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบ sagnac interferometer.....	50
รูปที่ 3.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวของเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่มีค่า conversion efficiency สูงสุดเท่ากับ -19.05 dB.....	50
รูปที่ 3.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊ม (pump separation) ที่มีค่า conversion efficiency สูงสุดเท่ากับ -16.97 dB.....	52
รูปที่ 3.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊ม (pump separation) ที่มีค่า conversion efficiency สูงสุดเท่ากับ -16.97 dB.....	53
รูปที่ 3.7	โครงสร้างของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแบบ sagnac interferometer ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	54
รูปที่ 3.8	สเปกตรัมของสัญญาณ (a) จุด point#1 (b) จุด point#2 (c) จุด point#3 (d) จุด point#4.....	55

รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบผลจากการคำนวณทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....57

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า η และกำลังของสัญญาณคอนจูเกตกับกำลังของสัญญาณแสง.....59

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า η กับกำลังของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 (P_{p1}) และสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 (P_{p2})60

รูปที่ 4.1 ภาพสเปกตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกต เมื่อนำ OPC มาใช้กับสัญญาณแสงหลายสัญญาณที่มี WDM.....62

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสัญญาณปั๊มกับค่า Q factor ของแต่ละระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณ 4 8 10 15 และ 20 ช่องสัญญาณ.....64

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า penalty กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสง เมื่อใช้สัญญาณแบบ WDM ด้วยจำนวนสัญญาณแสง 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ68

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q factor กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสง เมื่อใช้สัญญาณแบบ WDM ด้วยจำนวนสัญญาณแสง 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ69

รูปที่ 4.5 ภาพ eye pattern ของช่องสัญญาณที่มีค่า Q factor มากที่สุดและน้อยที่สุดสำหรับระบบสี่สัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน (a) 4 ช่องสัญญาณ (b) 8 ช่องสัญญาณ (c) 10 ช่องสัญญาณ และ (d) 15 ช่องสัญญาณ.....71

รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบสี่สัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีระยะทาง72

รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของสัญญาณ WDM จำนวน 15 ความยาวคลื่น.....74

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่า Q factor ที่แต่ละความยาวคลื่นของการสี่สัญญาณผ่านระบบที่มี OPC และเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 100 km 200 km 300 km 400 km 450 km และ 500 km75

รูปที่ 4.9 ภาพ eye pattern ของทั้ง 15 ช่องสัญญาณ ที่ผ่านเส้นใยแสงระยะทาง 450 km (a) ความยาวคลื่น 1539.77 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.8688 (b) ความยาวคลื่น 1540.56 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.3239 (c) ความยาวคลื่น 1541.35 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.8071 (d) ความยาวคลื่น 1542.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.0067 (e) ความยาวคลื่น 1542.94 มีค่า Q factor เท่ากับ 145.0418 (f) ความยาวคลื่น 1543.73 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.2823 (g) ความยาวคลื่น 1544.53 มีค่า Q factor เท่ากับ 16.6908 (h) ความยาวคลื่น 1545.32 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.49 (i) ความยาวคลื่น 1546.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.8564 (j) ความยาวคลื่น 1546.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.8773 (k) ความยาวคลื่น

	1547.72 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.3332 (l) ความยาวคลื่น 1548.51 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.4004 (m) ความยาวคลื่น 1549.32 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.0012 (n) ความยาวคลื่น 1550.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 16.7347 (o) ความยาวคลื่น 1550.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.6384	76
รูปที่ 5.1	โครงสร้างของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่อาศัยเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัว.....	79
รูปที่ 5.2	สเปกตรัมของสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ในระบบ (a) สเปกตรัมของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC ตัวที่ 1 (b) สเปกตรัมของสัญญาณคอนจูเกตหลังออกจากพอร์ตที่ 2 ของ OPC ตัวที่ 1 และ (c) สเปกตรัมของสัญญาณคอนจูเกตใหม่หลังจากออกจากพอร์ตที่ 2 ของ OPC ตัวที่ 2	81
รูปที่ 5.3	สเปกตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกตที่ระยะทาง (a) 0 km (b) 200 km (ช่วงแรก) (c) 600 km (ช่วงตรงกลาง) และ (d) 800 km (ช่วงสุดท้าย)	83
รูปที่ 5.4	ความสัมพันธ์ของค่า Q factor ที่แต่ละความยาวคลื่นของการสื่อสารสัญญาณผ่านระบบที่มี OPC และเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 200 km 400 km 600km 800km 900 km และ 1000 km	85
รูปที่ 5.5	ภาพ eye pattern ของทั้ง 15 ช่องสัญญาณ ที่ผ่านเส้นใยแสงระยะทาง 900 km (a) ความยาวคลื่น 1539.77 มีค่า Q factor เท่ากับ 9.1620 (b) ความยาวคลื่น 1540.56 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.8451 (c) ความยาวคลื่น 1541.35 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.4653 (d) ความยาวคลื่น 1542.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.5431 (e) ความยาวคลื่น 1542.94 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.9603 (f) ความยาวคลื่น 1543.73 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.5502 (g) ความยาวคลื่น 1544.53 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.8862 (h) ความยาวคลื่น 1545.32 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.4332 (i) ความยาวคลื่น 1546.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.586 (j) ความยาวคลื่น 1546.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.8104 (k) ความยาวคลื่น 1547.72 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.2600 (l) ความยาวคลื่น 1548.51 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.1754 (m) ความยาวคลื่น 1549.32 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.8074 (n) ความยาวคลื่น 1550.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.1346 (o) ความยาวคลื่น 1550.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.0467	87

บทที่ 1

บทนำ

การที่ระบบสื่อสารสามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงได้ในระยะทางไกลโดยที่ข้อมูลนั้นไม่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น เป็นจุดมุ่งหมายของระบบสื่อสารในยุคปัจจุบัน ซึ่งแต่เดิมระบบการสื่อสารอยู่เพียงแค่ระยะสายตาระหว่างผู้ส่งและผู้รับสัญญาณแบบหนึ่งต่อหนึ่ง แต่ปัจจุบันระบบการสื่อสารสามารถพัฒนาไปไกลถึงผู้ส่งและผู้รับสัญญาณที่อยู่ห่างกันคนละประเทศจนครอบคลุมไปทั่วโลกแบบจำนวนผู้ส่งและผู้รับขนาดอนันต์ ทั้งนี้การพัฒนา ยังคงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ อย่างไม่มีจุดสิ้นสุด อัตราเร็วในการส่งสัญญาณกำลังจะพัฒนาเข้าสู่ขนาดเทลาเฮิร์ตซ์ (THz) ระยะทางในการส่งสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ราคาลดต่ำลง รวมถึงความง่ายในการติดตั้งและใช้งานจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งตัวแปรสำคัญที่เป็นตัวจำกัดขอบเขตของการพัฒนา คือ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เพราะถ้าหากสามารถพัฒนาระบบการสื่อสารให้มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ การส่งสัญญาณระยะทางไกลมากก็สามารถเกิดขึ้นได้อย่างแน่นอน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางและวิธีการที่สามารถชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารที่ประกอบไปด้วยหลายความยาวคลื่นให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ การติดต่อสื่อสารเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นมากสำหรับการดำรงชีวิตร่วมกันในสังคม ทำให้เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากในอดีตที่มนุษย์จะติดต่อสื่อสารกันได้เมื่ออยู่ต่อหน้าเท่านั้น จนกระทั่งปัจจุบันมนุษย์สามารถติดต่อสื่อสารกันได้แม้ว่าจะอยู่คนละฝั่งของโลกก็ตาม

ในยุคปัจจุบันความเจริญของบ้านเมืองที่เติบโตควบคู่ไปกับความก้าวหน้าทางวิทยาการและเทคโนโลยีต่าง ๆ ทำให้มนุษย์มีความต้องการในการสื่อสารที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความต้องการแบนด์วิดท์และคุณภาพของสัญญาณสูงขึ้นอย่างไร้ขีดจำกัด ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงที่ให้ขนาดแบนด์วิดท์มหาศาลสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้อย่างดีเยี่ยม

การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงเริ่มต้นขึ้นเมื่อเลเซอร์ ตัวแรกถูกประดิษฐ์ขึ้นสำเร็จในปี 1960 ซึ่งการมอดูเลตข้อมูลลงบนแสงเลเซอร์สามารถรองรับการส่งข้อมูลได้มากกว่าระบบไมโครเวฟถึง

10^5 เท่า อีกทั้งเส้นใยแสงที่ใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูลยังมีคุณสมบัติที่เด่นกว่าสายสัญญาณทองแดง เช่น เส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์กว้างมาก มีค่าการลดทอนสัญญาณแสงต่ำ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาทำให้สะดวกต่อการติดตั้ง ไม่มีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนและเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพราะเส้นใยแสงทำมาจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า และมีความปลอดภัยของข้อมูลสูงด้วยเหตุนี้วิศวกรจึงหันมาให้ความสนใจและเริ่มต้นพัฒนาศักยภาพของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงอย่างจริงจัง

ยุคเริ่มแรกของการพัฒนาระบบเส้นใยแสง ตั้งแต่ปี 1974 การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในสมัยนั้นใช้ความยาวคลื่นแสงประมาณ 850 nm และเส้นใยแสงชนิดโหมดร่วม (multi-mode fiber) เพื่อรองรับการส่งสัญญาณโทรศัพท์ และสามารถส่งสัญญาณระยะทางไกลได้โดยใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ ซึ่งมีระยะ 10 กิโลเมตรต่อหนึ่งช่วงเครื่องทวนสัญญาณ ยุคที่สอง ความยาวคลื่นแสงถูกเปลี่ยนจาก 850 nm มาเป็น 1300 nm เนื่องจากมีค่าลดทอนสัญญาณแสงที่ต่ำกว่าและเส้นใยแสงมีการพัฒนามากขึ้นจนได้เป็นเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยว (single-mode fiber) ทำให้การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงสามารถส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น โดยเพิ่มระยะทางระหว่างเครื่องทวนสัญญาณได้มากขึ้นถึงระดับ 40 กิโลเมตร ยุคที่สาม ได้มีการค้นพบช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการลดทอนสัญญาณแสงต่ำที่สุดที่ความยาวคลื่น 1550 nm ทำให้สัญญาณข้อมูลสามารถส่งออกไปได้ไกลมาก แต่ในภายหลังพบว่าที่ความยาวคลื่น 1550 nm จะเกิดปัญหาดีสเพอร์ชัน (dispersion) ที่ค่อนข้างรุนแรงส่งผลให้พัลส์สัญญาณขยายตัวออก จึงได้มีการคิดค้นเส้นใยแสงชนิด dispersion shifted fiber (DSF) ขึ้นมาทดแทน ซึ่งเป็นเส้นใยแสงที่มีค่าดีสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ยุคที่สี่ เป็นยุคเฟื่องฟูของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง เนื่องจากมีการค้นพบอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด EDFA (erbium-doped fiber amplifier) ซึ่งสามารถขยายสัญญาณแสงได้โดยตรงพร้อมกันหลายความยาวคลื่นโดยไม่จำเป็นต้องแปลงกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อขึ้นรูปสัญญาณใหม่ด้วยอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) ที่ละหนึ่งความยาวคลื่น อีกทั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณยังเป็นตัวจำกัดอัตราข้อมูล ทำให้ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลที่ต่ำกว่า 10 Gb/s เนื่องจากเกิดปัญหาคอขวดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลที่ใช้ EDFA สามารถส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลสูงได้

ในปัจจุบัน การคิดค้นพัฒนาศักยภาพของการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลได้สูงถึงกว่า 25.6 Tb/s [1] และยังเพิ่มระยะทางให้ไกลมากขึ้นเป็นหลายพันกิโลเมตรข้ามมหาสมุทรไปยังอีกฟากของโลกได้สำเร็จ ทั้งนี้การพัฒนายังไม่สิ้นสุดเพราะยังมีเส้นใยแสงชนิดพิเศษถูกออกแบบมาเพื่อชดเชยหรือแก้ไขปัญหาต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เช่น เส้นใยแสงชนิด DSF ซึ่งเป็นเส้นใยแสงที่มีค่าดีสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1550 nm สำหรับแก้ไขปัญหา

ดิสเพอร์ชันแทนเส้นใยแสงชนิดใหม่เดี่ยวยที่มีค่าดิสเพอร์ชัน 17 ps/nm-km แต่เส้นใยแสงชนิดนี้ไม่เหมาะกับการใช้งานในแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งแบบ DWDM (dense wavelength division multiplexing) เพราะจะก่อให้เกิดการข้ามสัญญาณ (interference crosstalk) ขึ้น ปัจจุบันเส้นใยแสงชนิดนี้มีการใช้งานน้อยลง โดยมีเส้นใยแสงชนิด NZ-DSF (non-zero dispersion-shifted fiber) ถูกพิจารณามาใช้แทนเพราะมีคุณสมบัติการกระจายตัวของคลื่นแสงเป็นไปอย่างคงที่ตลอดทั้งกลุ่มของคลื่นแสงที่ 1550 nm ทำให้เส้นใยแสงชนิด NZ-DSF สามารถใช้งานในแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งแบบ DWDM โดยไม่มีปัญหาเรื่องการข้ามสัญญาณ ซึ่งช่วยทำให้การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงสามารถสื่อสารสัญญาณได้ระยะทางไกลขึ้นและคุณภาพของสัญญาณดีขึ้น [2]

นอกจากการพัฒนาเส้นใยแสงและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีมาอย่างต่อเนื่องแล้ว เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้สร้างโครงข่ายความเร็วสูงให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้หลายประเภทพร้อม ๆ กัน เช่น ข้อมูล ภาพ หรือเสียง ภายในโครงข่ายเดียวกัน คือ เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing: WDM) ซึ่งพยายามใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของเส้นใยแสงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในอดีตการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจะอยู่ในเชิงเวลา (time division multiplexing: TDM) แต่ WDM อาศัยการมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันจำนวนหนึ่งรวมกันเพื่อส่งผ่านเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว WDM มีข้อดีกว่า TDM จากการที่ช่องสัญญาณใน WDM แต่ละช่องไม่จำเป็นต้องมีอัตราส่งที่สูงมาก แต่อาศัยช่องสัญญาณหลายช่องบนคลื่นพาห้หลายความยาวคลื่นแทนเพื่อให้ได้ความจุสูงตามต้องการ เมื่ออัตราการส่งของช่องสัญญาณแต่ละช่องมีค่าไม่สูงมาก ทำให้การออกแบบอุปกรณ์แต่ละส่วนไม่ซับซ้อนมากนัก ในขณะที่เทคโนโลยี TDM หากต้องการให้ได้ช่องสัญญาณที่มีอัตราการส่งสูงมากเทียบเท่ากัน การออกแบบของอุปกรณ์แต่ละส่วนจะซับซ้อนมาก จะต้องอาศัยเทคนิคการจัดการรูปสัญญาณที่ยุ่งยากมากเช่นกัน

ทั้งนี้การวิจัยและพัฒนาาระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงยังทำให้มีการคิดค้นอุปกรณ์ขึ้นมารองรับอีกหลายประเภททั้งอุปกรณ์แบบกัมมันต์หรืออุปกรณ์ที่ใช้พลังงานกระตุ้นในการทำงาน (active component) และอุปกรณ์แบบแพสซีฟหรืออุปกรณ์ที่ไม่ใช้พลังงานกระตุ้นในการทำงาน (passive component) ซึ่งหนึ่งในนั้นคืออุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เป็นอุปกรณ์แบบกัมมันต์ มีหน้าที่ขยายสัญญาณแสงให้สามารถส่งได้ระยะทางที่ไกลมากขึ้นหลายร้อยกิโลเมตร และการพัฒนาระเบียบวิธีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อรองรับการสื่อสารในโครงข่ายขนาดใหญ่หรือโครงข่ายระยะทางไกล จึงทำให้การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในปัจจุบันสามารถข้ามผ่านใต้ท้องทะเล มหาสมุทรเพื่อเชื่อมโยงจากทวีปหนึ่งไปยังทวีปต่าง ๆ ทั่วโลก เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากปัญหาทางด้านกำลังสัญญาณที่จะลดทอนลงแล้ว การใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงเพื่อให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลขึ้นจะส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยน

ของสัญญาณที่ภาครับมากขึ้น เพราะความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้นเกิดจากปัญหาการกระจาย (dispersion) และปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity) โดยปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นที่สำคัญและก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนต่อสัญญาณ คือ ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ซึ่งเกิดจากการที่ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณ ทั้งนี้ปรากฏการณ์เคอร์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปรากฏการณ์ตามลักษณะการเกิด ได้แก่ 1. การที่เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกำลังของตัวสัญญาณเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Self-phase modulation (SPM) 2. การที่เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกำลังของสัญญาณต่างความยาวคลื่น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Cross-phase modulation (XPM) และ 3. การที่เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากตัวสัญญาณถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณความยาวคลื่นอื่น ผ่านปรากฏการณ์ Four-wave mixing (FWM) เพราะฉะนั้นในการส่งสัญญาณทางไกลจะต้องทำการลดผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากการกระจายและปรากฏการณ์เคอร์ของเส้นใยแสงเป็นหลัก

จากปัญหาของความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงเนื่องจากการกระจายและปรากฏการณ์เคอร์ ทำให้นักวิจัยค้นคว้าเพื่อหาทางแก้ไขปัญหา ซึ่งที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ทำการลดผลปัญหาดังกล่าวในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลแบบหลายความยาวคลื่นถูกนำเสนอออกมามากมาย อาทิเช่น การแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงเนื่องจากการกระจาย สามารถแก้ไขได้ด้วยการติดตั้งหน่วยชดเชยการกระจาย (dispersion compensation unit: DCU) ในโครงข่ายทางแสง ซึ่งเป็นการนำเส้นใยชดเชยการกระจาย (dispersion compensating fiber: DCF) มาวางในระบบ [3] ทำให้ค่าการกระจายสะสมของทุกช่องสัญญาณลดลง หรือการชดเชยการกระจายด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ fiber bragg grating (FBG) จำนวน 3 ชั้นแบบอนุกรมกัน เพื่อลดค่าความเร็วกลุ่ม (group velocity delay: GVD) ของสัญญาณแสงลง [4] ส่วนการลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงเนื่องจากปรากฏการณ์เคอร์ สามารถลดได้ด้วยการจัดสรรความยาวคลื่น โดยงานวิจัยที่นำเสนอการลดปัญหานี้ เช่น การเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางของสัญญาณแสงและความยาวคลื่นกับการวางอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณแสง (wavelength converter) [5] โดยเลือกใช้เส้นทางที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณให้มีระยะห่างของแต่ละช่องสัญญาณ (Channel Spacing) มากที่สุดอย่างเหมาะสม เพื่อเป็นการลดความผิดเพี้ยนจากปรากฏการณ์เคอร์ หรือการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบรามาน (distributed raman amplifier: DRA) แทน EDFA เนื่องจาก DRA จะช่วยให้กำลังสัญญาณแสงอยู่ในค่าที่เรียบเนียน (flatten) ทำให้สามารถลดปรากฏการณ์เคอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK (On-Off Keying) มาเป็นการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK (Differential

Phase-Shift Keying) ยังสามารถลดปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นให้ลดลงได้ [6][7] เนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK จะมีกำลังสัญญาณแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูลบิต 0 และบิต 1 มีปริมาณเท่ากัน ทำให้ผลของปรากฏการณ์เคอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงลดลง [8] ดังนั้นวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK จึงมีความทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสงมากกว่าวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK [9] ในปัจจุบันวิธีการมอดูเลตสัญญาณเริ่มพัฒนาเป็นแบบ DQPSK (differential quadrature phase-shift keying) เพราะสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตด้วยวิธีการนี้จะมีเเนวโพลของสัญญาณ (envelope signal) คงที่ ทำให้สามารถลดการเกิดของปรากฏการณ์เคอร์ได้มากกว่าวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ DPSK [10][11] นอกจากนี้วิธีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว ยังมีวิธีที่น่าสนใจซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาคอมพิวชันของสัญญาณแสงเนื่องจากดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ได้ในเวลาเดียวกันอย่างค่อนข้างมีประสิทธิภาพ นั่นคือการใช้วิธีสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugation) ซึ่งคือการวาง OPC (optical phase conjugator: OPC) ไว้ตรงช่วงกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการรับส่งสัญญาณแสงเสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนครึ่งแรกนั้นดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์จะก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง แต่เมื่อสัญญาณแสงผ่าน OPC แล้ว จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตเดิมขึ้นมา เรียกว่าสัญญาณคอนจูเกต (Conjugation signal) จากนั้นเมื่อสัญญาณคอนจูเกตเดินทางผ่านในส่วนครึ่งหลัง ทำให้ความผิดเพี้ยนถูกชดเชยและสัญญาณแสงกลับคืนสู่รูปเดิมเหมือนต้นทางอีกครั้ง ทั้งนี้เส้นใยแสงที่อยู่ในระบบทั้งครึ่งแรกและครึ่งหลังจะต้องมีคุณสมบัติของเส้นใยแสงต่าง ๆ รวมถึงค่าดิสเพอร์ชันที่เหมือนกัน [12][13][14][15]

การประยุกต์ใช้วิธีสังยุคเฟสแสงกับระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงได้ถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกโดยงานวิจัยของ Yariv A. ที่เสนอการวาง OPC ไว้ที่กึ่งกลางของระบบเพื่อแก้ไขปัญหาคอมพิวชันของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ [16] ซึ่งจากการทดลองล่าสุดของ S. L. Jansen et al. [17] เมื่อไม่นานมานี้ ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวจะสามารถรับส่งสัญญาณแบบ DWDM (dense wavelength-division multiplexed) จำนวน 22 ช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราเร็ว 21.4 กิกะบิตต่อวินาที สื่อสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวมาตรฐาน (standard single-mode fiber: SSMF) เป็นระยะทางทั้งหมดถึง 10,200 กิโลเมตร ได้เป็นผลสำเร็จ

โดยทั่วไปแล้ว OPC จะถูกสร้างขึ้นจากการทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ในเส้นใยแสง [18][19] หรือในอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงแบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor optical amplifier: SOA) [20][21][22] โดยในกรณี OPC แบบ SOA จะให้ค่า conversion efficiency (η) หรือ ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณคอนจูเกตหลังจากออกจาก OPC เทียบกับกำลังของ

สัญญาณแสงก่อนเข้า OPC ที่ค่อนข้างสูงกว่าแบบใช้เส้นใยแสง เนื่องจาก SOA อาศัยตัวกลางที่เป็นประเภทแอ็กทีฟ (active) จึงส่งผลให้เกิดอัตราขยาย (gain) ในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ขึ้น แต่การใช้ SOA ทำ OPC ก็มีข้อเสียคือการเกิดปัญหา nonlinear distortion ที่ค่อนข้างรุนแรงกับสัญญาณแสง [23]

ในทางตรงกันข้าม หากใช้เส้นใยแสงในการสร้าง OPC จะให้ค่า conversion efficiency ที่ไม่สูงนัก แต่ก็ไม่ต้องเผชิญปัญหา nonlinear distortion เหมือนแบบ SOA ทั้งนี้ OPC ที่สร้างจากเส้นใยแสงยังให้ค่า signal-to-background-noise ratio ที่สูงมากด้วย [24] อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยแสง จะต้องประสบกับปัญหา Stimulated Brillouin Scattering (SBS) ที่ทำให้สัญญาณแสงเกิดการสะท้อนกลับออกจากเส้นใยแสง ถ้าหากสัญญาณแสงนั้นมีกำลังสูงเกินกว่าค่า SBS threshold ดังนั้นจึงเป็นการจำกัดมิให้ใช้สัญญาณปั๊ม (pump signal) มีค่ากำลังสูงมากเกินไปสำหรับการแก้ปัญหา SBS นั้นสามารถใช้วิธีการมอดูเลตทางความถี่หรือเฟสเพื่อเพิ่มค่า SBS threshold ให้สูงขึ้นได้ นอกจากนี้การใช้เส้นใยแสงยังเกิดปัญหาจากการที่แกน polarization ของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่สัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล ซึ่งในการเกิดปรากฏการณ์ FWM นั้นจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อแกน polarization ของสัญญาณต่างๆอยู่ในแกนเดียวกัน โดยหากแกน polarization เปลี่ยนไป ประสิทธิภาพของการเกิดปรากฏการณ์ FWM ก็ลดลง ส่งผลให้ค่า conversion efficiency ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ polarization insensitivity ก็จะมีค่าต่ำลง หมายความว่าหากสัญญาณที่เข้าสู่ OPC มี polarization ต่างกันก็จะมีค่า conversion efficiency ที่ต่างกันออกไป ต่อมาภายหลังมีการคิดค้นวิธีใช้สัญญาณปั๊มซึ่งมีแกนของ polarization สองแกนที่ตั้งฉากกัน ซึ่งจะทำให้สัญญาณขาเข้าของ OPC ที่ถึงแม้จะมีแกน polarization แตกต่างกัน แต่ยังคงให้ค่า conversion efficiency ที่ใกล้เคียงกัน [19] [25][26]

แม้ว่า OPC ที่ทำขึ้นมาจากเส้นใยแสงจะให้ค่า conversion efficiency ที่ค่อนข้างต่ำ แต่ปัญหานี้ก็ไม่หนักหนาเท่ากับปัญหา nonlinear distortion จากกรณีที่ใช้ SOA ในการสร้าง OPC ดังนั้นเส้นใยแสงจึงได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในทำ OPC มากกว่า SOA

สำหรับชนิดของเส้นใยแสงที่ใช้ทำ OPC นั้น ในยุคแรกคือเส้นใยแสงชนิด DSF [18][19] แต่เส้นใยแสงชนิดนี้มีค่า nonlinear coefficient (γ) ที่ไม่ค่อยสูงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ไม่ค่อยดีนัก หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของ FWM ให้มากขึ้น จำเป็นต้องใช้เส้นใยแสงที่ยาวขึ้น ซึ่งแน่นอนว่าจะตามมาด้วยปัญหา polarization ของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเปลี่ยนไปเป็นระยะ ๆ ตามความยาวของเส้นใยแสง ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเส้นใยแสงชนิด Highly nonlinear fiber (HNLF) ขึ้น โดยคุณสมบัติของเส้นใยแสงชนิดนี้ก็คือมีค่า nonlinear coefficient ที่สูงขึ้น ทำให้สามารถลดความยาวของเส้นใยแสงให้สั้นลงกว่า DSF ได้ [26][27][28] จากการทดลอง พบว่าเดิมที่ใช้เส้นใยแสงชนิด DSF จะต้องใช้ความยาวมากกว่า 10 กิโลเมตร

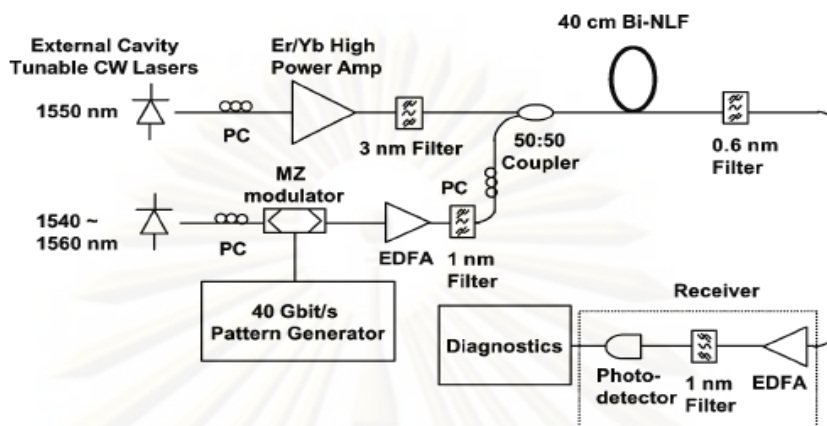
เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ในการสร้าง OPC แต่เมื่อพัฒนามาใช้เส้นใยแสงชนิด HNLF ซึ่งมีค่า nonlinear coefficient เท่ากับ $18 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ แล้ว จะสามารถลดความยาวของเส้นใยแสงลงเหลือเพียง 1 กิโลเมตรเท่านั้น ซึ่งสามารถให้ค่า conversion efficiency ที่มากกว่า 0 dB [29]

หลังจากนั้น ยังมีการคิดค้นเส้นใยแสงชนิด Bismuth oxide-based nonlinear fiber (Bi-NLF) ขึ้นมาอีก ซึ่ง ของ HNLF ที่ว่าสูงนั้นยังมีค่าเพียง $18 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ เท่านั้น แต่สำหรับ Bi-NLF แล้ว ค่า nonlinear coefficient จะอยู่ในระดับ $1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ จึงสามารถสร้าง OPC ได้จากเส้นใยแสงที่มีความยาวน้อยกว่าเดิมมาก และข้อดีอีกประการของเส้นใยแสงชนิดนี้ก็คือมีค่า SBS threshold ที่สูงกว่า DSF มาก จึงไม่จำเป็นต้องมอดูเลตสัญญาณบีบเพื่อยกค่า SBS threshold ให้สูงขึ้น ในการทดลองที่ผ่านมา ได้มีการสร้าง OPC จาก Bi-NLF ที่มีค่า nonlinear coefficient เท่ากับ $1100 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ โดยใช้ความยาวเพียง 40 เซนติเมตรเท่านั้น ซึ่ง OPC ดังกล่าวสามารถสื่อสารสัญญาณแสงแบบ nonreturn-to-zero (NRZ) ที่มีอัตราข้อมูล 40 กิกะบิตต่อวินาทีได้โดยเกิดความผิดพลาดน้อยมาก [30] นอกจากนี้ยังมีอีกการทดลองหนึ่งที่ใช้สร้าง OPC ด้วย Bi-NLF ที่มีค่า nonlinear coefficient เท่ากับการทดลองแรก แต่ใช้เส้นใยแสงที่มีความยาว 1 กิโลเมตร ทำให้การสื่อสารสัญญาณแสงแบบ NRZ ที่มีอัตราเร็ว 40 กิกะบิตต่อวินาที ผ่านระยะทางทั้งหมด 150 กิโลเมตร ได้เป็นผลสำเร็จ [31] แต่ในความเป็นจริงแล้ว การที่มีค่า nonlinear coefficient สูงขึ้น จะเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิด by-product FWM ให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สัญญาณรบกวนได้รับการถ่ายเทพลังงานจากปรากฏการณ์ FWM ตามไปด้วย อันจะก่อให้เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนมากยิ่งขึ้น

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาเส้นใยแสงชนิดใหม่แบบ photonics crystal fiber ซึ่งมีออกแบบขึ้นด้วยหลักการพิเศษทำให้มีการสูญเสียพลังงานในเส้นใยแสงต่ำมาก ซึ่งเส้นใยแสงที่กำลังได้รับความนิยมใช้ทำ OPC คือ เส้นใยแสงชนิด highly nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) ซึ่งมีค่า nonlinear coefficient เท่ากับ $11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนมากเหมือนการใช้เส้นใยแสงชนิด Bi-NLF และความยาวของเส้นใยแสงก็อยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 500 เมตร ไม่ถือว่ายาวจนเกินไป โดยจากการทดลองล่าสุดของ Yan Geng et al ซึ่งทำการทดลองกลับความยาวคลื่นสัญญาณ (wavelength converter) ที่จำนวน 6 ช่องสัญญาณ ด้วยอัตราข้อมูล 40 Gb/s โดยอาศัยเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ได้ค่า conversion efficiency มากกว่า -20.3 dBm เมื่อป้อนสัญญาณบีบที่ 25 dBm [32]

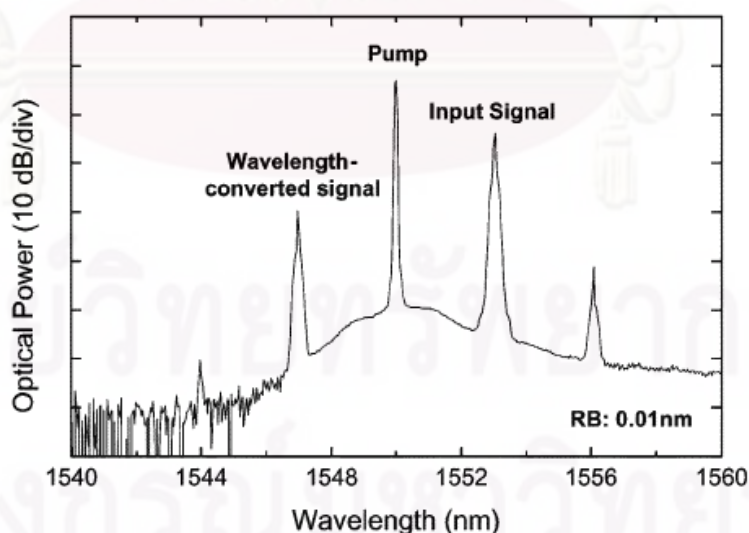
OPC ที่สร้างจากเส้นใยแสงสามารถแบ่งตามตำแหน่งการเกิดสัญญาณคอนจูเกตได้เป็นสองชนิดคือ ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift type) [18][30] [31] และ ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free type) [25][26][27] โดย OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น หมายความว่าสัญญาณคอนจูเกตที่ OPC แปลงออกมามีค่าความยาวคลื่นต่างกับสัญญาณแสง

เดิมก่อนเข้า OPC โดยจะอาศัยสัญญาณปั๊มเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM เพียงสัญญาณเดียว ดังแสดงโครงสร้างของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในรูปที่ 1.1 [30]



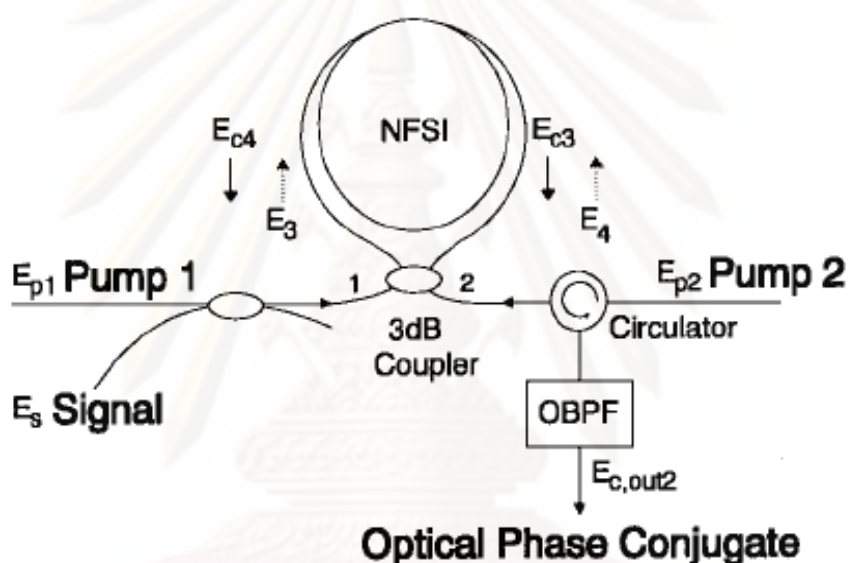
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโครงสร้างของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง [30]

จากโครงสร้างของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในรูปที่ 1.1 นั้น เมื่อสัญญาณแสงผ่าน coupler แล้วสัญญาณปั๊มกับสัญญาณแสงจะเดินทางพร้อมกันเข้าไปในเส้นใยแสง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ขึ้นและส่งผลให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่าความยาวคลื่นต่างออกไปจากสัญญาณแสงเดิมดังแสดงในรูปที่ 1.2 [30] จากนั้นที่ปลายทางของเส้นใยแสงจะมีตัวกรองความถี่ช่วงสัญญาณ (band pass filter) แยกสัญญาณคอนจูเกตออกมา



รูปที่ 1.2 สเปกตรัมของคลื่นใน OPC ตัวอย่างตามโครงสร้างในรูปที่ 1.1 [30]

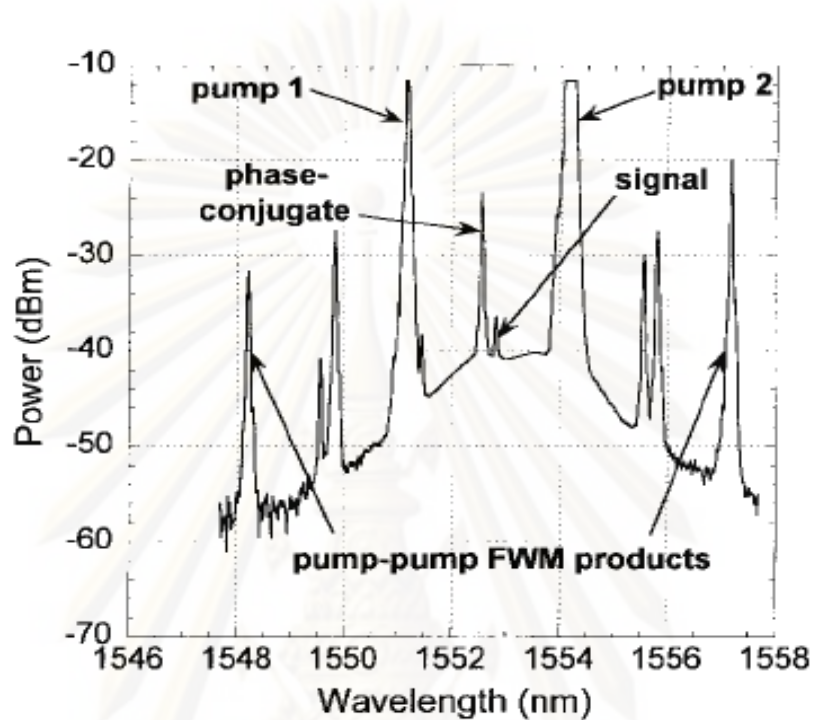
ส่วน OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นหมายความว่าสัญญาณคอนจูเกตที่ OPC แปลงออกมากับสัญญาณแสงเดิมก่อนเข้า OPC มีค่าความยาวคลื่นที่เท่ากัน โดยจะอาศัยสัญญาณปั๊มจำนวน 2 สัญญาณแสงเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ขึ้นภายในโครงสร้าง Sagnac Interferometer ที่ทำเส้นใยแสงให้มีลักษณะเป็น loop ซึ่งโครงสร้างเช่นนี้จะทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่ OPC แปลงออกมามีค่าความยาวคลื่นเท่ากับสัญญาณแสงเดิม แต่สัญญาณคอนจูเกตและสัญญาณแสงเดิมสามารถแยกจากกันได้ เพราะสัญญาณแสงทั้งสองจะออกมาจาก Sagnac interferometer ที่พอร์ตต่างกัน ดังแสดงโครงสร้างพร้อมทั้งสเปกตรัมของคลื่นในรูปที่ 1.3 และ รูปที่ 1.4 ตามลำดับ [25]



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างโครงสร้างของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง [25]

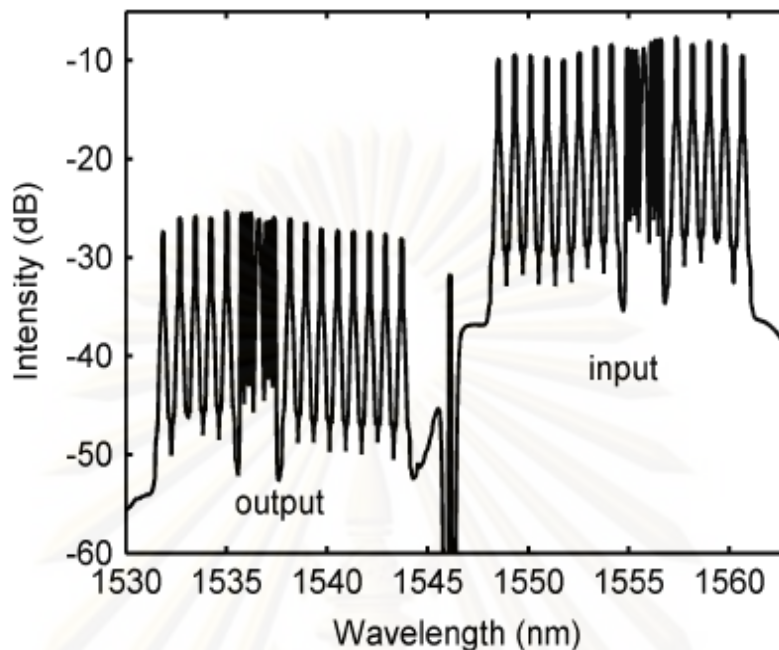
จากโครงสร้างของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในรูปที่ 1.3 จะเห็นว่ามี การอาศัยโครงสร้าง Sagnac interferometer ซึ่งสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 กับสัญญาณแสงจะเข้าสู่พอร์ตที่ 1 ของ coupler ส่วนสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 จะเข้าสู่พอร์ตที่ 2 ของ coupler จากนั้นเมื่อสัญญาณปั๊มทั้งสองคลื่นและสัญญาณแสงเดินทางเข้าไปยัง loop ของเส้นใยแสงพร้อมกันแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์ FWM ขึ้น ทำให้ได้สัญญาณคอนจูเกตที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับสัญญาณแสงเดิมเดินทางออกมาพร้อมกับสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 ที่พอร์ตที่ 2 ของ coupler จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะมีตัวกรองความถี่ช่วงสัญญาณ (band pass filter) เพื่อสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 ออกจากสัญญาณคอนจูเกต ในขณะที่พอร์ตที่ 1 ของ coupler นั้น จะมีสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 กับสัญญาณแสงเดิมเดินทางออกมา ทำให้สัญญาณคอนจูเกตกับสัญญาณแสงเดิมที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากันสามารถแยกออกจากกันได้เพราะเดินทางออกมาจากพอร์ตที่ต่างกันของ loop เส้นใย

แสง ซึ่งสเปกตรัมของคลื่นภายใน OPC ที่ใช้โครงสร้าง Sagnac interferometer จะแสดงในรูปที่ 1.4 โดยในการทดลอง [25] มีการเลื่อนความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตกับสัญญาณแสงเดิมออกจากกันเล็กน้อยเพื่อให้สังเกตสเปกตรัมของสัญญาณคอนจูเกตได้



รูปที่ 1.4 สเปกตรัมของคลื่นใน OPC ตัวอย่างตามโครงสร้างในรูปที่ 1.3 โดยมีการเลื่อนความยาวคลื่นของสัญญาณแสงเดิมเล็กน้อยเพื่อให้สังเกตสเปกตรัมของสัญญาณแสงเดิมและสัญญาณคอนจูเกตแยกจากกันได้ [25]

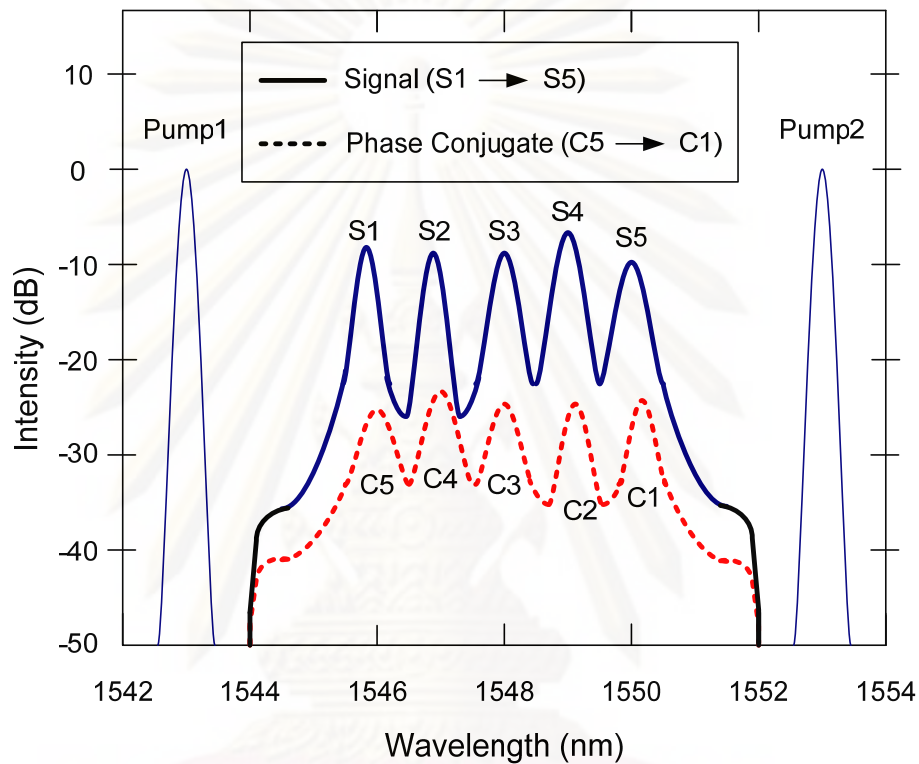
แน่นอนว่า OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นย่อมสะดวกในการใช้งานมากกว่าชนิดเลื่อนความยาวคลื่น เนื่องจากไม่ต้องตรวจเทียบที่ปลายทางว่าสัญญาณคอนจูเกตที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งแปลงมาจากสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นค่าใด ซึ่งจะสร้างความยุ่งยากให้ไม่น้อยในกรณีของการสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ประกอบด้วยสัญญาณแสงมากมายที่มีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน ทั้งนี้จากการทดลองเกี่ยวกับการสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ผ่านมา เมื่อเลือกใช้ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแล้ว [17][33] จะทำให้สัญญาณคอนจูเกตมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปรวมทั้งช่วงของสัญญาณคอนจูเกต (band) ก็เปลี่ยนไปจากช่วงของสัญญาณแสงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 1.5 [17]



รูปที่ 1.5 สเปกตรัมของคลื่นแบบ WDM ใน OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น [17]

นอกจากนี้ เมื่อนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นมาใช้กับการสื่อสารสัญญาณ WDM ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตจะยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากความยาวคลื่นของสัญญาณแสงเดิม แต่ช่วงของสัญญาณทั้งสองจะยังคงใช้ช่วงเดียวกัน หมายความว่า ความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นสลับตำแหน่งความยาวคลื่นกับสัญญาณแสงเดิมที่อยู่ในช่วงแบนด์วิดท์เดียวกัน นั่นคือ คุณสมบัติของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปเป็น OPC ชนิดไม่เลื่อนช่วงสัญญาณเมื่อนำมาใช้กับสัญญาณ WDM ดังแสดงในรูปที่ 1.6 โดยจากสเปกตรัมของสัญญาณ WDM จะเห็นได้ว่า เมื่อมีสัญญาณ WDM 5 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ S1 ถึง S5 ผ่านเข้า OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตของสัญญาณแสงทั้ง 5 ความยาวคลื่นเป็น C1 ถึง C5 ตามลำดับ โดยที่ความยาวคลื่นของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC กับความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตหลังออกจาก OPC จะอยู่คนละตำแหน่งกัน เช่น สัญญาณแสง S1 ที่ความยาวคลื่น 1546 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกต C1 ที่ความยาวคลื่น 1551 nm ซึ่งความยาวคลื่นดังกล่าวเป็นตำแหน่งของสัญญาณแสง S5 ที่มีสัญญาณคอนจูเกต C5 เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของสัญญาณแสง S1 เช่นเดียวกัน ทำให้ทราบว่าเมื่อป้อนสัญญาณ WDM เข้า OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแล้ว จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่สลับตำแหน่งความยาวคลื่นกับสัญญาณแสงขึ้น โดยมี C5 ที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับ S1 ส่วนสัญญาณคอนจูเกต C4, C3, C2 และ C1 จะมีความยาวคลื่นตรงกันกับสัญญาณแสง S2, S3, S4 และ S5 ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบว่า

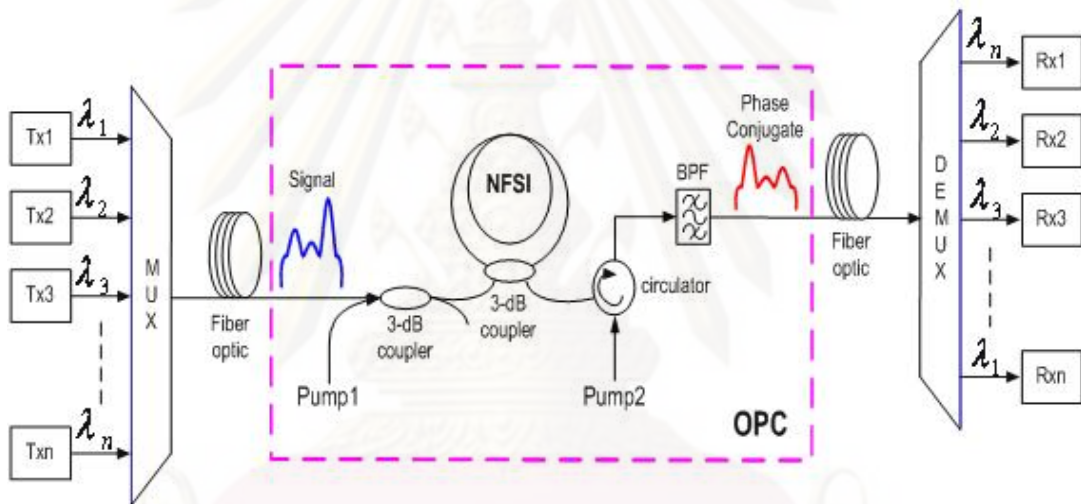
สัญญาณแสงกับสัญญาณคอนจูเกตที่ถึงแม้จะมีความยาวคลื่นไม่เหมือนกัน แต่ก็ยังคงมีช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณทั้งสองที่เหมือนกัน ซึ่งข้อดีของการใช้ช่วงแบนด์วิดท์เดียวกันนี้คือสามารถช่วยให้ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ประหยัดช่วงแบนด์วิดท์ที่จะต้องใช้งานได้มากขึ้น ทำให้ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น เปลี่ยนเป็น OPC ชนิดไม่เลื่อนช่วงสัญญาณ สำหรับสัญญาณ WDM



รูปที่ 1.6 สเปกตรัมของคลื่นแบบ WDM ใน OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

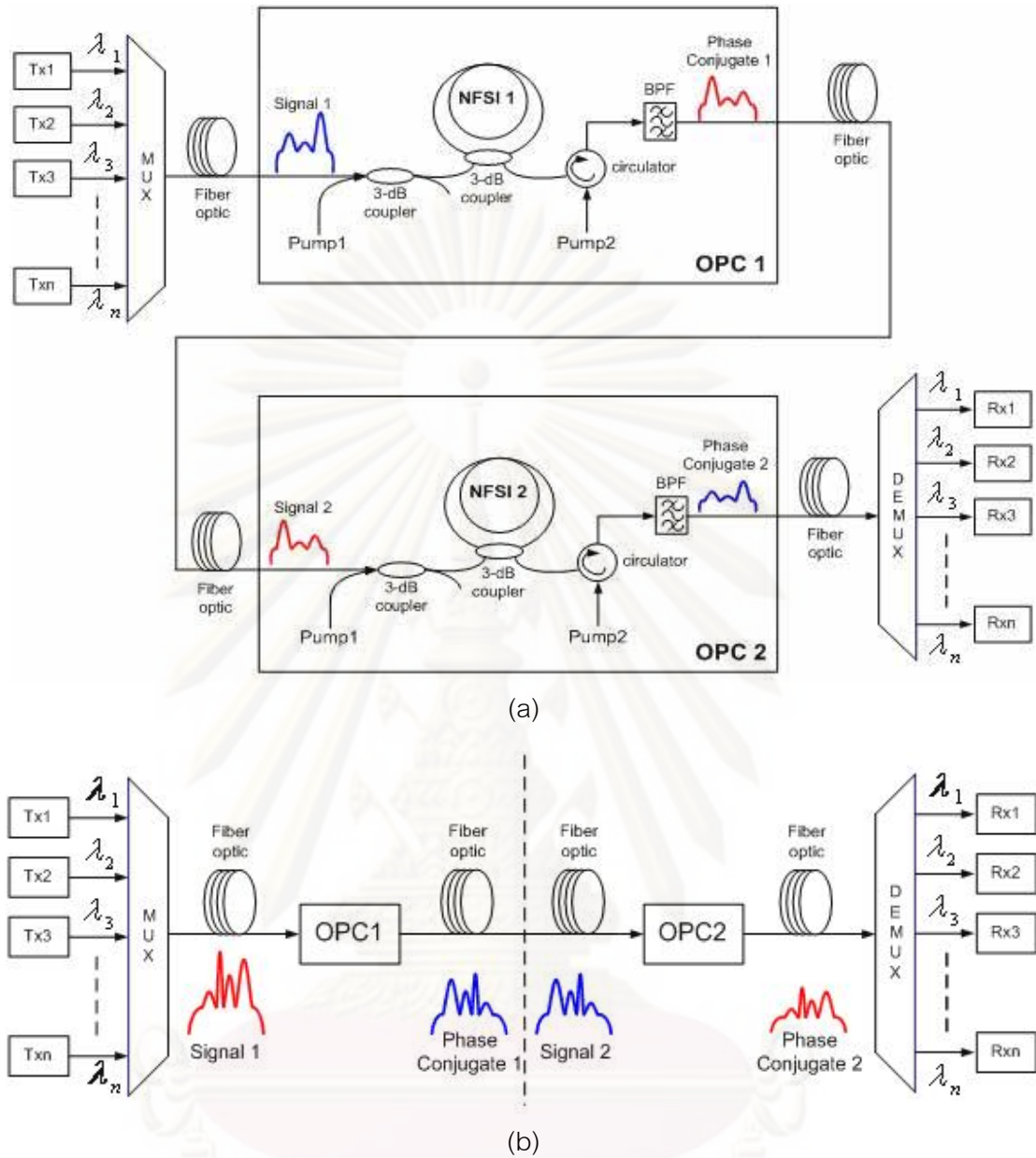
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังไม่มีผู้ใดศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM โดยไม่เลื่อนความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตในระบบที่มี OPC เพื่อชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นความสนใจในการศึกษาและออกแบบระบบดังกล่าว โดยให้ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ประกอบไปด้วย OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจำนวน 2 เครื่อง เมื่อสัญญาณแสงแบบ WDM ผ่าน OPC ตัวที่ 1 การเรียงตัวของสัญญาณคอนจูเกตจะสลับตำแหน่งความยาวคลื่นกับสัญญาณแสงเดิมแต่ยังคงอยู่ในช่วงของสัญญาณแสงเดียวกัน ต่อมาเมื่อสัญญาณคอนจูเกตเดินทางมาถึง OPC ตัวที่ 2 จะทำให้สัญญาณคอนจูเกตปลายทางกลับมามีความยาวคลื่นตรงกับสัญญาณแสงเมื่อเริ่มต้น โดยจะออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่ไม่เลื่อนความยาวคลื่นให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด พร้อมใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0

ตรวจสอบผล ทั้งนี้ในขั้นแรกจะวิเคราะห์ว่าเมื่อนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นมาใช้กับสัญญาณที่มีแบนด์วิธกว้างมาก ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณแสงแบบ WDM ดังในรูปที่ 1.7 จะมีผลต่อคุณลักษณะ (Characteristic) ต่าง ๆ เช่น ประสิทธิภาพของแต่ละช่องสัญญาณ ขนาดของแบนด์วิธที่จะให้ประสิทธิภาพที่สูง ประสิทธิภาพและระยะห่างระหว่างสัญญาณบีบทั้งสอง และการออกแบบเพื่อให้ได้ค่ากำลังของสัญญาณบีบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency สูง จากนั้นจะนำเอาระบบจากรูปที่ 1.7 มาปรับเปลี่ยนโดยการเพิ่ม OPC เข้าไปเป็น 2 เครื่อง เพื่อให้สัญญาณที่เข้าสู่ภาครับสัญญาณแสงปลายทางมีความยาวคลื่นตรงกับสัญญาณที่ออกจากภาคส่งสัญญาณที่ต้นทางดังแสดงในรูปที่ 1.8 นอกจากนี้จะทำการวิเคราะห์ผล penalty ของ OPC พร้อมทั้งจะทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างระบบที่ออกแบบกับระบบที่วาง OPC ไว้ตรงช่วงกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดเป็นลำดับถัดไป



รูปที่ 1.7 ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM กับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.8 ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM กับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer จำนวน 2 เครื่อง เพื่อให้ส่งยุคของสัญญาณมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิม

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษา OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer กับสัญญาณ WDM พร้อมทั้งวิเคราะห์การตอบสนองของอุปกรณ์ต่อความกว้างของแบนด์วิดท์ ผลของค่า conversion efficiency ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบต่าง ๆ ของ OPC และความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นหลังจากสัญญาณแสงผ่าน OPC โดยออกแบบระบบให้เหมาะสมกับสัญญาณ WDM ที่สุด ซึ่งขนาดแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้ OPC ได้ ค่า penalty ของ OPC ที่เสียไปเมื่อส่งสัญญาณแบบ WDM ผ่าน OPC และความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเป็นประเด็นสำคัญที่กำหนดว่าระบบสามารถทำงานได้หรือไม่
2. ศึกษาผลของการนำ OPC ข้างต้น จำนวน 2 เครื่อง มาใช้ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM เพื่อให้ความยาวคลื่นที่เข้าสู่ภาครับสัญญาณแสงปลายทางตรงกันกับความยาวคลื่นที่ออกจากภาคส่งสัญญาณแสงต้นทาง และออกแบบให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุด โดยเน้นที่ขนาดแบนด์วิดท์ของ WDM ที่ระบบสามารถรองรับได้และความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งอาศัยค่า Q factor เป็นค่าชี้วัด โดยค่า Q factor ต้องมีค่ามากกว่า 7 หรือมีค่าอัตราบิดผิดพลาด (Bit error rate) น้อยกว่า 10^{-12}
3. เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างระบบที่ทำการออกแบบซึ่งมี OPC จำนวน 2 เครื่องที่ได้นำเสนอกับระบบที่วาง OPC ไว้ตรงช่วงกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดเพียงเครื่องเดียว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการออกแบบและทดลองระบบโดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์เท่านั้น ไม่มีการทดลองกับระบบจริง
2. พิจารณาเฉพาะ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบ Sagnac interferometer เท่านั้น
3. สื่อสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 10 Gbps เท่านั้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาพื้นฐานของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณเมื่อสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
2. ศึกษาการแก้ไขความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณเมื่อสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วย OPC
3. ศึกษาหลักการของการให้กำเนิดสัญญาณคอนจูเกต (phase-conjugated signal) โดยอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ four-wave mixing (FWM) ในเส้นใยแสง

4. ศึกษาชนิดของ OPC โดยเฉพาะ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer และมีสัญญาณบีบ 2 คลื่น พร้อมทั้งชุดสมการที่อธิบายการกำเนิดสัญญาณคอนจูเกตในโครงสร้างดังกล่าว
5. วิเคราะห์เพื่อหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก ๆ โดยเฉพาะกับสัญญาณ WDM เมื่อผ่าน OPC ที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer ดังนี้
 - 5.1 ประสิทธิภาพของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณ
 - 5.2 ขนาดของแบนด์วิดท์ที่ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงเพียงพอ
 - 5.3 ประสิทธิภาพและระยะห่างระหว่างสัญญาณบีบทั้ง 2 คลื่น
 - 5.4 กำลังของสัญญาณบีบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency สูง
6. ออกแบบ OPC จากทางทฤษฎีและนำไปใช้ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM จำนวน 2 เครื่องเพื่อไม่ให้ความยาวคลื่นเลื่อนไปจากเดิมพร้อมทั้งทดสอบผลด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0
7. วิเคราะห์ผลของค่า penalty ที่เสียไปหลังจากที่มีการใช้ OPC เพราะ OPC จะทำให้คุณภาพของสัญญาณ ซึ่งอาศัยค่าชี้วัดคือ Q factor ลดลง
8. ออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่ไม่เลื่อนความยาวคลื่นเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุด โดยอาศัยค่าชี้วัดคือ ค่า Q factor
9. เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างระบบที่ทำการออกแบบซึ่งมี OPC จำนวน 2 เครื่องกับระบบที่วาง OPC ไว้ตรงช่วงกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดเพียงเครื่องเดียว
10. เรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบหลายความยาวคลื่นระยะทางไกล
2. ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณเมื่อสัญญาณหลายความยาวคลื่นเดินทางผ่านระยะทางไกล และการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อทำการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย OPC
3. ข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ OPC จำนวน 1 เครื่อง และระบบที่ใช้ OPC จำนวน 2 เครื่อง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

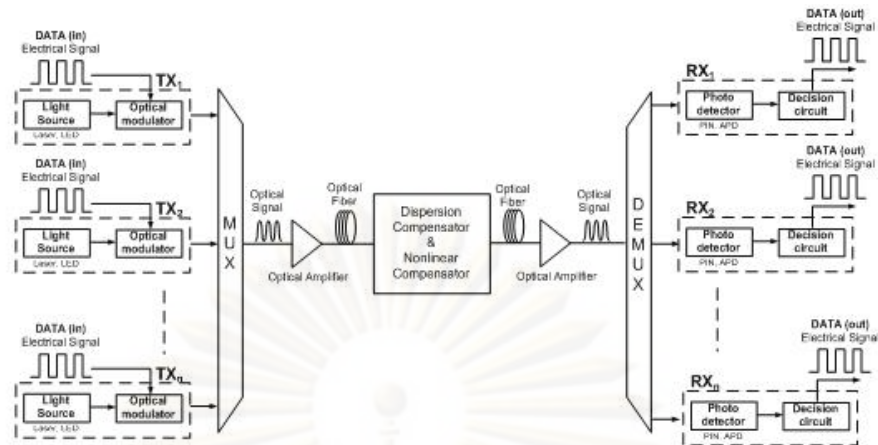
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับ OPC ที่ใช้ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบหลายความยาวคลื่น เพื่อให้เข้าใจเหตุผลว่าเหตุใดจึงเลือกใช้อุปกรณ์ดังกล่าว จึงจะเริ่มต้นกล่าวในส่วนขอระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลแบบหลายความยาวคลื่น ในหัวข้อที่ 2.1 และทฤษฎีการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงรวมทั้งปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง ในหัวข้อที่ 2.2 จากนั้นจะกล่าวถึงการกำเนิดสัญญาณและชนิดของ OPC ในหัวข้อที่ 2.3 และจบท้ายด้วยการทำงานของโครงสร้างแบบ sagnac interferometer ซึ่งเป็นโครงสร้างของ OPC ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในหัวข้อที่ 2.4

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบหลายความยาวคลื่น

ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบหลายความยาวคลื่น (WDM) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สัญญาณแสงที่ถูกส่งออกไปยังปลายทางจะเกิดการลดทอนกำลังแสง (power attenuation) เกิดความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณอันเนื่องมาจากปัญหาการกระจาย (dispersion) และปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้น (fiber nonlinearity) ของเส้นใยแสง ดังนั้นในองค์ประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงทั่วไป ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (optical transmitter) เส้นใยแสง (optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (optical receiver) จะต้องมีตัวมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางความยาวคลื่น (wavelength division multiplexer) เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณได้พร้อมกันที่หลายความยาวคลื่น อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier) เพื่อแก้ไขปัญหาการลดทอนของกำลังแสง และอุปกรณ์ในการชดเชยปัญหาการกระจายและปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มเติมเข้าไปในระบบ ดังแสดงในรูปที่

2.1

ศูนย์วิทยุโทรพัทธยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีการขยายสัญญาณแสง แก้ไขปัญหาดิสเพอร์ชันและปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

ตัวขยายสัญญาณแสงที่เลือกใช้ในระบบทั่ว ๆ ไปมักเป็นชนิด EDFA เนื่องจากสามารถขยายสัญญาณแสงได้ตลอดช่วง C-band ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ใช้กันมากในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง ส่วนอุปกรณ์ในการชดเชยปัญหาดิสเพอร์ชันและปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีสังยุคเฟสแสงด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า OPC ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของ OPC ในหัวข้อที่ 2.3 ต่อไป

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงรวมทั้งปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงได้ระยะทางหนึ่งจะเกิดการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณขึ้น ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากปัญหาดิสเพอร์ชันและปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติของสัญญาณแสงกระทำได้โดยการพิจารณาสมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสง ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ (Nonlinear Schrödinger equation, NLSE) [34]

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

โดยที่	A	คือ กรอบคลื่น (envelope) ของสัญญาณ
	α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Constant)
	β_2	คือ ค่าที่บ่งบอกถึงค่าจีวีดี (group-velocity dispersion, GVD)
	γ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient) ของเส้นใยแสง
	z	คือ ระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง
	T	คือ เวลาที่ถูก normalize ด้วยความเร็วกลุ่ม (group velocity, vg)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและเวลาที่ถูกระบุ Normalize ด้วยความเร็วกลุ่ม มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (2.2)$$

$$T = t - \frac{z}{v_g} \quad (2.3)$$

โดยที่	n_2	คือ nonlinear refractive index
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่น
	A_{eff}	คือ effective core area
	t	คือ เวลาที่สัญญาณแสงใช้ในการเดินทางผ่านมา

จากสมการ NLSE จะแสดงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสัญญาณ A เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (2.1) สามารถแบ่งได้เป็น 3 พจน์ ดังนี้

1. พจน์ของการลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นไปตามระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง สามารถชดเชยกำลังสัญญาณได้ด้วยเครื่องขยายสัญญาณแสง
2. พจน์ของปรากฏการณ์ GVD หรือดิสเพอร์ชัน (β_2) ที่แสดงการบานออกของรูปสัญญาณเมื่อสัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง
3. พจน์ของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) หรือปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (γ) ภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออก โดยความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

โดยปัจจัยทั้ง 3 จากสมการที่ (2.1) จะมีผลกระทบต่อรูปสัญญาณของสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงให้เกิดความผิดเพี้ยน ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.1 ถึง 2.2.3 ตามลำดับ

2.2.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (Attenuation)

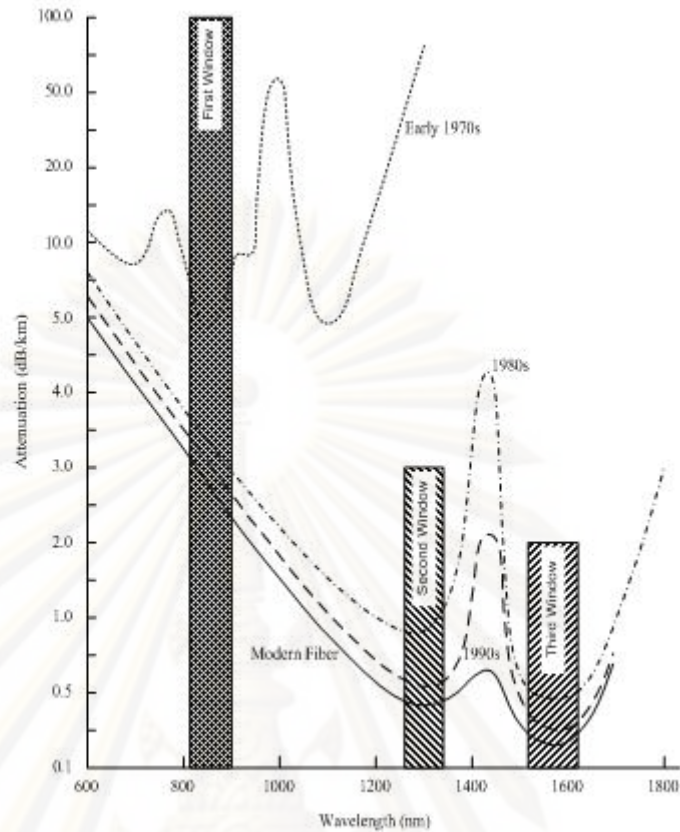
การลดทอนกำลังสัญญาณของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้งานซึ่งเป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณดังสมการที่ (2.4)

$$P(L) = P(0) - \alpha L \quad (2.4)$$

โดยที่	$P(L)$	คือ กำลังของสัญญาณแสงที่ระยะ L จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง [dB]
	$P(0)$	คือ กำลังของสัญญาณแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง [dB]
	α	คือ ค่าคงตัวของการลดทอนกำลังสัญญาณ [dB/km]
	L	คือ ระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง [km]

สำหรับค่าคงตัวการลดทอนกำลังสัญญาณ α นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 4 เส้นโดยเส้นที่สองจากบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างสุดเส้นที่บซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกาและจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ซึ่งทำให้อัตราสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูปที่ 2.2 หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นประสลับจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ต่อมาในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้นเราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [35]

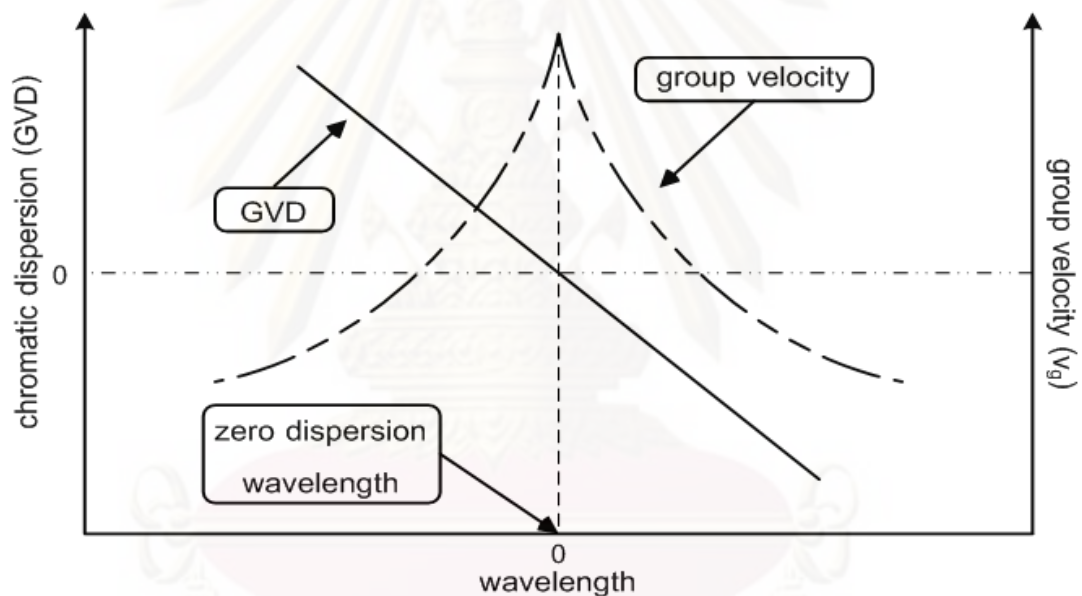
การลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสง เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงกับอุปกรณ์รับสัญญาณแสงและถูกใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดของเส้นใยแสงในระบบสื่อสาร เช่น หากเส้นใยแสงมีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ ก็จะสามารถใช้กับระบบที่มีระยะทางไกลได้ เป็นต้น

2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

ดิสเพอร์ชัน หมายถึง การขยายออกของพัลส์สัญญาณแสง (broadening) เมื่อเดินทางในเส้นใยแสง ถูกวัดอยู่ในหน่วย $ps / (nm \times km)$ ดิสเพอร์ชันสามารถเกิดขึ้นได้กับเส้นใยแสงทุกชนิด โดยไม่ขึ้นกับลักษณะของพัลส์สัญญาณ โดยทั่วไปดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ คือ ดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด (intermodal dispersion) ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะในเส้นใยแสงแบบ MMF และดิสเพอร์ชันภายในโหมด (intramodal dispersion หรือ chromatic dispersion) ที่เกิดขึ้นทั้งในเส้นใยแสงแบบ MMF และ SMF สำหรับการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล จะเลือกใช้เส้นใยแสงแบบ SMF เพราะ SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงอัตราการลดทอนกำลัง

สัญญาณแสงที่น้อยกว่า ดังนั้นค่าดิสเพอร์ชันที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกลจึงเป็นประเภท chromatic dispersion เท่านั้น

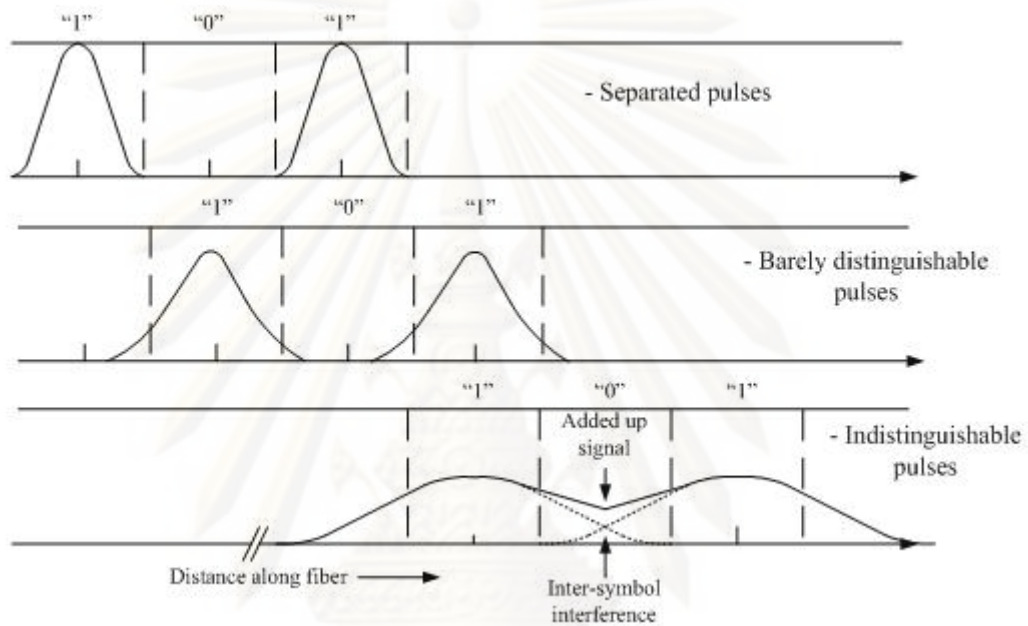
Chromatic dispersion หรืออาจถูกเรียกว่า group velocity dispersion (GVD) เป็นการขยายออกของพัลส์สัญญาณที่เกิดจากคลื่นแสงแต่ละความยาวคลื่นใช้เวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน (ในระยะทางที่เท่ากัน) เนื่องจากคุณสมบัติของความเร็วกลุ่ม (v_g) มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้พัลส์สัญญาณที่ประกอบไปด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (GVD) เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ โดยสามารถแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชันได้เป็น 3 ช่วง คือ normal dispersion ($\beta_2 > 0$), zero dispersion ($\beta_2 = 0$) และ anomalous dispersion ($\beta_2 < 0$)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่มในแต่ละความยาวคลื่น

ความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณแสงเนื่องจากดิสเพอร์ชันจะเกิดมากขึ้นตามระยะทางการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงที่ไกลขึ้น พัลส์สัญญาณจะเกิดการทับซ้อนกัน (overlap) ระหว่างพัลส์ที่ติดกันมากขึ้นจนทำให้พัลส์ข้างเคียงไม่สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องที่ตำแหน่งอุปกรณ์รับสัญญาณแสง จึงมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ (error decision) ว่าสัญญาณแสงที่วิ่งเข้ามาควรจะเป็นบิต '1' หรือบิต '0' ซึ่งปรากฏการณ์ทับซ้อนระหว่างพัลส์สัญญาณนี้เรียกว่า การแทรกสอดระหว่างพัลส์ (inter-symbol interference, ISI) ดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงถึง ISI ที่เกิดจากการขยายตัวของพัลส์สัญญาณที่มอดูเลตแบบความเข้มแสงด้วยบิต '1'.

'0' และ '1' ตามลำดับ พัลส์สัญญาณระหว่างบิตแยกออกจากกันอย่างชัดเจนในรูปด้านบน แต่เมื่อ พัลส์สัญญาณเดินทางในเส้นใยแสง ผลของดิสเพอร์ชันจะทำให้พัลส์สัญญาณเกิดการขยายออกจนกระทั่งเกิด ISI ขึ้น ดังในรูปด้านล่าง ซึ่งผลของ ISI ทำให้กำลังของสัญญาณที่บิต '0' เพิ่มสูงขึ้นในการตรวจจับสัญญาณแสงจึงอาจเกิดความผิดพลาดจากบิต '0' เป็นบิต '1' หากกำลังของสัญญาณเพิ่มสูงขึ้นมีค่าเกินค่าขอบเขตที่เครื่องตรวจจับสัญญาณแสงกำหนดไว้ ดังนั้น ขนาดความจุของข้อมูลในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงจึงถูกกำหนดด้วยดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการเกิด inter-symbol interference

2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)

ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือ nonlinear stimulated inelastic scattering ซึ่งเป็นกระบวนการกระเจิงแสงที่ไม่ยืดหยุ่นและ nonlinear refraction ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (refractive index, n) ที่ขึ้นอยู่กับระดับของกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปราคฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มาจากปราคฏการณ์เคอร์เท่านั้น

ปราคฏการณ์เคอร์เป็นปราคฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงในเส้นใยแสง ทำให้เฟสของสัญญาณแสงที่ปลายทางเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เฟสของสัญญาณแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงนี้จะเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) ซึ่งสามารถแบ่งปราคฏการณ์เคอร์ที่มีผลต่อสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงได้เป็นสามประเภทดังนี้ ประเภทแรก เฟสของสัญญาณ

เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า self-phase modulation (SPM), ประเภทที่สอง เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยกำลังของสัญญาณต่างความยาวคลื่น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า cross-phase modulation (XPM) และประเภทที่สาม อาจเกิดการถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณความยาวคลื่นอื่น ผ่านปรากฏการณ์ four-wave mixing (FWM)

1. Self-Phase Modulation (SPM) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยระดับกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยระดับกำลังของตัวสัญญาณเอง ปรากฏการณ์ SPM จะทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณแสงขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุด
2. Cross-Phase Modulation (XPM) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณแสง 2 สัญญาณที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกันร่วมเดินทางไปด้วยกันในเส้นใยแสง โดยในแต่ละพัลส์สัญญาณ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปเนื่องจากระดับกำลังของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไปเหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้สัญญาณแสงทั้งสองสัญญาณจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็ปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยจะเกิดขึ้นที่ช่วงของสัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลจากปรากฏการณ์ XPM นี้จะมีค่าเป็น 2 เท่าของผลจากปรากฏการณ์ SPM
3. Four-Wave Mixing (FWM) เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่และมีความสัมพันธ์กันตามเงื่อนไขของการจับคู่ความถี่ (frequency matching) และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching) โดยเงื่อนไขของการจับคู่ความถี่จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงาข้ามให้แก่กันและกันแล้วการกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ กันมาผสมผสานกัน ผลของปรากฏการณ์ FWM ในกรณีนี้ที่ช่องสัญญาณเดียวเรียกว่า Intra-channel FWM (IFWM) สำหรับผลของปรากฏการณ์ FWM ในกรณีที่มีหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมาและจะมีความรุนแรงมากเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเลื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ XPM

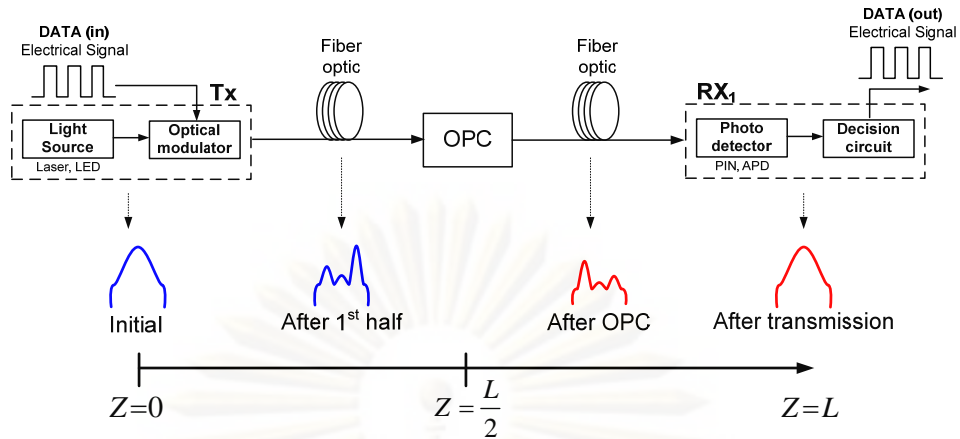
2.3 เครื่องส่งยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugator: OPC)

วิธีการชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดีสเพอร์ชัน และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง คือ วิธีการคอนจูเกตสัญญาณ (phase conjugated) โดยอาศัยการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง (optical phase conjugator, OPC) ไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณ เสมือนว่าแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน เมื่ออุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงทำการปล่อยสัญญาณแสงเข้าสู่เส้นใยแสง รูปสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านในส่วนครึ่งแรกของระบบ ซึ่งสามารถพิจารณาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณได้จากสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ ในสมการที่ (2.1) จากนั้นสัญญาณแสงจากส่วนครึ่งแรกจะผ่านเข้าสู่ OPC ซึ่งมีหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณคอนจูเกต จากสัญญาณแสง A จะได้สัญญาณคอนจูเกต A^* ซึ่งเป็นสัญญาณแสงใหม่สำหรับเดินทางผ่านเส้นใยแสงในส่วนครึ่งหลัง ทำให้ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกถูกปรับเปลี่ยนกลับมาเป็นรูปสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเหมือนกับสัญญาณแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องส่งสัญญาณแสง ทั้งนี้สัญญาณคอนจูเกตจะเป็นไปตามสัญยุคของสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ ดังสมการที่ (2.5)

$$\frac{\partial A^*}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A^* - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} + i\gamma |A^*|^2 A^* \quad (2.5)$$

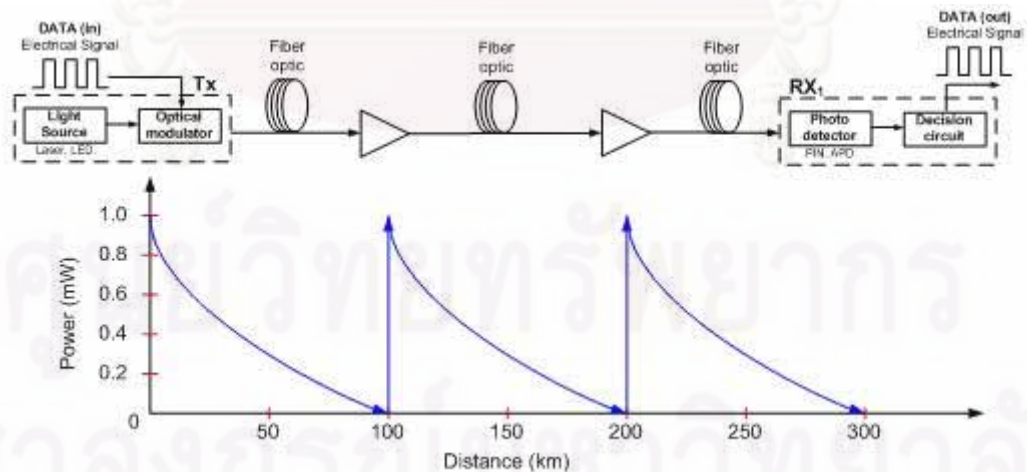
จากทั้งสมการแสดงการเดินทางในส่วนครึ่งแรกและส่วนครึ่งหลังของระบบในสมการที่ (2.1) และ (2.5) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางในส่วนครึ่งแรกไประยะทางหนึ่ง จะเกิดดีสเพอร์ชันขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า β_2 และเมื่อสัญญาณคอนจูเกตที่ออกมาจาก OPC มีค่าดีสเพอร์ชันติดลบเป็น $-\beta_2$ ทำให้ค่าดีสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นจากสัญญาณแสงที่เดินทางในส่วนครึ่งหลังสามารถหักล้างกับดีสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกได้หมด ทั้งนี้ตำแหน่งการวางของ OPC จะต้องอยู่กึ่งกลางของระยะทางทั้งหมด เพื่อให้ปรากฏการณ์ดีสเพอร์ชันถูกชดเชยได้สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงกระบวนการส่งยุคเฟสแสง

อย่างไรก็ตามครั้งแรกจะถูกกลับเป็นค่าตรงกันข้ามในส่วนครึ่งหลังเช่นกัน แต่พบว่าปรากฏการณ์ SPM ซึ่งเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์เคอร์ ไม่สามารถถูกชดเชยได้สมบูรณ์เหมือนกับปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน ทั้งนี้เป็นเพราะปรากฏการณ์ SPM ขึ้นอยู่กับค่ากำลังของสัญญาณ เนื่องจากค่าการลดทอนกำลังสัญญาณที่ไม่เป็นศูนย์ ทำให้กำลังของสัญญาณแสงลดลงไปเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางผ่าน ซึ่งหากว่ากำลังของสัญญาณแสงลดลง ความรุนแรงของปรากฏการณ์ SPM ก็จะอ่อนลงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังของระบบไม่สมมาตรกัน ดังรูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์ SPM ที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังจึงไม่สมดุลกัน ทำให้ไม่สามารถชดเชยปรากฏการณ์เคอร์ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.6 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ถึงแม้ว่าวิธีการสังยุคเฟสแสงจะไม่สามารถชดเชยปรากฏการณ์เคอร์รี่ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องมาจากปัญหาของปรากฏการณ์ SPM แต่หากต้องการชดเชยปรากฏการณ์ดังกล่าวจริง ๆ ยังคงมีวิธีที่สามารถนำมาช่วยชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยาย สัญญาณแสงในระบบการรับส่งสัญญาณให้สั้นลง [36] การใช้ dispersion-decreasing fiber [37] การใช้ Raman amplification [38] และการออกแบบตำแหน่งของอุปกรณ์ในระบบการรับส่ง สัญญาณ [39][40][41] เป็นต้น

2.3.1 การกำเนิดสังยุคของสัญญาณ (Conjugated signal)

วิธีการคอนจูเกตสัญญาณหรือการสร้าง OPC จากเส้นใยแสงนั้น คือวิธีการสร้างสังยุค ของสัญญาณ หรือ การสร้างสัญญาณคอนจูเกตขึ้นมาจากสัญญาณแสงเดิม โดยอาศัยการเกิด ปรากฏการณ์ FWM ซึ่งเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์สามชนิดภายใต้ปรากฏการณ์เคอร์รี่

ปรากฏการณ์ FWM เกิดจากการที่มีสัญญาณแสง 4 สัญญาณเดินทางร่วมกันในเส้นใย แสง โดยสัญญาณแสงหนึ่งสามารถถ่ายเทพลังงานให้อีกสัญญาณแสงหนึ่งได้ ทั้งนี้สัญญาณแสง ทั้ง 4 สัญญาณจะต้องมีความถี่และเฟสสอดคล้องกับเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition) และเงื่อนไขการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังแสดงในสมการ ที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ

สมการเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition)

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

สมการเงื่อนไขการจับคู่เฟส (phase matching condition)

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

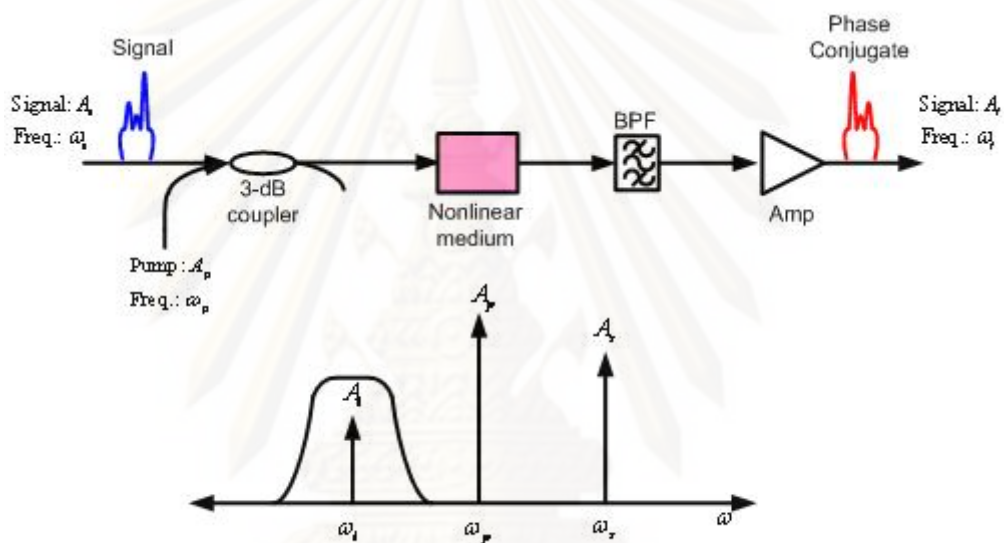
โดยที่ f_n คือ สัญญาณความถี่

k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ส่วนใหญ่แล้วปรากฏการณ์ FWM จะเกิดขึ้นในกรณีที่สัญญาณแสงเดินทางพร้อมกับ สัญญาณรบกวนภายในเส้นใยแสงหรือในระบบ WDM ที่มีความสัมพันธ์ตรงตามเงื่อนไขการจับคู่ ความถี่และเฟสพอดี สัญญาณแสงจะเกิดการถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณรบกวนหรือสัญญาณ แสงอื่น ๆ ที่มีค่าความยาวคลื่นต่างออกไป ทำให้เกิดสัญญาณไขว้แทรก (crosstalk) ซึ่งเป็นผลทำ ให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

2.3.2 การเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อความถี่ของสัญญาณปั๊มเท่ากัน

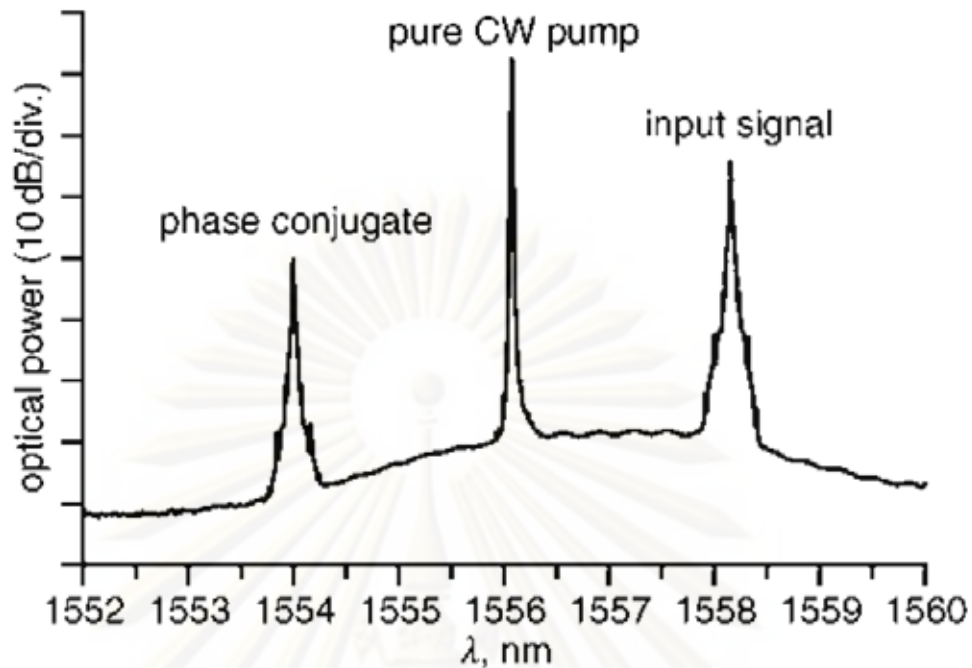
สำหรับ OPC นั้น จะอาศัยปรากฏการณ์ FWM เพื่อให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น โดยจะทำการป้อนคลื่นแสงที่มีกำลังสูงกว่าสัญญาณแสง ที่เรียกว่า สัญญาณปั๊ม (pump signal) ที่ค่าความถี่ f_1 และ f_2 (อาจจะมีสัญญาณปั๊มเพียงความถี่เดียวเมื่อ $f_1 = f_2$) ให้เดินทางเข้าไปในเส้นใยแสงพร้อมกับสัญญาณแสงที่มีค่าความถี่ f_3 จากนั้นสัญญาณปั๊มที่มีกำลังสูงกว่าจะถ่ายโอนพลังงานไปให้สัญญาณแสงพร้อมกับสร้างสัญญาณแสงที่มีความถี่ f_4 ขึ้นมาใหม่ โดยสัญญาณแสงที่กำเนิดขึ้นใหม่นี้จะเป็นสัญญาณคอนจูเกตหรือสังยุคของสัญญาณแสงเดิม (f_3) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตเดิมด้วยปรากฏการณ์ FWM

ทั้งนี้การชี้วัดประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ของ OPC จะอาศัยค่า conversion efficiency (η) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณคอนจูเกตที่ออกมาจาก OPC ที่มีความถี่ f_4 กับกำลังของสัญญาณแสงก่อนที่จะเข้าสู่ OPC ที่มีความถี่ f_3 โดยหาก η มีค่ามาก แสดงว่าการเกิดปรากฏการณ์ FWM มีประสิทธิภาพสูง

กำลังสัญญาณคอนจูเกตที่ได้จาก OPC จะมีค่าต่ำกว่ากำลังสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC สาเหตุที่ กำลังสัญญาณลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นนั้นมีพลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่เข้าไปใน OPC จากการจำลองระบบที่มีการส่งระยะทาง 75 km ส่งข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 1558.16 nm และมี OPC ที่อาศัยสัญญาณปั๊มที่ 1556 nm ได้ ประสิทธิภาพของ OPC ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีค่าประมาณ -14.5 dB [31]



รูปที่ 2.8 ประสิทธิภาพของ OPC ในกรณีที่สัญญาณปั๊มมีความถี่หรือความยาวคลื่นเดียวกัน [31]

นอกจากนี้ค่า η ในกรณีที่สัญญาณปั๊มมีความถี่เท่ากัน ($f_1 = f_2$) และมีความยาวคลื่นเท่ากับ zero-dispersion wavelength ของเส้นใยแสงพอดี จะแทนค่า η ด้วย η_0 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_0(l) = \phi^2(l) \exp(-\alpha l) \quad (2.8)$$

โดยที่ l คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ทำเป็น OPC ขึ้นมา

$\phi(l)$ คือ nonlinear phase shift ที่เป็นผลมาจากปรากฏการณ์เคอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi(l) = \frac{\gamma P_0 [1 - \exp(-\alpha l)]}{\alpha} \quad (2.9)$$

โดยที่ P_0 คือ ค่ากำลังของ pump

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะเห็นว่า η_0 แปรผันตรงกับ P_0^2 นั่นคือเมื่อเพิ่มค่า P_0 ขึ้นแล้ว η_0 ก็เพิ่มขึ้นแบบกำลังสอง ส่วนค่า η_0 ในกรณีที่ความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มไม่เท่ากับ zero-dispersion wavelength ของเส้นใยแสง จะต้องคิดผลกระทบของปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันที่พจน์ β_2 ซึ่งคือ ค่า GVD ของสัญญาณปั๊ม สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta(l) = \left[\phi(l) \frac{\sin(Kl)}{Kl} \right]^2 \exp(-\alpha l) \quad (2.10)$$

โดย

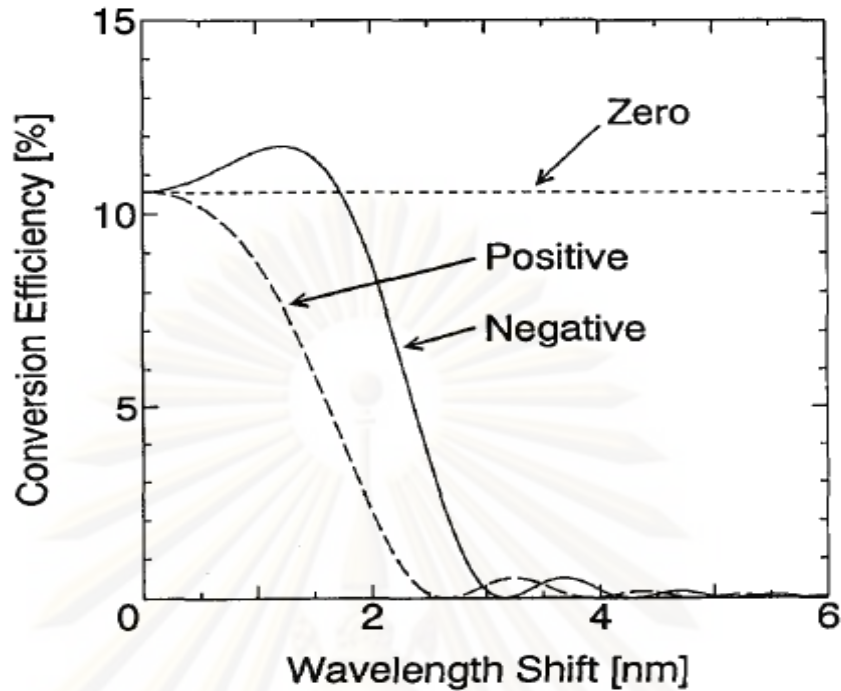
$$K = \frac{1}{2} |\beta_2| \Omega [\Omega^2 + \Omega_c^2]^{1/2} \quad (2.11)$$

เมื่อ Ω_c คือค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณปั๊มกับสัญญาณแสงก่อนเข้าสู่ OPC ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\Omega_c^2 = 4\gamma P_0 \left[\frac{1 - \exp(-\alpha l)}{\alpha |\beta_2|} \right] \quad (2.12)$$

จากสมการข้างต้น พบว่าค่า η ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดิม เมื่อค่า P_0 ถูกเพิ่มขึ้น แต่ไม่ใช่แบบกำลังสอง นอกจากนั้นหากหาค่า l ที่ทำให้ค่า η สูงสุด จะพบว่า l เปลี่ยนไปตามค่า P_0 ที่เปลี่ยนไปด้วย

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในทางทฤษฎีของกรณีที่ไม่มีความกระทบจากดิสเพอร์ชัน พบว่า η_0 จะไม่ขึ้นกับ Ω ทำให้อัตราการขยายแบนด์วิดท์ (gain bandwidth) ในการเกิดปรากฏการณ์ FWM มีค่าเป็นอนันต์ เป็นผลให้ไม่ว่าความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะห่างจากสัญญาณปั๊มเพียงไรก็ตาม แต่ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM จะมีค่าเท่ากัน แต่ในกรณีที่มีความกระทบจากดิสเพอร์ชันแล้วอัตราการขยายแบนด์วิดท์จะแคบลงด้วยฟังก์ชัน $\frac{\sin(KL)}{KL}$ ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ต่ำลงเมื่อความยาวคลื่นของสัญญาณแสงอยู่ห่างจากสัญญาณปั๊มมากขึ้น ดังแสดงได้จากรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของ η กับ Ω ในกรณีที่ β_2 มีค่าเป็นบวก ศูนย์ และลบ

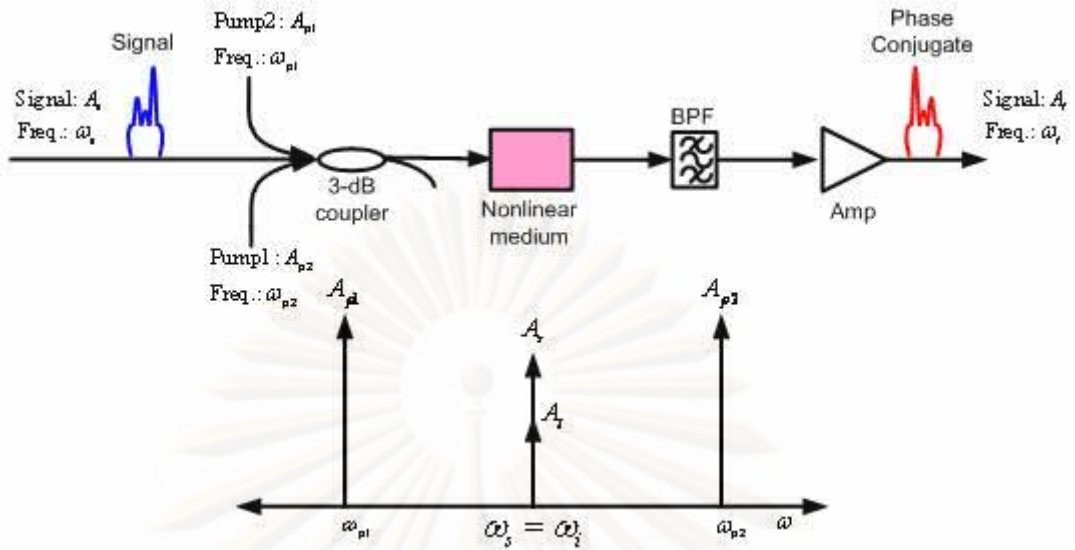


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของ conversion efficiency กับผลต่างระหว่างความยาวคลื่นของสัญญาณแสงและสัญญาณปั๊มในกรณีที่ GVD parameter (β_2) มีค่าเป็นบวก ลบ และ ศูนย์ [18]

จากรูปที่ 2.9 พบว่าจะมีช่วงของ Ω ที่ให้ค่า η ในกรณีที่ค่า β_2 เป็นลบ มีค่ามากกว่าค่า η ในกรณีที่ค่า β_2 เป็นศูนย์เพราะอิทธิพลของ modulation instability (MI) ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์เคอร์และดิสเพอร์ชันที่มีต่อสัญญาณร่วมกัน

2.3.3 การเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อความถี่ของสัญญาณปั๊มแตกต่างกัน

จากที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ถึงการเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อสัญญาณปั๊มมีความถี่เท่ากัน ($f_1 = f_2$) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อสัญญาณปั๊มทั้งสองมีความถี่ที่ไม่เท่ากัน ($f_1 \neq f_2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสร้างสัญญาณคอนจูเกต

ระบบการสื่อสารแบบหลายความยาวคลื่น ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM เนื่องจากมีสัญญาณหลายสัญญาณเดินทางไปพร้อมกันในเส้นใยแสงเดียวกัน ทั้งนี้การเกิดปรากฏการณ์ FWM ในกรณีนี้จะเหมือนกันกับในกรณีที่สัญญาณปั๊มทั้งสองมีความถี่ที่ไม่เท่ากัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งกำลังของสัญญาณคอนจูเกต (P_{con}) ที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.13 [42]

$$P_{con}(L) = \frac{\eta_{FWM}}{9} D^2 \gamma^2 P_{P1} P_{P2} P_S \exp(-\alpha L) \left\{ \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} \right\} \quad (2.13)$$

- โดยที่
- P_{P1} คือ ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ความถี่ของสัญญาณปั๊มที่ 1 (f_{P1})
 - P_{P2} คือ ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ความถี่ของสัญญาณปั๊มที่ 2 (f_{P2})
 - P_S คือ ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ความถี่ของสัญญาณแสง (f_S)
 - L คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการสร้าง OPC (fiber length)
 - α คือ ค่าการลดทอนของเส้นใยแสง (fiber attenuation coefficient)
 - D คือ ค่า degeneracy factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3 สำหรับกรณี degenerate และ 6 สำหรับกรณี non-degenerate
 - γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient)

และประสิทธิภาพของการเกิดปรากฏการณ์ FWM (η_{FWM}) หาได้จากสมการที่ 2.14 [42]

$$\eta_{FWM} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta k^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta k L / 2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (2.14)$$

ทั้งนี้ Δk คือค่าจับคู่เฟส (phase-matching factor) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงและค่าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (channel spacing) ซึ่งสามารถอธิบายได้ในสมการที่ 2.15 [42]

$$\Delta k = \left\{ \left(\frac{2\pi\lambda_s^2}{c} \Delta f_{P1S} \Delta f_{P2S} \right) \times \left[D_c + \left(\frac{\lambda_s^2}{2c} \cdot \frac{dD_c}{d\lambda} \cdot (\Delta f_{P1S} + \Delta f_{P2S}) \right) \right] \right\} - \left[\gamma(P_{P1} + P_{P2} - P_S) \left(\frac{1 - e^{-\alpha L_{eff}}}{\alpha L_{eff}} \right) \right] \quad (2.15)$$

โดยที่ D_c คือ ค่าโครเมติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง

$\frac{dD_c}{d\lambda}$ คือ ค่าความชันของดิสเพอร์ชัน (dispersion slope)

λ_s คือ ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณแสงที่ความถี่ f_s

เมื่อค่าประสิทธิภาพความยาวของเส้นใยแสง (Effective length, L_{eff}) และค่าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณหาได้จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (2.16)$$

$$\Delta f_{mn} = |f_m - f_n| \quad (2.17)$$

โดยที่ f_m และ f_n คือ ความถี่ของสัญญาณบีบคลื่นที่ 1 (f_{P1}) สัญญาณบีบคลื่นที่ 2 (f_{P2}) หรือ สัญญาณแสง (f_S)

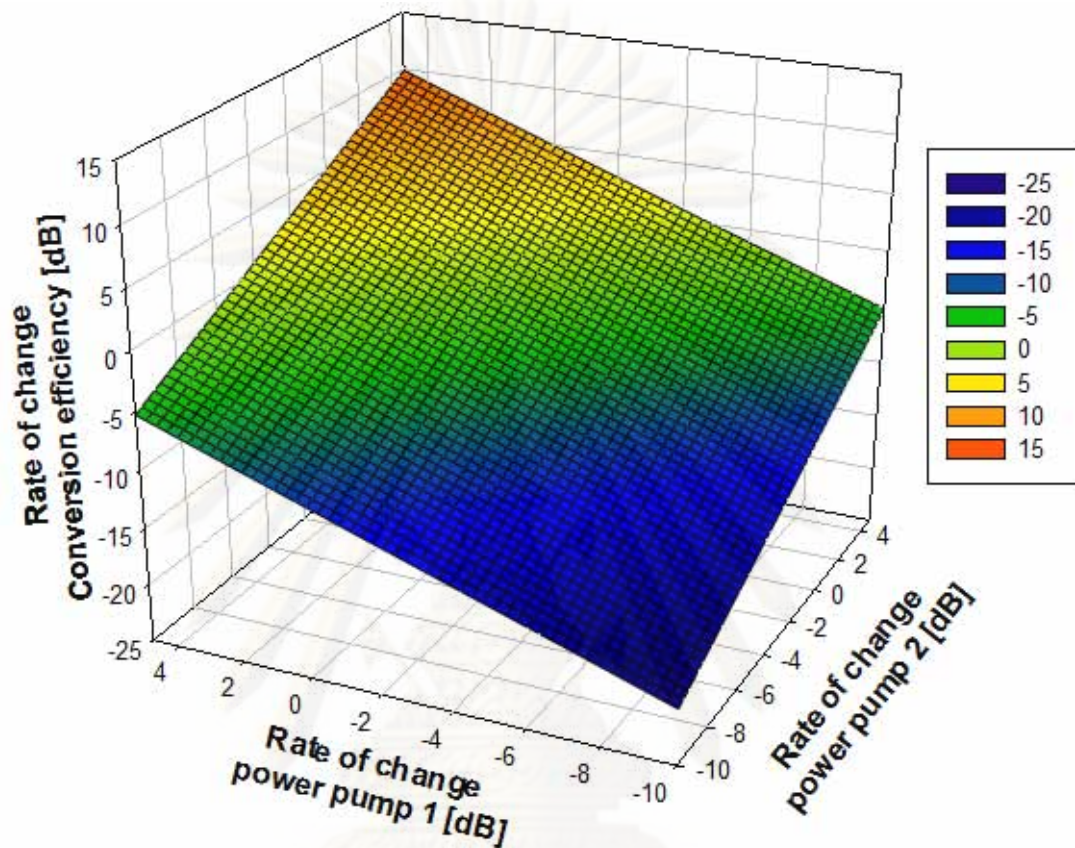
และอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต (Conversion efficiency, η) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณคอนจูเกตหลังออกจาก OPC กับกำลังของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC ดังสมการที่ 2.18

$$\eta = \frac{P_c}{P_s} \quad (2.18)$$

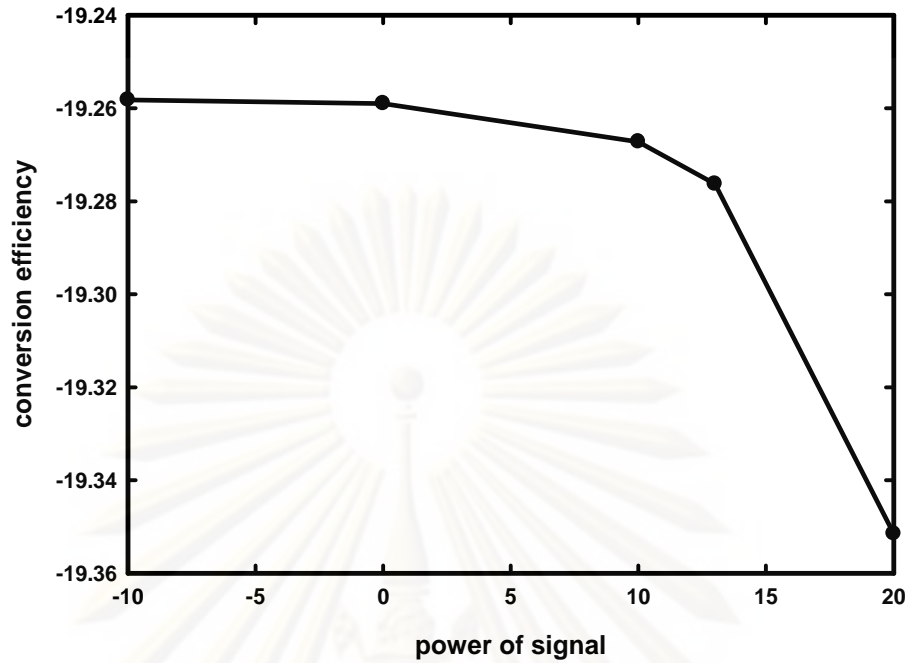
โดยที่ P_c คือ ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ความถี่ของสัญญาณคอนจูเกต (f_c)

จากสมการที่ 2.13 ถึง 2.18 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต ได้แก่ P_{P1} P_{P2} P_S และ L ซึ่งหากพารามิเตอร์เหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้น

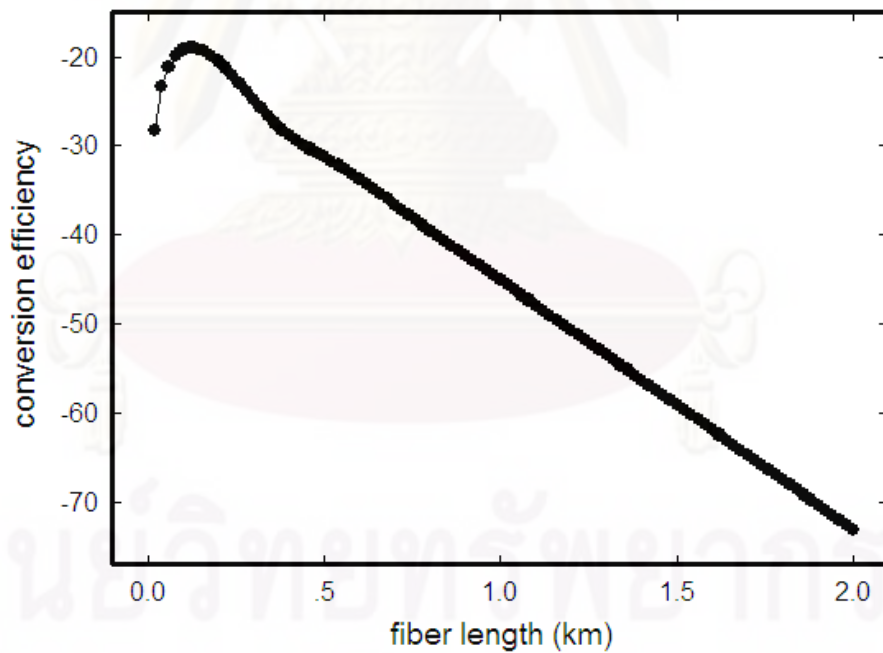
ค่า η ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังของสัญญาณปั๊ม กำลังของสัญญาณแสง และความยาวของเส้นใยแสงกับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต ดังรูปที่ 2.11 ถึง รูปที่ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณสัญญาณปั๊มทั้งสอง
คลืนกับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต



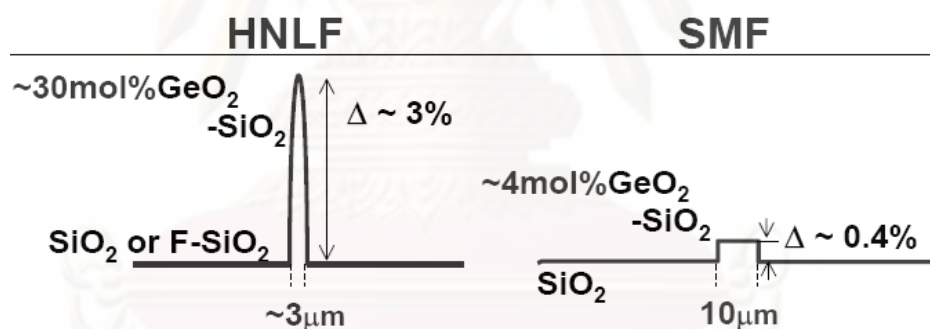
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณแสงกับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการสร้าง OPC กับอัตราการเกิดของสัญญาณคอนจูเกต

นอกจากนี้ จะให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ยังขึ้นกับค่า nonlinear coefficient (γ) ภายใน core ของเส้นใยแสงเป็นสำคัญอีกด้วย โดยเส้นใยแสงที่มีค่า

γ สูง จะมีการเกิดปรากฏการณ์ FWM มากขึ้น ซึ่งตั้งแต่อดีตเส้นใยแสงที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการสร้าง OPC จะมีการพัฒนาให้ค่า γ สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ดังนั้นในยุคเริ่มแรก OPC จะสร้างมาจากเส้นใยแสงชนิด DSF แต่เส้นใยแสงชนิดนี้จะมีค่า γ ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ $2 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$) เนื่องจาก SiO_2 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำ core มีค่า n_2 ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ $2.4 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{w}^{-1}$) เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.12) พบว่าหากต้องการเพิ่มค่า γ ให้มากขึ้น จะสามารถทำได้สองวิธีคือ การเพิ่มค่า n_2 ให้สูงขึ้นและการลดค่า A_{eff} ให้ต่ำลง ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเปลี่ยนเป็นเส้นใยแสงชนิด HNLF ซึ่งในกระบวนการผลิตของเส้นใยแสงชนิดนี้ได้ทำการเพิ่มค่า n_2 และลดค่า A_{eff} เพื่อเพิ่มค่า γ ให้สูงขึ้น โดยจากเดิมเส้นใยแสงชนิด DSF ที่มีค่า A_{eff} อยู่ประมาณ $50 \mu\text{m}^2$ ลดลงเหลือราว $10 \mu\text{m}^2$ และค่า n_2 ก็ถูกเพิ่มขึ้นโดยการเจือธาตุเจอร์เมเนียม (Ge) ลงไปใน core ของเส้นใยแสงมากขึ้น ทำให้เส้นใยแสงชนิด HNLF มีค่า n_2 สูงขึ้น (ประมาณ $4 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{w}^{-1}$ ถึง $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{w}^{-1}$) ซึ่งเป็นผลให้ γ มีค่าสูงขึ้น (ประมาณ $10 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ ถึง $30 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$) ยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์เส้นใยแสงชนิด HNLF จากบริษัท OFS Furukawa ที่มีค่า γ เท่ากับ $11.5 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ [43] และตัวอย่างการเปรียบเทียบ n_2 ของเส้นใยแสงชนิด HNLF กับเส้นใยแสงชนิด DSF ที่มีอัตราส่วนในการเจือธาตุแตกต่างกันดังรูปที่ 2.14 [44]



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการเปรียบเทียบ refractive index (n_2) profile ของเส้นใยแสงชนิด HNLF กับเส้นใยแสงชนิด DSF [42]

นอกจากนี้ การเพิ่มค่า n_2 อีกหนทางหนึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำ core จาก SiO_2 เป็น Bi_2O_3 ซึ่งมีค่า n_2 สูงขึ้นกว่าเดิมมาก (ประมาณ $60 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{w}^{-1}$ ถึง $80 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{w}^{-1}$) ส่งผลให้ γ สูงกว่าเส้นใยแสงชนิด DSF และเส้นใยแสงชนิด HNLF อย่างมาก ถึงระดับ $1000 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ ดังตัวอย่างเส้นใยแสงชนิด Bi-NLF จาก [43] มีค่า γ สูงถึง $1360 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ อย่างไรก็ตามการผลิตเส้นใยแสงชนิด Bi-NLF ในปัจจุบัน เกิดขึ้นเพียงในห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น ยังไม่เข้าสู่ระบบอุตสาหกรรมแต่อย่างใด ดังนั้นในปัจจุบันเส้นใยแสงที่ได้รับความนิยมนำมาใช้สร้าง OPC คือเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF [45] โดยเส้นใยแสงชนิดนี้มีค่า γ ประมาณ $11 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียง

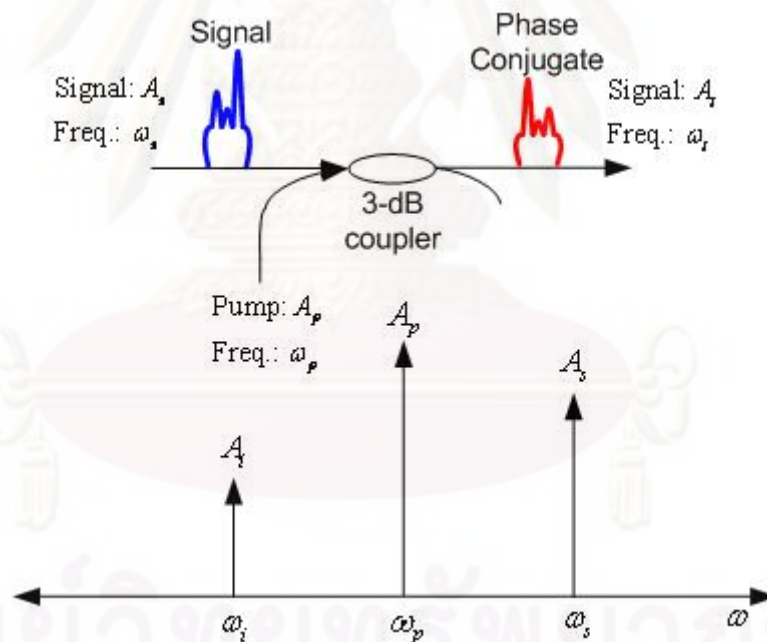
กับเส้นใยแสงชนิด HNLF [46] แต่เลือกใช้วิธีการลดค่า A_{eff} ให้ต่ำลง เหลือประมาณ $6 \mu m^2$ เท่านั้น อีกทั้งโครงสร้างภายในของเส้นใยแสงชนิดนี้ยังถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องการให้เกิดปรากฏการณ์ FWM อีกด้วย

2.3.4 ชนิดของ OPC

โดยทั่วไปแล้ว OPC สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดตามความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกต คือ ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift type) และ ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free type)

2.3.4.1 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น

โดยปกติ OPC ทั่วไปจะเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่นเนื่องจากในกระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตหรือสัญญาณคอนจูเกต สามารถทำได้ง่ายกว่า เพราะอาศัยสัญญาณปั๊มเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้น ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบเลื่อนความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่ามีการใช้สัญญาณปั๊มเพียงสัญญาณเดียว โดยจะทำการป้อนสัญญาณปั๊มที่ความยาวคลื่น ω_p ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ส่งผลให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น แต่สัญญาณคอนจูเกตที่ได้จะมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปคือความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นที่อีกฝากหนึ่งของสัญญาณปั๊ม

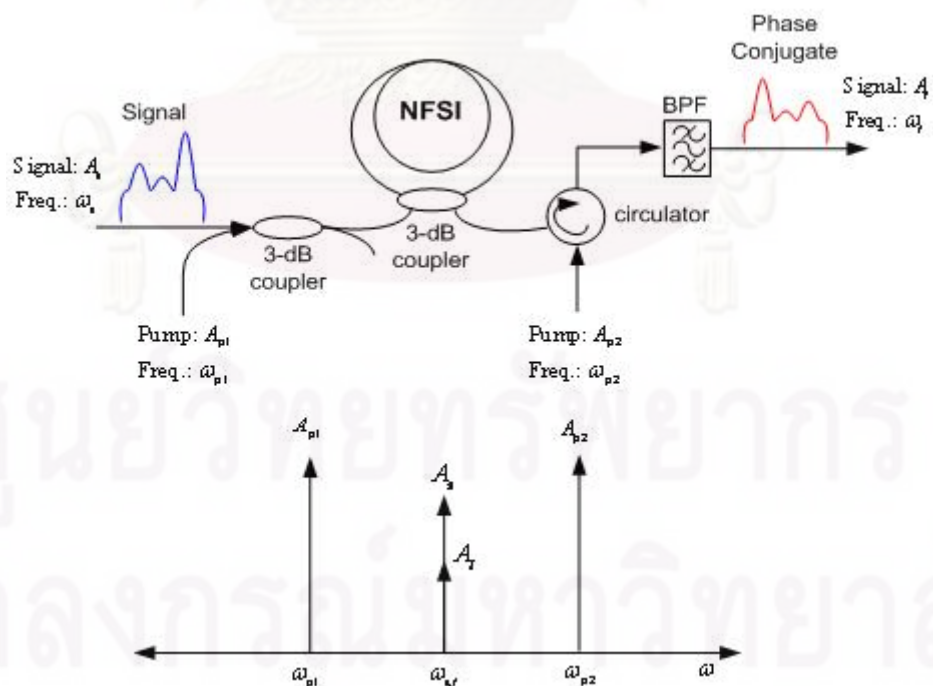
สำหรับการชดเชยปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันด้วย OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้นจะต้องมีการคำนวณระยะทางในส่วนครึ่งแรกและระยะทางในส่วนครึ่งหลังให้เหมาะสม เพื่อให้ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังสมดุลกันพอดี การชดเชยความผิดเพี้ยนจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น เป็นดังต่อไปนี้

$$\beta_2(\omega_s) \times L_1 = \beta_2(\omega_i) \times (L - L_1) \quad (2.19)$$

โดยที่ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณในครึ่งแรก
 ω_i คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณในครึ่งหลัง
 L_1 คือ ระยะทางในครึ่งแรก
 L คือ ระยะทางในการรับส่งสัญญาณทั้งหมด

2.3.4.2 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

OPC ชนิดนี้ใช้ปรากฏการณ์ FWM ในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตเช่นเดียวกัน แต่จะให้สัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิม ดังนั้นในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตจึงต้องอาศัยสัญญาณปั๊มสองสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.16 สัญญาณบีบแรกจะอยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p1} และสัญญาณบีบที่สองจะอยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p2} เมื่อความยาวคลื่นของสัญญาณบีบทั้งสองสอดคล้องกันตามเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM และมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมกันแล้ว จะทำให้ความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิมที่ความยาวคลื่น ω_s แต่กำลังสัญญาณของสัญญาณคอนจูเกตจะมีค่าลดลงไปจากสัญญาณแสงเดิม และมีค่ากำลังสัญญาณที่ต่ำกว่าสัญญาณคอนจูเกตแบบชนิดเลื่อนความยาวคลื่นอีกด้วย

ทั้งนี้เมื่อสัญญาณคอนจูเกตมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเดิม ทำให้การนำสัญญาณคอนจูเกตออกจากสัญญาณแสงเดิมออกมาใช้งานมีความยากลำบากมากขึ้น ดังนั้น OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจึงจำเป็นต้องอาศัยโครงสร้างแบบ Sagnac interferometer เพื่อใช้ในการแยกสัญญาณคอนจูเกตออกจากสัญญาณแสงเดิม โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างแบบ Sagnac แบบละเอียดในหัวข้อต่อไป โดยการชดเชยปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันด้วย OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนี้เพียงวาง OPC ไว้ตรงจุดกึ่งกลางของระยะทางในการสื่อสารสัญญาณทั้งหมดก็จะสามารถชดเชยความผิดเพี้ยนได้สมบูรณ์

2.4 โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer

Sagnac Interferometer ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Georges Sagnac ในปี 1913 เมื่อเขาได้ทดลองปล่อยสัญญาณแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันเดินทางเข้าไปยัง interferometer ในทิศทางตรงกันข้ามกันคือทิศตามเข็มนาฬิกา (clockwise) และทิศทวนเข็มนาฬิกา (counterclockwise) ด้วยระยะทางที่เท่ากัน ผลที่ได้ออกมาจาก interferometer กลายเป็นแถบมืดและแถบสว่างซึ่งเกิดจากการแทรกสอดกันของสัญญาณแสงในทั้งสองทิศทาง ทั้งนี้หากหมุนเลื่อนตำแหน่งที่สัญญาณแสงเดินทางเข้า interferometer จะทำให้เกิดความต่างเฟสของสัญญาณแสงทั้งสองใน interferometer ขึ้น โดยค่าความต่างเฟสจะขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ทำให้สามารถคำนวณหามุมที่ต้องหมุนเพื่อให้ได้ค่าความต่างเฟสของสัญญาณแสงที่ต้องการได้

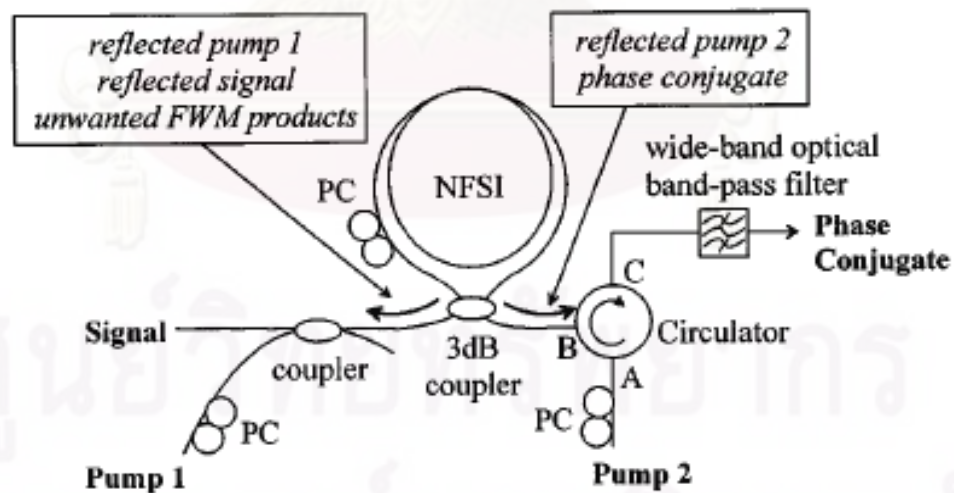
Sagnac interferometer สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเส้นใยแสงเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์มากมาย โดยหนึ่งในนั้นก็คือ nonlinear fiber Sagnac interferometer (NFSI) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้าง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้า

2.4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของ Sagnac interferometer

OPC ที่มีโครงสร้างแบบ Sagnac interferometer ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก ดังต่อไปนี้

1. เส้นใยแสงความยาว L ที่นำมาวนรอบจนมีลักษณะเป็น loop เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ขึ้นภายในบริเวณนี้ ซึ่งแต่ก่อนจะอาศัยเส้นใยแสงชนิด DSF [25][47] ซึ่งมีค่า γ ค่อนข้างต่ำอยู่ที่ประมาณ $2 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ แต่การทดลองส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้พัฒนามาใช้เส้นใยแสงชนิด HNL-DSF [26][27] ซึ่งมีค่า γ สูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ $10 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ ถึง $30 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ โดยยิ่งค่า γ สูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM มากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังทำให้ความยาวของเส้นใยแสงสั้นลงอีกด้วย
2. 3-dB coupler ทำหน้าที่ในการรวมหรือแยกสัญญาณแสงสองสัญญาณด้วยอัตราส่วนที่เท่ากัน หรือ 50:50
3. circulator เป็นอุปกรณ์ที่มี 3 พอร์ต โดยสามารถวนสัญญาณแสงให้เข้าและออกในพอร์ตที่กำหนดได้
4. ตัวกรองช่วงความถี่ (Optical band-pass filter, OBPF) ใช้สำหรับกรองสัญญาณแสงเพื่อแยกเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการออกมาใช้งาน

ทั้งนี้ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจะมีสัญญาณแสงเพื่อป้อนเข้าสู่ Sagnac interferometer ทั้งหมดสามสัญญาณ ได้แก่ สัญญาณแสงข้อมูล 1 สัญญาณและสัญญาณปั๊ม 2 สัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของ Sagnac interferometer [26]

2.4.2 หลักการทำงานของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ Sagnac interferometer

สัญญาณที่ถูกป้อนเข้าสู่ Sagnac interferometer มีอยู่ทั้งหมดสามสัญญาณ ได้แก่ สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น ω_s และสัญญาณปั๊มสองสัญญาณที่มีความยาวคลื่น $\omega_s + \Omega$ กับ $\omega_s - \Omega$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ในสมการที่ (2.20) และ (2.21) [25] ดังนี้

$$E_s = \varepsilon_s \exp\{i[\omega_s t - \beta(\omega_s) z]\} \quad (2.20)$$

$$E_{p1,p2} = \varepsilon_{p1,p2} \exp\{i[(\omega_s \pm \Omega)t - \beta(\omega_s \pm \Omega) z]\} \quad (2.21)$$

โดยที่ ε_s คือ ค่า complex amplitudes ของสัญญาณแสง
 ε_{p1} คือ ค่า complex amplitudes ของสัญญาณปั๊มที่ 1
 ε_{p2} คือ ค่า complex amplitudes ของสัญญาณปั๊มที่ 2
 $\beta(\omega)$ คือ ค่าคงที่ของการเดินทางของสัญญาณ (propagation constant) ที่ความยาวคลื่น ω
 Z คือ ระยะทางที่สัญญาณเดินทาง (distance of propagation)

โดยความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะอยู่ ณ จุดกึ่งกลางระหว่างความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มทั้งสอง ดังนั้นสัญญาณคอนจูเกตหรือสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสง

เมื่อสัญญาณแสงถูกป้อนเข้าไปรวมกับสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 โดยอาศัย coupler ในการรวมสัญญาณทั้งสองเพื่อส่งต่อเข้าไปยัง พอร์ตที่ 1 ในขณะที่สัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 จะถูกป้อนเข้าไปยัง พอร์ตที่ 2 ของ Sagnac interferometer สัญญาณแสงจาก พอร์ตที่ 1 และ พอร์ตที่ 2 จะผ่าน 3-dB coupler เพื่อเดินทางเข้าสู่เส้นใยแสงที่มีลักษณะเป็น loop หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Sagnac loop โดยสัญญาณจะถูกแบ่งเส้นทางการเดินทางออกเป็นสองทิศทาง คือ ทิศตามเข็มนาฬิกา (clockwise) และทิศทวนเข็มนาฬิกา (counterclockwise) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าของสัญญาณทั้งสองเส้นทางได้ดังสมการที่ (2.22) และ (2.23) [25] ต่อไปนี้

สัญญาณที่มีทิศตามเข็มนาฬิกา

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{p1} + E_s + iE_{p2}) \quad (2.22)$$

สัญญาณที่มีทิศทวนเข็มนาฬิกา

$$E_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(iE_{p1} + iE_s + E_{p2}) \quad (2.23)$$

โดยมีสัญญาณคอนจูเกต อธิบายได้ดังสมการที่ (2.24)

$$E_{c3,c4} = \varepsilon_{c3,c4}(z) \exp\{i[\omega_s t - \beta(\omega_s) z]\} \quad (2.24)$$

จากนั้นเมื่อสัญญาณแสงและสัญญาณปั๊มทั้งสองเดินทางเข้าไปในบริเวณ Sagnac loop พร้อมกันแล้ว ค่า complex amplitudes ของสัญญาณคอนจูเกต ε_{c3} และ ε_{c4} สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.25) และ (2.26) [25] โดยที่ค่า $\varepsilon_{c3}(L)$ และ $\varepsilon_{c4}(L)$ จะมีเฟสต่างกันอยู่ $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

$$\varepsilon_{c3}(L) = i\eta\varepsilon_{p1}\varepsilon_{p2}\varepsilon_s^* \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_{c4}(L) = \eta\varepsilon_{p1}\varepsilon_{p2}\varepsilon_s^* \quad (2.26)$$

โดยที่ η คือ ค่าประสิทธิภาพของการเกิดปรากฏการณ์ FWM ภายใน Sagnac loop

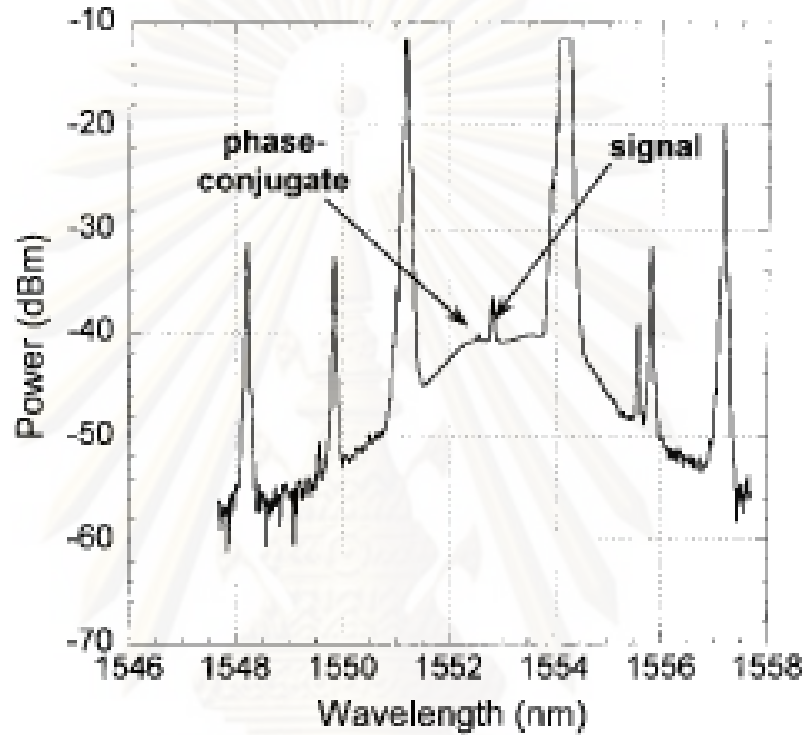
หลังจากที่สัญญาณเดินทางครบรอบ Sagnac loop แล้ว ทุกคลื่นสัญญาณจะออกจาก loop แล้วกลับเข้าสู่ 3-dB coupler อีกครั้ง โดยสัญญาณแสงกับสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 จะออกมาทาง พอร์ตที่ 1 ของ coupler ในขณะที่สัญญาณปั๊มที่ 2 กับสัญญาณคอนจูเกตจะเดินทางออกมาจากทาง พอร์ตที่ 2 ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบสัญญาณคอนจูเกตได้โดยการหาค่า complex amplitude ที่ตำแหน่ง พอร์ตที่ 1 และ พอร์ตที่ 2 ได้ตามสมการที่ (2.27) และ (2.28) [25]

$$\varepsilon_{c,out1} = \frac{1}{\sqrt{2}}\{i\varepsilon_{c3}(L) + \varepsilon_{c4}(L)\} = 0 \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_{c,out2} = \frac{1}{\sqrt{2}}\{\varepsilon_{c3}(L) + i\varepsilon_{c4}(L)\} = \sqrt{2}i\eta\varepsilon_{p1}\varepsilon_{p2}\varepsilon_s^* \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งพอร์ตที่ 1 จะไม่มีสัญญาณคอนจูเกตออกมาเลย ดังนั้นเมื่อทราบแน่ชัดแล้วว่าสัญญาณคอนจูเกตออกมาทางพอร์ตที่ 2 ของ sagnac loop เท่านั้น ทำให้สัญญาณแสงกับสัญญาณคอนจูเกตที่มีความยาวคลื่นเดียวกัน ถูกแยกออกจากกันโดยธรรมชาติของโครงสร้างแบบ Sagnac interferometer ซึ่งสัญญาณที่ออกมา

จากพอร์ตที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 และสัญญาณคอนจูเกต จะเดินทางผ่าน circulator เพื่อเข้าสู่ตัวกรองย่านความถี่ (optical band-pass filter, OBPF) เพื่อแยกเอาสัญญาณคอนจูเกตออกจากสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 โดยสเปกตรัมของคลื่นภายใน OPC ที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมของคลื่นภายใน OPC ที่ใช้โครงสร้างแบบ Sagnac interferometer [25]

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีและชนิดของ OPC มาแล้วในบทที่ 2 ในบทนี้จะเป็นรายละเอียดในส่วนของการออกแบบ OPC จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและพิสูจน์ผลด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยค่าชี้วัด คือ ค่า conversion efficiency (η) และค่า Q factor ซึ่งค่า η เป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดสัญญาณคอนจูเกต โดยจะเลือกใช้ OPC ที่ให้ค่า η มากที่สุด และค่า Q factor เป็นตัวกำหนดสมรรถนะที่ดีที่สุดของ OPC เนื่องจากค่า Q factor ของสัญญาณที่ผ่าน OPC ไปยังปลายทางจะต้องมีค่ามากกว่า 7 หรือ Bit error rate น้อยกว่า 10^{-12} จึงจะสามารถเป็นที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ในการออกแบบ OPC จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะพิจารณาในส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ ของ OPC ได้แก่ ชนิดของเส้นใยแสงที่เลือกใช้ ความยาวของเส้นใยแสงที่นำมาใช้ทำ OPC และระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มทั้งสองในหัวข้อที่ 3.2 จากนั้นในหัวข้อที่ 3.3 จะเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบ OPC และนำผลของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.4 สุดท้ายนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาหาค่ากำลังของสัญญาณแสงและสัญญาณปั๊ม เพื่อให้ได้ OPC ที่ดีที่สุดในหัวข้อที่ 3.5

3.1 กำลังของสัญญาณคอนจูเกตที่เกิดจาก OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer

จากทฤษฎีในหัวข้อ 2.3.4.2 ทำให้ทราบว่า OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนั้น จะเกิดสัญญาณคอนจูเกต (f_4) ที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณแสง (f_3) เมื่อสัญญาณแสงนั้นมีความถี่อยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างสัญญาณปั๊มที่มีความถี่ f_1 และ f_2 โดยอัตราการเกิดสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสามารถหาได้จากหัวข้อ 2.3.3 ที่กล่าวถึงการเกิดสัญญาณคอนจูเกตเมื่อความถี่ของสัญญาณปั๊มแตกต่างกัน ถ้าหากนำค่า η_{FWM} จากสมการที่ (2.14) ไปแทนลงในสมการที่ (2.28) ซึ่งเป็นสมการของสัญญาณคอนจูเกตที่ออกทาง พอร์ตที่ 2 ของ OPC จะได้ค่า complex amplitude ของสัญญาณคอนจูเกต (ε_c) ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\varepsilon_c = \sqrt{2i}\eta_{FWM}\varepsilon_{p1}\varepsilon_{p2}\varepsilon_s^* \quad (3.1)$$

ทั้งนี้ค่ากำลังของสัญญาณคอนจูเกต (Conjugate power, P_c) หาได้จาก

$$P_c = |\varepsilon_c|^2 \quad (3.2)$$

และค่า Conversion efficiency ของ OPC (η_{OPC}) ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ Sagnac Interferometer หาได้จากสมการที่ 3.3

$$\eta_{OPC} = \frac{P_c}{P_s} \quad (3.3)$$

โดยที่	ε_{P1}	คือ ค่า complex amplitude ของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1
	ε_{P2}	คือ ค่า complex amplitude ของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2
	ε_s	คือ ค่า complex amplitude ของสัญญาณแสง
	P_s	คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสง

3.2 การวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อออกแบบ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer

จากหัวข้อที่ 3.1 เราสามารถคำนวณหาค่า η_{OPC} ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer ได้ทำให้ทราบว่าค่า η_{OPC} นั้นขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ที่นำมาสร้าง OPC อาทิเช่น ชนิดของเส้นใยแสงซึ่งมีค่า nonlinear coefficient (γ) ที่แตกต่างกัน ความยาวของเส้นใยแสง (L) ที่ใช้ทำ Sagnac loop รวมถึงระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 กับสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 และค่ากำลังของสัญญาณแสงทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาใน OPC ด้วย

3.2.1 การหาชนิดของเส้นใยแสงที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency มากที่สุด

องค์ประกอบหลักของ OPC คือเส้นใยแสงที่ใช้ในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ดังนั้นขั้นตอนแรกของการออกแบบ OPC จึงต้องเริ่มต้นจากการเลือกใช้เส้นใยแสงที่ทำให้ OPC มีค่า η มากที่สุด เพื่อให้ได้ค่ากำลังของสัญญาณคอนจูเกตที่มากที่สุดด้วย โดยเส้นใยแสงที่นำมาพิจารณามีทั้งหมด 7 ชนิด ประกอบไปด้วย SSMF [48] DCF [49] DSF [50] NZ-DF [51] NZ-DSF [52] HNLF [43] และ HNL-PCF [46] ซึ่งเส้นใยแสงแต่ละชนิดมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับเส้นใยแสงที่ใช้ทำ OPC ในการทดลอง

	SSMF	DCF	DSF	NZ-DF	NZ-DSF	HNLF	HNL-PCF
α [dB/km]	0.2	0.35	0.25	0.20	0.25	0.90	8.1
D_2 @ 1550 nm [ps/nm ² km]	18	-85	0	4.5	4.5	-0.25	1.27
D_3 [ps/nm ² km]	0.086	-0.35	0.085	0.05	0.05	0.019	0.0031
γ [W ⁻¹ km ⁻¹]	1.6	5	2.1	2.16	2.19	11.5	11
A_{eff} [μm^2]	84.948	26	52.810	52	55.417	11.7	6.1575
n_2 @ 1545.32 nm	3.3428	3.1973	2.7276	2.7625	2.9849	3.3092	1.6658

โดยที่ α คือ ค่าลดทอนของกำลังสัญญาณ (attenuation)
 D_2 คือ ค่า Group velocity dispersion
 D_3 คือ ค่า Dispersion slope
 γ คือ ค่า nonlinear coefficient
 A_{eff} คือ ค่า effective fiber core area
 n_2 คือ ค่า refractive index ของคอร์เส้นใยแสง

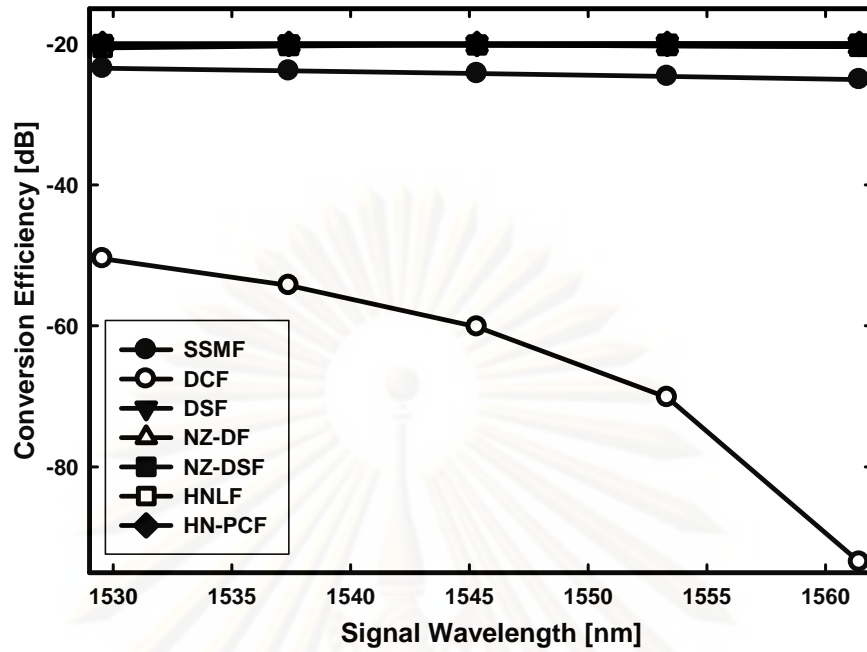
จากตารางที่ 3.1 จะพบว่าค่า γ ของเส้นใยแสงชนิด HNLF มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF DCF NZ-DSF NZ-DF DSF และ SSMF ตามลำดับ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วหากเส้นใยแสงเส้นใดมีค่า γ มาก เส้นใยแสงชนิดนั้นจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ที่สูงขึ้นตามไปด้วย และหากพิจารณาค่า A_{eff} ของเส้นใยแสงแล้ว จะพบว่าเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งตามทฤษฎีหากเส้นใยแสงใดมีค่า A_{eff} น้อย เส้นใยแสงนั้นจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ที่มากกว่าเส้นใยแสงที่มีค่า A_{eff} มาก ดังนั้นการพิจารณาเบื้องต้นจากการสังเกตค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงทำให้สามารถคาดคะเนเส้นใยแสงที่เหมาะสมสำหรับการนำมาสร้าง OPC คือเส้นใยแสงชนิด HNLF และ HNL-PCF ทั้งนี้นอกจากค่า γ และค่า A_{eff} ของเส้นใยแสงที่จะมีผลต่อค่า η แล้วนั้น ค่ากำลังของสัญญาณป้อน ก็ถือเป็น

ตัวแปรสำคัญ เนื่องจากสัญญาณปั๊มที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงย่อมให้ประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์ FWM ที่สูงด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เบื้องต้นจากการสังเกตค่าพารามิเตอร์จึงยังไม่สามารถหาข้อสรุปในการเลือกเส้นใยแสงที่จะนำมาใช้ทำ OPC ได้ จึงต้องอาศัยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจากสมการข้างต้นเข้ามาช่วยในการตัดสินใจ

ในการทดสอบหาค่า η จากเส้นใยแสงทั้ง 7 ชนิด จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องตามที่สมการต้องการ โดยในการทดลองนี้จะกำหนดตามค่าที่ได้ศึกษาจากการทดลองต่าง ๆ ที่ผ่านมา ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของอุปกรณ์ที่หาได้จริงในท้องตลาดและนิยมใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้น ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดประกอบไปด้วยค่าความยาวของเส้นใยแสงเท่ากับ 500 m ค่ากำลังของสัญญาณแสง (P_s) เท่ากับ 3 dBm (2 mW) ค่ากำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสอง ($P_{p1,p2}$) เท่ากับ 20 dBm (100 mW) ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณแสง (λ_s) เท่ากับ 1520 – 1570 nm (C-band) และระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มกับสัญญาณแสง (pump separation) ด้านละ 1.2 nm เช่นหากค่าความยาวของสัญญาณแสงเท่ากับ 1545.32 nm (ITU-grid 194 THz) ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 (λ_{p1}) จะต้องมีค่าเท่ากับ 1544.12 nm และค่าความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 (λ_{p2}) เท่ากับ 1546.52 nm

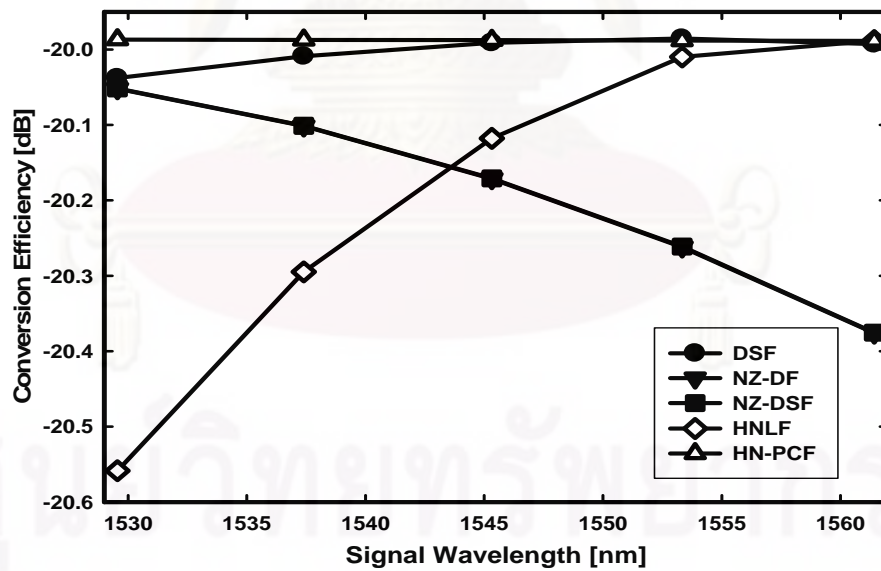
จากการคำนวณตามทฤษฎี จะได้ค่า η ของ OPC ที่ทำมาจากเส้นใยแสงทั้ง 7 ชนิดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า conversion efficiency ของ OPC ที่ทำมาจากเส้นใยแสงชนิด SSMF DCF DSF NZ-DF NZ-DSF HNLF และ HNL-PCF กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสงในช่วง C-band (1520 – 1570 nm)

จากรูปที่ 3.1 จะสังเกตได้ว่าเส้นใยแสงชนิด SSMF ให้ค่า η ประมาณ -23 ถึง -25 dB และเส้นใยแสงชนิด DCF ให้ค่า η ประมาณ -50 ถึง -100 dB ซึ่งต่ำกว่าเส้นใยแสงอีก 5 ชนิดที่เหลือ ที่มีค่า η ประมาณ -19 ถึง -20 dB ดังนั้นเมื่อนำเส้นใยแสงทั้ง 5 ชนิดมาเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นผลอย่างชัดเจนได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสง ในช่วง C-band ของเส้นใยแสงชนิด SSMF DCF DSF NZ-DF NZ-DSF HNLF และ HN-PCF

2D Graph 10



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสง ในช่วง C-band ของเส้นใยแสงชนิด DSF, NZ-DF, NZ-DSF, HNLF และ HN-PCF

จากรูปที่ 3.2 จะสรุปได้ว่า เส้นใยแสงชนิด HNL-PCF จะให้ค่า η สูงที่สุด อีกทั้งเส้นใยแสงชนิดนี้ยังให้ค่า η ที่ใกล้เคียงกันตลอดช่วง C-band คือประมาณ -19.98 dB ซึ่งตรงตาม

เป้าหมายที่ต้องการ OPC ที่สามารถใช้งานได้ดีในทุกความยาวคลื่นของสัญญาณแสงช่วง C-band ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้เส้นใยแสงชนิด HNL-PCF มาสร้าง OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อได้ชนิดของเส้นใยแสงที่ต้องการใช้แล้ว จากนั้นในหัวข้อต่อไปจะหาความยาวของเส้นใยแสงสำหรับ sagnac loop ที่จะทำให้ OPC มีค่า η มากที่สุด

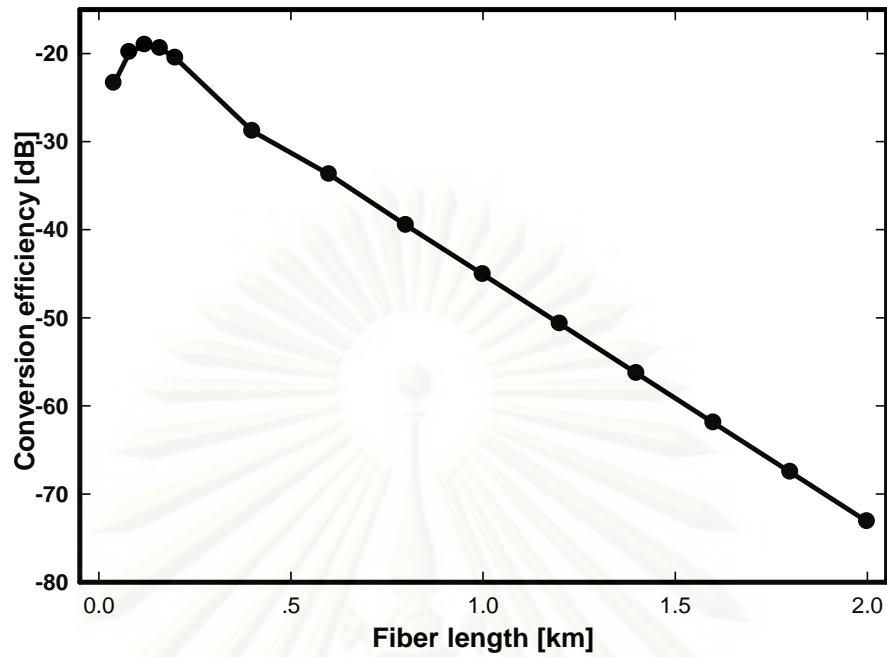
3.2.2 การหาความยาวของเส้นใยแสงที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency มากที่สุด

เส้นใยแสงชนิด HNL-PCF เป็นเส้นใยแสงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้สร้าง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer ดังนั้นในหัวข้อนี้จะหาความยาวของเส้นใยแสงที่นำมาใช้สร้าง sagnac loop ที่ให้ค่า η มากที่สุด

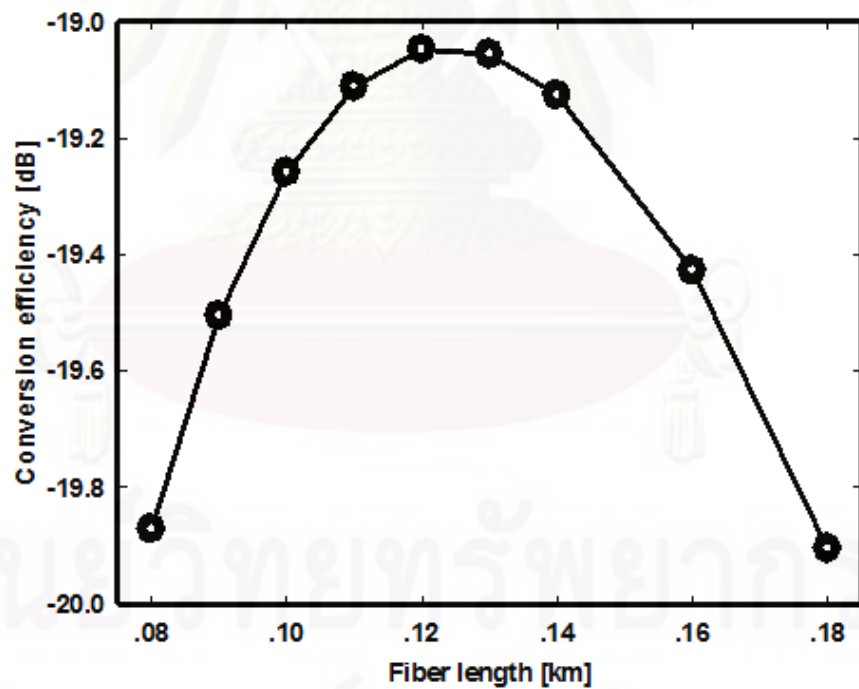
จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 จะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นใยแสงมีผลต่อค่ากำลังของสัญญาณคอนจูเกต (P_c) และค่าประสิทธิภาพของการเกิดปรากฏการณ์ FWM (η_{FWM}) ซึ่งค่าทั้งสองจะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่าค่า η ของ OPC มีมากน้อยเพียงใด โดยหากค่า P_c และ η_{FWM} มีค่ามาก ค่า η ก็จะมีค่าตามไปด้วย

เมื่อหาค่า η มากที่สุดจากสมการในหัวข้อที่ 3.1 โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1 หากแต่สัญญาณแสงที่ใช้ทดสอบคือสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1545.32 nm ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ ณ จุดกึ่งกลางของช่วง C-band และทำการเลือกใช้ความยาวของเส้นใยแสงตั้งแต่ 0.1 ถึง 2 km ซึ่งจะได้ผลของค่า η ดังแสดงในรูปที่ 3.3

จากรูปที่ 3.3 ค่า η จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งเมื่อเพิ่มความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ทำ sagnac loop มากขึ้น แต่หลังจากความยาวของเส้นใยแสงประมาณ 0.2 km ค่า η จะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วงความยาวของเส้นใยแสงที่ให้ค่า η มากที่สุด อยู่ประมาณ 0.1 ถึง 0.2 km เหตุผลที่ค่า η ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้เส้นใยแสงที่มีความยาวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF มีค่าลดทอนของกำลังสัญญาณที่ค่อนข้างสูง คือ 0.9 dB/km เมื่อสัญญาณแสงวิ่งผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทางยาวขึ้น ค่ากำลังของสัญญาณแสงก็จะต่ำลงเรื่อย ๆ จนส่งผลให้อัตราการเกิดสัญญาณคอนจูเกตลดต่ำลง ดังนั้นเมื่อทดลองหาค่า η จากความยาวของเส้นใยแสงอย่างละเอียดตั้งแต่ 100 ถึง 200 m จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวของเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่นำมาใช้สร้าง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบ sagnac interferometer



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับความยาวของเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่มีค่า conversion efficiency สูงสุดเท่ากับ -19.05 dB

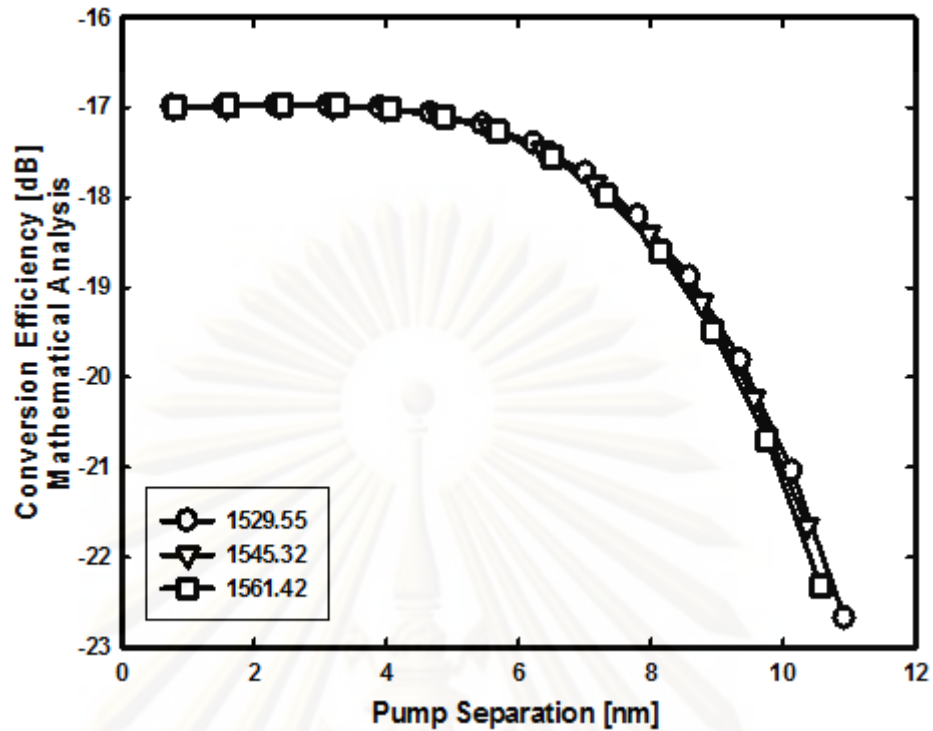
จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่มีความยาว 0.12 km หรือ 120 m สำหรับสร้าง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น จะได้ค่า η มากที่สุดเท่ากับ -19.05 dB

3.2.3 การหาระยะห่างระหว่างสัญญาณบีบทั้งสองที่ทำให้ OPC มีค่า conversion efficiency มากที่สุด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่มีความยาวเท่ากับ 120 m จะให้ค่า η มากที่สุดสำหรับนำมาใช้สร้าง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบ sagnac interferometer ในหัวข้อนี้เป็นการหาดำแหน่งความยาวคลื่นของสัญญาณบีบทั้งสองที่นำมาใช้กระตุ้นให้สัญญาณแสงเกิดปรากฏการณ์ FWM ภายใน sagnac loop เพื่อให้ OPC มีค่า η มากที่สุด

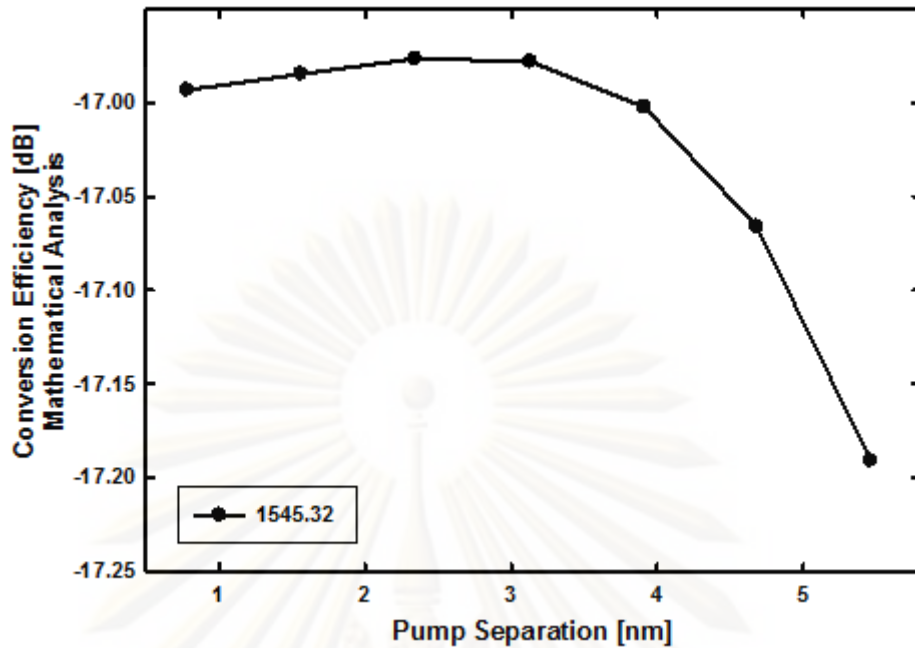
ปรากฏการณ์ FWM จะเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณแสง 4 สัญญาณเดินทางอย่างพร้อมเพรียงกันในเส้นใยแสง โดยสัญญาณแสงหนึ่งสามารถถ่ายเทพลังงานให้อีกสัญญาณแสงหนึ่งได้ ทั้งนี้สัญญาณแสงทั้งสี่จะต้องมีความถี่และเฟสที่เข้ากันได้ โดยในกรณีนี้ เมื่อมีสัญญาณแสง 1 สัญญาณเดินทางพร้อมกับสัญญาณบีบ 2 สัญญาณเข้าสู่ sagnac loop โดยที่ความยาวคลื่นของสัญญาณแสงอยู่กึ่งกลางระหว่างความยาวคลื่นของสัญญาณบีบทั้งสอง สัญญาณบีบทั้งสองจะถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณแสง ทำให้เกิดสัญญาณใหม่ขึ้น คือ สัญญาณคอนจูเกต ซึ่งมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสง โดยที่สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นจะมีข้อมูลภายในและรูปร่างสัญญาณที่เหมือนกันกับสัญญาณแสง ดังนั้นการจะเกิดสัญญาณคอนจูเกตมากหรือน้อยเพียงใดจึงขึ้นอยู่กับความตำแหน่งของสัญญาณบีบทั้งสอง ที่จะต้องมีความยาวคลื่นที่สอดคล้องเหมาะสมกับสัญญาณแสงมากที่สุดด้วย

จากสมการที่ 2.15 จะเห็นได้ชัดว่าค่าจับคู่เฟสจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณแสงและสัญญาณบีบ โดยการคำนวณหาค่า η จากสมการข้างต้น เมื่อหาตำแหน่งของสัญญาณบีบที่เหมาะสมที่สุดโดยการค่อย ๆ ขยับตำแหน่งของสัญญาณบีบออกจากสัญญาณแสงมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ทดสอบกับสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1529.55 nm 1545.32 nm และ 1561.42 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายของสัญญาณช่วง C-band ตามลำดับ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสัญญาณบีบกับค่า conversion efficiency ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊ม (pump separation) ที่มีค่า conversion efficiency สูงสุดเท่ากับ -16.97 dB

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มทั้งสองเพิ่มมากขึ้นจนถึงขีดหนึ่ง ค่า η ก็จะลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งช่วงของระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มที่ให้ค่า η สูงจะอยู่ระหว่าง 0.1 nm ถึง 4 nm โดยเมื่อทดสอบอย่างละเอียด จะได้ค่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสัญญาณปั๊มกับค่า conversion efficiency ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง conversion efficiency กับระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊ม (pump separation) ที่มีค่า conversion efficiency สูงสุดเท่ากับ -16.97 dB

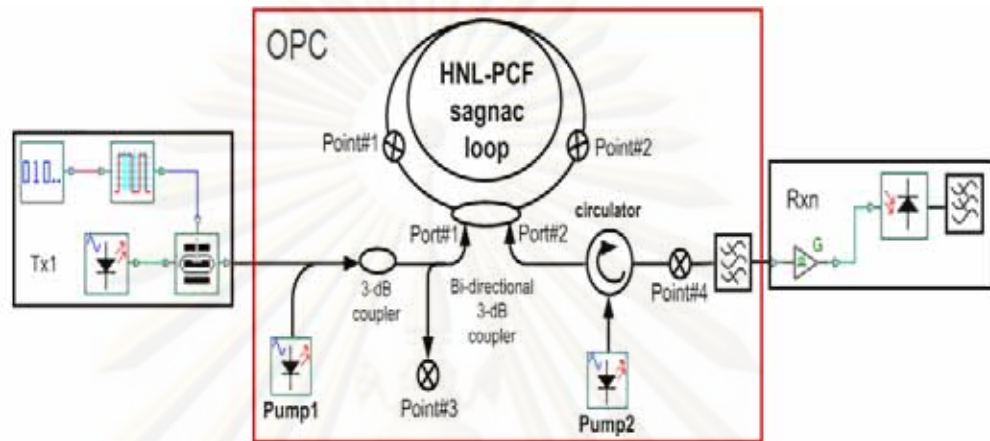
จากรูปที่ 3.6 ทำให้ทราบว่าเมื่อสัญญาณปั๊มทั้งสองอยู่ห่างกัน 2.4 nm หรือห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 1.2 nm จะทำให้สัญญาณปั๊มถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณแสงเพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกตขึ้นมาใหม่ได้ดีที่สุด ซึ่งจะให้ค่า η เท่ากับ -16.97 dB โดยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1529.55 nm นั้นจะต้องอาศัยสัญญาณปั๊มที่มีความยาวคลื่น 1528.35 nm กับ 1530.75 nm ส่วนสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1545.32 nm และ 1561.42 nm จะต้องอาศัยสัญญาณปั๊มที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1544.12 nm กับ 1546.52 nm และ 1560.22 nm กับ 1562.62 nm ตามลำดับ

ดังนั้นการออกแบบ OPC จากสมการทางทฤษฎีทำให้ทราบว่าเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบ sagnac interferometer ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้เส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่มีความยาวคลื่น 120 m สำหรับใช้สร้าง sagnac loop และป้อนสัญญาณคลื่นปั๊มที่มีความยาวคลื่นห่างจากสัญญาณแสงเท่ากับ 1.2 nm

3.3 การทดสอบผลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0

เมื่อได้ชนิดของเส้นใยแสง ค่าความยาวของเส้นใยแสงและระยะห่างของสัญญาณปั๊มที่ทำให้ค่า η สูงที่สุดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในหัวข้อ 3.2 แล้ว จากนั้นในหัวข้อนี้จะใช้ข้อมูลที่ได้มาประกอบเป็น OPC เพื่อนำ OPC ที่ออกแบบมาหาค่าระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊ม (pump separation) เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีให้ทราบชัดว่า สมการ

ที่นำมาคิดคำนวณสำหรับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีนั้นเชื่อถือได้ ในหัวข้อที่ 3.4 และเพื่อหาค่ากำลังของสัญญาณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม OptiSystem 8.0 ในหัวข้อที่ 3.5 ทั้งนี้กำหนดให้โครงสร้างของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแบบ sagnac interferometer เป็นดังรูปที่ 3.7



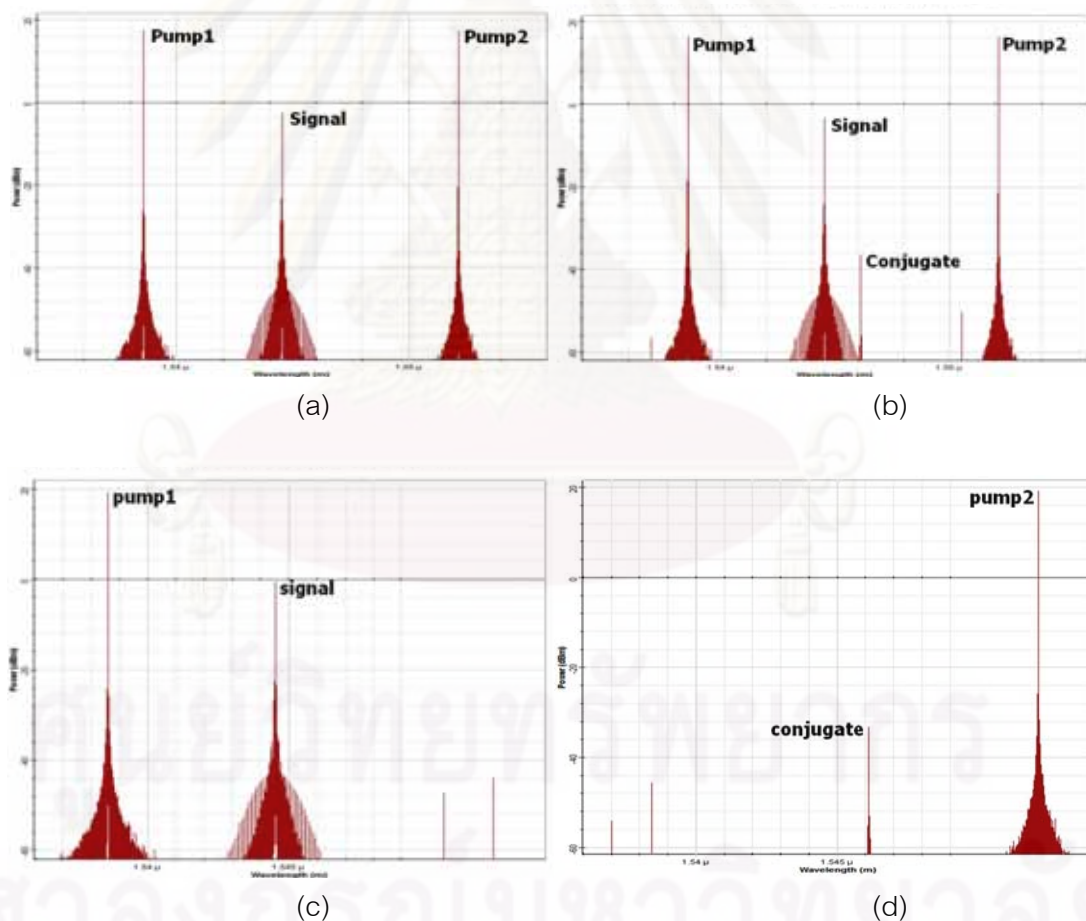
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแบบ sagnac interferometer ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากรูปที่ 3.7 ส่วนของภาคส่งสัญญาณแสง (transmitter) ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ CW Laser มีหน้าที่กำเนิดสัญญาณแสงแบบต่อเนื่อง (continuous) Bit Sequence Generator มีหน้าที่สร้างขบวนบิตข้อมูลแบบสุ่ม (Pseudo Random) โดยกำหนดให้มีจำนวนทั้งสิ้น 1,024 บิต Pulse Generator มีหน้าที่สร้างพัลส์ข้อมูลแบบ NRZ และ Modulator มีหน้าที่มอดูเลตข้อมูลเข้ากับสัญญาณแสงด้วยอุปกรณ์ Mach-Zehnder Modulator

เมื่อสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง c-band ถูกป้อนออกจากเลเซอร์ถูกมอดูเลตเข้ากับขบวนบิตข้อมูล NRZ แบบ pseudo random จำนวนทั้งสิ้น 1,024 บิต กลายเป็นขบวนสัญญาณแสงที่มีอัตราข้อมูล 10 Gb/s จากนั้นขบวนสัญญาณแสงดังกล่าวจะถูกส่งไปยังส่วนของ OPC ซึ่งภายในส่วนนี้ประกอบไปด้วย Pump Laser มีหน้าที่กำเนิดสัญญาณแสงที่ใช้เป็นสัญญาณปั๊ม (pump) coupler มีหน้าที่รวมสัญญาณแสงเข้ากับสัญญาณปั๊มทั้งสอง HNL-PCF เป็นเส้นใยแสงที่นำมาทำ Sagnac loop เพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกต Circulator มีหน้าที่วนสัญญาณแสง และ Optical band pass filter มีหน้าที่กรองสัญญาณเฉพาะช่วงที่ต้องการ

ขบวนสัญญาณแสงจะถูกรวมเข้ากับสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 ด้วย 3-dB coupler จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะเข้าสู่ พอร์ตที่ 1 ของ bi-directional coupler เพื่อผ่านไปยังเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF ที่ทำเป็น sagnac loop ในขณะเดียวกัน สัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 จะเข้าสู่ พอร์ตที่ 2 ของ bi-directional coupler เพื่อเข้าสู่ Sagnac loop เช่นเดียวกัน เมื่อสัญญาณทั้งสามถูกรวมแล้ว

เดินทางในเส้นใยแสงชนิด HNL-PCF พร้อมกัน สัญญาณปั๊มทั้งสองจะถ่ายเทพลังงานไปให้ สัญญาณแสง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM และสร้างสัญญาณคอนจูเกตที่มีความยาวคลื่น เดียวกันกับสัญญาณแสงขึ้นภายใน Sagnac loop หลังจากนั้นสัญญาณทั้งสี่ จะเดินทางกลับมาที่ bi-directional อีกครั้ง โดยสัญญาณแสงและสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 จะออกมาที่ พอร์ตที่ 1 ส่วน สัญญาณคอนจูเกตและสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 จะออกมาที่ พอร์ตที่ 2 ซึ่งจะเดินทางผ่าน circulator ไปยัง band pass filter (BPF) เพื่อกรองเอาสัญญาณคลื่นปั๊มที่ 2 ออก ให้เหลือเฉพาะสัญญาณ คอนจูเกตที่ต้องการเดินทางต่อไปยังส่วนของภาควัดสัญญาณ ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลื่อนความ ยาวคลื่นของสัญญาณแสงออกจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสัญญาณปั๊มทั้งสองเล็กน้อย ทำให้ สัญญาณคอนจูเกตมีความยาวคลื่นแตกต่างจากสัญญาณแสง เพื่อให้สามารถสังเกตเห็น สัญญาณคอนจูเกตได้อย่างชัดเจน โดยจะแสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่จุด point#1 ถึง point#4 ในรูปที่ 3.8 (a) ถึง รูปที่ 3.8 (d) ตามลำดับ



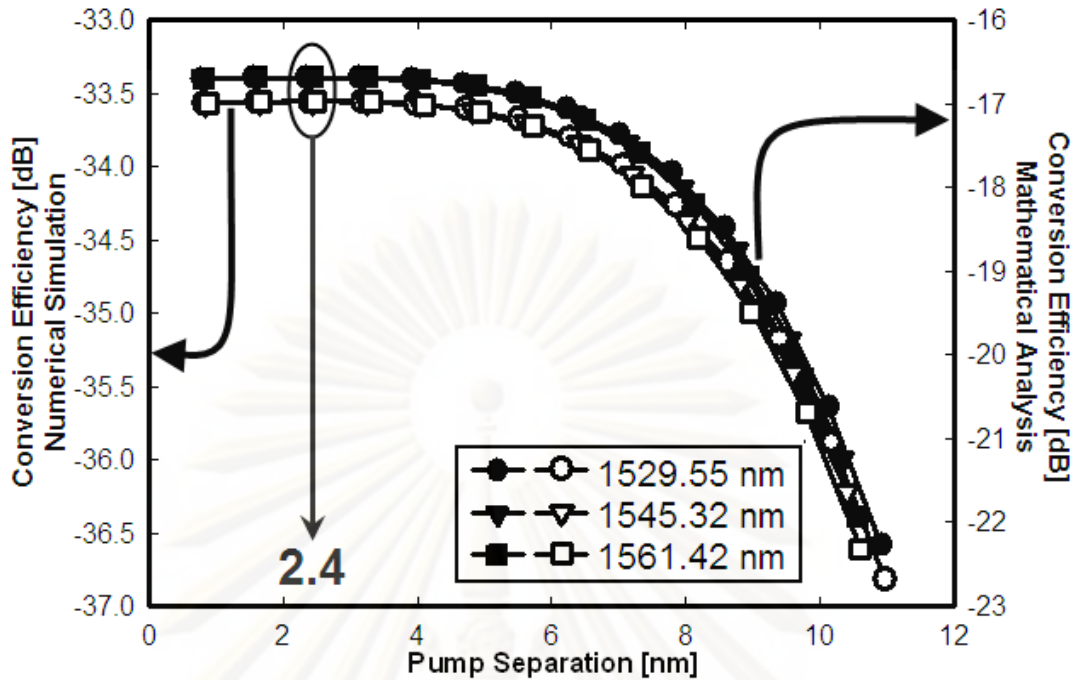
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของสัญญาณ (a) จุด point#1 (b) จุด point#2 (c) จุด point#3 (d) จุด point#4

จากรูปที่ 3.8 (a) เป็นสเปคตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณบีมทั้งสอง ที่เดินทางพร้อมกันภายใน sagnac loop รูปที่ 3.8 (b) เป็นสเปคตรัมของสัญญาณแสง สัญญาณบีมทั้งสอง และสัญญาณคอนจูเกตซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์ FWM ที่เกิดขึ้นภายใน sagnac loop จากการเดินทางพร้อมกันของสัญญาณแสงและสัญญาณบีมทั้งสอง รูปที่ 3.8 (c) เป็นสเปคตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณบีมคลื่นที่ 1 ซึ่งออกมายัง พอร์ตที่ 1 ของ bi-directional coupler และรูปที่ 3.8 (d) เป็นสัญญาณคอนจูเกตและสัญญาณบีมคลื่นที่ 2 ซึ่งออกมายัง พอร์ตที่ 2 ของ bi-directional coupler โดยจากรูปที่ 3.8 (c) และ รูปที่ 3.8 (d) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกตจะแยกออกจากกันที่คนละ พอร์ต ของ bi-directional coupler ดังนั้นเมื่อสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกตมีความยาวคลื่นเดียวกันก็ไม่เกิดปัญหาสำหรับการแยกสัญญาณคอนจูเกตมาใช้แต่อย่างใด จากนั้นสัญญาณคอนจูเกตที่ได้ออกมาจะเข้าสู่ภาครับสัญญาณ ซึ่งภายในส่วนของภาครับสัญญาณจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังนี้ Pre amplifier มีหน้าที่ขยายสัญญาณคอนจูเกตก่อนจะเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ Photo detector มีหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแสงเพื่อแปลงกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้ง Electrical low pass filter มีหน้าที่กรองสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่ต่ำ และ Visual analyzer เป็นเครื่องมือวัดสำหรับการวัดค่าซีวีวี เพื่อนำมาวิเคราะห์ผล

เมื่อสัญญาณคอนจูเกตเข้ามาสู่ส่วนของภาครับสัญญาณจะถูกขยายสัญญาณด้วยตัวขยายสัญญาณที่มีอัตราขยาย (Gain) 30 dB ก่อนจะเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณแสงแบบ PIN เพื่อแปลงข้อมูลจากสัญญาณคอนจูเกตเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วผ่านเข้าสู่ตัวกรองสัญญาณแสงแบบความถี่ต่ำเพื่อกรองเอาสัญญาณรบกวนออกให้เหลือเฉพาะสัญญาณข้อมูลที่ต้องการก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องมือวัดต่าง ๆ อาทิเช่น เครื่องวัดสัญญาณบิตผิดพลาด (Bit error rate tester) เครื่องวัดสัญญาณตา (Eye diagram) และเครื่องวัดค่า Q factor ซึ่งเป็นค่าซีวีวีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของสัญญาณ

3.4 การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณทางทฤษฎีและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้โครงสร้างโดยละเอียดของ OPC ที่ใช้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบค่า η ที่ขึ้นอยู่กับค่า pump separation ระหว่างผลจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการต่าง ๆ ข้างต้นและผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทดสอบกับสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1529.55 nm 1545.32 nm และ 1561.42 nm และทดสอบด้วยการขยายระยะห่างของสัญญาณบีมทั้งสองเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เหมือนกันกับการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสัญญาณบีมกับค่า η ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบผลจากการคำนวณทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างสัญญาณปั๊มที่ทำให้สัญญาณปั๊มถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณแสงเพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกตขึ้นมาใหม่ได้ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.4 nm หรือเมื่อสัญญาณปั๊มอยู่ห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 1.2 nm เช่นเดียวกันกับผลจากการคิดคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งหมายความว่าสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1529.55 nm นั้นจะต้องอาศัยสัญญาณปั๊มที่มีความยาวคลื่น 1528.35 nm กับ 1530.75 nm ส่วนสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1545.32 nm และ 1561.42 nm จะต้องใช้สัญญาณปั๊มที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1544.12 nm กับ 1546.52 nm และ 1560.22 nm กับ 1562.62 nm ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ค่า η สูงสุดที่วัดได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่าเท่ากับ -33.39 dB เมื่อนำผล η จากหัวข้อที่ 3.2.3 ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าผลจากวิธีการทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกัน แต่ค่า η จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าต่ำกว่าค่า η ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี เนื่องจากการคำนวณทางทฤษฎีไม่ได้คิดคำนวณผลของ pump depletion และผลกระทบจากสัญญาณข้างเคียงที่เกิดจากปรากฏการณ์ FWM (by-product spurious FWM sideband) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าค่า η ที่ได้จะมีค่าที่แตกต่างกันก็ตาม แต่ผลของระยะห่างของสัญญาณปั๊มที่ต้องการทราบก็มีค่าเท่ากัน คือ 2.4 nm รวมถึงผลทั้งหมดยังมีแนวโน้มเดียวกันอีกด้วย จึงถือว่าการคำนวณทางทฤษฎี สามารถช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้ชนิดและความยาวของเส้นใยแสงได้

3.5 การออกแบบ OPC ที่มีสมรรถนะดีที่สุด

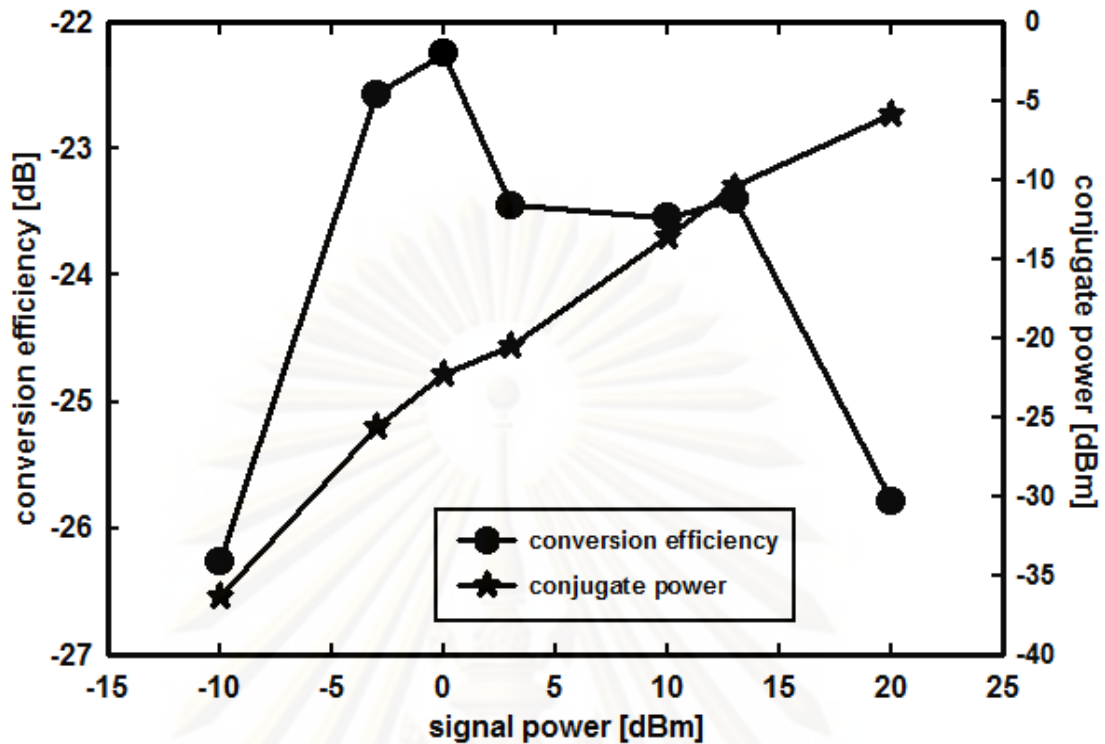
ในหัวข้อนี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่ได้มาจากหัวข้อ 3.3 มาหาค่ากำลังของสัญญาณแสง (P_s) และค่ากำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสอง (P_{p1} และ P_{p2}) ที่เหมาะสมที่จะทำให้ OPC มีสมรรถนะที่ดีที่สุด โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งได้เลือกใช้สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1545.32 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่อยู่กึ่งกลางของช่วง c-band

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Signal wavelength	1545.32 nm
Signal power	-10 ถึง 10 dBm
Pumps wavelength	1544.12 nm กับ 1546.52 nm
Pumps power	10 ถึง 30 dBm
Type of fiber	HNL-PCF
Fiber length	120 m
Gain of optical preamplifier	30 dB
Responsivity of PIN	0.85 A/W
Bandwidth of electrical low pass filter	20 GHz

3.5.1 การหาค่ากำลังของสัญญาณแสงที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.2 เพื่อหาค่ากำลังของสัญญาณแสง (P_s) ที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้กำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสองมีค่าเท่ากับ 20 dBm จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า η และกำลังของสัญญาณคอนจูเกตกับกำลังของสัญญาณแสง

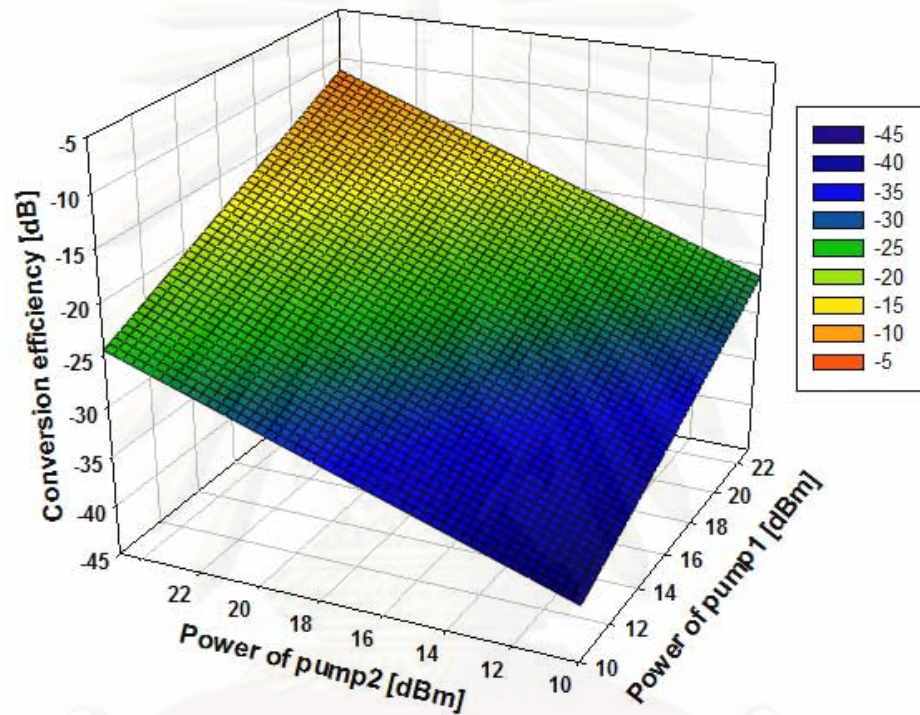


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า η และกำลังของสัญญาณคอนจูเกตกับกำลังของสัญญาณแสง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.10 พบว่าค่ากำลังของสัญญาณคอนจูเกตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มกำลังของสัญญาณแสงขึ้น แต่ค่า η จะเพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งและจะเริ่มลดลง ซึ่งเมื่อทำการป้อนสัญญาณแสงเข้าไป 0 dB จะให้ค่า η สูงที่สุดเท่ากับ -22.25 dB โดยหากต้องการส่งสัญญาณแสงแบบหลายความยาวคลื่นแล้ว การส่งสัญญาณแสงที่มีกำลังสูงๆ จะเปรียบเสมือนสัญญาณแสงที่อยู่ข้างเคียงทำตัวเป็นสัญญาณบีบ ทำให้สัญญาณแสงเกิด by-product spurious FWM sideband ขึ้น โดยเป็นการเกิดปรากฏการณ์ FWM ที่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างสัญญาณแสงที่อยู่ข้างเคียงกัน ทำให้เกิดสัญญาณใหม่ที่ไม่ต้องการขึ้นมาทับซ้อนในตำแหน่งเดียวกันกับความยาวคลื่นของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกต โดยจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกต เกิดปัญหาข้อมูลผิดพลาดได้ จึงทำให้ค่า η ลดลงเมื่อป้อนสัญญาณแสงที่สูงมากเกินไป ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้กำลังของสัญญาณแสงเท่ากับ 0 dBm ซึ่งให้ค่า η มากที่สุดและยังเป็นค่าของกำลังสัญญาณแสงที่สามารถหาได้จากเลเซอร์ทั่วไปตามท้องตลาด

3.5.2 การหาค่ากำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสองที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะหาค่ากำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสอง (P_{p1} และ P_{p2}) ที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้กำลังของสัญญาณแสงมีค่าเท่ากับ 0 dBm จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า η กับกำลังของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 (P_{p1}) และสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 (P_{p2})



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า η กับกำลังของสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 1 (P_{p1}) และสัญญาณปั๊มคลื่นที่ 2 (P_{p2})

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.11 พบว่าค่า η จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มค่า P_{p1} และ P_{p2} ให้สูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นในสัดส่วนคงที่ เช่น หากเพิ่มค่า P_{p1} หรือค่า P_{p2} ขึ้น 3 dB ค่า η ก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 3 dB เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ค่า P_{p1} และค่า P_{p2} จะมีผลต่อค่า η เท่ากัน อย่างไรก็ตาม หากสัญญาณปั๊มมีกำลังที่สูงมากเกินไปจะส่งผลเสียเช่นเดียวกันกับกรณีที่สัญญาณแสงมีกำลังสูงเกินไป คือ สัญญาณปั๊มจะถ่ายเทพลังงานไปยังสัญญาณแสง ทำให้เกิด by-product spurious FWM sideband ขึ้น ดังนั้นค่า P_{p1} และ P_{p2} เท่ากับ 20 dBm หรือ 100 mW ซึ่งเป็นค่ากำลังของสัญญาณปั๊มที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการทดลองที่ผ่านมา [46] และให้ค่า η เท่ากับ -33 dB จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลือนความยาวคลื่นที่อาศัยโครงสร้างแบบ sagnac interferometer มากที่สุด

บทที่ 4

การทดสอบ OPC ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM

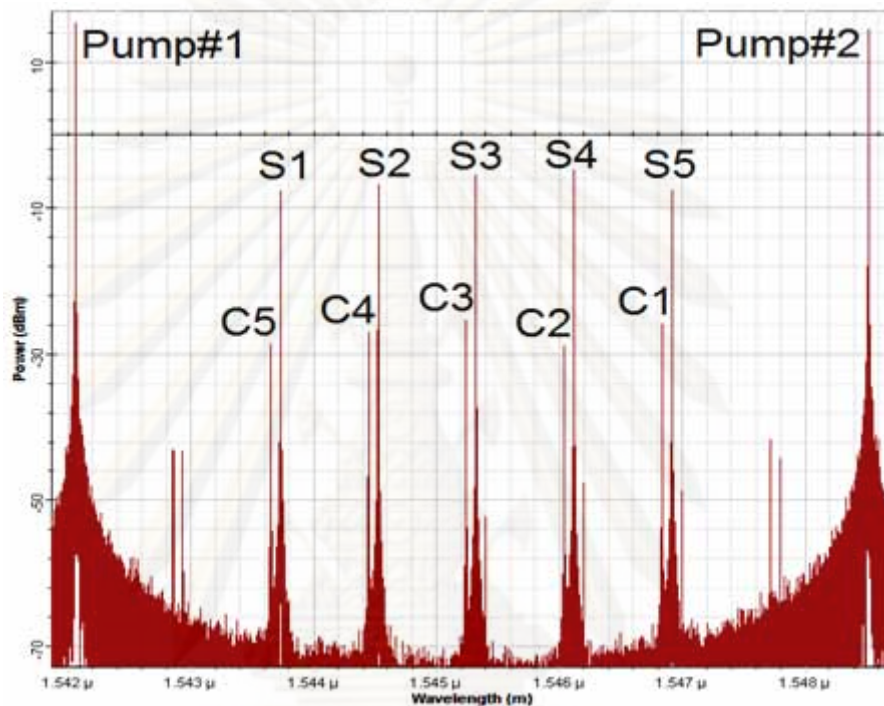
จากการออกแบบ OPC ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการทดสอบ OPC กับสัญญาณแสงเพียงสัญญาณเดียวที่ยังไม่ได้มีการเดินทางผ่านระบบสื่อสารสัญญาณที่มีระยะทางแต่อย่างใด สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนั้น สามารถสร้างสัญญาณคอนจูเกตที่มีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงได้ แต่ถ้านำ OPC ชนิดเดียวกันนี้ไปใช้กับสัญญาณแสงแบบหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นจะมีแบนด์วิดท์เดียวกันกับสัญญาณแสง โดยที่ความยาวคลื่นนั้นเปลี่ยนแปลงไป ทำให้คุณสมบัติจาก OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับสัญญาณแสงหนึ่งความยาวคลื่นกลายเป็น OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับสัญญาณแสงแบบ WDM

อย่างไรก็ตามการทดสอบที่ผ่านมานั้นเป็นเพียงการทดสอบ OPC กับสัญญาณแสงเพียงสัญญาณเดียวและยังไม่ได้นำ OPC มาทดสอบในระบบสื่อสารสัญญาณที่มีระยะทาง ซึ่งการวัดสมรรถนะที่แท้จริงของ OPC นั้น จะต้องทดสอบด้วยการวาง OPC ไว้กึ่งกลางของระบบสื่อสารสัญญาณเพื่อทำหน้าที่ชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาดีสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ ดังนั้นในบทนี้จะทดสอบ OPC กับสัญญาณแสงแบบ WDM เพื่อหาจำนวนช่องสัญญาณที่มากที่สุดที่สามารถส่งผ่านระบบสื่อสารสัญญาณที่มี OPC แล้วให้ค่า Q factor ที่มากกว่า 7 หรือ BER น้อยกว่า 10^{-12} สำหรับทุกช่องสัญญาณ จากนั้นจะเลือกราง OPC ไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงชนิด SSF ที่มีความยาวของระยะทางเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อหาระยะทางยาวที่สุดที่สัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณยังคงสามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางได้ไม่ผิดเพี้ยน โดยอาศัยเกณฑ์ในการตัดสินที่ค่าชี้วัด Q factor มากกว่า 7 สำหรับทุกช่องสัญญาณเช่นเดิม ทั้งนี้ค่า Q factor สามารถวัดได้จากโปรแกรม OptiSystem 8.0

4.1 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

เครื่องส่งยุคเฟสแสงหรือ OPC สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น และชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ตามที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งเป็นการแบ่งชนิดของ OPC ตามตำแหน่งความยาวคลื่นที่เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น โดยเป็นการนำ OPC มาใช้กับสัญญาณแสงหนึ่งสัญญาณ เพื่อให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตเพียงหนึ่งสัญญาณเช่นเดียวกัน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM อีกทั้งในระบบยังอาศัย OPC เพื่อชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งได้เลือกใช้และออกแบบ OPC ชนิดไม่

เลื่อนความยาวคลื่นที่มีสมรรถนะดีที่สุดมาแล้วในบทที่ 3 ดังนั้น OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น สำหรับสัญญาณแสงเดี่ยว จึงถูกนำมาใช้กับสัญญาณแสงหลายสัญญาณ หรือสัญญาณ WDM ที่มีหลายความยาวคลื่น ทำให้คุณสมบัติจากการไม่เลื่อนความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ของสัญญาณคอนจูเกตแทน ดังแสดงภาพสเปกตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกต ดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพสเปกตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกต เมื่อนำ OPC มาใช้กับสัญญาณแสงหลายสัญญาณที่มี WDM

จากภาพสเปกตรัมของสัญญาณ WDM ในรูปที่ 4.1 เมื่อมีสัญญาณ WDM จำนวน 5 ความยาวคลื่น ได้แก่สัญญาณ S1 S2 S3 S4 และ S5 เดินทางผ่านเข้า OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตของสัญญาณแสงทั้ง 5 ความยาวคลื่นเป็น C1 C2 C3 C4 และ C5 ตามลำดับ โดยที่ความยาวคลื่นของสัญญาณแสงก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงกับความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตหลังจากออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงจะอยู่คนละตำแหน่งกัน เช่น สัญญาณแสง S1 ที่ความยาวคลื่น 1546 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกต C1 ที่ความยาวคลื่น 1551 nm ซึ่งความยาวคลื่น 1551 nm นั้นเป็นความยาวคลื่นของสัญญาณแสง S5 ที่มีสัญญาณคอนจูเกต C5 เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นของสัญญาณแสง S1 เช่นเดียวกัน ทำให้ทราบว่าเมื่อป้อนสัญญาณ WDM เข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแล้ว จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่สลับตำแหน่งความยาวคลื่นกับสัญญาณแสงขึ้น โดยมีสัญญาณคอนจูเกต C5 เกิดขึ้นที่

ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสง S1 ส่วนสัญญาณคอนจูเกต C4 C3 C2 และ C1 จะมีความยาวคลื่นตรงกันกับสัญญาณแสง S2 S3 S4 และ S5 ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบว่าสัญญาณแสงกับสัญญาณคอนจูเกตที่ถึงแม้จะมีความยาวคลื่นไม่เหมือนกัน แต่สัญญาณทั้งหมดยังคงอาศัยอยู่ในช่วงแบนด์วิดท์เดียวกัน หรือหมายความว่าช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณทั้งสองเหมือนกัน ซึ่งข้อดีของการใช้ช่วงแบนด์วิดท์เดียวกันนี้ สามารถช่วยให้ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ประหยัดช่วงแบนด์วิดท์ที่จะต้องใช้งานได้มากขึ้นเพราะอาศัยช่วงแบนด์วิดท์เพียงช่วงเดียวเท่านั้น

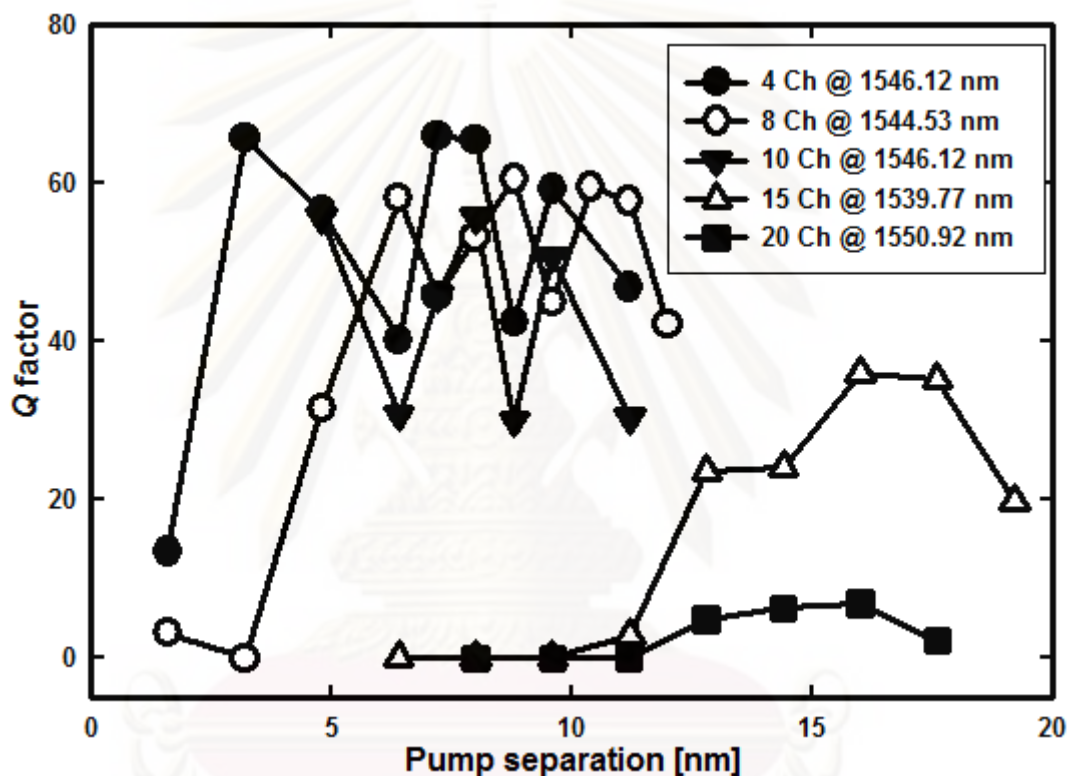
ดังนั้นถึงแม้ว่าจะเลือกใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นกับการสื่อสารสัญญาณ WDM สัญญาณของสัญญาณแสงหรือสัญญาณคอนจูเกตที่ออกมาจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะมีความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจากความยาวคลื่นของสัญญาณแสงเดิม แต่ตำแหน่งแบนด์วิดท์ของสัญญาณคอนจูเกตจะยังคงเป็นช่วงเดียวกันกับสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC

4.2 ผลของระยะห่างระหว่างสัญญาณป้อนกับการสื่อสารสัญญาณแบบ WDM

จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการส่งสัญญาณแสงเพียงสัญญาณเดียวผ่าน OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในบทที่ 3 จะทราบว่าเมื่อกำหนดให้สัญญาณป้อนกับสัญญาณแสงมีความยาวคลื่นห่างกัน 1.2 nm จะทำให้ OPC สร้างสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดขึ้นมาได้ นั่นคือเมื่อสัญญาณแสงมีความยาวคลื่นเท่ากับ 1545.32 nm แล้วสัญญาณป้อนที่จะกระตุ้นให้เส้นใยแสงในช่วง Sagnac loop ของ OPC เกิดปรากฏการณ์ FWM ได้ดีที่สุดจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากับ 1544.12 nm และ 1546.52 nm แต่ในบทนี้ สัญญาณแสงที่จะส่งผ่าน OPC เพื่อทำ phase conjugation จะเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวเป็นสัญญาณแสงแบบ WDM เมื่อสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไป ระยะห่างและความยาวคลื่นของสัญญาณป้อนทั้งสองที่จะกระตุ้นให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตที่ดีที่สุดก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งการพิจารณาเลือกระยะห่างและความยาวคลื่นของสัญญาณป้อนทั้งสองในกรณีนี้จะใช้ค่าชี้วัด Q factor เป็นตัวตัดสิน โดยในการทดสอบหาระยะห่างและความยาวคลื่นของสัญญาณป้อนทั้งสองจะเริ่มโดยการเพิ่มระยะห่างของสัญญาณป้อนกับสัญญาณแสงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสัญญาณป้อนทั้งสองไม่สามารถกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ FWM หรือเกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้นใหม่ได้ จากนั้นจึงเลือกระยะห่างและความยาวคลื่นของสัญญาณป้อนที่ให้ค่า Q factor ของการทำ phase conjugation ได้มากที่สุด มาใช้ต่อไป

เมื่อทดสอบหาระยะห่างและความยาวคลื่นของสัญญาณป้อนที่ให้ค่า Q factor ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 8 10 15 และ 20 ช่องสัญญาณ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสัญญาณป้อนกับค่า Q factor ของแต่ละระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นแสดงค่า Q factor ของสัญญาณ

แสงที่ให้ค่า Q factor ต่ำที่สุดเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่า ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM นั้น ๆ จะอาศัยระยะห่างระหว่างสัญญาณบีบเท่าใด จึงจะทำให้สัญญาณแสงทุกสัญญาณผ่านการทำ phase conjugation ได้ดีที่สุด โดยในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 4 ช่องสัญญาณ สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1546.12 nm มีค่า Q factor ต่ำที่สุดในจำนวนช่องสัญญาณทั้ง 4 ช่อง ส่วนระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 8 10 15 และ 20 ช่องสัญญาณนั้น ค่า Q factor ที่ต่ำที่สุดจะอยู่ที่สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1544.53 nm 1539.77 nm และ 1550.92 nm ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสัญญาณบีบกับค่า Q factor ของแต่ละระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณ 4 8 10 15 และ 20 ช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าระยะห่างของสัญญาณบีบส่งผลต่อค่า Q factor อย่างมาก เมื่อค่าระยะห่างของสัญญาณบีบเปลี่ยนแปลงไป ค่า Q factor ก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย อีกทั้งค่าระยะห่างของสัญญาณบีบที่ทำให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตดีที่สุด ยังแตกต่างกันไปตามจำนวนของช่องสัญญาณอีกด้วย โดยระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 4 ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1544.53 nm 1545.32 nm 1546.12 nm และ 1546.92 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเมื่อสัญญาณแสงผ่านเข้า OPC ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณบีบที่มีระยะห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 7.2 nm นั่นคือสัญญาณบีบ

จะตั้งอยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1537.40 nm และ 1554.13 nm ซึ่งจะให้ค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 67.266 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1546.92 nm และมีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 65.9351 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1546.12 nm

สำหรับระบบสี่สัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 8 ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1542.94 nm 1543.73 nm 1544.53 nm 1545.32 nm 1546.12 nm 1547.72 nm และ 1548.51 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเมื่อสัญญาณแสงผ่านเข้า OPC ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณบีมที่มีระยะห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 8.8 nm นั่นคือสัญญาณบีมจะตั้งอยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1534.25 nm และ 1557.36 nm ซึ่งจะให้ค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 66.6599 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1543.73 nm และมีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 60.5086 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1544.53 nm

สำหรับระบบสี่สัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 10 ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1542.14 nm 1542.94 nm 1543.73 nm 1544.53 nm 1545.32 nm 1546.12 nm 1546.92 nm 1547.72 nm 1548.51 nm และ 1549.32 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเมื่อสัญญาณแสงผ่านเข้า OPC ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณบีมที่มีระยะห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 8 nm นั่นคือสัญญาณบีมจะตั้งอยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1534.25 nm และ 1557.36 nm ซึ่งจะให้ค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 61.459 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1546.92 nm และมีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 55.6856 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1546.12 nm

สำหรับระบบสี่สัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1539.77 nm 1540.56 nm 1541.35 nm 1542.14 nm 1542.94 nm 1543.73 nm 1544.53 nm 1545.32 nm 1546.12 nm 1546.92 nm 1547.72 nm 1548.51 nm 1549.32 nm 1550.12 nm และ 1550.92 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเมื่อสัญญาณแสงผ่านเข้า OPC ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณบีมที่มีระยะห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 16 nm นั่นคือสัญญาณบีมจะตั้งอยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1524.11 nm และ 1567.13 nm ซึ่งจะให้ค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 56.9967 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1540.56 nm และมีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 35.9932 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1539.77 nm

สุดท้ายสำหรับระบบสี่สัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 20 ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1538.19 nm 1538.98 nm 1539.77 nm 1540.56 nm 1541.35 nm 1542.14 nm 1542.94 nm 1543.73 nm 1544.53 nm 1545.32 nm 1546.12 nm 1546.92 nm 1547.72 nm 1548.51 nm 1549.32 nm 1550.12 nm 1550.92 nm 1551.72 nm

1552.52 nm และ 1533.33 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเมื่อสัญญาณแสงผ่านเข้า OPC ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณบีมที่มีระยะห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 16 nm นั่นคือสัญญาณบีมจะตั้งอยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1522.56 nm และ 1569.59 nm ซึ่งจะให้ค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 47.0314 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1553.33 nm และมีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 6.9430 nm ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1550.92 nm

จากการทดสอบจะเห็นว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ด้วย OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 1 ตัว แล้วสัญญาณคอนจูเกตก่อนเข้าตัวรับสัญญาณแสงปลายทางมีค่า Q factor มากกว่า 7 หรือค่าอัตราผิดพลาด (Bit Error Rate, BER) น้อยกว่า 10^{-12} คือระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณ 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณเท่านั้น เนื่องจากระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 20 ช่องสัญญาณมีบางสัญญาณที่มีค่า Q factor ต่ำกว่า 7 ดังนั้นในการทดสอบสมรรถนะที่แท้จริงของ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีระยะห่างจะทำการทดสอบเฉพาะระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณเท่านั้น และจะกำหนดให้ OPC ที่ใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ มีสัญญาณบีมอยู่ห่างจากสัญญาณแสงเท่ากับ 7.2 nm 8.8 nm 8 nm และ 16 nm ตามลำดับ

4.3 ผลของจำนวนช่องสัญญาณต่อการทำ Phase conjugation ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

ในหัวข้อนี้จะใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM เพื่อหาค่า penalty ของ OPC ซึ่งเป็นค่าสูญเสียของความถูกต้องบิตเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่าน OPC โดยค่า penalty จะเป็นค่าเฉพาะตัวของ OPC ที่สามารถบ่งบอกได้ว่าสัญญาณคอนจูเกตที่ได้หลังจากผ่านการจะมีค่า Q factor มากหรือน้อยเพียงใด โดยหาก OPC มีค่า penalty สูง แสดงว่าค่า Q factor ที่วัดได้จากสัญญาณคอนจูเกตที่ออกมาจาก OPC จะมีค่าต่ำกว่า OPC ที่มีค่า penalty ต่ำ ทั้งนี้ค่า penalty ของ OPC สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$penalty[dB] = 20\log Q_{in} - 20\log Q_{out} \quad (4.1)$$

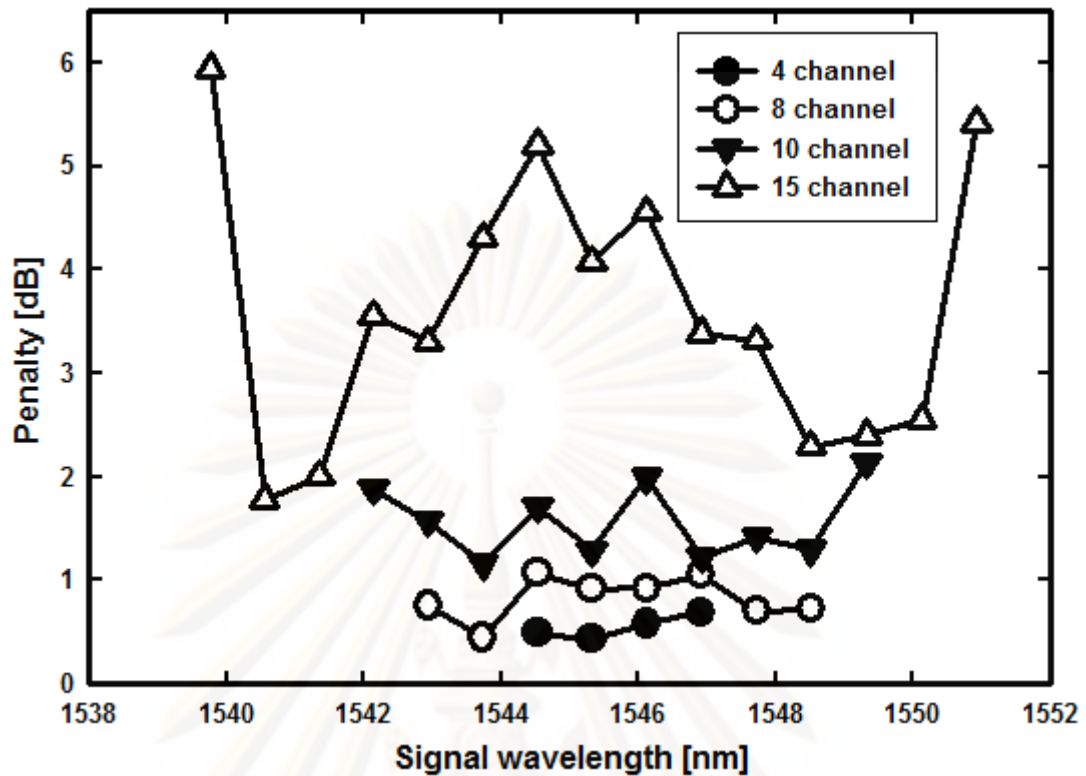
โดยที่ Q_{in} คือ ค่า Q factor ของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC

Q_{out} คือ ค่า Q factor ของสัญญาณคอนจูเกตหลังจากออกจาก OPC

การทดสอบในหัวข้อนี้จะนำ OPC ที่ผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบความยาวคลื่นเดียวมาแล้วในบทที่ 3 มาใช้กับระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ

WDM ที่แต่ละช่องสัญญาณกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสัญญาณแสงแต่ละคลื่นมีค่าเท่ากับ 100 GHz หรือ 0.8 nm โดยที่ช่วงของสัญญาณแสงจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง C-band ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1529.55 nm ถึง 1561.42 nm โดยที่กำลังของสัญญาณแสง กำลังของสัญญาณปั๊มและพารามิเตอร์ต่าง ๆ กำหนดให้มีค่าเท่ากันกับการทดสอบในบทที่ 3 ยกเว้นค่าความยาวคลื่นและระยะห่างของสัญญาณแสงปั๊มทั้งสองที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนช่องสัญญาณและความยาวคลื่นของสัญญาณแสงที่หาได้จากหัวข้อที่ 4.2

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดในการทดสอบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM เพื่อหาค่า penalty ของ OPC ที่ใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ได้แก่ สัญญาณแสงที่ส่งจะมีขบวนบิตข้อมูล NRZ แบบ pseudorandom จำนวน 1024 บิต มีอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gb/s กำลังของสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นก่อนเข้า OPC เท่ากับ 0 dBm และกำลังของสัญญาณปั๊มทั้งสองเท่ากับ 20 dBm โดยระยะห่างของสัญญาณปั๊มทั้งสองจะห่างจากสัญญาณแสงที่อยู่ริมสุดแตกต่างกันออกไปตามจำนวนช่องสัญญาณคือสัญญาณ WDM จำนวน 4 ช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มอยู่ห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 7.2 nm สัญญาณ WDM จำนวน 8 ช่องสัญญาณ จะมีความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มอยู่ห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 8.8 nm สัญญาณ WDM จำนวน 10 ช่องสัญญาณ จะมีความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มอยู่ห่างจากสัญญาณแสง 8 nm และสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ จะมีความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มอยู่ห่างจากสัญญาณแสง 16 nm เมื่อทดสอบการส่งสัญญาณแบบ WDM ผ่าน OPC จะได้ความสัมพันธ์ของค่า penalty ของ OPC กับความยาวคลื่นแต่ละช่องสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.3

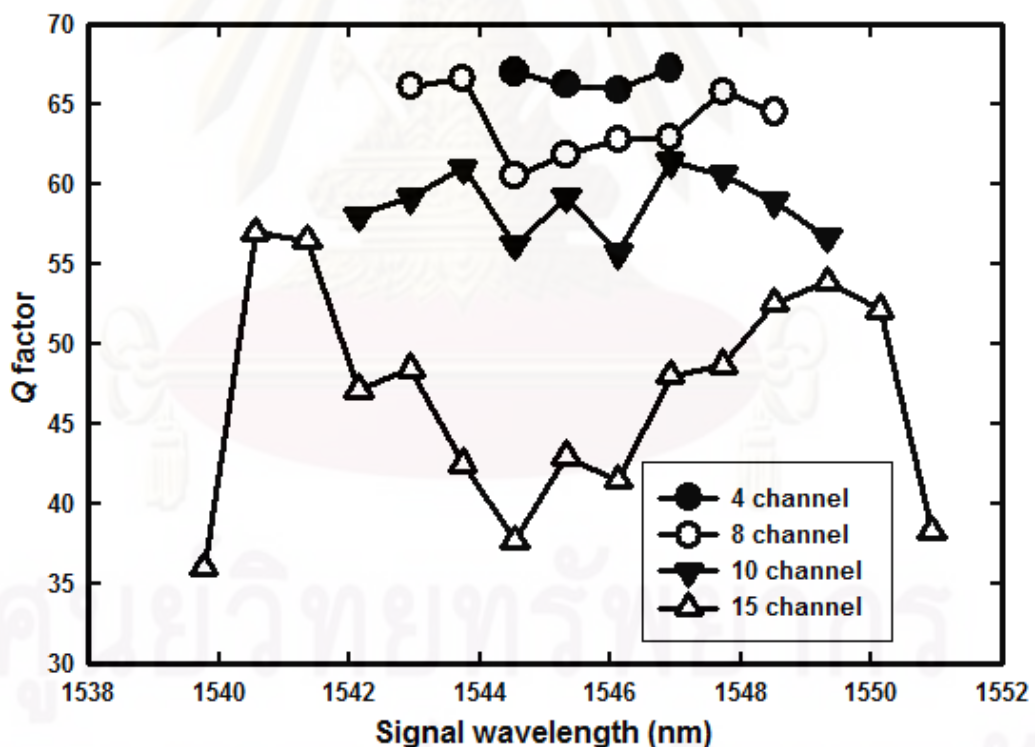


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า penalty กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสง เมื่อใช้สัญญาณแบบ WDM ด้วยจำนวนสัญญาณแสง 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่า penalty ของ OPC จะแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่น โดยระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากจะมีค่า penalty สูงกว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณน้อย โดยในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวน 4 ช่องสัญญาณ จะมีค่า penalty มากที่สุดเท่ากับ 0.6943 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1546.92 nm และมีค่า penalty ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.4253 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1545.32 nm ซึ่งค่า penalty มีค่าพิสัย (range) เพียง 0.269 dB ส่วนระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 8 ช่องสัญญาณ มีค่า penalty มากที่สุดเท่ากับ 1.0699 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1544.53 nm และมีค่า penalty ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.4444 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1543.73 nm มีค่าพิสัย (range) ของค่า penalty เท่ากับ 0.6259 dB สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 10 ช่องสัญญาณ มีค่า penalty มากที่สุดเท่ากับ 2.1337 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1549.32 nm และมีค่า penalty ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.1585 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1543.73 nm มีค่าพิสัย (range) ของค่า penalty เท่ากับ 0.9752 dB และระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ จะมีค่า penalty มากที่สุดเท่ากับ 5.9432 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1539.77 nm และมีค่า penalty ต่ำที่สุดเท่ากับ

1.7846 dB ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1540.56 nm ซึ่งมีค่าพิสัย (range) ของค่า penalty สูงถึง 4.1586 dB

จากผลการทดสอบข้างต้น ทำให้ทราบว่าในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณมาก OPC จะมีค่า penalty สูงกว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณน้อย นอกจากนี้ความแตกต่างของค่า penalty ที่แต่ละความยาวคลื่นในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวนมาก ก็จะมีค่าความแตกต่างมากตามไปด้วย เนื่องจากว่าในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากนั้น จะมีจำนวนสัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นมากกว่าเพราะมีสัญญาณที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ได้หลายกรณีมากกว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณน้อย ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่ไม่ต้องการกลายเป็นสัญญาณรบกวนและก่อให้เกิดอัตราบิดผิดพลาดกับสัญญาณแสงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวนช่องสัญญาณมาก เช่น 15 ช่องสัญญาณ จะมีค่า Q factor ที่ต่ำกว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณน้อย เช่น 4 ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 4.4



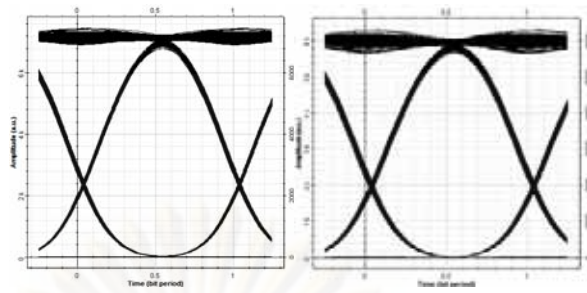
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q factor กับความยาวคลื่นของสัญญาณแสง เมื่อสื่อสารสัญญาณแบบ WDM ด้วยจำนวนสัญญาณแสง 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากจะมีค่า Q factor ต่ำกว่าระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลจากรูปที่ 4.3 คือระบบใดที่มีค่า penalty สูง ก็จะมีค่า Q factor ต่ำ ในทางกลับกันระบบใดที่มีค่า penalty ต่ำ ก็จะมีค่า Q factor สูง โดยจากผลการทดสอบ ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวน 4 ช่องสัญญาณจะมีค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 67.2660 และมีค่า 67.2660 น้อยที่สุดเท่ากับ 65.9351 ส่วนค่า Q factor มากที่สุดกับน้อยที่สุด เท่ากับ 66.6599 กับ 60.5086 สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณ 8 ช่องสัญญาณ ค่า Q factor มากที่สุดกับน้อยที่สุด เท่ากับ 61.4590 กับ 55.6850 สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM 10 ช่องสัญญาณ และสำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ จะมีค่า Q factor มากที่สุดกับน้อยที่สุดเท่ากับ 56.9967 กับ 35.9932 ซึ่งภาพ eye pattern ของช่องสัญญาณที่มีค่า Q factor มากที่สุดและน้อยที่สุด สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.5

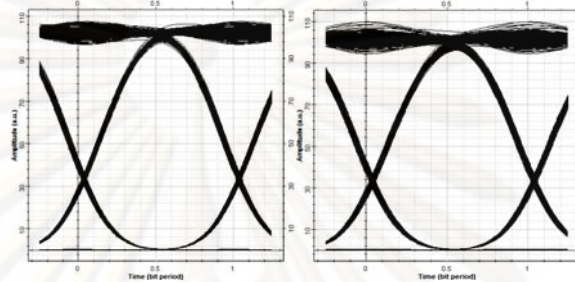


ศูนย์วิทยทรัพยากร

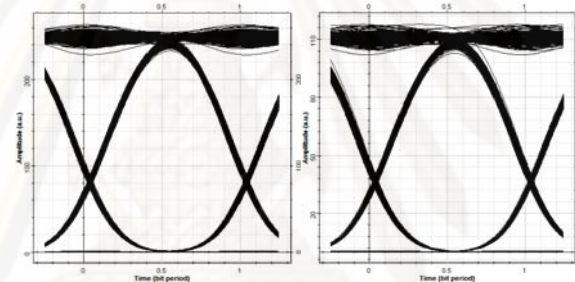
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



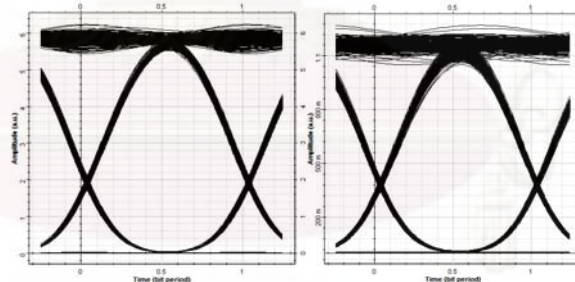
(a)



(b)



(c)



(d)

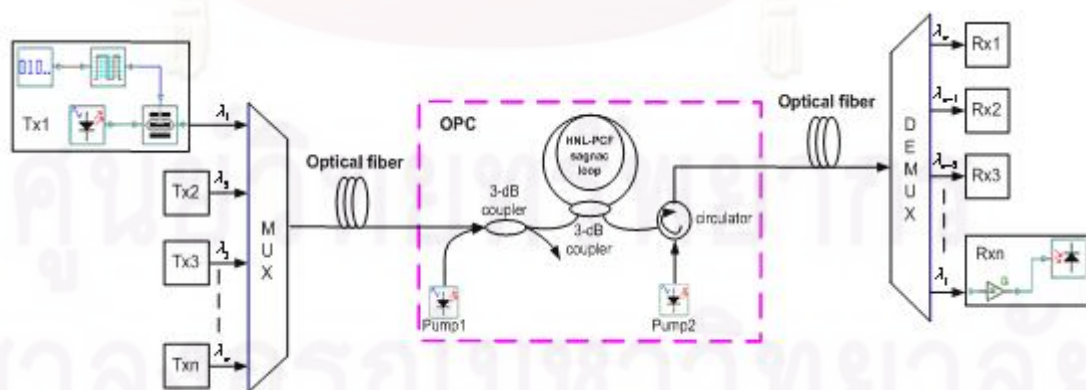
รูปที่ 4.5 ภาพ eye pattern ของช่องสัญญาณที่มีค่า Q factor มากที่สุดและน้อยที่สุด สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน (a) 4 ช่องสัญญาณ (b) 8 ช่องสัญญาณ (c) 10 ช่องสัญญาณ และ (d) 15 ช่องสัญญาณ

จากการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทดสอบส่งสัญญาณแบบ WDM ผ่านระบบสื่อสารสัญญาณเส้นใยแสงที่มีเครื่องสังยุคเฟสแสงสำหรับทำหน้าที่ชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงพบว่า จำนวนสัญญาณมากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation จำนวน 1 ครั้งแล้วทำให้ค่า Q factor ของทุกช่องสัญญาณมีค่ามากกว่า 7 เท่ากับ 15 ช่องสัญญาณ ดังนั้นใน

หัวข้อถัดไป จะนำเสนอระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่ประกอบด้วย OPC จำนวน 1 ตัว แบบมีระยะทาง เพื่อจะหาค่า Q factor ของสัญญาณแสงที่ผ่านระยะทางต่าง ๆ ก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง

4.4 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ OPC ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ระยะทางต่าง ๆ

จากที่ทดสอบการสื่อสารสัญญาณแบบ WDM ผ่าน OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จนได้จำนวนช่องสัญญาณที่มากที่สุดเท่ากับ 15 ช่องสัญญาณ ที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation และวัดค่า Q factor ของสัญญาณคอนจูเกตได้มากกว่า 7 ที่ทุกช่องสัญญาณมาแล้วนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอแบบจำลองและ OPC ที่ออกแบบไว้มาวัดสมรรถนะที่แท้จริงจากการใช้ในการสื่อสารสัญญาณ WDM นั่นคือ การทดสอบโดยวาง OPC ไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะทางส่งสัญญาณทั้งหมด เพื่อทำหน้าที่ชดเชยปัญหาดีสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ที่ทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนไป ซึ่งจะวัดสมรรถนะของ OPC ที่วางอยู่ในระบบและหาระยะทางยาวที่สุดแต่ยังคงให้ค่า Q factor ของสัญญาณคอนจูเกตมากกว่า 7 ดังนั้นในการจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้จะทดสอบโดยการเพิ่มระยะทางยาวขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งให้ค่า Q factor ที่น้อยกว่า 7 โดยเส้นใยแสงที่ใช้สำหรับการสื่อสารสัญญาณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นเส้นใยแสงชนิด G.652 (standard single mode fiber) ที่มีอัตราการลดทอน (attenuation) เท่ากับ 0.2 dB/km ค่าดีสเพอร์ชัน (dispersion) เท่ากับ 16.75 ps/nm/km ค่าความชันดีสเพอร์ชัน (dispersion slope) เท่ากับ 0.075 ps/nm²/km และค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (nonlinear coefficient) เท่ากับ 1.3 W⁻¹km⁻¹ ซึ่งโครงสร้างของการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.6

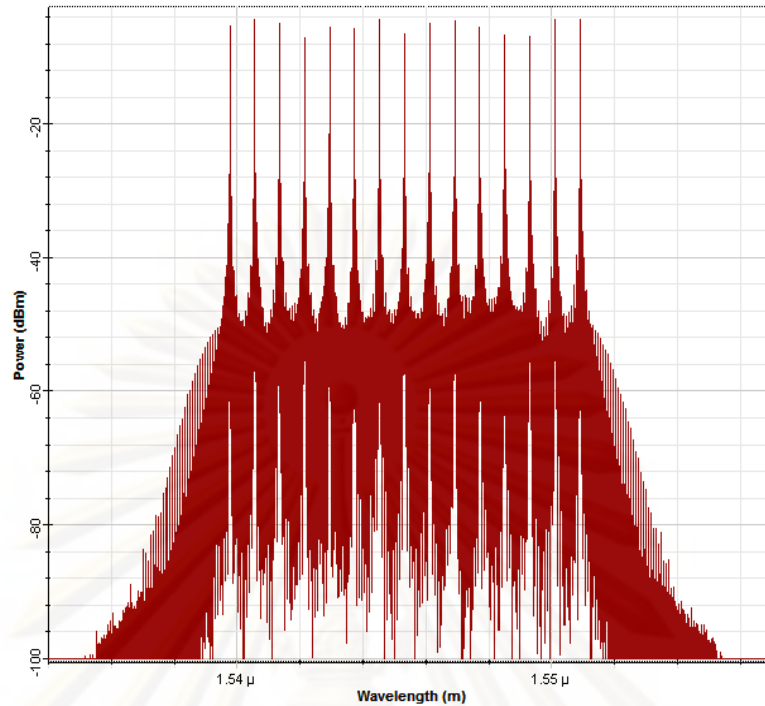


รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีระยะทาง

จากรูปที่ 4.6 เมื่อสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันถูกลอยออกมาจากตัวส่งสัญญาณแสง (transmitter) จะถูกรวมเข้าด้วยกันด้วยตัวรวมสัญญาณทางแสง (Multiplexer) จากนั้นสัญญาณแสงจะเดินทางผ่านเส้นใยแสงชุดที่ 1 เพื่อไปยัง OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ เพื่อสร้างสัญญาณคอนจุงเกตขึ้นมาสอดเซย์ปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง จากนั้นสัญญาณคอนจุงเกตจะเดินทางจาก OPC ผ่านเส้นใยแสงชุดที่ 2 ไปยังตัวแยกสัญญาณแสง (demultiplexer) ที่อยู่ปลายทาง เพื่อให้สัญญาณคอนจุงเกตที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันถูกแยกออกเป็นสัญญาณคอนจุงเกตเดี่ยวที่มีความยาวคลื่นเท่าเดิมกับสัญญาณแสงนั้น ๆ ที่ถูกลอยออกมาจากต้นทางเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแสง (receiver) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปสัญญาณคอนจุงเกตเป็นสัญญาณไฟฟ้า ก่อนจะทำการวัดค่าของความผิดเพี้ยนข้อมูล ทั้งนี้เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงชุดที่ 1 จะเกิดปัญหาดีสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ ทำให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ดังนั้นเมื่อสัญญาณคอนจุงเกตจาก OPC ที่มีคุณสมบัติของค่าดีสเพอร์ชันและค่า nonlinearity ตรงข้ามกับสัญญาณแสง เดินทางผ่านเส้นใยแสงชุดที่ 2 จึงทำหน้าที่ชดเชยปัญหาดีสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ ซึ่งการชดเชยปัญหานี้จะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์แบบมากที่สุดเมื่อเส้นใยแสงชุดที่ 1 และ 2 มีระยะทางและคุณสมบัติที่เหมือนกัน หรือ OPC ตั้งอยู่กึ่งกลางของระบบทั้งหมด โดยในการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาระยะทางที่สามารถสื่อสัญญาณได้ไกลที่สุด จะกำหนดให้ 1 ช่วงระหว่างตัวขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) มีระยะทางเท่ากับ 50 km ดังนั้นการทดสอบจะเริ่มต้นที่ระยะทาง 100 km จากนั้นจะเพิ่มระยะทางขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า Q factor ที่วัดได้จากสัญญาณคอนจุงเกต จะมีสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 7 ทั้งนี้จะทำการทดสอบการสื่อสัญญาณแบบ WDM ผ่าน OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 15 ช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นจำนวนช่องสัญญาณที่มากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

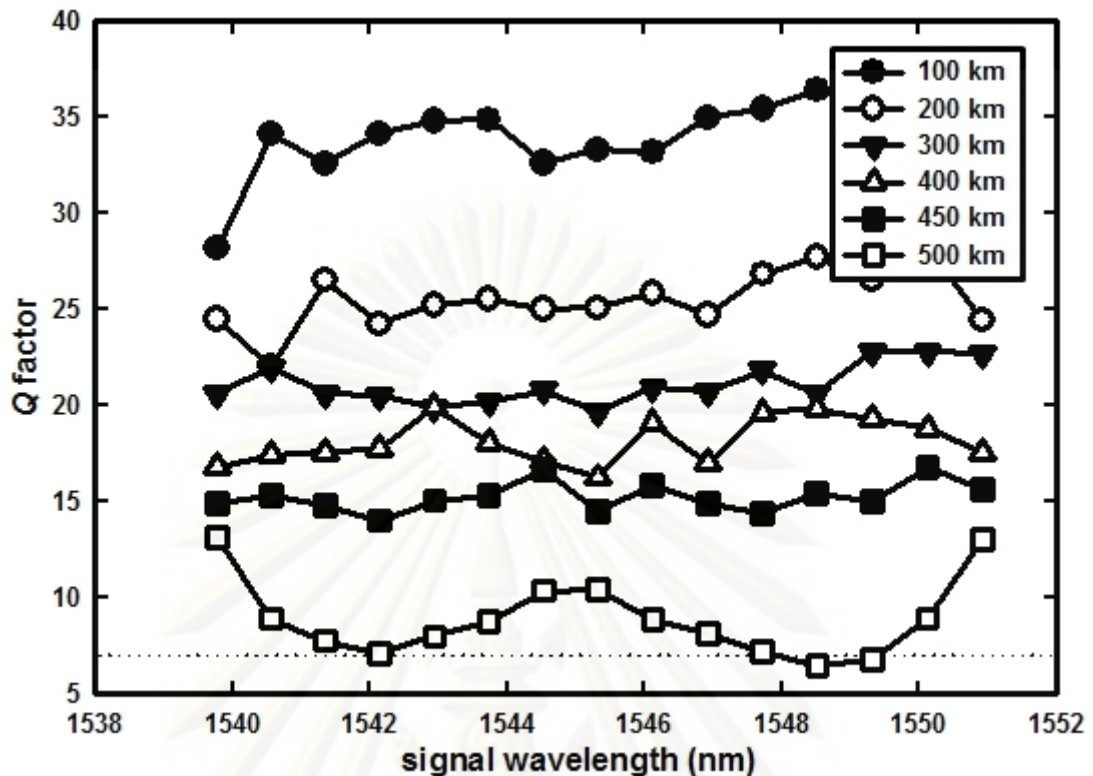
สำหรับระบบสื่อสัญญาณ WDM ที่มีจำนวน 15 ช่องสัญญาณ จะประกอบไปด้วยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1539.77 nm 1540.56 nm 1541.35 nm 1542.14 nm 1542.94 nm 1543.73 nm 1544.53 nm 1545.32 nm 1546.12 nm 1546.92 nm 1547.72 nm 1548.51 nm 1549.32 nm 1550.12 nm และ 1550.92 nm โดยจะมีสเปคตรัมของสัญญาณแสงทั้ง 15 ความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



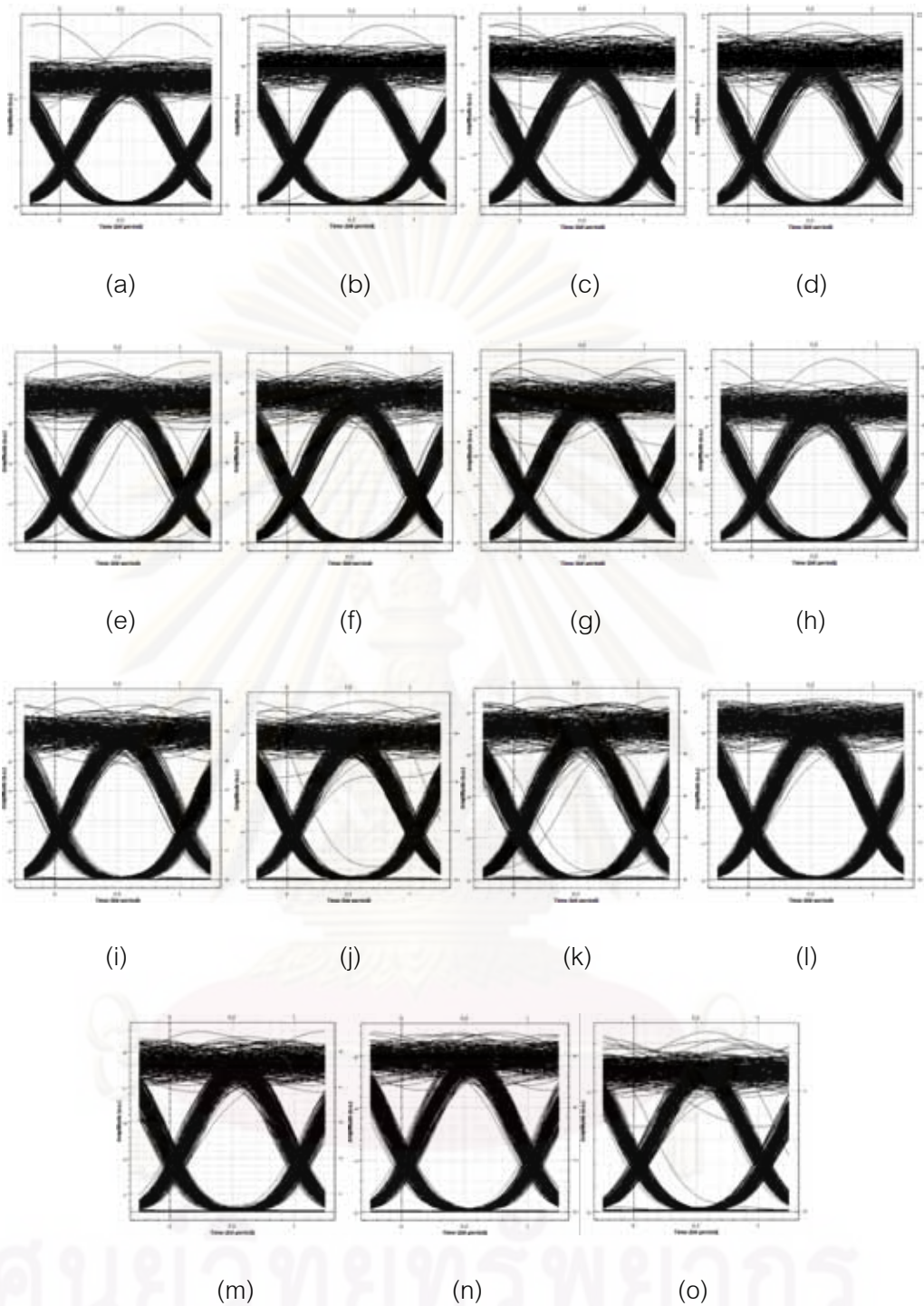
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของสัญญาณ WDM จำนวน 15 ความยาวคลื่น

เมื่อป้อนสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณที่มีสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.7 เข้าสู่ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย OPC โดยอาศัยสัญญาณบีบที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1522.56 nm และ 1569.59 nm จะได้ค่า Q factor ที่แต่ละความยาวคลื่นของสัญญาณแสงในการสื่อสารสัญญาณผ่านระยะทาง 100 km 200 km 300 km 400 km 450 km และ 500 km ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่า Q factor ที่แต่ละความยาวคลื่นของการสื่อสารสัญญาณผ่านระบบที่มี OPC และเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 100 km 200 km 300 km 400 km 450 km และ 500 km

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณเดินทางผ่านระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 100 km ถึง 450 km สัญญาณแสงสามารถผ่านการทำ phase conjugation แล้วมีค่า Q factor ได้มากกว่า 7 ครอบคลุมความยาวคลื่น แต่เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านระบบที่มีระยะทางทั้งหมด 500 km ซึ่งหมายถึงการที่สัญญาณ WDM เดินทางออกจากตัวส่งสัญญาณแสง ผ่านเส้นใยแสง 250 km เข้าสู่ OPC เพื่อกำเนิดสัญญาณคอนจูเกต จากนั้นสัญญาณคอนจูเกตจะเดินทางผ่านเส้นใยแสงอีก 250 km เข้าสู่ตัวรับสัญญาณแสงปลายทาง รวมระยะทางทั้งหมด 500 km สัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณไม่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ได้ เนื่องจากสัญญาณแสงจำนวน 2 ความยาวคลื่น คือ 1548.51 nm และ 1549.32 nm ซึ่งมีค่า Q factor เท่ากับ 6.43483 และ 6.74255 ดังนั้น ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ผ่านเส้นใยแสงสามารถทำการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงด้วยเครื่องสังยุคเฟสแสงแบบไม่เลือนแบนดิวิตีจำนวน 1 เครื่อง ได้ด้วยจำนวน 15 ช่องสัญญาณในระบบที่มีเส้นใยแสงยาว 450 km โดยสัญญาณแสงที่มีค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 16.7347 ที่ความยาวคลื่น 1550.12 nm และสัญญาณแสงที่มีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 14.0067 ที่ความยาวคลื่น 1542.14 nm ทั้งนี้ภาพ eye pattern ของทั้ง 15 ช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ภาพ eye pattern ของทั้ง 15 ช่องสัญญาณ ที่ผ่านเส้นใยแสงระยะทาง 450 km (a) ความยาวคลื่น 1539.77 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.8688 (b) ความยาวคลื่น 1540.56 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.3239 (c) ความยาวคลื่น 1541.35 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.8071 (d) ความยาวคลื่น 1542.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.0067 (e) ความยาวคลื่น 1542.94 มีค่า Q factor เท่ากับ 145.0418 (f) ความยาวคลื่น 1543.73 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.2823 (g) ความยาวคลื่น 1544.53 มีค่า Q factor เท่ากับ 16.6908 (h) ความยาวคลื่น 1545.32 มีค่า Q factor

เท่ากับ 14.49 (i) ความยาวคลื่น 1546.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.8564 (j) ความยาวคลื่น 1546.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.8773 (k) ความยาวคลื่น 1547.72 มีค่า Q factor เท่ากับ 14.3332 (l) ความยาวคลื่น 1548.51 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.4004 (m) ความยาวคลื่น 1549.32 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.0012 (n) ความยาวคลื่น 1550.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 16.7347 (o) ความยาวคลื่น 1550.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 15.6384

จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่าน ๆ มา ทำให้ได้ OPC ชนิดไม่เลือนแบนด์วิดท์ที่มีสมรรถนะดีที่สุด ซึ่งมีสัญญาณแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ สามารถผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 450 km และผ่านการ phase conjugation แล้ววัดค่า Q factor ของสัญญาณคอนจูเกตที่ปลายทางมีค่ามากกว่า 7 ดังนั้นในบรอดไป จะเป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่ประกอบไปด้วย OPC ชนิดไม่เลือนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัว เพื่อให้สัญญาณคอนจูเกตที่เข้าสู่เครื่องรับสัญญาณแสงปลายทางมีความยาวคลื่นตรงกันกับสัญญาณแสงที่ปล่อยออกจากเครื่องส่งสัญญาณแสงต้นทางและสามารถชดเชยปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาดีสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ได้อย่างสมบูรณ์แบบที่สุด

บทที่ 5

การทดสอบ OPC ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM

วิธีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจากปัญหาดีสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ด้วยเครื่องส่งยุคเฟสแสงหรือ OPC นั้น เมื่อนำมาใช้กับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM แล้ว จะทำให้ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free) เปลี่ยนคุณสมบัติของการเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงเป็นการเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่ช่วงแบนด์วิดท์เดียวกันกับสัญญาณแสงแทน ด้วยเหตุนี้ทำให้ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นเปลี่ยนเป็น OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ (bandwidth-shift-free) สำหรับการสื่อสารสัญญาณแบบ WDM ดังที่กล่าวในบทที่ 4

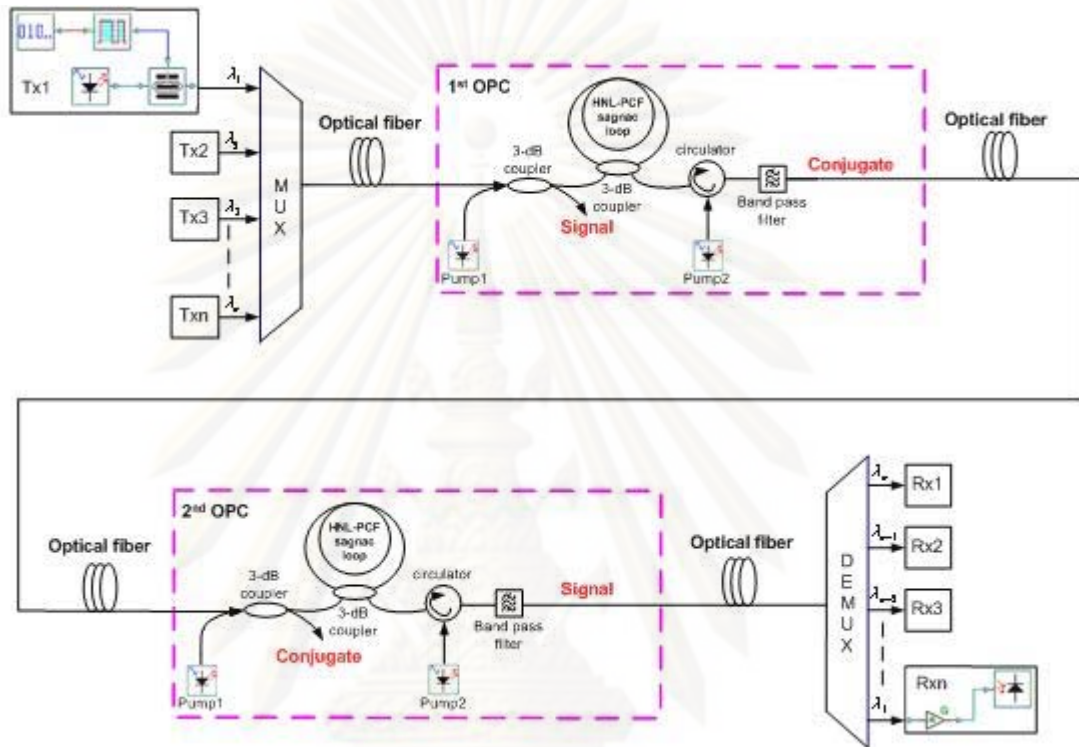
อย่างไรก็ตาม ถ้าหากสัญญาณแสงที่ส่งออกจากเครื่องส่งสัญญาณแสงต้นทางกับสัญญาณคอนจูเกตที่ถูกรวบรวมด้วยเครื่องรับสัญญาณแสงปลายทางมีความยาวคลื่นที่ตรงกัน ก็จะสามารถลดความยุ่งยากและซับซ้อนในการตรวจสอบข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณแสงจำนวนหลายความยาวคลื่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำ OPC ที่ศึกษามาจากบทที่ 3 และ 4 มาใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM จำนวน 2 เครื่อง เพื่อให้สัญญาณคอนจูเกตปลายทางมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงต้นทาง กลายเป็นระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีการชดเชยความผิดเพี้ยนด้วยวิธีการใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นอย่างสมบูรณ์

5.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่อาศัยเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 เครื่อง

จากการทดสอบแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ในบทที่ 4 ทำให้ทราบว่าหากนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นมาใช้กับสัญญาณแบบ WDM จะทำให้ OPC นั้นเปลี่ยนความสามารถเป็น OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์แทน ทั้งนี้ความยาวคลื่นยังคงสลับตำแหน่งกันอยู่คือสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ใกล้สัญญาณปั๊มคลื่นที่สองจะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่มีความยาวคลื่นอยู่ใกล้สัญญาณปั๊มคลื่นที่หนึ่ง ส่วนสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวกันกับที่มีสัญญาณคอนจูเกตที่มาจากสัญญาณปั๊มคลื่นที่หนึ่ง ก็จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้นที่สัญญาณแสงที่อยู่ใกล้กับสัญญาณปั๊มคลื่นที่สองเช่นกัน

สำหรับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM หากสัญญาณแสงจากต้นทางและสัญญาณคอนจูเกตที่ปลายทางมีความยาวคลื่นเดียวกันแล้ว จะทำให้ความซับซ้อนของการตรวจสอบข้อมูลลดลงได้อย่างมาก ประเด็นนี้จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับปัจจุบันที่ระบบการสื่อสารผ่านเส้น

ใยแสงได้มีการสื่อสารสัญญาณแบบ WDM เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะออกแบบโครงสร้างของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ไม่เลื่อนความยาวคลื่นเมื่ออาศัย OPC ในการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยการนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัวมาประกอบเข้าไปในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ซึ่งจะมีโครงสร้างของระบบดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่อาศัยเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัว

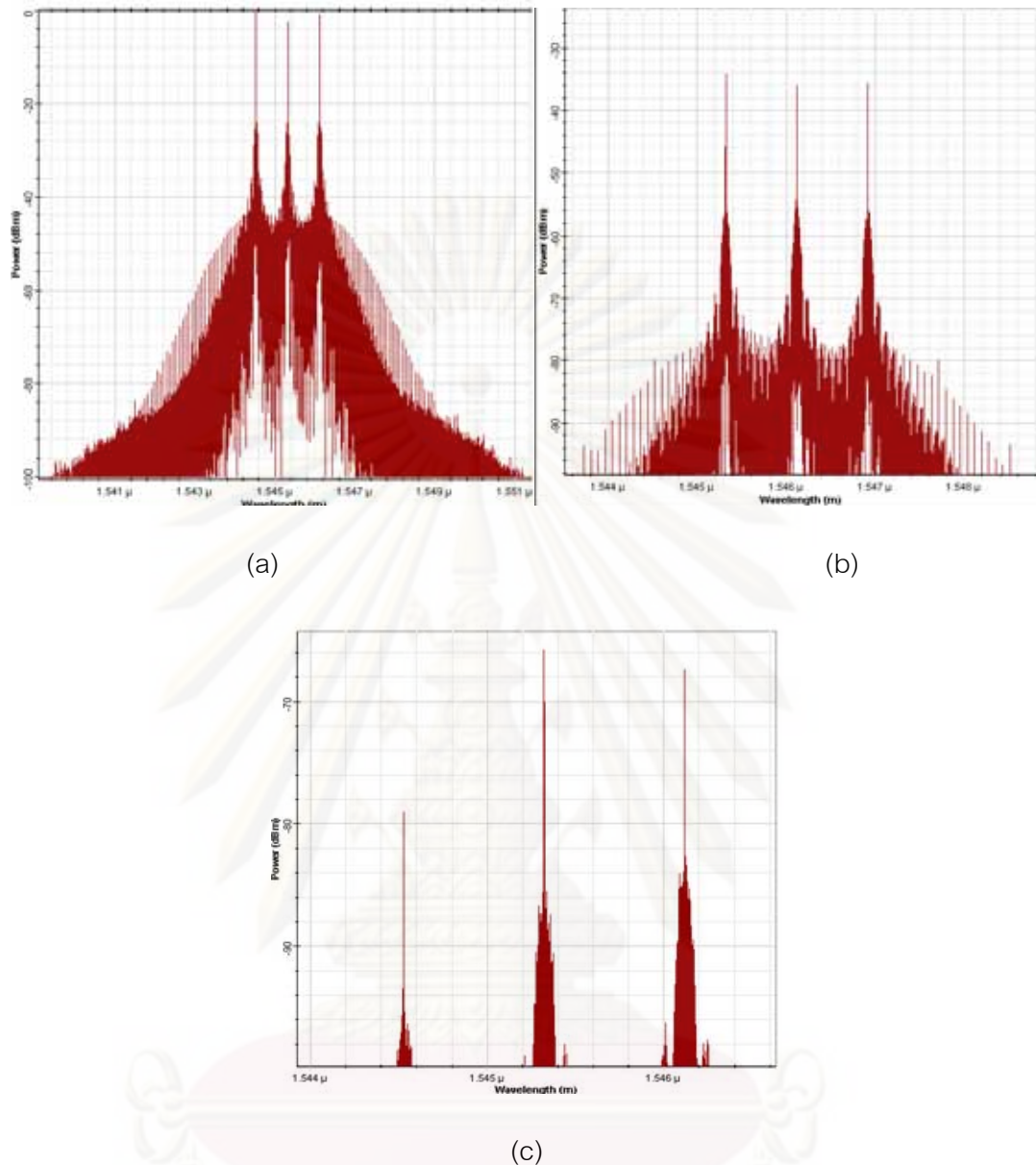
จากรูปที่ 5.1 สัญญาณแสงแบบ WDM ที่ถูกป้อนออกมาจากตัวส่งสัญญาณแสง จะผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทางหนึ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น จากนั้นสัญญาณแสงดังกล่าวจะผ่านเข้าสู่ OPC แล้วเกิดปรากฏการณ์ FWM ทำให้มีสัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้น หากสมมติให้สัญญาณแสงแบบ WDM ประกอบไปด้วย 3 ความยาวคลื่น คือ 1544.53 nm 1545.32 nm และ 1546.12 nm และสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1545.32 nm อยู่กึ่งกลางระหว่างสัญญาณบีมทั้งสองแล้ว สัญญาณคอนจูเกตของสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1544.53 nm จะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่น 1546.12 nm ส่วนสัญญาณคอนจูเกตของสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1545.32 nm และ 1546.12 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้นที่ความยาวคลื่น 1545.32 nm และ 1544.53 nm ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณแสงจะเกิดสัญญาณคอนจูเกตสลับตำแหน่งกัน ยกเว้นสัญญาณแสงที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสัญญาณบีมทั้งสองเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้นที่จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงของตนเอง จากนั้น

สัญญาณคอนจูเกตทั้งสามจะเดินทางออกมายังพอร์ตที่ 2 ของ OPC ผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทางมากกว่าช่วงแรก 2 เท่า เพื่อให้ชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณในครั้งแรกของระยะทางและในส่วนครึ่งหลังจะก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณอีกรอบหนึ่ง เมื่อสัญญาณคอนจูเกตเดินทางผ่านเส้นใยแสงมาแล้ว จะเข้าสู่ OPC ตัวที่ 2 ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นในรอบนี้เกิดการสลับตำแหน่งของความยาวคลื่นเช่นเดียวกันกับในกรณีของ OPC ตัวที่ 2 แต่ในครั้งนี้นี้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นใหม่จากสัญญาณคอนจูเกตเดิมจะกลับมามีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงที่ต้นทางอีกครั้ง คือ สัญญาณคอนจูเกตเดิมที่มีความยาวคลื่น 1546.12 nm จะเกิดสัญญาณคอนจูเกตใหม่ขึ้นที่มีความยาวคลื่น 1544.53 nm ซึ่งตรงกันกับสัญญาณแสงเมื่อเริ่มต้นก่อนเข้า OPC ตัวที่ 1 ส่วนสัญญาณที่เหลืออีก 2 สัญญาณคือสัญญาณคอนจูเกตเดิมที่มีความยาวคลื่น 1545.32 nm และ 1544.53 nm ก็จะมีสัญญาณคอนจูเกตใหม่ที่มีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงต้นทางเช่นเดียวกันที่มีความยาวคลื่น 1545.32 nm และ 1545.12 nm ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณคอนจูเกตใหม่จะเดินทางผ่านเส้นใยแสงระยะสุดท้ายเพื่อชดเชยปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากครึ่งหลังของเส้นใยแสงก่อนเข้าสู่ OPC ตัวที่ 2 ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่จะถูกตรวจจับด้วยตัวรับสัญญาณแสงปลายทางสามารถตรวจสอบข้อมูลได้สะดวกมากขึ้นจากการที่สัญญาณคอนจูเกตมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสง ดังสเปกตรัมของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC ตัวที่ 1 สเปกตรัมของสัญญาณคอนจูเกตหลังจากออกจากพอร์ตที่ 2 ของ OPC ตัวที่ 1 และสเปกตรัมของสัญญาณแสงหลังจากออกจากพอร์ตที่ 2 ของ OPC ตัวที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.2



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 สเปกตรัมของสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ในระบบ (a) สเปกตรัมของสัญญาณแสงก่อนเข้า OPC ตัวที่ 1 (b) สเปกตรัมของสัญญาณคอนจูเกตหลังจากพอร์ตที่ 2 ของ OPC ตัวที่ 1 และ (c) สเปกตรัมของสัญญาณคอนจูเกตใหม่หลังจากพอร์ตที่ 2 ของ OPC ตัวที่ 2

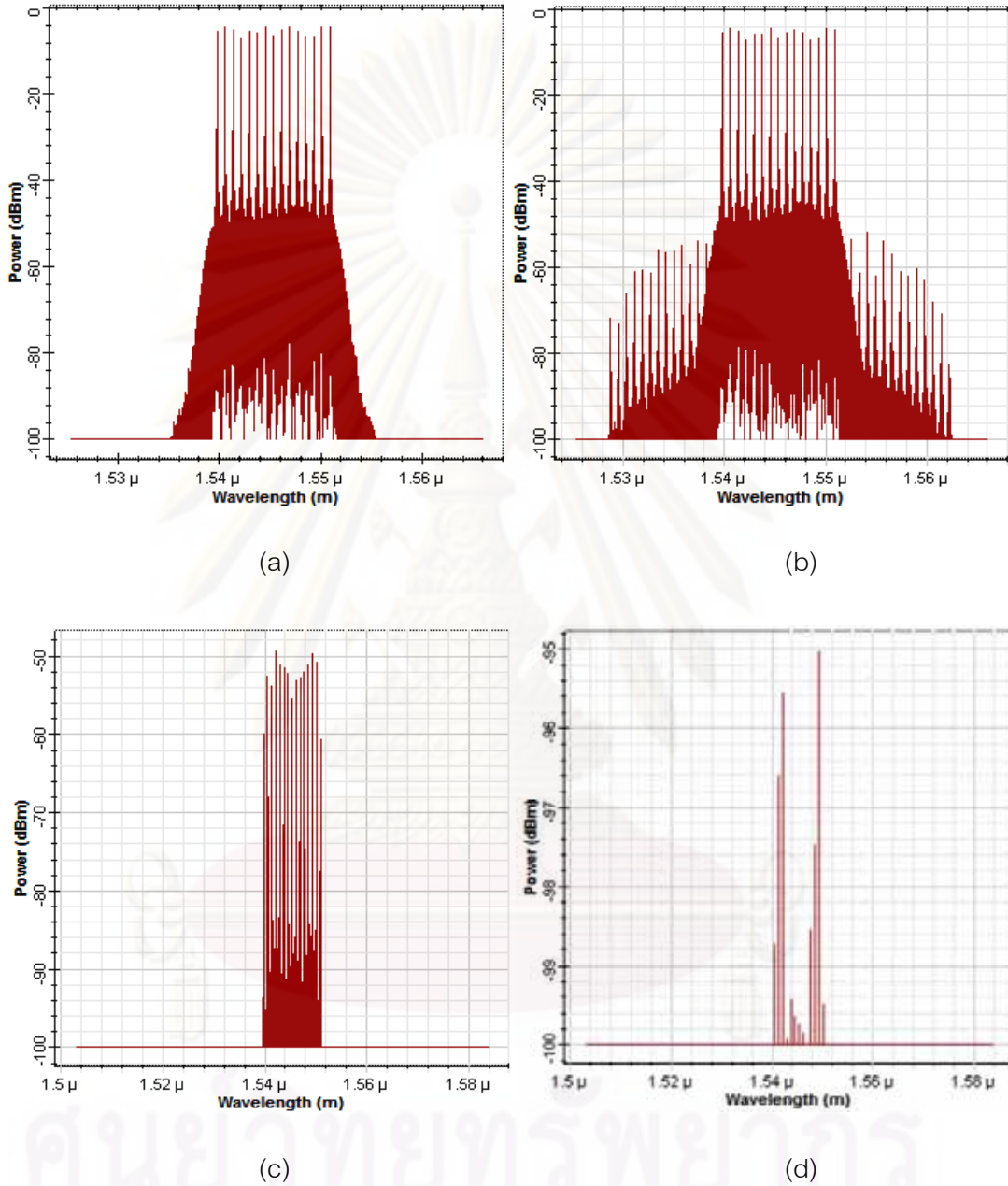
จากรูปที่ 5.2 ทำให้ทราบว่าเมื่อนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัวมาประกอบลงในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM แล้วนั้น สัญญาณคอนจูเกตที่ปลายทางจะกลับมามีความยาวคลื่นเดียวกับสัญญาณแสงที่ต้นทาง ทำให้ได้ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่อาศัย OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นได้เป็นผลสำเร็จ แต่อย่างไรก็ตามการตรวจวัดว่าระบบที่กล่าวมาข้างต้นจะใช้งานได้หรือไม่ สามารถให้สัญญาณผ่านการทำ phase conjugation

ไปยังปลายทางได้ก็ช่องสัญญาณ ด้วยระยะทางไกลเท่าไร และมีความอัตราผิดพลาด (BER) ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

5.2 ผลของระยะทางต่อการทำ phase conjugation ของ OPC แบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ จำนวน 2 ตัว

จากที่ทราบแล้วว่าหากใช้ OPC จำนวน 2 ตัวเพื่อชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM แล้ว สัญญาณคอนจูเกตก่อนเข้าตัวรับสัญญาณแสงจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงที่ออกจากตัวส่งสัญญาณแสง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองระบบดังกล่าวเพื่อหาจำนวนช่องสัญญาณมากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation แล้วมีค่า Q factor ที่มากกว่า 7 ได้ แต่จากบทที่ 4 ทำให้ทราบว่าจำนวนช่องสัญญาณมากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation หนึ่งครั้งจาก OPC จำนวนหนึ่งตัวได้เป็นผลสำเร็จมีค่าเท่ากับ 15 ช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถผ่านระยะทาง 450 km ได้เป็นผลสำเร็จ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเริ่มการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากบทที่ 4 จำนวน 2 ชุดมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งจะกำหนดให้มีจำนวนช่องสัญญาณที่เท่ากับบทที่ 4 คือ 15 ช่องสัญญาณ และระยะทางทั้งหมดของระบบที่เท่ากับ 2 เท่าของระยะทางมากที่สุดที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากบทที่ 4 ซึ่งในบทที่ 4 ระยะทางทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงที่เท่า ๆ กัน เช่น ในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทางทั้งหมด 400 km เส้นใยแสงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงของสัญญาณก่อนเข้า OPC และช่วงที่สองเป็นช่วงสัญญาณหลังออกจาก OPC อย่างละ 200 km แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบทที่ 5 จะเป็นดังโครงสร้างในรูปที่ 5.1 ซึ่งระยะทางทั้งหมดของระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงระหว่างตัวส่งสัญญาณแสงกับ OPC ตัวที่หนึ่ง ช่วงระหว่าง OPC ตัวที่หนึ่งและ OPC ตัวที่สอง และช่วงระหว่าง OPC ตัวที่สองกับตัวรับสัญญาณแสง โดยช่วงแรกและช่วงสุดท้ายจะมีระยะทางเท่ากันที่ 200 km ส่วนช่วงตรงกลางจะมีระยะทางเป็น 2 เท่าของช่วงแรกและช่วงสุดท้าย ซึ่งจะมีระยะทางเท่ากับ 400 km รวมทั้ง 3 ช่วงเป็นระยะทางทั้งหมด 800 km ซึ่งเป็น 2 เท่าของระยะทางทั้งหมดจากบทที่ 4 โดยเหตุผลที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบทนี้ต้องแบ่งระยะทางทั้งหมดออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก: ช่วงกลาง: ช่วงสุดท้าย ด้วยอัตราส่วน 1:2:1 เนื่องจากว่าสัญญาณแสงที่เกิดการผิดเพี้ยนเนื่องจากการเดินทางผ่านระยะทางช่วงที่หนึ่งจะถูกชดเชยด้วยระยะทางในส่วนครึ่งแรกของช่วงตรงกลาง จากนั้นส่วนครึ่งหลังของช่วงตรงกลางจะทำให้สัญญาณคอนจูเกตเกิดความผิดเพี้ยนเพื่อที่จะได้ถูกชดเชยอย่างสมบูรณ์ด้วยระยะทางช่วงสุดท้ายก่อนเข้าตัวรับสัญญาณแสงที่อยู่ปลายทาง สเปคตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกตที่ระยะทาง 200 km (ช่วงแรก) ระยะทาง 600 km (ช่วงตรง

กลาง) และ 800 km (ช่วงสุดท้าย) ของสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.3

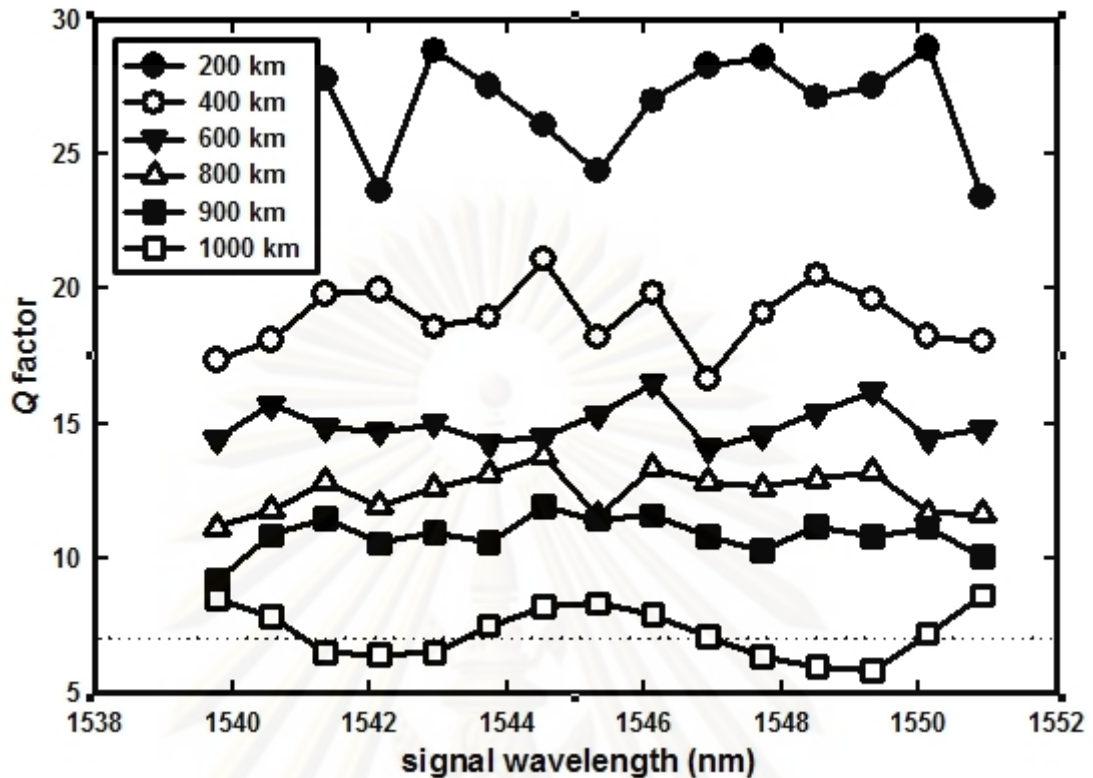


รูปที่ 5.3 สเปกตรัมของสัญญาณแสงและสัญญาณคอนจูเกตที่ระยะทาง (a) 0 km (b) 200 km (ช่วงแรก) (c) 600 km (ช่วงตรงกลาง) และ (d) 800 km (ช่วงสุดท้าย)

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นว่า เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสง จะมีสัญญาณเกิดขึ้นใหม่ มากมายรอบ ๆ บริเวณสัญญาณแสงทั้ง 15 ช่องสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่นั้นเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ FWM โดยจะส่งผลทำให้สัญญาณแสงเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น นอกจากนี้เมื่อ

สัญญาณแสงเดินทางผ่าน OPC แล้ว ค่ากำลังของสัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นจะมีต่ำกว่าค่ากำลังของสัญญาณแสง ดังนั้นเมื่อสัญญาณคอนจูเกตเดินทางผ่านเส้นใยแสงในช่วงตรงกลางระหว่าง OPC ตัวที่ 1 และ OPC ตัวที่ 2 แล้ว สัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นก็จะยังมีค่ากำลังสัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณคอนจูเกตมากยิ่งขึ้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อสัญญาณของระบบอย่างมากอีกด้วย จากนั้นเมื่อสัญญาณคอนจูเกตเดินทางผ่าน OPC ตัวที่ 2 เรียบร้อยแล้ว สัญญาณคอนจูเกตใหม่ที่เกิดขึ้นซึ่งก็คือสัญญาณแสงเดิมก่อนที่จะเข้าสู่ OPC 1 ก็จะมีค่ากำลังของสัญญาณที่ลดลงยิ่งขึ้นไปอีก เมื่อสัญญาณคอนจูเกตใหม่เดินทางผ่านเส้นใยแสงช่วงสุดท้ายก่อนเข้า OPC จึงได้รับผลจากปรากฏการณ์ FWM มากที่สุด และยังมีผลกระทบอันเนื่องมาจากการลดทอนของสัญญาณและค่าสัญญาณรบกวนจากเครื่องขยายสัญญาณแสงอีกด้วย

ทั้งนี้วิธีการในการหาระยะทางของสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณที่ผ่านการทำ phase conjugation ของ OPC แบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัวจะทำคล้ายกันกับการหาระยะทางของสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณที่ผ่านการทำ phase conjugation ของ OPC แบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 1 ตัวในหัวข้อที่ 4.2 โดยเริ่มต้นจากการใช้ชุดจำลองจากบทที่ 4 จำนวน 2 ชุดมาเชื่อมต่อกันและเพิ่มระยะทางของระบบให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสัญญาณไม่สามารถผ่านการทำ phase conjugation แล้วมีค่า Q factor มากกว่า 7 ได้ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของค่า Q factor ที่แต่ละความยาวคลื่นของการสื่อสารสัญญาณผ่านระยะทาง 200 km 400 km และ 600 km 800 km 900 km และ 1000 km ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของค่า Q factor ที่แต่ละความยาวคลื่นของการสื่อสารสัญญาณผ่านระบบที่มี OPC และเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 200 km 400 km 600km 800km 900 km และ 1000 km

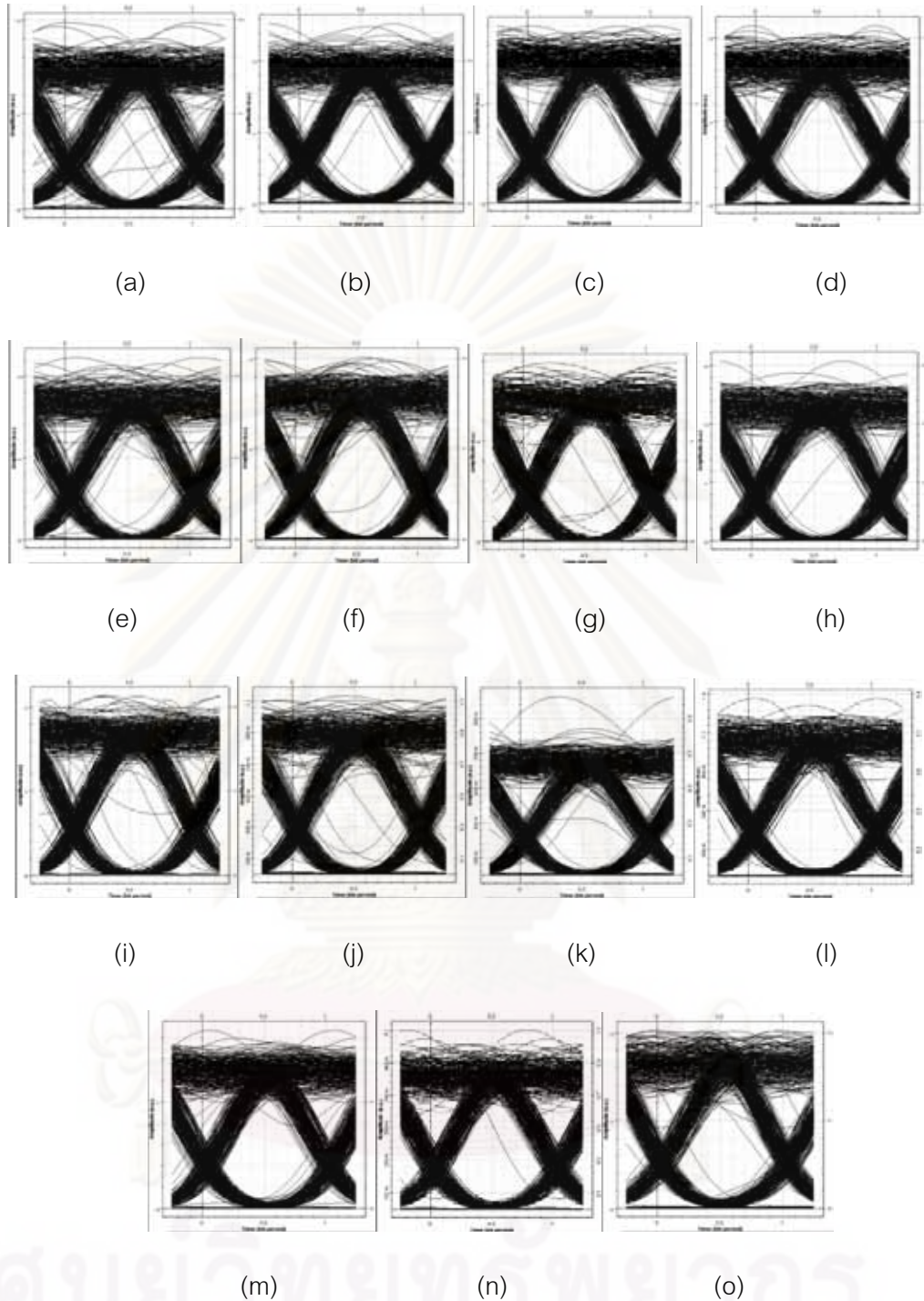
จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าเมื่อสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณเดินทางผ่านระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทาง 200 km ถึง 900 km สัญญาณแสงสามารถผ่านการทำ phase conjugation แล้วมีค่า Q factor ได้มากกว่า 7 ครอบคลุมความยาวคลื่น แต่เมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านระบบที่มีระยะทางทั้งหมด 1000 km ซึ่งหมายถึงการที่สัญญาณ WDM เดินทางออกจากตัวส่งสัญญาณแสง ผ่านเส้นใยแสง 250 km เข้าสู่ OPC เพื่อกำเนิดสัญญาณคอนจูเกต จากนั้นสัญญาณคอนจูเกตจะเดินทางผ่านเส้นใยแสงอีก 500 km แล้วเข้าสู่ OPC ตัวที่สองเพื่อกำเนิดสัญญาณแสงกลับคืนมาจากนั้นสัญญาณแสงจะเดินทางผ่านเส้นใยแสงช่วงสุดท้ายอีก 250 km เข้าสู่ตัวรับสัญญาณแสงปลายทาง รวมระยะทางทั้งหมด 1000 km สัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณไม่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ได้ เนื่องจากสัญญาณแสงจำนวน 6 ความยาวคลื่น ซึ่งมีค่า Q factor ที่ต่ำกว่า 7 ซึ่งจะทำให้มีค่าอัตราบิดผิดพลาดมากกว่าที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ผ่านเส้นใยแสงสามารถทำการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงด้วยเครื่องสังยุคเฟสแสงแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 เครื่อง ได้ด้วยจำนวน 15 ช่องสัญญาณ ในระบบที่มีเส้นใยแสงยาว 900 km ซึ่งหากเปรียบเทียบ

กับระบบสื่อสัญญาณแสงแบบ WDM ผ่านเส้นใยแสงสามารถทำการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงด้วยเครื่องสังยุคเฟสแสงแบบไม่เลื่อนเบนตัวที่จำนวน 1 เครื่องแล้ว จะพบว่า การที่ระบบมี OPC จำนวน 1 ตัว สามารถเดินทางผ่านระยะทางได้ 450 km แต่หากใช้ OPC 2 ตัว จะสามารถส่งสัญญาณได้ไกลเพิ่มขึ้นถึง 900 km ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของการใช้ OPC เพียง 1 ตัว ทั้งนี้เนื่องจากว่าความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในหนึ่งช่วง คือระหว่างตัวส่งสัญญาณกับ OPC และระหว่าง OPC กับตัวรับสัญญาณ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

ทั้งนี้สัญญาณแสงที่มีค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 11.8862 ที่ความยาวคลื่น 1544.53 nm และสัญญาณแสงที่มีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 9.1620 ที่ความยาวคลื่น 1539.77 nm ทั้งนี้ภาพ eye pattern ของทั้ง 15 ช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 ภาพ eye pattern ของทั้ง 15 ช่องสัญญาณ ที่ผ่านเส้นใยแสงระยะทาง 900 km
 (a) ความยาวคลื่น 1539.77 มีค่า Q factor เท่ากับ 9.1620 (b) ความยาวคลื่น 1540.56 มีค่า Q
 Q factor เท่ากับ 10.8451 (c) ความยาวคลื่น 1541.35 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.4653 (d) ความ
 ยาวคลื่น 1542.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.5431 (e) ความยาวคลื่น 1542.94 มีค่า Q factor
 เท่ากับ 10.9603 (f) ความยาวคลื่น 1543.73 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.5502 (g) ความยาวคลื่น
 1544.53 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.8862 (h) ความยาวคลื่น 1545.32 มีค่า Q factor เท่ากับ

11.4332 (i) ความยาวคลื่น 1546.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.586 (j) ความยาวคลื่น 1546.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.8104 (k) ความยาวคลื่น 1547.72 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.2600 (l) ความยาวคลื่น 1548.51 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.1754 (m) ความยาวคลื่น 1549.32 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.8074 (n) ความยาวคลื่น 1550.12 มีค่า Q factor เท่ากับ 11.1346 (o) ความยาวคลื่น 1550.92 มีค่า Q factor เท่ากับ 10.0467

จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่ประกอบไปด้วย OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จำนวน 2 ตัว เพื่อให้สัญญาณคอนจูเกตที่เข้าสู่เครื่องรับสัญญาณแสงปลายทางมีความยาวคลื่นตรงกันกับสัญญาณแสงที่ปล่อยออกจากเครื่องส่งสัญญาณแสงต้นทางและสามารถชดเชยปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์รี่ได้อย่างสมบูรณ์แบบที่สุด ทำให้ทราบว่าสัญญาณ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ เป็นจำนวนช่องสัญญาณที่มากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ได้ค่า Q factor มากกว่า 7 และสามารถสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีระยะทางมากที่สุดเท่ากับ 900 km ได้ ทำให้ได้การสื่อสารสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นที่ใช้วิธีสังยุคเฟสแสงโดยไม่มีการเลื่อนความยาวคลื่นได้เป็นผลสำเร็จ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลของการทดสอบระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาการกระจาย (Dispersion) และปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ด้วยวิธีสังยุคเฟสแสงโดยอาศัยเครื่องสังยุคเฟสแสง (OPC) ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free) ที่มีโครงสร้างแบบ Sagnac Interferometer จำนวน 2 ตัว เพื่อให้สัญญาณแสงปลายทางก่อนเข้าตัวรับสัญญาณแสงมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงต้นทางที่ออกมาจากตัวส่งสัญญาณแสง โดยในขั้นแรกได้ศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นและออกแบบ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวสำหรับนำมาใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่มีความยาวคลื่นแสงเดียวให้มีสมรรถนะดีที่สุด โดยอาศัยค่าชี้วัด คือ ค่า conversion efficiency (η) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้ OPC ที่ประกอบขึ้นจาก เส้นใยแสงชนิด highly nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) ที่มีความยาว 120 m สำหรับนำมาทำเป็น Sagnac loop อีกทั้งสัญญาณป้อนทั้งสองจะอยู่ห่างกัน 2.4 nm หรืออยู่ห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 1.2 nm เท่า ๆ กัน ค่ากำลังของสัญญาณป้อนทั้งสองเท่ากับ 20 dBm และค่ากำลังของสัญญาณแสงเท่ากับ 0 dBm

หลังจากที่ได้ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบความยาวคลื่นเดี่ยวแล้ว เราจะนำ OPC ดังกล่าวมาใช้กับระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ที่มีจำนวนความยาวคลื่นตั้งแต่ 4 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ โดยจะต้องหาค่าระยะห่างของสัญญาณป้อนทั้งสองใหม่ เนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไป แต่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงใช้ค่าเดิมเช่นเดียวกันกับ OPC ที่ใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงความยาวคลื่นเดี่ยว เมื่อทำการหาระยะห่างของสัญญาณป้อนทั้งสองใหม่จะเห็นว่าที่ระบบ WDM จำนวน 4 ช่องสัญญาณ จะต้องอาศัยสัญญาณป้อนที่มีความยาวคลื่นห่างจากสัญญาณแสงด้านละ 7.2 nm ส่วนระบบ WDM จำนวน 8 10 และ 15 ช่องสัญญาณ จะต้องอาศัยสัญญาณป้อนที่มีความยาวคลื่นห่างจากสัญญาณแสง 8.8 nm 8.0 nm และ 16.6 nm ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นมาใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM แล้ว OPC ดังกล่าวจะเปลี่ยนคุณสมบัติจากไม่เลื่อนความยาวคลื่นเป็นไม่เลื่อนแบนด์วิดท์อีกด้วย จากนั้นเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ครบแล้ว จึงนำ OPC ชนิดไม่เลื่อนแบนด์วิดท์มาใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM แบบมีระยะทางเพื่อหาระยะทางมากที่สุดที่สัญญาณสามารถผ่านการทำ phase conjugation ได้ โดยอาศัยค่าชี้วัดคือ

ค่า Q factor ที่ต้องมีค่ามากกว่า 7 หรือค่าอัตราบิดผิวดผลาดที่ต้อมมีค่าน้อยกว่า 10^{-12} ซึ่งระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ ในระบบที่มีเส้นใยแสงยาว 450 km โดยสัญญาณแสงที่มีค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 16.7347 ที่ความยาวคลื่น 1550.12 nm และสัญญาณแสงที่มีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 14.0067 ที่ความยาวคลื่น 1542.14 nm

ในขั้นตอนสุดท้าย เมื่อนำ OPC ชนิดไม่เลือนแบนด์วิดท์ จำนวน 2 ตัวมาใช้ในระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM จะทำให้สัญญาณแสงปลายทางก่อนเข้าตัวรับสัญญาณแสงมีความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณแสงต้นทางที่ออกจากตัวส่งสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณ โดยใช้ OPC ที่มีค่าพารามิเตอร์เท่ากับกับระบบสื่อสัญญาณแสงแบบ WDM ที่ใช้ OPC เพียงตัวเดียว โดยจะได้จำนวนช่องสัญญาณมากที่สุดที่สามารถผ่านการทำ phase conjugation ผ่าน OPC จำนวน 2 ตัวได้ คือ 15 ช่องสัญญาณ ที่วิ่งผ่านเส้นใยแสงระยะทาง 900 km ได้ ซึ่งผลจากค่าที่วัดสามารถแสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวสามารถชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากปัญหาดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์รี่ได้เป็นผลสำเร็จ โดยทั้งนี้สัญญาณแสงที่มีค่า Q factor มากที่สุดเท่ากับ 11.8862 ที่ความยาวคลื่น 1544.53 nm และสัญญาณแสงที่มีค่า Q factor น้อยที่สุดเท่ากับ 9.1620 ที่ความยาวคลื่น 1539.77 nm

ดังนั้นการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงแบบ WDM ด้วยวิธีการสังยุคเฟสแสงด้วยเครื่องสังยุคเฟสแสงจำนวน 2 ตัว สามารถทำในระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM จำนวน 15 ช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s ที่มีระยะทาง 900 km ได้เป็นผลสำเร็จ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขยายขอบเขตในการพิจารณาถึงอัตราบิตข้อมูล 40 Gb/s

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดสอบระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงด้วย OPC ชนิดไม่เลือนแบนด์วิดท์ ที่มีอัตราบิตข้อมูล 10 Gb/s เท่านั้น ซึ่งในอนาคตอันใกล้ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงจะพัฒนามากขึ้น จนทำให้ความต้องการใช้ข้อมูลเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยขั้นต่อไปควรเพิ่มการออกแบบ OPC และนำมาทดสอบในระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีอัตราบิตข้อมูล 40 Gb/s

2. การเพิ่มระยะทางและจำนวนช่องสัญญาณในการส่งสัญญาณ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดสอบระบบระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบ WDM ที่มีการชดเชยความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงด้วย OPC ชนิดไม่เลือนแบนด์วิดท์ที่จำนวนช่องสัญญาณมากที่สุดเท่ากับ 15 ช่องสัญญาณผ่านระยะทาง 900 km เนื่องจากปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างสูงจากปัญหาการใช้เครื่องขยายสัญญาณ

แสงแบบ EDFA ดังนั้นหากทำการเปลี่ยนชนิดของตัวขยายสัญญาณแสงเป็นแบบ Distributed Raman Amplifier (DRA) แทน จะทำให้สัญญาณรบกวนลดน้อยลงและสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของสัญญาณที่ภาครับของระบบให้สามารถกระจายกำลังสัญญาณก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสง และหลังผ่านเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เป็นสมมาตรกัน ทำให้ลดผลของ Dispersion และ Kerr effect ได้มากขึ้น ค่าผิดเพี้ยนของสัญญาณจึงลดลง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Gnauck, A.H., et al. 25.6-Tb/s WDM Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals. Journal of Lightwave Technology, 26, 1 (January 2008): 79-84.
- [2] Li, M.J. recent progress in fiber dispersion compensations. Proceedings of the 27th Europe Conference on Optical Communication, pp. 486-489. RAI Congress Centre: Amsterdam, 2001.
- [3] Jarupoom, P., et al. Dispersion Compensation Unit Placement in Long-haul Broadcast and Selective DWDM Passive Optical Networks. Proceedings of the 5th International Conference on Optical Internet (COIN 2006), Hyatt Regency Jeju: Korea, 2006.
- [4] Petruzzi, P., et al. Dispersion Compensation Using Only Fiber Bragg Gratings. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 5, 5 (September-October1999):1339-1344.
- [5] Li, B., Chu, X., and Sohraby, K. Routing and Wavelength Assignment vs. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks. IEEE Optical Communication, (August 2003).
- [6] Miyana, T. Suppression of Degradation Induced by SPM/XPM+GVD in WDM Transmission Using a bit-synchronous Intensity Modulated DPSK Signal. Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (2000), Nippon Convention Center: Japan, 2000.
- [7] Wree, C. RZ-DQPSK Format with High Spectral Efficiency and High Robustness towards Fiber Nonlinearities. Proceedings of the 28th European Conference and Exhibition on Optical Communication (2002), Copenhagen: Denmark, 2002.
- [8] Gnauck, A.H., and Winzer, P.J. Phase-Shift-Keyed transmission. Proceedings of the 5th Optical Fiber Communication Conference (2004), Los Angeles: California, 2004.
- [9] Xu, C. Comparison of Return-to-zero phase shift keying and OOK in long haul dispersion managed transmission. Proceedings of the 4th Optical Fiber Communication Conference (2003), Atlanta: Georgia, 2003.

- [10] Gnauck, A.H., Winzer, P.J., Dorrer, C., and Chandrasekhar, S. Linear and Nonlinear Performance of 42.7-Gb/s Single-Polarization RZ-DQPSK Format. IEEE Photonics Technology Letters, 18, 7 (April 2006): 883–885.
- [11] Gemikonakl, O. Analysis of a Phase-shift Technique for Inter-modulation Cancellation Proposed for 2-Carrier QPSK Systems. Proceedings of the 2nd Information and Communication Technologies (2006), Damascus: Syria, 2006.
- [12] Set, S.Y., et al. 40 Gbit/s field transmissions over standard fibre using midspan spectral inversion for dispersion compensation. Electronics Letters, 35, 7 (April 1999): 581–582.
- [13] Chowdhury, A., Raybon, G., and Essiambre, R.J. Optical Phase Conjugation for Intra-Channel Nonlinearity Compensation in 40 Gbit/s CSRZ Pseudo-Linear Systems. Electronics Letters, 40, 22 (October 2004): 1442–443.
- [14] Minzioni, P., et al. Experimental Demonstration of Nonlinearity and Dispersion Compensation in an Embedded Link by Optical Phase Conjugation. IEEE Photonics Technology Letters, 18, 9 (May 2006): 995–997.
- [15] Chowdhury, A., et al. Compensation of Intrachannel Nonlinearities in 40-Gb/s Pseudolinear Systems Using Optical-Phase Conjugation. Journal of Lightwave Technology, 23, 1 (January 2005): 172–177.
- [16] Yariv, A., Fekete, D., and Pepper, D.M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation. Optics Letters, 4, 2 (October 1979): 52–54.
- [17] Jansen, S.L., van den Borne, D., Krummrich, P.M., Spalter, S., Khoe, G.D., and de Waardt, H. Long-Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 12, 4 (July – August 2006): 505-520.
- [18] Kikuchi, K., Lorattanasane, C. Design of Highly Efficient Four-Wave Mixing Devices Using Optical Fibers. IEEE Photonics Technology Letters, 6, 8 (August 1994): 992-994.
- [19] Hedekvist, P.O., Karlsson, M., and Andrekson, P.A. Polarization Dependence and Efficiency in a Fiber Four-Wave Mixing Phase Conjugator with Orthogonal Pump Waves. IEEE Photonics Technology Letters, 8, 6 (June 1996): 776-778.

- [20] Set, S.Y., et al. Ultra-high bitrate optical phase conjugation/wavelength conversion in DSF and SOA with a novel configuration incorporating inline fibre DFB lasers. Electronics Letters, 34, 17 (1998): 1681–1683.
- [21] Feiste, U., et al. 40 Gbit/s transmission over 434 km standard fiber using polarization independent midspan spectral inversion. Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (1998), pp. 113-117, Madrid: Spain, 1998.
- [22] Mecozzi, A., et al. Optical Spectral Inversion Without Frequency Shift by Four-Wave Mixing Using Two Pumps With Orthogonal Polarization. IEEE Photonics Technology Letters, 10, 3 (March 1998): 355-357.
- [23] Herrera, J., Ramos, F., and Marti, J. Nonlinear Distortion Generated by DSF-Based Optical-Phase Conjugators in Analog Optical Systems. Journal of Lightwave Technology, 20, 9 (September 2002): 1688–1693.
- [24] Zacharopoulos, I., Tomkos, I., Syvridis, D., Girardin, F., Occhi, L., and Guekos, G. Influence of Phase Mismatch on a Spectral Inverter Based on Four-Wave Mixing in Dispersion-Shifted Fiber at 10 Gb/s. IEEE Photonics Technology Letters, 11, 4 (April 1999): 430-432.
- [25] Lim, H.C., Futami, F., and Kikuchi, K. Polarization-Independent, Wavelength-Shift-Free Optical Phase Conjugator Using a Nonlinear Fiber Sagnac Interferometer. IEEE Photonics Technology Letters, 11, 5 (May 1999): 578-580.
- [26] Lim, H.C., and Kikuchi, K. a Filter-Free Scheme for Orthogonally Pumped Polarization-Insensitive Optical Phase Conjugation of Broad-Band Optical Signals. IEEE Photonics Technology Letters, 13, 5 (May 2001): 481-483.
- [27] Lim, H.C., Futami, F., Taira, K., and Kikuchi, K. Broad-Band Mid-Span Spectral Inversion Without Wavelength Shift of 1.7-ps Optical Pulses Using a Highly Nonlinear Fiber Sagnac Interferometer. IEEE Photonics Technology Letters, 11, 11 (November 1999): 1405-1407.
- [28] Tanemura, T., Goh, C.S., Kikuchi, K., and Set, S.Y. Highly Efficient Arbitrary Wavelength Conversion Within Entire C-Band Based on Nondegenerate Fiber Four-Wave Mixing. IEEE Photonics Technology Letters, 16, 2 (February 2004): 551-553.

- [29] Tanemura, T., and Kikuchi, K. Polarization-Independent Broad-Band Wavelength Conversion Using Two-Pump Fiber Optical Parametric Amplification Without Idler Spectral Broadening. IEEE Photonics Technology Letters, 15, 11 (November 2003): 1573-1575.
- [30] Lee, J.H., Nagashima, T., Hasegawa, T., Ohara, S., Sugimoto, N., and Kikuchi, K. Four-Wave-Mixing-Based Wavelength Conversion of 40-Gb/s Nonreturn-to-Zero Signal Using 40-cm Bismuth Oxide Nonlinear Optical Fiber. IEEE Photonics Technology Letters, 17, 7 (July 2005): 1474-1476.
- [31] Lee, J.H., et al. Bismuth nonlinear fibre-based optical phase conjugator without SBS induced efficiency limitation and its application to dispersion compensation in transmission link. Electronics Letters, 42, 5 (March 2006): 298–299.
- [32] Geng, Y., Andersen, P.A., Tokle, T., Peucheret, C., and Jeppesen, P. Wavelength Conversion of a 6X40 Gb/s DPSK WDM Signal using FWM in Highly Non-linear Photonic Crystal Fiber. Proceedings of the 31th European Conference on Optical Communication (2005), pp. 205-206, Glasgow: UK, 2005.
- [33] Gnauck, A.H., Jopson, R.M., Derosier, R.M. Compensating the Compensator: A Demonstration of Nonlinearity Cancellation in a WDM System. IEEE Photonics Technology Letters, 7, 5 (May 1995): 582-584.
- [34] Agrawal, G. Nonlinear Fiber Optics (Optics and Photonics). Rochester, NY: Academic Press, 2001.
- [35] Keiser, G. Optical fiber communication 3rd ed. Singapore: McGraw Hill, 2000.
- [36] Pieper, W., et al. Nonlinearity-Insensitive Standard-Fiber Transmission Based on Optical-Phase Conjugation in a Semiconductor-Laser Amplifier. Electronics Letters, 30, (April 1994): 724-726.
- [37] Watanabe, S., and Shirasak, M. Exact Compensation for Both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation. Journal of Lightwave Technology, 14, (March 1996): 243–238.
- [38] Brener, I., et al. Cancellation of All Kerr Nonlinearities in Long Fiber Spans Using a LiNbO Phase Conjugator and Raman Amplification. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (2000), Baltimore Convention Center: Maryland, 2000.

- [39] Minzioni, P., Alberti, F., and Schiffini, A. Optimized Link Design for Nonlinearity Cancellation by Optical Phase Conjugation. IEEE Photonics Technology Letters, 16, 3 (March 2004): 813-815.
- [40] Minzioni, P., Alberti, F., and Schiffini, A. Techniques for Nonlinearity Cancellation Into Embedded Links by Optical Phase Conjugation. Journal of Lightwave Technology, 23, 8 (August 2005): 2364–2369.
- [41] Xiao, X.S., Yang, C.X., and Shum, P. Analytical Design of SPM-Limited Systems With Optical Phase Conjugation. IEEE Photonics Technology Letters, 20, 7 (April 2008): 472-474.
- [42] Song, S., Allen, C.T., Demarest, K.R., and Hui, R. Intensity-Dependent Phase-Matching Effects on Four-Wave Mixing in Optical Fibers. Journal of Lightwave Technology, 17, 11 (November 1999): 2285–2290.
- [43] of Furukawa, Non-Standard Fiber Specification Sheet, Highly Non-Linear Fiber.
- [44] Hirano, M. Highly Nonlinear Fibers and Their Applications, Optical Communications R&D Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd., 2007
- [45] Sugimoto, N., et al. Bismuth-based optical fiber with Nonlinear Coefficient of $1360 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. Proceedings of the 5th Optical Fiber Communication Conference (2004), Los Angeles: California, 2004.
- [46] Crystal fibre, Nonlinear photonic crystal fiber (NL 1550 POS1) Specification Sheet, Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber.
- [47] Lim, H.C., Futami, F., and Kikuchi, K. Novel Configuration for Polarization-Independent, Wavelength-Shift-Free Optical Phase Conjugator using a Nonlinear Fiber Sagnac Interferometer. Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'99), Baltimore: Maryland, 1999.
- [48] Corning incorporated, SMF-28e Optical Fiber Specification Sheet, Standard Single Mode Fiber (SSMF).
- [49] Mousavi, F., and Kikuchi, K. Performance Limit of Long-Distance WDM Dispersion-Managed Transmission System Using Higher Order Dispersion Compensation Fibers. IEEE Photonics Technology Letters, 11, 5 (May 1999): 608-610.
- [50] Prime Optical Fiber Corporation, Dispersion Shifted Fiber Specification Sheet, Dispersion Shifted Fiber (DSF)

[51] of Furukawa, OFS' TrueWave® RS Low Water Peak (LWP) Fiber Specification Sheet, Nonzero Dispersion Fiber (NZDF).

[52] of Furukawa, OFS' TrueWave® RS reduced dispersion slope fiber Fiber Specification Sheet, Nonzero Dispersion-shifted Fiber (NZ-DSF) G.655.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความทางวิชาการ

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

- บทความวิชาการในการประชุมวิชาการทางออปติกส์และการประยุกต์ใช้งานแห่งชาติ ครั้งที่ 5 (The 5th National Conference on Optics and Applications : NCOA-5) จัดขึ้นที่ โรงแรมเจ้าพระยาปาร์ค กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2553 ในชื่อบทความเรื่อง *WDM Transmission Systems Employing Sagnac Interferometer Based on Highly-Nonlinear Photonic Crystal Fiber for WDM C-Band-Shift-Free Optical Phase Conjugator* โดยบทความฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ใน Proceedings of the 5th National Conference on Optics and Applications (NCOA-5), Vol.1, pp. 24-28, 2553.
- บทความวิชาการในการประชุมวิชาการ The 2nd International Conference on Telecom Technology and Applications (ICTTA 2010) จัดขึ้นที่ Bali Dynasty Resort, Bali Island, Indonesia ในวันที่ 19-21 มีนาคม 2553 ในชื่อบทความเรื่อง *Characteristics of Sagnac Interferometer Based on Highly-Nonlinear Photonic Crystal Fiber for WDM C-Band-Shift-Free Optical Phase Conjugator* โดยบทความฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ใน Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Applications (ICCEA 2010), Vol. 2, pp. 99-103, 2010.

ดังนั้นจึงขอนำบทความที่ได้รับการตีพิมพ์มาเสนออีกครั้ง

WDM Transmission Systems Employing Sagnac Interferometer Based on Highly-Nonlinear Photonic Crystal Fiber for WDM C-Band-Shift-Free Optical Phase Conjugator

Pattarakamon Rangsee¹ and Pasu Kaewplung²

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Payathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand, E-mail: Pattarakamon@gmail.com¹ and Pasu.K@Chula.ac.th²

Abstract

This is the first report showing the simultaneous bandwidth-shift-free phase conjugation with Q factor larger than 7, of 15×10 Gb/s WDM signal on 11.15-nm bandwidth located from 1539.77 to 1550.92 nm, using the optimal designed Sagnac based optical phase conjugator constructed by the 120-m-long highly-nonlinear photonic crystal fiber.

Keywords: optical fiber transmission, dispersion compensation, Kerr effect, optical phase conjugation, Sagnac interferometer

1. Introduction

In the long-haul WDM transmission system, the chromatic dispersion and the Kerr effect are the main sources of signal distortion. The optical phase conjugation is one of attractive techniques to realize the compensation of both dispersion and Kerr effect. [1] By converting the transmitted signal to its phase-conjugated replica and re-transmitting this conjugated signal for the remained distance of the transmission, the accumulated waveform distortion before conjugation is self-recovered. In [1], a transmission of 22×20 Gb/s DQPSK WDM signal over 10,200 km was successfully demonstrated by the significant assistance of this phase conjugation technique.

Optical phase conjugation is all-optically performed by optical phase conjugators (OPCs), which mostly utilize the four-wave mixing (FWM) process in various types of optical fiber such as dispersion shifted fiber (DSF) [2], highly-nonlinear fiber (HNL) [2], and highly-nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) [4]. In comparison, the DSF exhibits the nonlinear coefficient of about $2.1 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, which is lower than that of the HNL ($10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$) and the HNL-PCF ($11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$). The higher nonlinear coefficient implies that the length of the optical fiber can be shorten, consequently results in the improvement of both conversion efficiency and signal quality. Recently, simultaneous phase conjugation of 6×40 Gb/s WDM-DPSK signal was accomplished by using a 50-m-long the OPC based on highly-nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF). [5]

The OPC for single-channel conversion can be categorized into two types: the wavelength-shift and the wavelength-shift-free types. Among these, the wavelength-shift-free OPC was implemented on the Sagnac fiber interferometer, which also provides the filter-free characteristic of the conjugated idler from the original signal [6].

In this paper, we first explore the characteristics of the wavelength-shift-free OPC based on Sagnac interferometer when being applied for the simultaneous conjugation of WDM signal. In this case, this wavelength-shift-free OPC (single channel) will behave as the "band-shift-free" OPC (WDM), since the wavelengths are unavoidably shifted in this scheme. The analysis shows the results of some important parameters and their relations such as the conversion efficiency and the supported bandwidth that used for designing the OPC to achieve the maximum performance. Finally, the computer simulation showed, the possibility of the band-shift-free conjugation with Q factor > 7 , of 15×10 Gb/s WDM signal on 11.15-nm bandwidth located from 1539.77 to 1550.92 nm, using the optimally designed Sagnac based OPC constructed by 120-m-long HNL-PCF.

2. Configuration of band-shift-free OPC

Fig. 1 shows the configuration of the bandwidth-shift-free OPC implemented on Sagnac interferometer. We use a HNL-PCF whose nonlinear coefficient is $11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ [4] as Sagnac loop. The HNL-PCF exhibits relatively high attenuation of 9.1 dB/km, and dispersion of 1.25 ps/km/nm at 1545 nm with dispersion slope of 0.0031 ps/km/nm². Two continuous-wave (CW) with different emission wavelengths injected laser pump into the Sagnac loop at different ports to stimulate the FWM process with the WDM signals whose bandwidth must be well within the wavelength separation between the wavelengths of the two pump lasers. The signal is launched to the port#1 of bi-directional 3-dB coupler with pump#1. The conjugated replica is newly generated inside the loop, and is output with pump#2 from port#2 of the coupler, without the necessity of filtering the original signal out, as shown by the spectrums in Fig. 2.

Fig. 2(a) and 2(b) show the spectrums at the input end (point#1) and the output end (point#2) of the HNL-PCF-based Sagnac loop, respectively. It is clearly seen from Fig. 2(b) that all channels are successfully converted to their conjugated replicas on the same bandwidth. Fig. 2(c) and 2(d) show the spectrums at the output port#1 (point#3) and port#2 (point#4), respectively. These spectrums in Fig. 2(d) show the filter-free characteristic of the conjugated idler from the original signal. Also in Fig. 2(b), (c), and (d), the by-product spurious FWM sidebands can be observed, with the suppression of about 3.5245 dB as shown in Fig. 2(d).

3. Conjugation bandwidth of Sagnac-based OPC

To explore the conjugation bandwidth that can be obtained by the Sagnac-based OPC, tune the optical field of a signal at the frequency of ω_s denotes by ϵ_s , and the fields of pump#1 and pump#2 at the frequencies $\omega_s + \Omega$ and $\omega_s - \Omega$ denote by ϵ_{p1} and ϵ_{p2} , respectively. If the frequency of the signal is located at the middle frequency between those of pump#1 and pump#2, the

field of conjugate replica (ϵ_c) is then generated exactly on identical frequency of signal. For WDM signal, the conversion bandwidth is exactly the same as the original bandwidth. However, the conjugate replica of each WDM channel is generated at the opposite wavelength, with respect to center wavelength between the two pump lasers, and that is the reason why we call this OPC "bandwidth-shift-free" OPC.

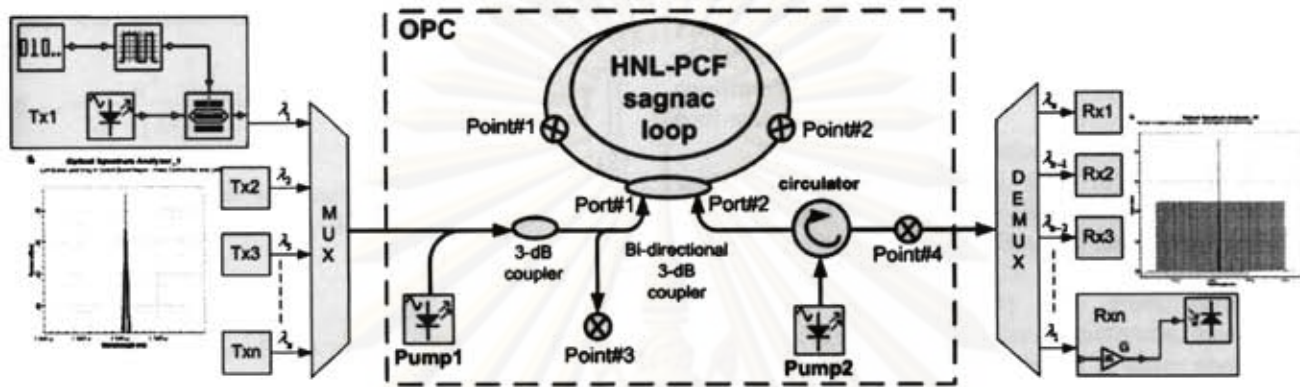


Figure1. Configuration of bandwidth-shift-free OPC.

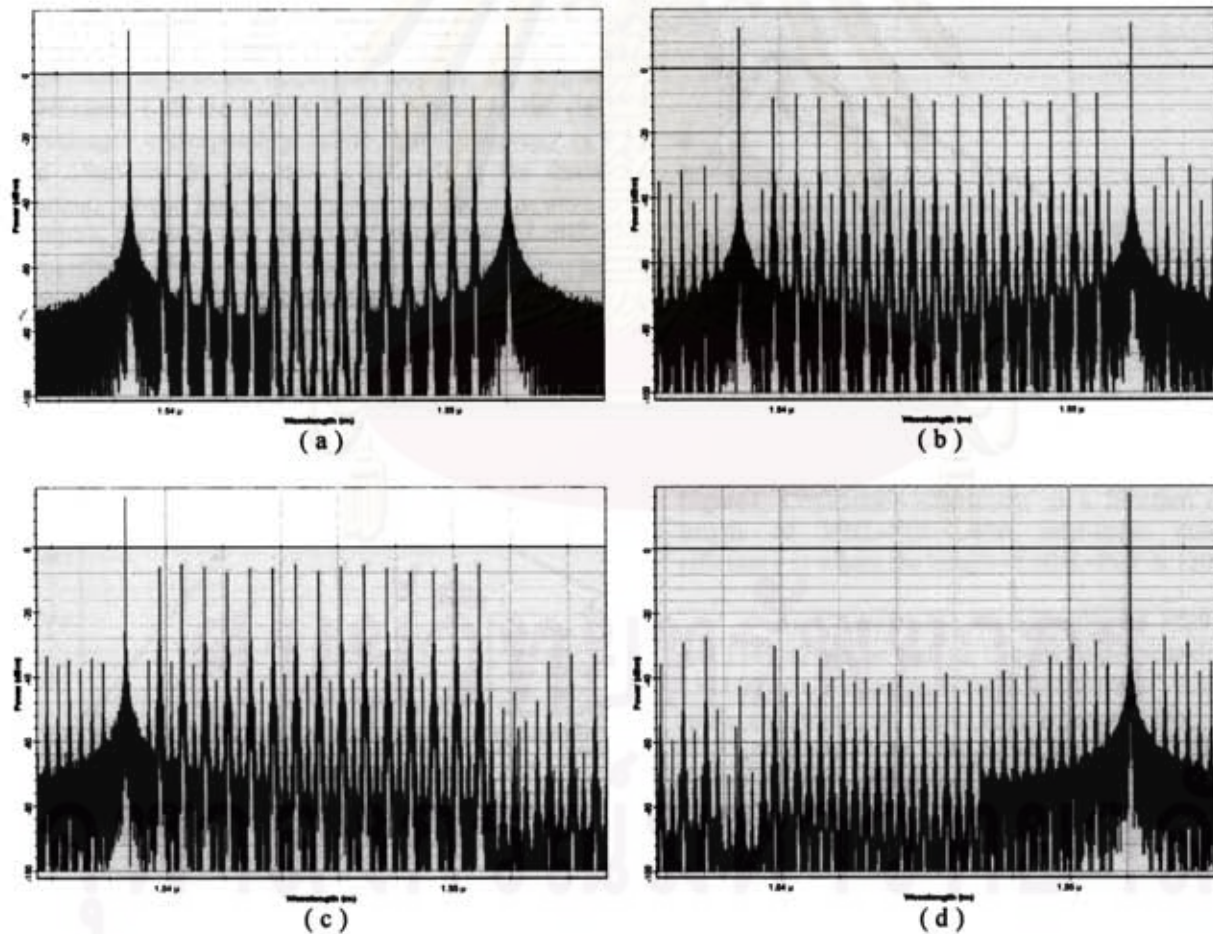


Figure2. Spectrums of WDM signal on 11.15-nm bandwidth located from 1539.77 to 1550.92 nm at (a) the input end of HNL-PCF in Sagnac loop, (b) the output end of HNL-PCF in Sagnac loop, (c) the output of port#1, and (d) the output of port#2

Assuming that FWM inside the Sagnac loop occurs only from the two pumps to a signal and its conjugate replica without pump depletion, the conjugated optical field can be expressed as [6]

$$\varepsilon_c = \sqrt{2i\eta_{FWM}} \varepsilon_{p1} \varepsilon_{p2} \varepsilon_s^* \quad (1)$$

where η_{FWM} is the efficiency of FWM in the Sagnac loop, and can be obtained as [7]

$$\eta_{FWM} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta k)^2} \left\{ 1 + \left[\frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta k \times L}{2}\right)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \right\} \quad (2)$$

where α is the fiber attenuation coefficient, and L the loop length. The intensity-dependent phase-matching factor Δk is given by

$$\Delta k = \left\{ \left(\frac{2\pi\lambda_s^2}{c} \Delta f_{p1s} \Delta f_{p2s} \right) \times \left[D_c + \left(\frac{\lambda_s^2}{2c} \cdot \frac{dD_c}{d\lambda} \cdot (\Delta f_{p1s} + \Delta f_{p2s}) \right) \right] \right. \\ \left. - \left[\gamma(P_{p1} + P_{p2} - P_s) \left(\frac{1 - e^{-\alpha L_{eff}}}{\alpha L_{eff}} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

where c is the vacuum speed of the light, D_c the fiber dispersion, $dD_c/d\lambda$ the dispersion slope, γ the nonlinear coefficient, L_{eff} the fiber effective length, λ_s the signal wavelength corresponding to the signal frequency of f_s , and $\Delta f_{mn} = f_m - f_n$, ($m, n = s, p1, p2$) is the channel spacing, where P_{p1} , P_{p2} , P_s are the input powers of pump#1, pump#2, and signal at frequencies f_{p1} , f_{p2} , f_s , respectively. The power of conjugate replica is $P_c = |\varepsilon_c|^2$, then the conversion efficiency becomes $\eta = P_c/P_s$.

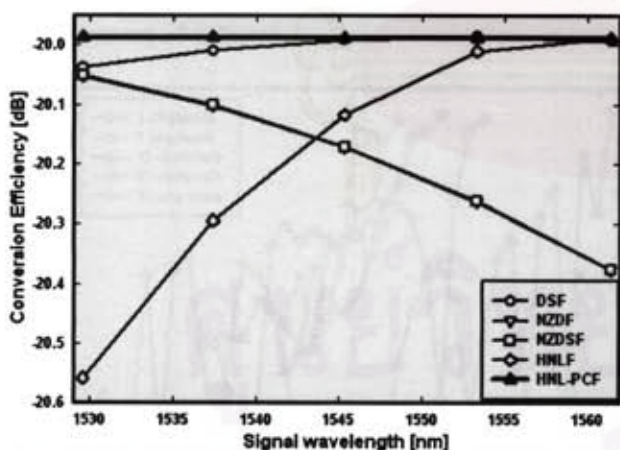


Figure 3. Conversion efficiency as a function of the signal wavelength for types of optical fiber such as DSF, NZDF, NZDSF, HNLF, and HNL-PCF

Next, we use Eq. (1)-(3) to evaluate η that achieves from different types of fiber. The results are shown Fig. 3 in terms of η as a function of C-band wavelengths. We can clearly observe that η obtained

from HNL-PCF is greater than -20 dB, which is higher than those from other types of fiber. Moreover, this value of η , obtained from HNL-PCF, is almost constant over the entire C band.

In order to achieve the highest η , we use Eq. (1)-(3) to optimize the length of HNL-PCF with the channel signal input power of 3 dBm, and the input power of both pump lasers are set at 20 dBm. Fig. 4 shows η , as a function of fiber length of HNL-PCF. From Fig. 4, we can obtain the highest η when the length of HNL-PCF is 120-m. This optimal length is then confirmed with computer simulation result that agrees well with Fig. 4.

Fig. 5 shows the relation between η and pump separation, obtained from Eq. (1) - (3), comparing to those obtained from computer simulations. The signal is CW whose input power is 3 dBm, and the input power of both pump lasers are set at 20 dBm. The two results, obtained from Eq. (1)-(3) and from computer simulations, are in a well-similar characteristic, however; with the η obtained from simulation is lower about 16 dB. This is due to the pump depletion and the by-product spurious FWM sidebands are not taken into account in (2).

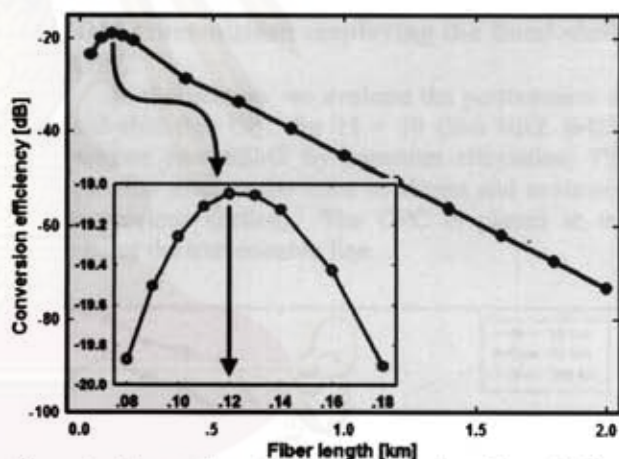


Figure 4. Conversion efficiency, as a function of fiber length of HNL-PCF. The maximum conversion efficiency is where the length of HNL-PCF is 120 m.

At C-band edge wavelengths of 1529.55 nm and 1561.42 nm, as well as, C-band center wavelength of 1545.32 nm, η appears to be independent of wavelength, while the maximum pump separations are, respectively, 10.93 nm, 10.57 nm, and 10.36 nm, among which the difference is smaller than 1 nm. For these 3 wavelengths, as well as, others in C band, the maximum η about -33.392 dB can be obtained equivalently at the pump separation of 2.4 nm, with respect to the signal wavelength placed at the center of pump separation (at 1.2 nm from each pump wavelength). Noted that this value of 2.4 nm can also be obtained from (2), therefore; it consistency with the simulation result.

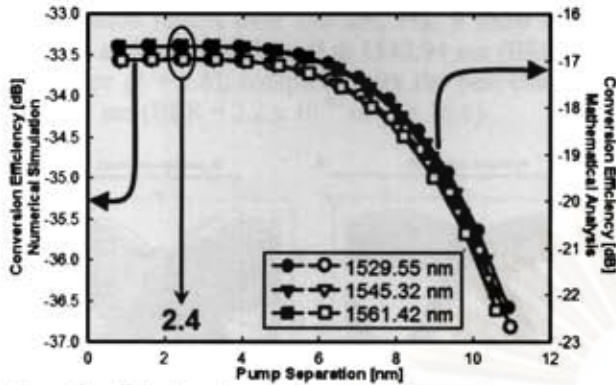


Figure 5. Relation between η and maximum pump separation at 1529.55, 1561.42, and 1545.32 nm.

4. Simultaneous conversion of C-band WDM signal

In this section, we explore the performance of Sagnac-based OPC in displaying the phase conjugation of WDM signal in C band (1529.55-1561.42 nm) with the channel spacing of 0.8 nm simultaneously. Each channel is externally modulated by a Mach-Zehnder modulator in NRZ shape with data rate of 10 Gb/s. The signal consists of 1024-bit pseudorandom sequence. The powers of both pump lasers are identical at 20 dBm.

In order to achieve the highest η , the length of HNL-PCF is set at the optimal length of 120 m, and channel signal input power is 3 dBm. The pump separation is also at the optimal value of 2.4 nm, which also yields the smallest spurious FWM sidebands. By using the computer simulation, we also adjusting the bandwidths of the 6th-order Bessel band-pass filter (14 GHz) and the 6th-order Bessel low-pass filter (20 GHz), including the gain of pre-amp (30 dB) to obtain the highest quality of conjugate replica through the measurement of Q factor.

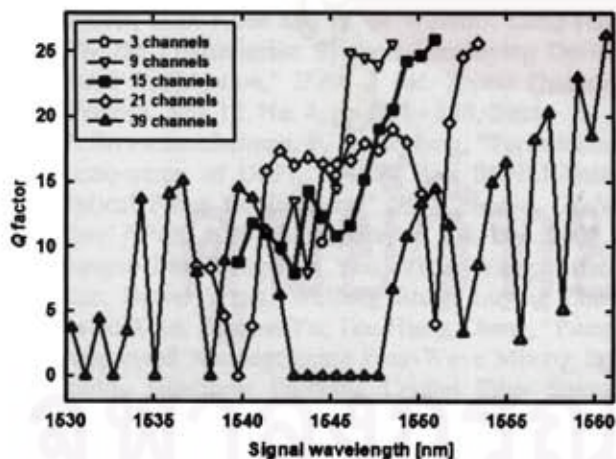


Figure 6. Q factor versus wavelengths of WDM signal composed of 3, 9, 15, 21, and 39 channels after being conversion to its conjugate replica.

Fig. 6 shows Q factors versus wavelengths of WDM signal composed of 3, 9, 15, 21, and 39 channels

after being converted to its conjugate replica by the Sagnac-based OPC. If we set the acceptable Q factor as a value larger than 7, Fig. 6 shows that, after being conjugated, the maximum number of WDM channels that achieves the Q factor exceeds 7 is about 15 (1539.77-1550.92 nm) with placing the pump#1 and pump#2 at 1538.58 and 1552.12 nm, respectively. Fig. 7 show the eye patterns of the worst channel at 1542.94 nm ($Q = 7.98945$), comparing with the best channel at 1550.92 nm ($Q = 25.9204$).

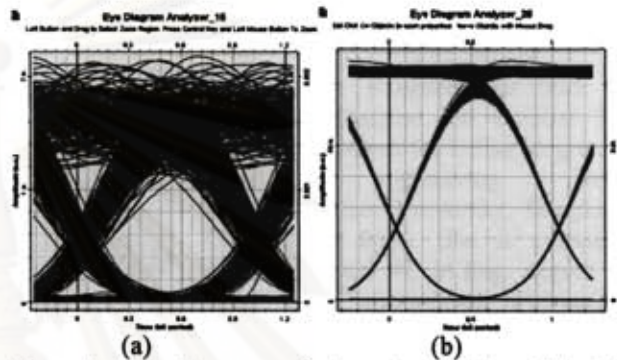


Figure 7. Eye diagrams of channels which exhibit (a) minimum Q factor, and (b) maximum Q factor.

5. WDM transmission employing the band-shift-free OPC

In this section, we evaluate the performance of the band-shift-free OPC for 15 × 10 Gb/s NRZ WDM transmission over SSMF by computer simulation. The configuration setup is the same as shown and explained in the previous section. The OPC is placed at the midpoint of the transmission line.

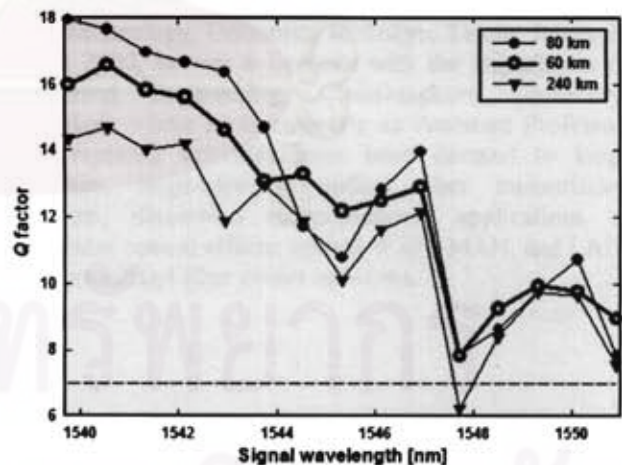


Figure 8. Q factor versus distances composed of 80, 160 and 240 km.

If we set the acceptable bit-error rate (BER) as a value smaller than 10^{-12} (equivalent to $Q > 7$), Fig. 8 shows Q factors versus distances for transmission distances of 80, 160, and 240 km. For the 15-channel WDM transmission, the maximum distance that achieves BER $< 10^{-12}$ is about 160 km. According to the

transmission results over 160 km, Fig. 9 show the eye patterns of the worst channel at 1542.94 nm ($\text{BER} = 1.6 \times 10^{-15}$ or $Q = 7.8$), compared with the best channel at 1550.12 nm ($\text{BER} = 3.2 \times 10^{-62}$ or $Q = 16.6$).

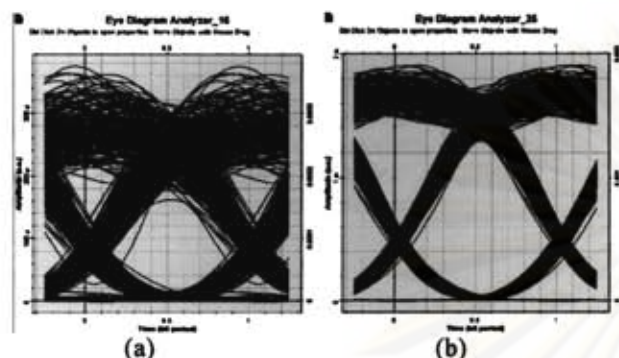


Figure 9. Eye diagrams of channels which exhibit (a) minimum Q factor, and (b) maximum Q factor in 160 km transmission.

6. Conclusion

For the first time to our knowledge, we have investigated the characteristics of the band-shift-free OPC based on Sagnac interferometer, which is constructed by HNL-PCF. We demonstrated that 15×10 Gb/s NRZ WDM signal are transmitted over an 160-km can be converted to its conjugate replica with the Q factor higher than 7.

7. Acknowledgment

The software OptiSys. 8.0, used for all simulations in this paper, is supported by the Telecommunications Research and Industrial and Development Institute (TRIDI), Thailand

References

- [1] S.L. Jansen, D. van den Borne, P.M. Krummrich, S. Spälter, G.D. Khoe and H. de Waardt, "Long-Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, No. 4, pp. 505 - 520, 2006.
- [2] V. Sriwattanathamma, P. Kaewplung, "Performance Comparison of DSF-, HNLF-, and Bi-NLF-based Optical Phase Conjugators," *IEEE photon. Global Conf. (IPGC 2008)*, Singapore, pp. 1-4, Dec. 2008.
- [3] Jianguo Liu; Yong-Kee Yeo; Yixin Wang; Lifang Xue; Dawei Wang; Weifeng Rong; Luying Zhou; Gaoxi Xiao; Xiaojun Yu; Tee-Hiang Cheng, "Pump-Suppressed Nondegenerate Four-Wave Mixing in a Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber Sagnac Loop," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, No. 24, pp. 2129-2131, Dec. 2008.
- [4] Yen Geng, P.A Andersen., T. Tokle, C. Peucheret, P. Jeppesen, "Wavelength conversion of a 6×40 Gb/s DPSK WDM signal using FWM in a highly non-linear photonic crystal fiber," *31st European Conf. of Optical Comms. (ECOC 2005)*, vol. 2, pp. 205 - 206, Sep. 2005.
- [5] H.C. Lim, F. Futami, K. Kikuchi, "Polarization-independent, wavelength-shift-free optical phase conjugator using a nonlinear fiber Sagnac interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, No. 5, pp. 578-580, May 1999.
- [6] S. Song, C.T. Allen, K.R. Demarest, R. Hui, "Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 11, pp. 2285-2290, Nov. 1999.



Pattarakamon Rangsee was born in Chiangrai, Thailand, on October 28, 1985. She received the B.Eng. degree in electrical engineering from Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand, in 2006. She is currently working toward the M.Eng. degree in electrical engineering at Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. Her current research topic is involved with band-shift-free optical phase conjugation and its application to long-haul WDM transmission.



Pasu Kaewplung was born in Bangkok, Thailand, on December 2, 1971. He received the B.S. and the M.S. degrees in electrical engineering from the Yokohama National University, Yokohama, Japan, in 1996 and 1998, respectively, and the Ph.D. degree in electrical engineering in 2004.

From April 1998 to March 2000, he had been doing research in Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Tokyo, Japan. In April 2000, he was a Lecturer with the Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, where he is currently an Assistant Professor. His research activities have been devoted to long-distance, large-capacity optical fiber transmission systems; dispersion compensations; applications of nonlinear optical effects; optical WAN, MAN, and LAN; and broadband fiber access networks.

Characteristics of Sagnac Interferometer Based on Highly-Nonlinear Photonic Crystal Fiber for WDM C-Band-Shift-Free Optical Phase Conjugator

Pattarakamon Rangsee
Department of Electrical Engineering
Chulalongkorn University
Bangkok, Thailand
Pattarakamon@gmail.com

Pasu Kaewplung
Department of Electrical Engineering
Chulalongkorn University
Bangkok, Thailand
Pasu.K@Chula.ac.th

Abstract—This is the first report showing the simultaneous bandwidth-shift-free phase conjugation with Q factor larger than 7, of 15×10 Gb/s WDM signal on 11.15-nm bandwidth located from 1539.77 to 1550.92 nm, using the optimal designed Sagnac based optical phase conjugator constructed by the 120-m-long highly-nonlinear photonic crystal fiber.

Keywords—optical fiber transmission; dispersion compensation; Kerr effect; optical phase conjugation; Sagnac interferometer

I. INTRODUCTION

In the long-haul WDM transmission system, the chromatic dispersion and the Kerr effect are the main sources of signal distortion. The optical phase conjugation is one of attractive techniques to realize the compensation of both dispersion and Kerr effect. [1] By converting the transmitted signal to its phase-conjugated replica and re-transmitting this conjugated signal for the remained distance of the transmission, the accumulated waveform distortion before conjugation is self-recovered. In [1], a transmission of 22 × 20 Gb/s DQPSK WDM signal over 10,200 km was successfully demonstrated by the significant assistance of this phase conjugation technique.

Optical phase conjugation is all-optically performed by optical phase conjugators (OPCs), which mostly utilize the four-wave mixing (FWM) process in various types of optical fiber such as dispersion shifted fiber (DSF) [2], highly-nonlinear fiber (HNLF) [2], and highly-nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF) [4]. In comparison, the DSF exhibits the nonlinear coefficient of about 2.1 W⁻¹km⁻¹, which is lower than that of the HNLF (10 W⁻¹km⁻¹) and the HNL-PCF (11 W⁻¹km⁻¹). The higher nonlinear coefficient implies that the length of the optical fiber can be shorten, consequently results in the improvement of both conversion efficiency and signal quality. Recently, simultaneous phase conjugation of 6 × 40 Gb/s WDM-DPSK signal was accomplished by using a 50-m-long the OPC based on highly-nonlinear photonic crystal fiber (HNL-PCF). [5]

The OPC for single-channel conversion can be categorized into two types: the wavelength-shift and the wavelength-shift-free types. Among these, the wavelength-shift-free OPC was implemented on the Sagnac fiber interferometer, which also provides the filter-free characteristic of the conjugated idler from the original signal [6].

In this paper, we first explore the characteristics of the wavelength-shift-free OPC based on Sagnac interferometer when being applied for the simultaneous conjugation of WDM signal. In this case, this wavelength-shift-free OPC (single channel) will behave as the “band-shift-free” OPC (WDM), since the wavelengths are unavoidably shifted in this scheme. The analysis shows the results of some important parameters and their relations such as the conversion efficiency and the supported bandwidth that used for designing the OPC to achieve the maximum performance. Finally, the computer simulation showed, the possibility of the band-shift-free conjugation with Q factor > 7, of 15 × 10 Gb/s WDM signal on 11.15-nm bandwidth located from 1539.77 to 1550.92 nm, using the optimally designed Sagnac based OPC constructed by 120-m-long HNL-PCF.

II. CONFIGURATION OF BAND-SHIFT-FREE OPC

Fig. 1 shows the configuration of the bandwidth-shift-free OPC implemented on Sagnac interferometer. We use a HNL-PCF whose nonlinear coefficient is 11 W⁻¹km⁻¹ [4] as Sagnac loop. The HNL-PCF exhibits relatively high attenuation of 9.1 dB/km, and dispersion of 1.25 ps/km/nm at 1545 nm with dispersion slope of 0.0031 ps/km/nm². Two continuous-wave (CW) with different emission wavelengths injected laser pump into the Sagnac loop at different ports to stimulate the FWM process with the WDM signals whose bandwidth must be well within the wavelength separation between the wavelengths of the two pump lasers. The signal is launched to the port#1 of bi-directional 3-dB coupler with pump#1. The conjugated replica is newly generated inside the loop, and is output with pump#2 from port#2 of the coupler, without the necessity of filtering the original signal out, as shown by the spectrums in Fig. 2.

Fig. 2(a) and 2(b) show the spectrums at the input end (point#1) and the output end (point#2) of the HNL-PCF-based Sagnac loop, respectively. It is clearly seen from Fig. 2(b) that all channels are successfully converted to their conjugated replicas on the same bandwidth. Fig. 2(c) and 2(d) show the spectrums at the output port#1 (point#3) and port#2 (point#4), respectively. These spectrums in Fig. 2(d) show the filter-free characteristic of the conjugated idler from the original signal. Also in Fig. 2(b), (c), and (d), the by-product spurious FWM sidebands can be observed, with the suppression of about 3.5245 dB as shown in Fig. 2(d).

III. CONJUGATION BANDWIDTH OF SAGNAC-BASED OPC

To explore the conjugation bandwidth that can be obtained by the Sagnac-based OPC, tune the optical field of a signal at the frequency of ω_s denotes by ε_s , and the fields of pump#1 and pump#2 at the frequencies $\omega_s + \Omega$ and $\omega_s - \Omega$ denote by ε_{p1} and ε_{p2} , respectively. If the frequency of the signal is located at the middle frequency between those of

pump#1 and pump#2, the field of conjugate replica (ε_c) is then generated exactly on identical frequency of signal. For WDM signal, the conversion bandwidth is exactly the same as the original bandwidth. However, the conjugate replica of each WDM channel is generated at the opposite wavelength, with respect to center wavelength between the two pump lasers, and that is the reason why we call this OPC "bandwidth-shift-free" OPC.

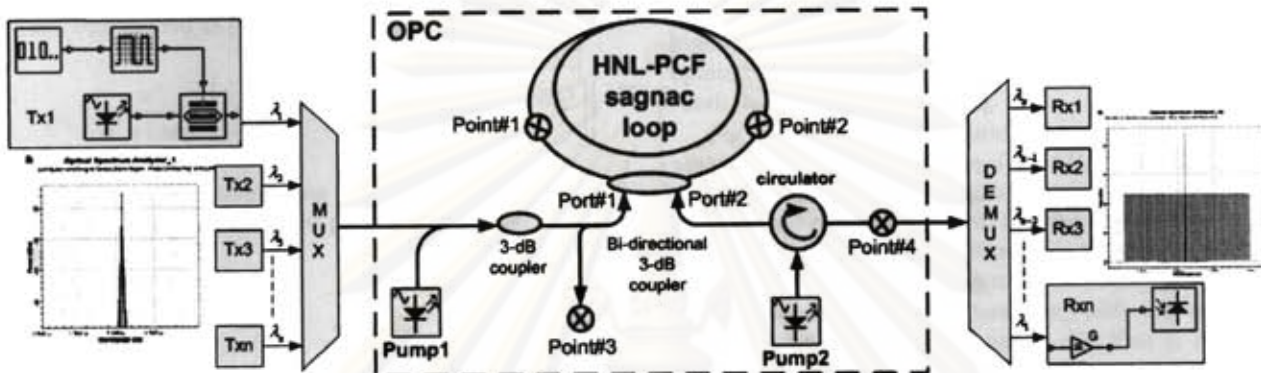


Figure 1. Configuration of bandwidth-shift-free OPC.

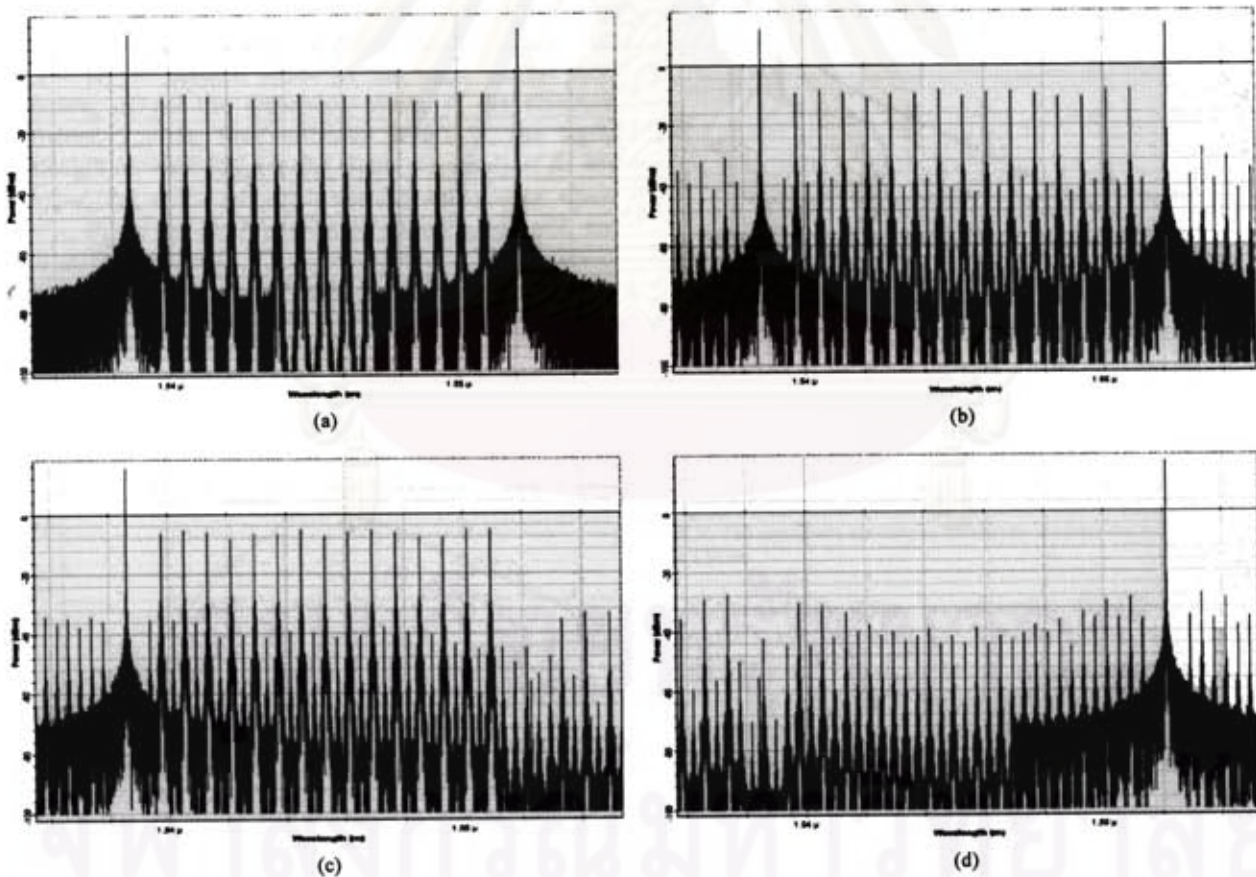


Figure 2. Spectrums of WDM signal on 11.15-nm bandwidth located from 1539.77 to 1550.92 nm at (a) the input end of HNL-PCF in Sagnac loop, (b) the output end of HNL-PCF in Sagnac loop, (c) the output of port#1, and (d) the output of port#2

Assuming that FWM inside the Sagnac loop occurs only from the two pumps to a signal and its conjugate replica without pump depletion, the conjugated optical field can be expressed as [6]

$$\varepsilon_c = \sqrt{2}i\eta_{FWM}\varepsilon_{p1}\varepsilon_{p2}\varepsilon_s^* \quad (1)$$

where η_{FWM} is the efficiency of FWM in the Sagnac loop, and can be obtained as [7]

$$\eta_{FWM} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta k)^2} \left\{ 1 + \left[\frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta k \times L}{2}\right)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \right\} \quad (2)$$

where α is the fiber attenuation coefficient, and L the loop length. The intensity-dependent phase-matching factor Δk is given by

$$\Delta k = \left\{ \left(\frac{2\pi\lambda_s^2}{c} \Delta f_{p1} \Delta f_{p2} \right) \times \left[D_c + \left(\frac{\lambda_s^2}{2c} \frac{dD_c}{d\lambda} (\Delta f_{p1} + \Delta f_{p2}) \right) \right] \right. \\ \left. - \left[\gamma(P_{p1} + P_{p2} - P_s) \left(\frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha L_{eff}} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

where c is the vacuum speed of the light, D_c the fiber dispersion, $dD_c/d\lambda$ the dispersion slope, γ the nonlinear coefficient, L_{eff} the fiber effective length, λ_s the signal wavelength corresponding to the signal frequency of f_s , and $\Delta f_{mn} = f_m - f_n$, ($m, n = s, p1, p2$) is the channel spacing, where P_{p1} , P_{p2} , P_s are the input powers of pump#1, pump#2, and signal at frequencies f_{p1} , f_{p2} , f_s , respectively. The power of conjugate replica is $P_c = |\varepsilon_c|^2$, then the conversion efficiency becomes $\eta = P_c/P_s$.

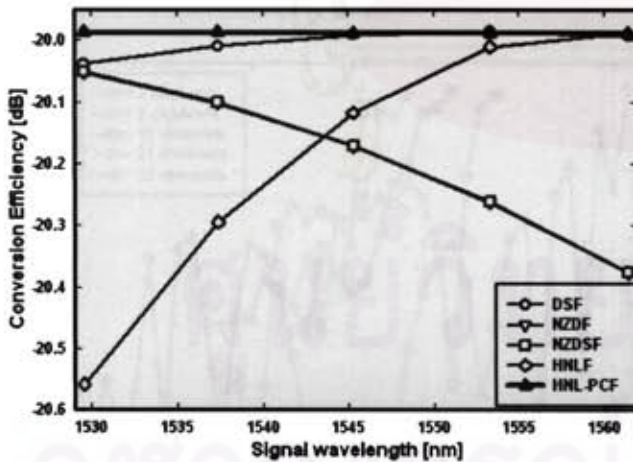


Figure 3. Conversion efficiency as a function of the signal wavelength for types of optical fiber such as DSF, NZDF, NZDSF, HNLF, and HNL-PCF

Next, we use Eq. (1)-(3) to evaluate η that achieves from different types of fiber. The results are shown Fig. 3 in terms of η as a function of C-band wavelengths. We can

clearly observe that η obtained from HNL-PCF is greater than -20 dB, which is higher than those from other types of fiber. Moreover, this value of η , obtained from HNL-PCF, is almost constant over the entire C band.

In order to achieve the highest η , we use Eq. (1)-(3) to optimize the length of HNL-PCF with the channel signal input power of 3 dBm, and the input power of both pump lasers are set at 20 dBm. Fig. 4 shows η , as a function of fiber length of HNL-PCF. From Fig. 4, we can obtain the highest η when the length of HNL-PCF is 120-m. This optimal length is then confirmed with computer simulation result that agrees well with Fig. 4.

Fig. 5 shows the relation between η and pump separation, obtained from Eq. (1) - (3), comparing to those obtained from computer simulations. The signal is CW whose input power is 3 dBm, and the input power of both pump lasers are set at 20 dBm. The two results, obtained from Eq. (1)-(3) and from computer simulations, are in a well-similar characteristic, however; with the η obtained from simulation is lower about 16 dB. This is due to the pump depletion and the by-product spurious FWM sidebands are not taken into account in (2).

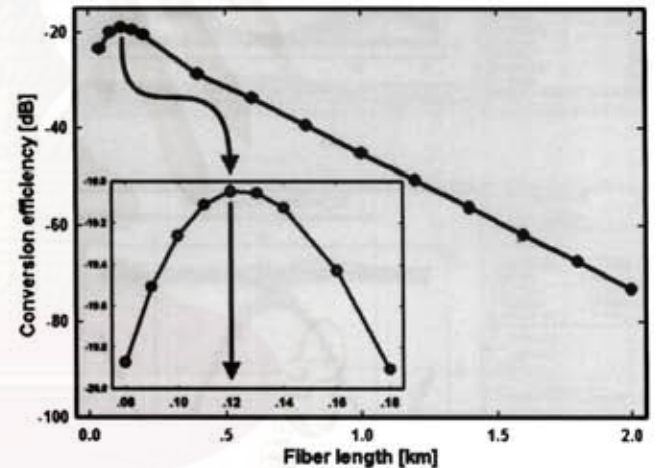


Figure 4. Conversion efficiency, as a function of fiber length of HNL-PCF. The maximum conversion efficiency is where the length of HNL-PCF is 120 m.

At C-band edge wavelengths of 1529.55 nm and 1561.42 nm, as well as, C-band center wavelength of 1545.32 nm, η appears to be independent of wavelength, while the maximum pump separations are, respectively, 10.93 nm, 10.57 nm, and 10.36 nm, among which the difference is smaller than 1 nm. For these 3 wavelengths, as well as, others in C band, the maximum η about -33.392 dB can be obtained equivalently at the pump separation of 2.4 nm, with respect to the signal wavelength placed at the center of pump separation (at 1.2 nm from each pump wavelength). Noted that this value of 2.4 nm can also be obtained from (2), therefore; it consistency with the simulation result.

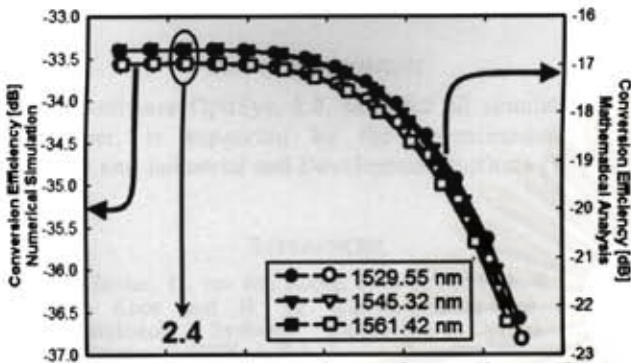


Figure 5. Relation between η and maximum pump separation at 1529.55, 1561.42, and 1545.32 nm.

IV. SIMULTANEOUS CONVERSION OF C-BAND WDM SIGNAL

In this section, we explore the performance of Sagnac-based OPC in displaying the phase conjugation of WDM signal in C band (1529.55-1561.42 nm) with the channel spacing of 0.8 nm simultaneously. Each channel is externally modulated by a Mach-Zehnder modulator in NRZ shape with data rate of 10 Gb/s. The signal consists of 1024-bit pseudorandom sequence. The powers of both pump lasers are identical at 20 dBm.

In order to achieve the highest η , the length of HNL-PCF is set at the optimal length of 120 m, and channel signal input power is 3 dBm. The pump separation is also at the optimal value of 2.4 nm, which also yields the smallest spurious FWM sidebands. By using the computer simulation, we also adjusting the bandwidths of the 6th-order Bessel band-pass filter (14 GHz) and the 6th-order Bessel low-pass filter (20 GHz), including the gain of pre-amp (30 dB) to obtain the highest quality of conjugate replica through the measurement of Q factor.

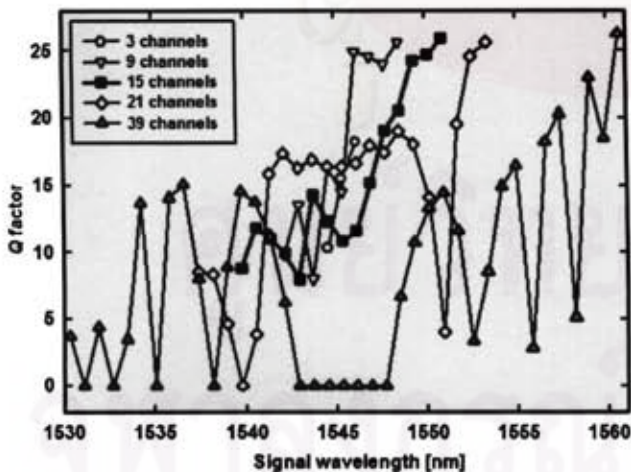
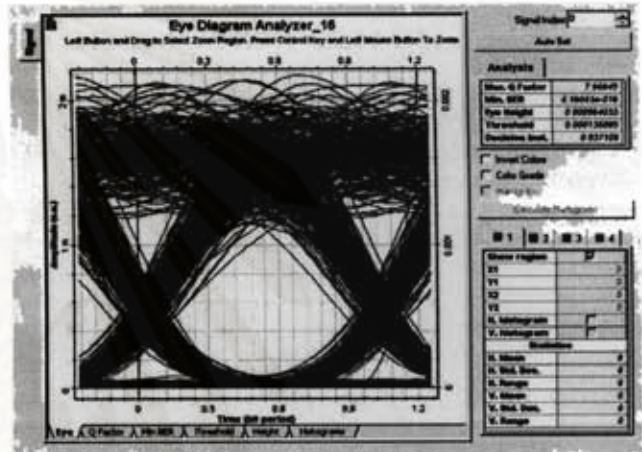
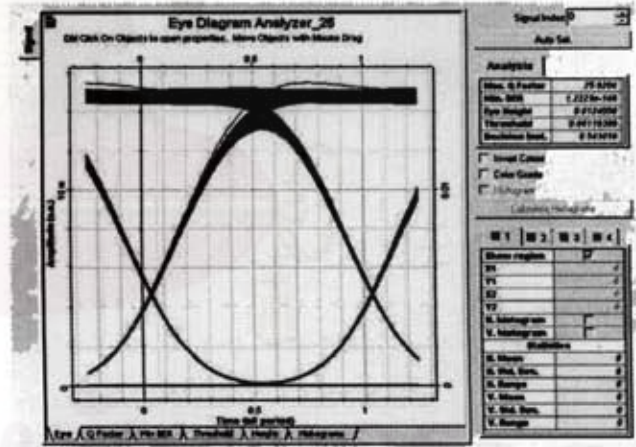


Figure 6. Q factor versus wavelengths of WDM signal composed of 3, 9, 15, 21, and 39 channels after being conversion to its conjugate replica.

Fig. 6 shows Q factors versus wavelengths of WDM signal composed of 3, 9, 15, 21, and 39 channels after being converted to its conjugate replica by the Sagnac-based OPC. If we set the acceptable Q factor as a value larger than 7, Fig. 6 shows that, after being conjugated, the maximum number of WDM channels that achieves the Q factor exceeds 7 is about 15 (1539.77-1550.92 nm) with placing the pump#1 and pump#2 at 1538.58 and 1552.12 nm, respectively. Fig. 7 show the eye patterns of the worst channel at 1542.94 nm ($Q = 7.98945$), comparing with the best channel at 1550.92 nm ($Q = 25.9204$).



(a)



(b)

Figure 7. Eye diagrams of channels which exhibit (a) minimum Q factor, and (b) maximum Q factor.

V. CONCLUSION

For the first time to our knowledge, we have investigated the characteristics of the band-shift-free Sagnac-based OPC constructed by HNL-PCF for simultaneous C-band WDM signal phase conjugation. We demonstrated that 15 × 10 Gb/s NRZ WDM signal can be

converted to its conjugate replica with the Q factor higher than 7.

ACKNOWLEDGMENT

The software OptiSys. 8.0, used for all simulations in this paper, is supported by the Telecommunications Research and Industrial and Development Institute (TRIDI), Thailand

REFERENCES

- [1] S.L. Jansen, D. van den Borne, P.M. Krummrich, S. Spälter, G.D. Khoe and H. de Waardt, "Long-Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, No. 4, pp. 505 - 520, 2006.
- [2] V. Sriwattanathamma, P. Kaewplung, "Performance Comparison of DSF-, HNLF-, and Bi-NLF-based Optical Phase Conjugators," *IEEE photon. Global Conf. (IPGC 2008)*, Singapore, pp. 1-4, Dec. 2008.
- [3] Jianguo Liu; Yong-Kee Yeo; Yixin Wang; Lifang Xue; Dawei Wang; Weifeng Rong; Luying Zhou; Gaoxi Xiao; Xiaojun Yu; Tee-Hiang Cheng, "Pump-Suppressed Nondegenerate Four-Wave Mixing in a Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber Sagnac Loop," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, No. 24, pp. 2129-2131, Dec. 2008.
- [4] Yen Geng, P.A. Andersen., T. Tokle, C. Peucheret, P. Jeppesen, "Wavelength conversion of a 6×40 Gb/s DPSK WDM signal using FWM in a highly non-linear photonic crystal fiber," *31st European Conf. of Optical Comms. (ECOC 2005)*, vol. 2, pp. 205 - 206, Sep. 2005.
- [5] H.C. Lim, F. Futami, K. Kikuchi, "Polarization-independent, wavelength-shift-free optical phase conjugator using a nonlinear fiber Sagnac interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, No. 5, pp. 578-580, May 1999.
- [6] S. Song, C.T. Allen, K.R. Demarest, R. Hui, "Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 11, pp. 2285-2290, Nov. 1999.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรมล รังษี เกิดวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่อำเภอเชียงแสน จังหวัด เชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ใน ปีการศึกษา 2549 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย