

การวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันและการจัดสรรความยาวคลื่นใน
โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มทางแสงแบบแพร์และเลือกสัญญาณ



นายปรีดา จารุภูมิ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

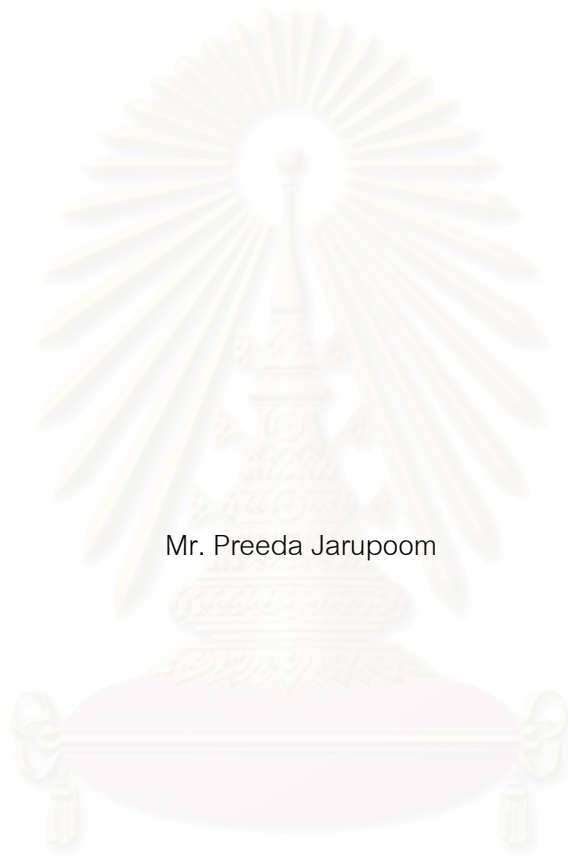
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DISPERSION COMPENSATION UNIT PLACEMENT AND WAVELENGTH ASSIGNMENT
IN DWDM BROADCAST-AND-SELECT OPTICAL NETWORKS



Mr. Preeda Jarupoom

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวางหน่วยเขตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นและการจัดสรรความยาวคลื่น
ในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มทางแสงแบบแพร่และเลือก
สัญญาณ

โดย

นายปรีดา จารุภูมิ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

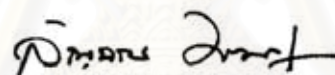
อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณีย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สบายวิจิตร)

สถาบันวิจัยการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรีดา จารุภูมิ : การวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มทางแสงแบบแพร์และเลือกสัญญาณ. (DISPERSION COMPENSATION UNIT PLACEMENT AND WAVELENGTH ASSIGNMENT IN DWDM BROADCAST-AND-SELECT OPTICAL NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 109 หน้า

โครงข่ายทางแสงมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นอย่างหนาแน่นแบบแพร์และเลือกสัญญาณ (B&S) มีความน่าสนใจอย่างมากในการขยายขนาดโครงข่ายจากเครือข่ายเข้าถึง (access network) ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นถึงระดับโครงข่ายนครหลวง (metropolitan-area network: MAN) หรือโครงข่ายทางไกล (long-haul network) เนื่องจากอุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานทางแสงทั้งหมดตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงไปถึงอุปกรณ์รับสัญญาณทางแสงทั้งหมด ทำให้ต้นทุนของระบบค่อนข้างต่ำ สำหรับโครงข่ายที่มีสายเชื่อมโยงที่ยาวนั้นดิสเพอร์ชันและผลกระทบจากเคอร์จะเป็นสาเหตุหลักของความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาระเบียบวิธีขั้นตอนการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (DCUs) อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อขจัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากดิสเพอร์ชันและระเบียบขั้นตอนวิธีการจัดสรรความยาวคลื่น (WA) สำหรับลดผลของปรากฏการณ์เคอร์

สำหรับระเบียบวิธีขั้นตอนการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (DCUs) นั้นสามารถใช้ได้ทั้งแบบชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (SC-DCUs) และไม่ชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (NSC-DCUs) สำหรับวิธีที่ได้เสนอนี้มีประสิทธิภาพมากในการลดต้นทุนของโครงข่ายเพราะสามารถหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดที่โครงข่ายต้องการ เรากำหนดความยาวคลื่นสำหรับส่งสัญญาณในตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณด้วยระยะห่างของสัญญาณแบบ 25-GHz-grid ITU พร้อมทั้งใช้เส้นใยแสงแบบโหมดคลื่นเดี่ยว (single-mode fiber: SMF, ITU-T G.652) โดยมีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm และความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ 0.05 ps/nm²/km ที่ 1550 nm เพื่อการส่งผ่านสัญญาณทางแสง เมื่อนำวิธีนี้ไปใช้กับตัวอย่างโครงข่ายจำนวน 4 โครงข่ายพบว่าสามารถหาจำนวน DCUs ที่น้อยที่สุดได้และการใช้จำนวน DCUs ในแต่ละชนิดมีจำนวนเท่ากันทุกโครงข่าย

สำหรับระเบียบวิธีขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่น วิธีการนี้จะทำการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณ (SCS) สองความยาวคลื่นที่ติดกันในแต่ละสายเชื่อมโยงโดยเหตุที่ SCS มีความเกี่ยวข้องกับการผิดคู่ของความเร็วกลุ่มระหว่างสองพัลส์ใดๆ ดังนั้นการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณซึ่งเกิดจากผลกระทบของเคอร์จะลดลงได้ด้วยการทำให้การผิดคู่ของความเร็วกลุ่มให้มีค่ามากที่สุด ในการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการส่งสัญญาณ DWDM ในตัวอย่างโครงข่าย B&S ที่ประกอบไปด้วยจำนวนสถานี 6 สถานีและอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟจำนวน 4 ตัว เมื่อมีการใช้ WA พบว่าค่าประกอบ Q โดยรวมของ 5 ช่องสัญญาณที่เข้าสู่สถานีที่ 1 มีค่ามากกว่าการไม่ใช้ WA เพราะได้มีการลดผลของ XPM และ FWM สำหรับการเปรียบเทียบที่กำลังเฉลี่ยตามระยะทาง 1.4 mW เราสามารถได้รับค่าประกอบ Q มากกว่า 7 สำหรับทั้ง 5 ช่องสัญญาณเมื่อมีการใช้ WA ขณะที่เมื่อไม่ใช้ WA มีเพียง 4 ช่องสัญญาณเท่านั้นที่ได้รับค่าประกอบ Q มากกว่า 7

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....ปรีดา จารุภูมิ
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2549

4770645021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS: OPTICAL FIBER TRANSMISSION / KERR EFFECT / DISPERSION / DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (DWDM) / DISPERSION COMPENSATION / WAVELENGTH ASSIGNMENT.

PREEDA JARUPOOM : DISPERSION COMPENSATION UNIT PLACEMENT AND WAVELENGTH ASSIGNMENT IN DWDM BROADCAST-AND-SELECT OPTICAL NETWORKS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 109 pp.

Broadcast-and-select (B&S) DWDM optical network is very attractive for the network scales of metropolitan-area network (MAN) or long-haul network because it can provide the full transparency of optical signal transmission from transmitter to receiver with relatively low system cost. For a network that has relatively long links, the fiber dispersion and the Kerr effect become main sources of signal distortion. In This thesis, we study the optimal dispersion compensation unit (DCUs) placement algorithm for overcoming the fiber dispersion, and the wavelength assignment (WA) algorithm for reducing the influence of Kerr effect.

For the optimal DCUs placement, our algorithm can be used for both non-slope-compensated (NSC) and slope-compensated (SC) DCUs. Our method is also efficient for saving the network cost because the obtained solution will gives the minimum number of DCUs required for the network. For validation of our algorithm, we assign wavelengths to four different B&S sample networks following the ITU 25-GHz-grid recommended wavelengths. The single-mode fiber (SMF: G.652) with dispersion of 16.5 ps/km/nm and its slope of 0.05 ps/nm²/km both at 1550 nm is assumed for signal transmission. By employing our algorithm, the minimum numbers of the DCUs for both types appears to be equivalence.

For the WA algorithm, Our WA will find the maximum summation of channel spacing (SCS) between two neighbor channels in each link. Since the SCS relates to the group-velocity mismatch between the two pulses, therefore; the inter-channel crosstalk induced by Kerr effect can be reduced owing to maximum group-velocity mismatch. We perform the numerical simulations of WDM signal transmission in B&S sample network which consists of 6 stations and 4 passive star couples. In comparison at identical path-averaged signal power of 1.4 mW, we can achieve the Q factor greater than 7 for all 5 channels by using our WA. On the other hand, without using our WA, only 4 channels can achieve Q greater than 7.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year 2006

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง ซึ่งมีส่วนช่วยในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงหลักการคิดเชิงวิเคราะห์และเชิงวิพากษ์ ตลอดจนคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์เปรียบเสมือนรากฐานและแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านกรวิจัยและพัฒนา (Cooperation Project between department of electrical engineering and private sector research and development) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี (2547-2548)

สิ่งดีๆ ที่ได้รับจากทุกคนล้วนเป็นส่วนสำคัญในการรังสรรค์ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จ ดังนั้นจึงไม่มีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
ดัชนีคำศัพท์.....	ณ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ.....	6
2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณทางแสงพื้นฐาน.....	7
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	7
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง.....	8
2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ.....	9
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง.....	10
2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง.....	13
2.3 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นอย่างหนาแน่นบนโครงข่ายทางแสงแบบแพร์และเลือกสัญญาณ.....	15
2.3.1 การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นทางแสง.....	15
2.3.2 โครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ.....	16
2.4 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน.....	22
2.4.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	24
3 การกำหนดตำแหน่งการวางอุปกรณ์ชดเชยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุด.....	28
3.1 การกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน.....	28

บทที่	หน้า
3.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย	28
3.1.2 การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต	29
3.1.2.1 เงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยง.....	29
3.1.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน	31
3.1.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนอุปกรณ์ชนิดเซยดิสเพอร์ชัน	31
3.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	31
3.1.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต	32
3.1.4 การวางตำแหน่งหน่วยชนิดเซยดิสเพอร์ชัน.....	33
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	34
4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่ายทางแสง.....	34
4.2 การจำลองการวางหน่วยชนิดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง	36
4.2.1 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1.....	36
4.2.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย	37
4.2.1.2 การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต	38
4.2.1.2.1 สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตข่ายเชื่อมโยง.....	38
4.2.1.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน	42
4.2.1.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม	45
4.2.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	45
4.2.1.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	45
4.2.1.4 การวางตำแหน่งหน่วยชนิดเซยดิสเพอร์ชัน.....	47
4.2.2 โครงข่ายตัวอย่างที่ 2.....	55
4.2.3 โครงข่ายตัวอย่างที่ 3.....	57
4.2.4 โครงข่ายตัวอย่างที่ 4.....	59
5 เทคนิคการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์	63
5.1 เทคนิคการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์.....	63
5.1.1 การลดผลกระทบของ XPM.....	63
5.1.2 การลดผลกระทบของ FWM.....	65
5.1.2.1 เงื่อนไขการจับคู่ความถี่	65
5.1.2.2 เงื่อนไขการจับคู่เฟส	66
5.1.2.3 การเกิด FWM จะเกิดเมื่อสัญญาณทุกความยาวคลื่นวิ่งซ้อนทับกัน.....	67

บทที่	หน้า
5.2 การกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์	67
5.2.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย	68
5.2.2 การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต	68
5.2.2.1 เงื่อนไขขอบเขตความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทางแสง	68
5.2.2.2 เงื่อนไขการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่สถานะในโครงข่ายทางแสง	69
5.2.2.3 เงื่อนไขการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณทั้งหมดภายในโครงข่ายทางแสง	69
5.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	69
5.2.3 การแก้สมการเงื่อนไขขอบเขต	70
6 การทดลองจำลองทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบของเคอร์	71
6.1 การจัดสรรความยาวคลื่นบนโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ	71
6.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย	71
6.1.2 สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต	71
6.1.2.1 เงื่อนไขขอบเขตความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทางแสง	71
6.1.2.2 เงื่อนไขการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่สถานะในโครงข่ายทางแสง	72
6.1.2.3 เงื่อนไขการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณทั้งหมดภายในโครงข่ายทางแสง	73
6.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	74
6.1.3 การแก้สมการเงื่อนไขขอบเขต	74
6.2 การวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณระหว่างการจำลองระบบที่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นกับการจำลองระบบที่ไม่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่น	74
6.2.1 การจำลองโครงข่ายตัวอย่างและตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	75
6.2.2 การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณ	79
7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	92
7.1 สรุปผล	92
7.2 ข้อเสนอแนะ	93
รายการอ้างอิง	94
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก. รายละเอียดการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างอื่นๆ	98

บทที่

หน้า

ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่..... 108

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 109



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญสำหรับมอดูลความยาวทั่วไป	26
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชัน.....	35
ตารางที่ 4.2 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่า ชุดเซยติสเพอร์ชันของหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCF และ SC-DCF ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	37
ตารางที่ 4.3 ความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงจากสถานีไปยัง PSC.....	38
ตารางที่ 4.4 สมการหาจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมจากสถานีไปยัง PSC	39
ตารางที่ 4.5 ความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงจาก PSC ไปยัง PSC	40
ตารางที่ 4.6 สมการหาจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมจาก PSC ไปยัง PSC	40
ตารางที่ 4.7 ความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงจาก PSC ไปยังสถานี.....	41
ตารางที่ 4.8 สมการหาจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมจาก PSC ไปยัง สถานี	42
ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันบน PSC ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	43
ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันบนสถานีในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	44
ตารางที่ 4.11 จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1.....	45
ตารางที่ 4.12 รายละเอียดการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ใช้หน่วย ชุดเซยติสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU	47
ตารางที่ 4.13 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่า ชุดเซยติสเพอร์ชันของหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCF และ SC-DCF ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 2	56
ตารางที่ 4.14 จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 2.....	57
ตารางที่ 4.15 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่า ชุดเซยติสเพอร์ชันของหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCF และ SC-DCF ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 3	58
ตารางที่ 4.16 จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 3.....	59

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.17 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCF และ SC-DCF ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 4	60
ตารางที่ 4.18 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 4.....	62
ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างรูปแบบการจัดความยาวคลื่นให้แต่ละสถานีบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1.....	72
ตารางที่ 6.2 ค่า SCS สำหรับบางชุดข้อมูล.....	74
ตารางที่ 6.3 รายละเอียดการกำหนดความยาวคลื่นให้แต่ละสถานี.....	75
ตารางที่ 6.4 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 0.4565 mW	80
ตารางที่ 6.5 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 0.4565 mW.....	81
ตารางที่ 6.6 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.0 mW	82
ตารางที่ 6.7 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.0 mW	82
ตารางที่ 6.8 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.1 mW	83
ตารางที่ 6.9 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.1 mW	84
ตารางที่ 6.10 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.2 mW	85

ตารางที่ 6.11 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.2 mW	85
ตารางที่ 6.12 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.3 mW	86
ตารางที่ 6.13 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.3 mW	87
ตารางที่ 6.14 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.4 mW	88
ตารางที่ 6.15 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.4 mW	88
ตารางที่ 6.16 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.5 mW	89
ตารางที่ 6.17 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.5 mW	90
ตารางที่ ก.1 รายละเอียดการวางหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 โดยใช้หน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU	98
ตารางที่ ก.2 รายละเอียดการวางหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU	104
ตารางที่ ก.3 รายละเอียดการวางหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU	106

สารบัญภาพ

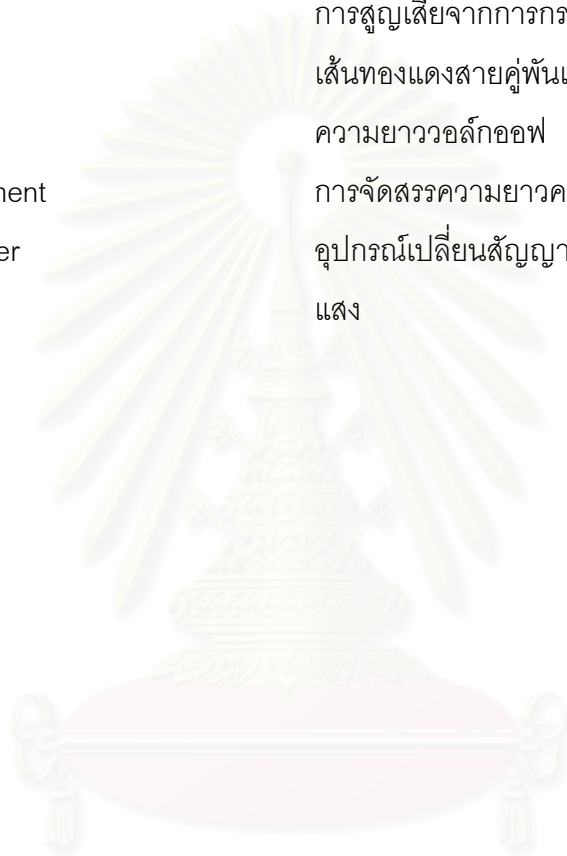
ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	7
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น	9
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่มในแต่ละความยาวคลื่น	11
รูปที่ 2.4 การกระจายความถี่ในแต่ละสีสัญญาณ	11
รูปที่ 2.5 การแสดงการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-symbol interference)	12
รูปที่ 2.6 ระบบและองค์ประกอบของดับเบิลยูดีเอ็ม	15
รูปที่ 2.7 โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ	17
รูปที่ 2.8 โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง	17
รูปที่ 2.9 องค์ประกอบภายในสถานี	18
รูปที่ 2.10 16x16 PSC	19
รูปที่ 2.11 แบบจำลองอัตราขยายอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง	21
รูปที่ 2.12 แบบจำลองอัตราขยายสัญญาณของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงโดยประมาณ ..	21
รูปที่ 2.13 การเฉลี่ยกำลังส่งของสัญญาณแบบเฉลี่ยตามระยะทาง	22
รูปที่ 2.14 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน	23
รูปที่ 2.15 การกระจายความเร็วกลุ่มของ SMF-28	24
รูปที่ 2.16 การกระจายความเร็วกลุ่มของ DCF	25
รูปที่ 2.17 Avanex's 100% Slope Compensating DCUs over C-band	26
รูปที่ 3.1 ข่ายเชื่อมโยงระหว่างสถานีไปยัง PSC	29
รูปที่ 3.2 ข่ายเชื่อมโยงระหว่าง PSCs	30
รูปที่ 3.3 ข่ายเชื่อมโยงระหว่าง PSC ไปยังสถานี	31
รูปที่ 4.1 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1	36
รูปที่ 4.2 โครงข่ายตัวอย่างที่ 2	55
รูปที่ 4.3 โครงข่ายตัวอย่างที่ 3	57
รูปที่ 4.4 โครงข่ายตัวอย่างที่ 4	59
รูปที่ 5.1 ความยาววอล์กออฟ	64
รูปที่ 5.2 ช่วงการเกิดผลกระทบจาก XPM	64
รูปที่ 5.3 Four Wave Mixing (FWM)	65

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.4 กรณีเสื่อมคลายของ FWM (degenerate case of FWM)	66
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายออร์แมลไลซ์ของผลกระทบจากเคอร์กับการเลื่อนทาง ความยาวคลื่น (Kerr effect normalized gain VS wavelength shift)	67
รูปที่ 6.1 ตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในตัวอย่างที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น.....	76
รูปที่ 6.2 ตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในตัวอย่างที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น...	76
รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการจำลองระบบเพื่อคุณภาพสัญญาณด้วยโปรแกรม OptiSystem 4.0 ในระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น	77
รูปที่ 6.4 ตัวอย่างการจำลองระบบเพื่อคุณภาพสัญญาณด้วยโปรแกรม OptiSystem 4.0 ในระบบที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น.....	78
รูปที่ 6.5 คุณภาพสัญญาณของระบบที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น.....	91
รูปที่ 6.6 คุณภาพสัญญาณของระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น	91

ดัชนีคำศัพท์

Access network	เครือข่ายเข้าถึง
Active component	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
Bandwidth	แบนด์วิดท์
Bottleneck	ปัญหาคอขวด
Broadcast-and-Select network	โครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ
Channel spacing	ระยะห่างของช่องสัญญาณ
Coaxial cable	สายเคเบิลแกนร่วม
Cross-Phase Modulation	การกล้ำสัญญาณข้ามกลุ่ม
Data traffic	ปริมาณการส่งข้อมูล
Dense Wavelength Division Multiplexing	การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นอย่างหนาแน่น
Dispersion	ดิสเพอร์ชัน
Dispersion compensation unit	หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน
Fiber nonlinearity	ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
Frequency matching	การจับคู่ทางความถี่
Global method	การพิจารณาแบบวงกว้าง
Insertion loss	การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก
Kerr effect	ผลกระทบจากเคอร์
Link-by-link	วิธีการคิดแบบทีละข่ายเชื่อมโยง
Long-haul network	โครงข่ายระยะไกล
Metropolitan-area-network	โครงข่ายนครหลวง
Optical Add-drop Multiplexer	อุปกรณ์เพิ่มลดช่องสัญญาณทางแสง
Optical communication	การสื่อสารทางแสง
Optical fiber	เส้นใยแสง
Optical receiver	อุปกรณ์รับสัญญาณทางแสง
Optical transmitter	อุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสง
Passive component	อุปกรณ์แพสซีฟ
Passive Star Coupler	อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ
Phase matching	การจับคู่ทางเฟส

Power margin	กำลังส่วนเผื่อ
Reyleigh scattering	การกระเจิงแบบเรย์ลี
Routing	การจัดสรรเส้นทางของสัญญาณ
Self-Phase Modulation	การกล้ำสัญญาณด้วยตัวสัญญาณเอง
Splicing loss	การสูญเสียเนื่องจากการต่อสาย
Splitter	อุปกรณ์แยกสัญญาณ
Splitting loss	การสูญเสียจากการกระจายสัญญาณ
Twisted pair	เส้นทองแดงสายคู่พันเกลียว
Walk-off length	ความยาววอล์กออฟ
Wavelength assignment	การจัดสรรความยาวคลื่น
Wavelength converter	อุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณความยาวคลื่นทางแสง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลมีความสำคัญอย่างมากในเชิงธุรกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ดังนั้นการพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารจึงได้รับความสนใจทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจากนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญมากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอระเบียบขั้นตอนวิธีการแก้ไขปัญหาการผิดเพี้ยนของสัญญาณจากดิสเพอร์ชันและผลกระทบจากเคอร์ซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารให้มีคุณภาพดีขึ้นจากการขยายขนาดของโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มทางแสงแบบแพร์และสัญญาณ โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตที่ผ่านมาการติดต่อสื่อสารจะอยู่ในรูปแบบของการส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านเส้นทองแดงชนิดสายคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือ สายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) ซึ่งในปัจจุบันปริมาณการส่งข้อมูล (data traffic) มีการเพิ่มมากขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยีส่งผลให้การสื่อสารในรูปแบบเดิมมีแบนด์วิดท์ (bandwidth) ไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ ดังนั้นการสื่อสารทางแสง (optical communication) จึงเข้ามามีบทบาทในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากเนื่องจากคุณสมบัติของการสื่อสารทางแสงที่มีแบนด์วิดท์ที่สูงมาก การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลหรือการใช้แบนด์วิดท์ให้คุ้มค่านั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นอย่างหนาแน่น (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) ซึ่งเป็นกลวิธีการรวมช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละช่องสัญญาณแคบกว่า 100 GHz ทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณให้ใช้งานมากขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้การสื่อสารทางแสงสามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ดีกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่น

ข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของเส้นใยแสงเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพมากในการส่งผ่านสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางอื่นๆ ที่ใช้ส่งสัญญาณ โดยจะพบว่าเส้นใยแสงมีข้อดีต่างๆ มากมาย [1] เช่น

- (1) เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแสงต่ำ ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณรวมทั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น
- (2) เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาซึ่งสามารถติดตั้งได้ง่าย จากการศึกษาที่มีขนาดเล็กจึงสามารถรวมเส้นใยแสง หลายเส้นเข้าด้วยกันเป็นสายเคเบิลทำให้ได้จำนวนเส้นที่มากขึ้น เป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้มากขึ้นจากการใช้พื้นที่เท่าเดิม
- (3) เส้นใยแสงถูกผลิตมาจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น ข่าวสารที่ส่งไปกับแสงจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ดังนั้นการแอบลักลอบใช้สัญญาณทางแสงเพื่อดักฟังจึงไม่สามารถกระทำได้
- (4) เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าและการออกแบบสายเคเบิลของเส้นใยแสงมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้น ทำให้สามารถนำเส้นใยแสงไปใช้ได้ทั้งในน้ำได้และเส้นใยแสงยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานอีกด้วยซึ่งเส้นใยแสงบางเส้นมีอายุการใช้งานประมาณ 40 ปี อีกทั้งความต้องการการบำรุงรักษายังน้อยมาก

เนื่องด้วยการสื่อสารทางแสงสามารถรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการส่งผ่านข้อมูลที่ต้องการทั้งคุณภาพและปริมาณที่สูงขึ้นตลอดเวลาได้ ทำให้ระบบสื่อสารผ่านโครงข่ายทางแสงมีการวิจัยและการพัฒนาอย่างกว้างขวาง ซึ่งส่งผลทำให้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ได้ถูกพัฒนาแล้วนำออกมาใช้มากมายหลายประเภททั้งอุปกรณ์แบบกัมมันต์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (active component) และอุปกรณ์แบบพาสซีฟหรืออุปกรณ์ที่ไม่ใช้พลังงานในการทำงาน (passive component) ในโครงข่ายที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากนั้นจะเกิดปัญหาคอขวด (bottleneck) เนื่องจากขีดจำกัดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 40 GHz ดังนั้นการลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงแล้วแทนที่ด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายทางแสงมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (Broadcast-and-Select network) เป็นโครงข่ายแบบหนึ่งของการสื่อสารทางแสงที่อุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นแบบพาสซีฟทั้งหมดประกอบด้วย อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบพาสซีฟ (Passive Star Coupler: PSC), อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง(Optical amplifier) และ หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชัน (Dispersion Compensation Units: DCUs) อีกทั้งยังเป็นโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณจะเป็นการวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ภายในโครงข่ายเช่น อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบพาสซีฟ [2], [3], อุปกรณ์เลือกช่องสัญญาณวิดีโอบนโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ [4], [5], และ อุปกรณ์เพิ่มลดช่องสัญญาณทางแสง (Optical Add-drop Multiplexer: OADM) [6],

การพัฒนาระเบียบวิธีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงบนโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเพื่อกำหนดตำแหน่งการวางที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง [7], [8] เพื่อรองรับการขยายขนาดโครงข่ายจากเครือข่ายเข้าถึง (access network) ไปยังโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้นเช่น โครงข่ายนครหลวง (metropolitan-area-network: MAN) หรือโครงข่ายระยะไกล (long-haul network) เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นนอกจากปัญหาทางด้านกำลังสัญญาณแล้ว ความผิดเพี้ยนของสัญญาณก็จะมีผลมากขึ้นด้วยเช่นกัน ในด้านปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้น เกิดจากดิสเพอร์ชัน (dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการจัดสรรความยาวคลื่น (wavelength assignment) เพื่อช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ตัวอย่างการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้นได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือการติดตั้งหน่วยชดเชยการดิสเพอร์ชันในโครงข่ายทางแสง [9] ซึ่งได้ทำการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแบบวิธีการคิดทีละข่ายเชื่อมโยง (link-by-link) [10] ส่งผลให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกช่องสัญญาณลดลงอย่างมาก สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดสรรความยาวคลื่นที่ผ่านมา [11-14] เช่น การจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการแพร์สัญญาณเฉพาะกลุ่ม (multicast) ในโครงข่ายแบบ WDM ด้วยเงื่อนไขขีดจำกัดของอุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter), การเปรียบเทียบระหว่างจัดการสรรเส้นทางของสัญญาณแสง (routing) และการจัดสรรความยาวคลื่น กับการวางอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณทางแสง (wavelength converter) เป็นต้น แต่ยังไม่มียานวิจัยใดกล่าวถึงการจัดสรรความยาวคลื่นที่สามารถลดผลกระทบความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงเลย ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอระเบียบขั้นตอนวิธีในการกำหนดการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยการพิจารณาแบบวงกว้าง (global method) [7], [8] โดยจะทำการพิจารณาผลกระทบจากทุกข่ายเชื่อมโยงซึ่งจะช่วยให้การกำหนดตำแหน่งและการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ของสัญญาณเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่ส่งผลทำให้เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการคล้ำสัญญาณด้วยตัวสัญญาณเอง (Self-Phase Modulation: SPM) และการคล้ำสัญญาณข้ามกลุ่ม (Cross-Phase Modulation: XPM) หรืออาจเกิดการถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณข้างเคียง (Four Wave Mixing: FWM) ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดเป็นผลกระทบของเคอร์ (Kerr effect) [15], [16] นั้นเราอาศัยการจัดสรรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณให้มีระยะห่างของแต่ละช่องสัญญาณ (channel spacing) มากที่สุด ซึ่งการจัดสรรความยาวคลื่นให้เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มระยะห่างในแต่ละช่องสัญญาณจะเป็นการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากผลกระทบของเคอร์ได้ เนื่องจากการที่แต่ละความยาวคลื่นที่จัดตั้งให้แต่ละช่องสัญญาณมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันทำให้เราสามารถใช้คุณสมบัตินี้เพื่อลดระยะทางวิ่งตัดผ่าน (walk-off length) และทำให้เงื่อนไขการ

จุดประสงค์วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร์และเลือกสัญญาณกับการจัดสรรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงมีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นห่างกันมากที่สุดเพื่อลดผลกระทบของเคอร์

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

โครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางว่าเป็นโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและถูกใช้เป็นเครือข่ายเข้าถึงในระบบการเช่าบริการเส้นใยแสงไปยังบ้านเรือน (fiber-to-the-home : FTTH) นอกจากนี้โครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณยังมีอุปกรณ์หลักคืออุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟซึ่งทำให้การส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางเป็นการสื่อสารทางแสงทั้งหมด การพัฒนาโครงข่ายและขยายขนาดโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณจากเครือข่ายเข้าถึงไปยังโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้นให้เป็นโครงข่ายนครหลวงหรือโครงข่ายระยะไกลจึงมีความน่าสนใจอย่างมากในการศึกษาวิจัย โดยเมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะมีปัญหาทางคุณภาพของสัญญาณทั้งปัญหาทางด้านกำลังสัญญาณและความผิดเพี้ยนของสัญญาณก็จะมีผลมากขึ้นด้วยเช่นกัน ปัญหาทางด้านความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้นเกิดจากปัจจัยสองส่วนคือ ดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ในส่วนของดิสเพอร์ชันเราสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีผลต่อสัญญาณโดยใช้การจัดสรรความยาวคลื่น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการกำหนดระเบียบวิธีขั้นตอนในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพื่อขจัดปัญหาทางด้านดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพและการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบของเคอร์ในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ โดยจากการศึกษาคูณลักษณะของโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณนั้นเมื่อสถานีใดส่งสัญญาณเข้าสู่โครงข่ายสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามาจะถูกส่งผ่านไปยังทุกสถานีในโครงข่ายดังนั้นการกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพื่อทำให้คุณภาพสัญญาณทุกจุดในโครงข่ายอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และใช้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันให้คุ้มค่าที่สุดจึงต้องพิจารณาผลกระทบจากทุกข่ายเชื่อมโยงแบบวงกว้าง (global method)

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาระเบียบขั้นตอนวิธีในการกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
2. จัดสรรความยาวคลื่นของช่องสัญญาณต่างๆ ในการส่งผ่านสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงให้ห่างกันมากที่สุดเพื่อลดผลกระทบของเคอร์ ที่เกิดจากการเลือกใช้ความยาวคลื่นในการส่งผ่านสัญญาณที่ใกล้กัน
3. นำเสนอองค์ความรู้ใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อนำไปพัฒนาโครงข่ายสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในอนาคต

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยแสงโดยเฉพาะผลของค่าดิสเพอร์ชันรวมทั้งการแก้ไขดิสเพอร์ชันในโครงข่าย
2. ศึกษาคุณสมบัติโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณพร้อมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
3. กำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการสร้างสมการและอสมการเพื่อใช้ในการกำหนดเงื่อนไขของการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิดชดเชยความชันของดิสเพอร์ชันและชนิดไม่ชดเชยความชันของดิสเพอร์ชันในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
4. ทดลองกับโครงข่ายตัวอย่างแบบต่างๆ กัน
5. กำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการจัดสรรความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเพื่อหลีกเลี่ยงผลของ Kerr effect ให้ได้มากที่สุด
6. ทดสอบระเบียบขั้นตอนวิธีที่สร้างขึ้นกับโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ กัน
7. วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลระหว่างโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ ที่นำมาทดลอง
8. เรียบเรียงเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. สร้างระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
2. สร้างระเบียบขั้นตอนวิธีในการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเพื่อลดผลจาก Kerr effect โดยการจัดให้ความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณที่ส่งผ่านไปในแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีระยะห่างกันมากที่สุด
3. ทำการทดลองระเบียบวิธีขั้นตอนกับโครงข่ายตัวอย่างที่กำหนดขึ้น
4. หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นแบบไม่ชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Non-Slope Compensation: NSC) และชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Slope-Compensation: SC) โดยมีระยะการชดเชยเมื่อเทียบกับ SMF แล้วหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสามารถชดเชยได้พอดีคือ 100 กิโลเมตร (dispersion level)
5. ระยะห่างของช่องสัญญาณ (channel spacing) มีค่า 25 GHz

1.6 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
2. วิธีการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันภายในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเป็นครั้งแรก
3. วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจาก Kerr effect เป็นครั้งแรก

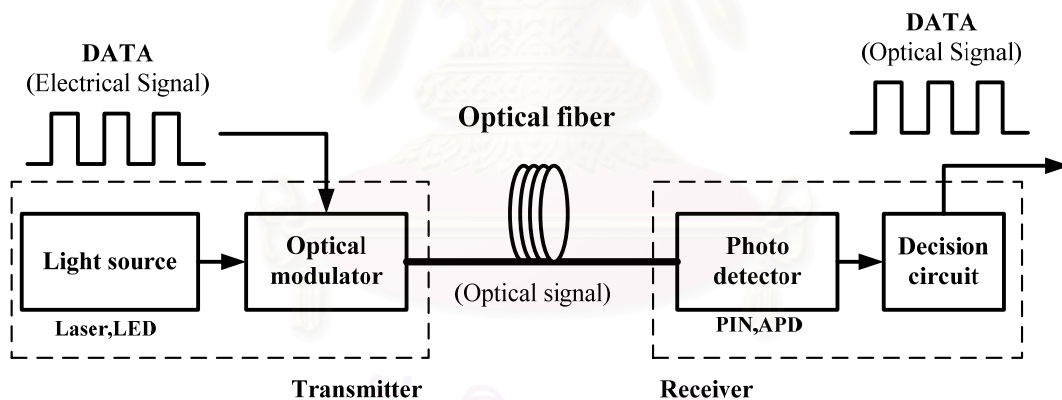
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของการส่งสัญญาณทางแสง

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงขั้นพื้นฐาน การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะไกล รวมไปถึงการแนะนำให้รู้จักว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงอย่างไรบ้าง สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงรวมทั้งการกล่าวถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อสัญญาณในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงซึ่งได้แก่ การลดทอนกำลังสัญญาณ, ผลกระทบของเคอร์และดิสเพอร์ชัน สำหรับในส่วนที่สามเป็นเทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากผลกระทบของเคอร์และผลจากดิสเพอร์ชัน สุดท้ายจะกล่าวถึงรายละเอียดของการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นอย่างหนาแน่นบนโครงข่ายทางแสงแบบแพร์และเลือกสัญญาณ

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (Optical transmitter), เส้นใยแสง (Optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (Optical receiver) การมอดูเลตสัญญาณแสงมีอยู่สองประเภทหลักๆ คือ การมอดูเลตภายนอก (External modulation) [17] ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) และ อุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (Modulator) แยกออกจากกัน ส่วนอีกประเภทจะเป็นการมอดูเลตโดยตรง (Direct modulation) [17] ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์เพียงชุดเดียว

เส้นใยแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสงจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงที่ใช้งานอยู่จะเป็นเส้นใยแสงโหมดเดียว (Single mode fiber: SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (Attenuation coefficient) กว่าเส้นใยแสงแบบหลายแผนคลื่น (Multi-mode fiber: MMF) ซึ่งมีราคาถูกกว่า ส่วนเส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชัน (Dispersion-shifted fiber: DSF) ซึ่งจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ ความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion) จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด (1550 nm) และเส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชันโดยที่ความยาวคลื่น 1550 nm ค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ (Non-zero Dispersion-shifted fiber: NZDSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

อุปกรณ์รับสัญญาณแสง ประกอบด้วยอุปกรณ์สองชนิดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น PIN (Positive, intrinsic, negative junctions) และ APD (Avalanche photodiode) ส่วนองค์ประกอบที่สองของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงคือ วงจรตัดสินใจ (Decision circuit) ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำหนดภายในวงจรตัดสินใจ

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของ Maxwell โดยเริ่มต้นจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุด จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Nonlinear Schrödinger equation (NLSE) [18], [19]

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

โดยที่ A เป็น Envelope ของสัญญาณ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน β_2 เป็นค่า Group-velocity dispersion (GVD) γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient) z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง และ T เป็นกรอบเวลาที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งสามารถแสดงดังในสมการ (2.2)

$$T = t - \frac{z}{v_g} \quad (2.2)$$

ในพจน์ทางขวามือของสมการ (2.1) แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อสัญญาณ A ซึ่งประกอบด้วย การลดทอนสัญญาณ (α) เมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงานของสัญญาณแสงลดต่ำลงและเราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สองทางขวามือของสมการ (2.1) คือ GVD (β_2) เป็นผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก สำหรับพจน์สุดท้ายทางขวามือของสมการ (2.1) คือ ผลกระทบของเคอร์ริงซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงซึ่งจะทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออก ความรุนแรงของเคอร์ริงในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (Peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง เพื่อที่จะดูผลกระทบแต่ละปัจจัยในสมการ (2.1) ต่อสัญญาณ เราสามารถแยกคิดผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัญญาณได้ในหัวข้อถัดไป ดังนี้

2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation loss)

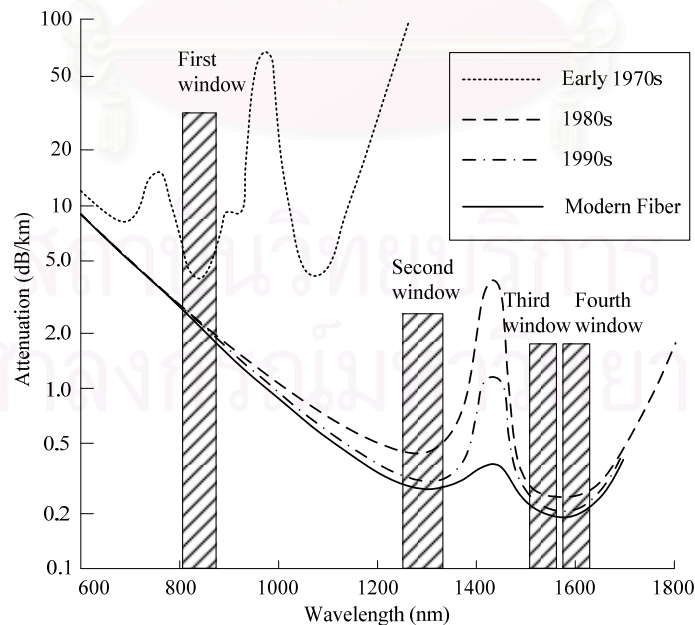
เป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณ [4] ดังนี้

$$P(L) = P(0) - \alpha L, \quad (2.3)$$

โดยที่ $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

α คือ ค่าคงตัวของ การลดทอน [dB/km]

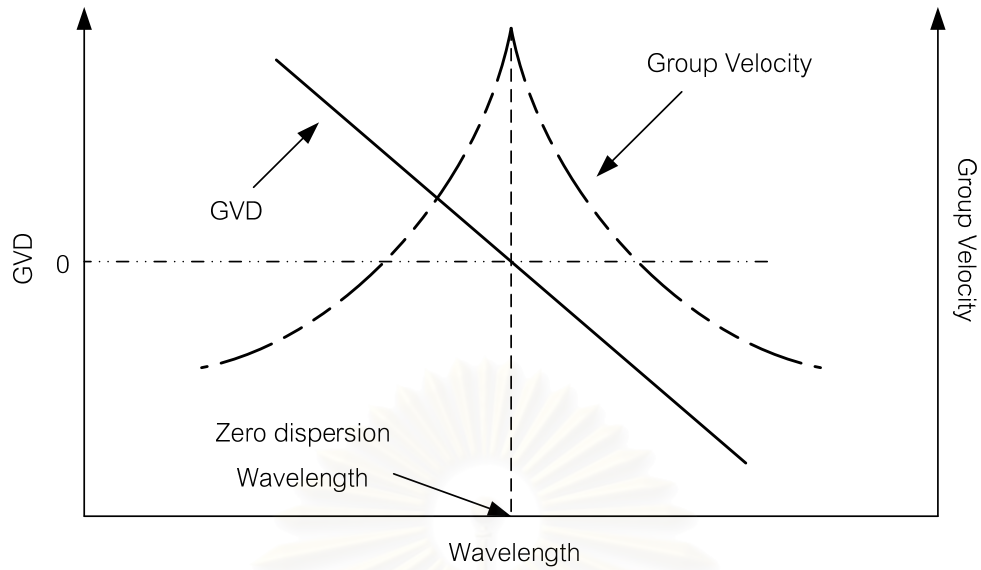


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น

สำหรับค่าคงตัวการลดทอน α นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 4 เส้นโดยเส้นที่สองจากบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างสุดเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกาและจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ซึ่งทำให้อัตราการสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูปที่ 2 หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นประสลับจุดที่มีความยาวคลื่น 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 เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm

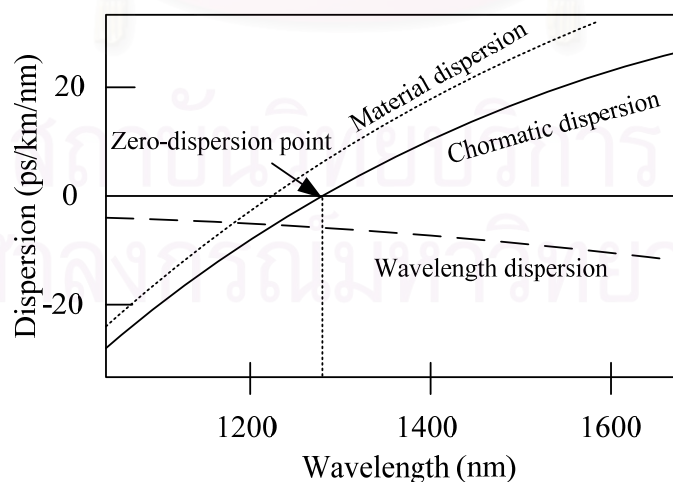
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

สัญญาณทางแสงจะเกิดการผิดเพี้ยนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงมีระยะทางยาวขึ้น การผิดเพี้ยนนี้เป็นผลมาจากดิสเพอร์ชันแบบภายในแผนคลื่น (intramodal dispersion) และผลการประวิงระหว่างโหมด (intermodal delay effects) โดยการผิดเพี้ยนเหล่านี้สามารถอธิบายด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocities) ของโหมดการเดินทาง (guided modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มนี้คือความเร็วของพลังงานในแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง รูปที่ 2.3 เป็นการแสดงตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (group velocity dispersion : GVD) เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ GVD เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงหนึ่งๆ ประกอบด้วยหลายความถี่โดยองค์ประกอบแต่ละความถี่นั้นมีความเร็วกลุ่มต่างกัน จึงส่งผลทำให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาที่แตกต่างกันในการเดินทางซึ่งมีผลทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง



รูปที่ 2.3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม
ในแต่ละความยาวคลื่น

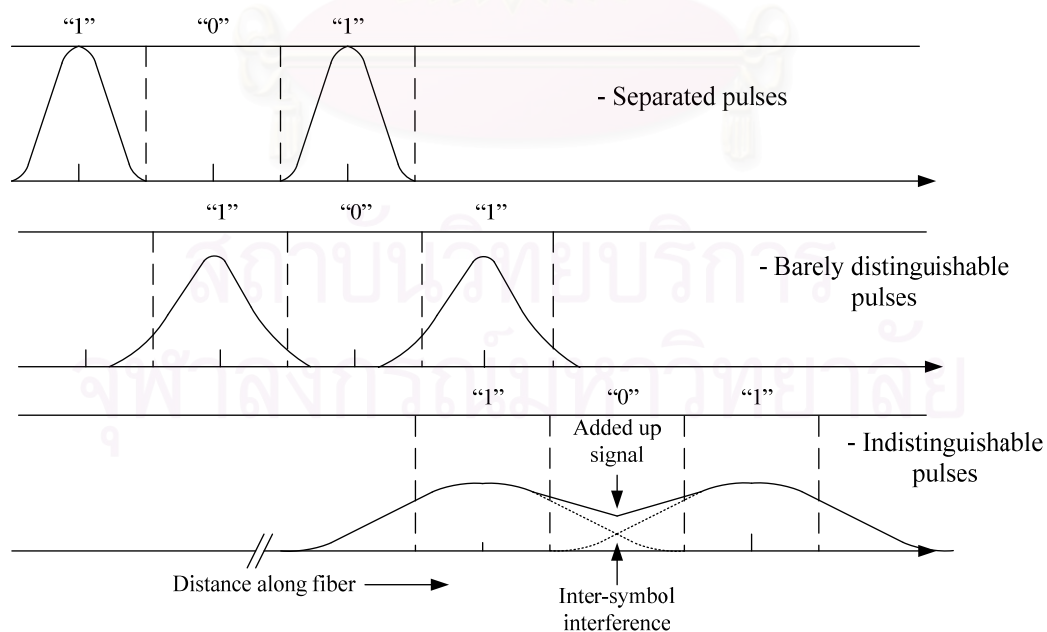
ดิสเพอร์ชันแบบภายในแผ่นคลื่นหรือดิสเพอร์ชันภายในสื่สัญญาณ (chromatic dispersion) เป็นการขยายตัวของพัลส์ที่เกิดขึ้นในโหมดเดียว (single mode) เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว ผลของดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน



รูปที่ 2.4. การกระจายความถี่ในแต่ละสื่สัญญาณ [15]

ดิสเพอร์ชันภายในสื่อสัญญาณเป็นผลรวมของดิสเพอร์ชันจากวัสดุ (material dispersion) อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น (waveguide dispersion) ซึ่งเป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง รูปที่ 2.4 แสดงค่าดิสเพอร์ชันที่แตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของแสง การส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1310 nm สำหรับ SMF: ITU-T G.652 ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero-dispersion point) จะหลีกเลี่ยงผลของดิสเพอร์ชันได้ ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการปรับปรุงเพื่อให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดทอนต่ำ เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Dispersion Shifted Fiber (DSF: ITU-T G.653) และ เส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF: ITU-T G.655)

อย่างไรก็ตาม ในระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นซึ่งสัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นรวมอยู่ด้วยกัน แม้จะมีการเลือกความยาวคลื่นหนึ่งให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ความยาวคลื่นอื่นๆที่เหลือย่อมได้รับผลจากดิสเพอร์ชันค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณในช่องสัญญาณที่ต่างกัน (signal distortion) และรุนแรงไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าความชันของเส้นโค้งดิสเพอร์ชัน (dispersion slope) โดยการบิดเบี้ยวของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์สัญญาณซึ่งถ้าไม่ทำการแก้ไขจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ รูปที่ 2.5 เป็นการแสดงการเกิด inter-symbol interference (ISI) จากผลของดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.5. การแสดงการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-symbol interference)

ส่วนการประวิงระหว่างโหมดเป็นผลของแต่ละโหมดการเดินทางของแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกันของค่าความเร็วกลุ่มที่ความถี่เดียวกันซึ่งเกิดในเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (Multi-Mode Fiber : MMF) ซึ่งมีผลรุนแรงกว่าเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว

2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)

ผลของเคอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับกำลังงานของสัญญาณ เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทคือ Self-phase modulation (SPM), Cross-phase modulation (XPM), และ Four-wave mixing (FWM)

- 1.) Self-Phase Modulation (SPM) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการที่ (2.4)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T}, \quad (2.4)$$

โดยที่ $\Delta\omega_{NL}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อหน่วยเวลา

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

ซึ่งค่า $\phi_{NL}(z,T)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi_{NL} = n_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) L |E_0|^2 = n_2 k_0 L |E_0|^2, \quad (2.5)$$

โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear-index coefficient)

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (free space wave number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุด

2.) Cross-Phase Modulation (XPM) ปปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไปเหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม สำหรับสมการของแสดงการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของพัลส์ A_1 และ A_2 ที่มีการแผ่สัญญาณไปในเส้นใยแสงพร้อมกัน แสดงดังสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ โดยในสมการกำหนดให้พัลส์ A_1 เป็นพัลส์อ้างอิง

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} = i\gamma_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + d \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} = i\gamma_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) A_2, \quad (2.7)$$

$$d = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1}v_{g2}}, \quad (2.8)$$

เมื่อ A_1 คือ แอมพลิจูดของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1
 A_2 คือ แอมพลิจูดของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2
 d คือ การวัดการผิดคู่ของความเร็วกลุ่มระหว่างสองพัลส์

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะเห็นว่าด้านขวาของสมการจะแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงโดยพจน์แรกจะแสดงถึง SPM และพจน์หลังแสดงถึง XPM ซึ่งมีความรุนแรงมากกว่า SPM 2 เท่า [15], [16] ส่วนสมการที่ (2.8) แสดงความแตกต่างของความเร็วกลุ่มระหว่างสองพัลส์ซึ่งถ้าค่าพารามิเตอร์ d มีค่าน้อยจะทำให้สองพัลส์ซึ่งเคลื่อนตัวซ้อนทับกันอยู่ให้แยกออกจากกันนั้นจะใช้ระยะเวลาสั้นส่งผลให้ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงส่งผลต่อสัญญาณมากขึ้น

3.) Four Wave Mixing (FWM) เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไข การจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังข้ามให้แกกันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆกันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1, f_2, f_3 ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.9)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3, \quad (2.9)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3, \quad (2.10)$$

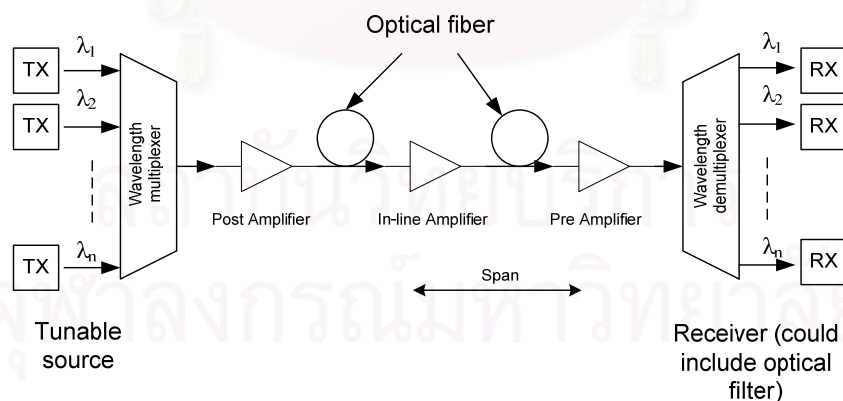
โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n ดังนั้นประสิทธิภาพของ FWM

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่า Intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (ghost pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตสัญญาณเชิงเลขแบบออน-ออฟ (ON-OFF keying: OOK) สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

การลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุดเพื่อทำให้การวิ่งตัดกันของสัญญาณเนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้ยากขึ้น พร้อมทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.3 การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นอย่างหนาแน่นบนโครงข่ายทางแสงแบบแพร์และเลือกสัญญาณ

2.3.1 การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นทางแสง



รูปที่ 2.6 ระบบและองค์ประกอบของดับเบิลยูดีเอ็ม

จากการพัฒนาและวิจัยเทคโนโลยีการผลิตเส้นใยแสงทำให้ความกว้างของแบนด์วิดท์ที่สามารถส่งข้อมูลข่าวสารมีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 800 nm ถึง 1,600 nm [15] ซึ่งมีจำนวนความยาวคลื่นมากมายเพียงพอกับการใช้งานที่หลากหลายของโครงข่ายทั้งการส่งข้อมูล, ภาพ, และเสียงด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูง การที่จะใช้ประโยชน์ของจำนวนความยาวคลื่นที่มากมายขนาดนี้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไปอีกนั้นต้องมีการใช้เทคโนโลยี WDM [20], [21] ข้อมูลแต่ละชุดจะครอบครองสัญญาณแสงในแต่ละความยาวคลื่นโดยระบบและองค์ประกอบของ WDM เป็นดังรูปที่ 2.6 มีสัญญาณจำนวน N ความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์และส่งไปตามเส้นใยแสงเส้นเดียว และอุปกรณ์ที่ปลายทางจะเลือกรับในความยาวคลื่นที่ต้องการ ในช่วงแรกระบบ WDM จะเป็นการส่งความยาวคลื่นเพียง 2, 4, 8, 12, และ 16 ความยาวคลื่นโดยใช้ส่งสัญญาณในระยะทางสั้นๆ เทคโนโลยีในระยะถัดมาคือ coarse WDM (CWDM) และ dense WDM (DWDM) โดยการพัฒนาการของเทคโนโลยีจะเกี่ยวข้องกับขีดจำกัดของระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่น เทคโนโลยี CWDM ทั่วไปแล้วจะมีระยะห่างของความยาวคลื่นอยู่ที่ 20 nm (3000 GHz) มีจำนวนความยาวคลื่นอยู่ที่ 18 ความยาวคลื่นและถูกจำกัดอยู่ที่พิสัยความยาวคลื่น 1270 nm ถึง 1610 nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 ส่วนเทคโนโลยี DWDM นั้นปกติจะมีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นอาจจะอยู่ที่ 200, 100, 50, หรือ 25 GHz โดยมีจำนวนช่องสัญญาณให้สามารถใช้ได้จำนวนนับร้อยช่องสัญญาณตามอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีใช้งานและสามารถส่งสัญญาณไปได้หลายพันกิโลเมตรโดยต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณตามเส้นทาง [19] ทำให้ระหว่างการเดินทางของสัญญาณผ่านเส้นใยแสงจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงเนื่องจากการสูญเสียกำลังงานที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงโดยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณทางแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่น (Optical attenuation coefficient: α dB/km) ทำให้กำลังงานสัญญาณแสงลดลงและอาจจะเป็นผลให้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Optical detector) ไม่สามารถตรวจจับกำลังงานแสงได้ สำหรับค่ากำลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจะสามารถแปลงกำลังงานแสงเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้คือค่าความไว (Sensitivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ

เราสามารถแบ่งลักษณะการใช้งานอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงได้ดังนี้

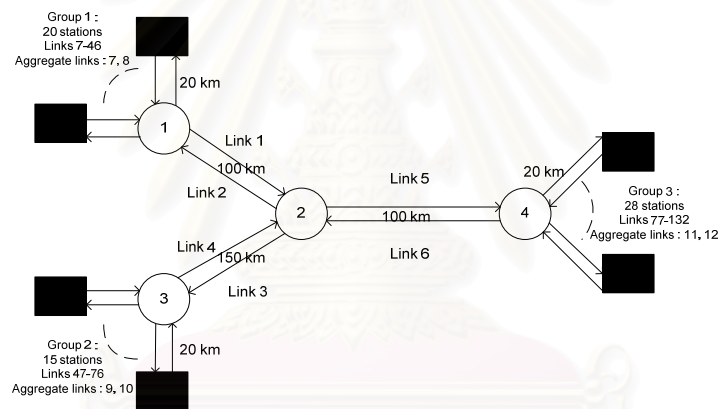
- 1) Post amplifier วางไว้ก่อนเข้าสายส่งเพื่อเพิ่มกำลังของสัญญาณ
- 2) Line amplifier วางไว้ระหว่างสายส่งสัญญาณเป็นช่วงๆ เพื่อชดเชยการลดทอนสัญญาณเนื่องจากเส้นใยแสง
- 3) Pre amplifier ทำการขยายสัญญาณเพื่อปรับสัญญาณให้ดีขึ้นก่อนเข้าอุปกรณ์รับสัญญาณ

ส่วนระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (span) นั้นเราต้องไม่กำหนดให้มีระยะทางมากเกินไปจนกำลังสัญญาณถูกลดทอนลงทำให้อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงไม่สามารถตรวจจับได้หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางแสง (Optical Signal to Noise Ratio: OSNR) มีค่าต่ำซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพที่ไม่ดีของระบบ

2.3.2 โครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (Broadcast and Selective network)

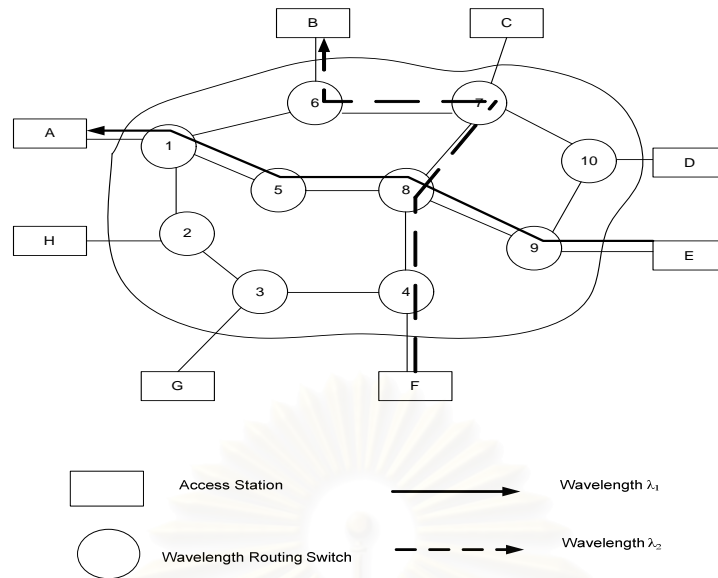
โครงข่ายทางแสงที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วยความยาวคลื่นสามารถแบ่งอย่างกว้างๆได้เป็น 2 ประเภท [21] ได้แก่

- 1) โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (Broadcast-and-Selective WDM Networks)
- 2) โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง (Wavelength-Routed WDM Networks)



รูปที่ 2.7. โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ [21]

รูปที่ 2.7 แสดงถึงตัวอย่างโครงข่ายแบบดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณที่ประกอบไปด้วยจำนวนข่ายเชื่อมโยงจำนวน 132 ข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมโยงสถานีทั้งหมดจำนวน 63 สถานีและอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวต่อแบบแพสซีฟจำนวน 4 ตัว ซึ่งรูปแบบการเชื่อมโยงกันอยู่ในรูปของโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณโดยไม่ปรากฏวงปิดในโครงข่าย โดยแต่ละสถานีประกอบด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณทำหน้าที่ส่งสัญญาณหนึ่งความยาวคลื่นเฉพาะ ส่งกระจายไปยังทุกสถานีในโครงข่าย และ อุปกรณ์รับสัญญาณที่สามารถปรับค่าเพื่อเลือกรับสัญญาณแสงจากสถานีอื่น ๆ ในความยาวคลื่นที่ต้องการได้ [21] โดยค่ากำลังสัญญาณที่เข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณจะต้องมีค่ามากกว่าระดับพลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถตรวจจับได้ (sensitivity level หรือ P_{sen}) [7]

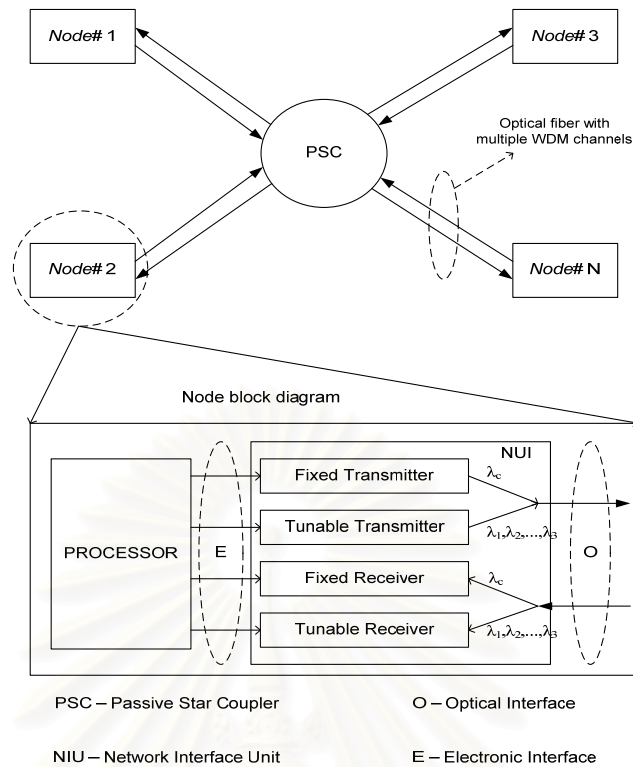


รูปที่ 2.8. โครงข่ายดีดัดเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง [21]

รูปที่ 2.8 แสดงโครงข่ายประเภทโครงข่ายดีดัดเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง (Wavelength-Routed) ประกอบด้วยอุปกรณ์ไวงาน (active device) คืออุปกรณ์เชื่อมต่อแบบไขว้ทางความยาวคลื่น (wavelength cross-connect) ที่เชื่อมโยงระหว่างกันด้วยเส้นใยแสง โดยการทำงานของโครงข่ายนี้จะต่างจากโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณซึ่งการส่งสัญญาณจากสถานีต้นทางไปสถานีปลายทางคู่ใดคู่หนึ่งจะมีการกำหนดความยาวคลื่นประจำแต่ละเส้นทางขึ้นทำให้จำเป็นต้องทำสำเนาข้อมูลซ้ำๆหลายครั้ง หากต้องการส่งไปยังสถานีปลายทางหลายสถานี

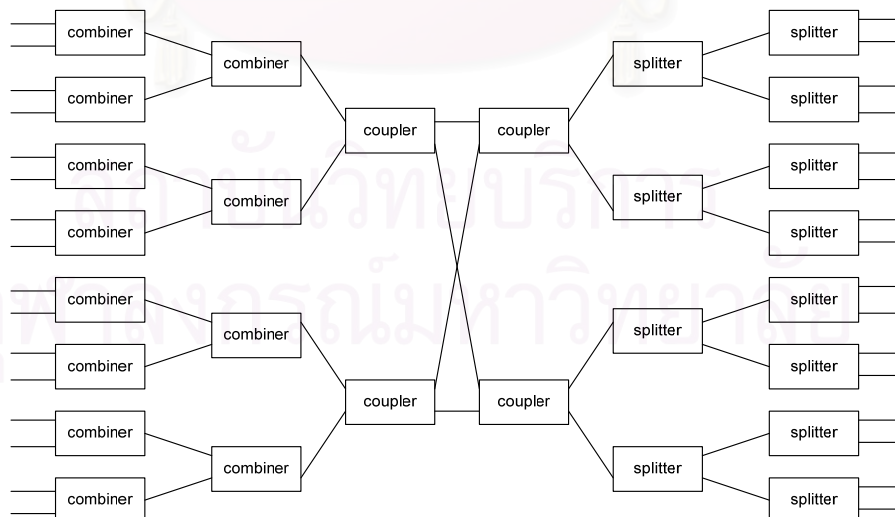
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้งานโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณเนื่องจากเป็นโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายเป็นอุปกรณ์ทางแสงทั้งหมดทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลสูง แต่จำเป็นต้องมีการกำหนดความยาวคลื่นให้แต่ละสถานีไม่ให้ซ้ำซ้อนกันเนื่องจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟไม่มีความสามารถในการจัดสรรความยาวคลื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9. องค์ประกอบภายในสถานี [21]

รูปที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบภายในสถานีหนึ่งๆ ซึ่งจะมีอุปกรณ์ทั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณ อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งอาจมีทั้งแบบที่ส่งหรือรับได้เพียงความยาวคลื่นเดียว (fixed transmitter หรือ fixed receiver) และแบบที่เลือกส่งหรือรับได้หลายความยาวคลื่น (tunable transmitter หรือ tunable receiver)



รูปที่ 2.10. 16x16 PSC [21]

อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟแต่ละตัวประกอบด้วยพอร์ตขาเข้าและพอร์ตขาออกเป็นคู่ๆ เช่น $N \times N$ star คืออุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟที่มีดีกรีเท่ากับ N จะมีคู่พอร์ตขาเข้ากับพอร์ตขาออกจำนวน N คู่ เป็นต้น โครงสร้างของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟเป็นดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงตัวอย่างของ 16×16 PSC ซึ่งเมื่อมีสัญญาณแสงเข้าที่พอร์ตใดๆ ทางซ้ายมือสัญญาณแสงจะกระจายออกยังพอร์ตทางขวามือทั้ง 16 พอร์ต ซึ่งค่ากำลังสัญญาณก็จะลดทอนลงตามสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณ

ขาเข้า (P_{in}) กับกำลังสัญญาณขาออก (P_{out}) [21] ดังสมการที่ (2.11)

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{N}, \quad (2.11)$$

โดยที่ N คือ ดีกรีของ PSC

จากสมการที่ (2.11) เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเข้าสู่พอร์ตขาเข้าของ $N \times N$ PSC ด้วยกำลังขาเข้า P_{in} หลังจากที่ผ่านมาโครงสร้างภายในของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟสัญญาณจะถูกแบ่งเป็น N ส่วนและกระจายออกทุกพอร์ตขาออกด้วยกำลังเท่ากับ P_{out}

แต่สำหรับโครงข่ายที่ทำการออกแบบนั้น เราใช้อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟไม่สะท้อนกลับ (Non-reflective PSC) ซึ่งพอร์ตขาออกจะส่งผ่านสัญญาณในทุกความยาวคลื่นที่เข้าสู่ PSC นั้นๆ ยกเว้นความยาวคลื่นในพอร์ตขาเข้าที่เป็นคู่ของมัน ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟหมายเลข 2 ในรูปที่ 2.10 พบว่าสายเชื่อมโยงที่ 5 มีสัญญาณรวมทั้งสิ้น 35 ความยาวคลื่นซึ่งมาจาก สายเชื่อมโยงที่ 1 จำนวน 20 ความยาวคลื่น และจากสายเชื่อมโยงที่ 4 จำนวน 15 ความยาวคลื่น โดยไม่นับรวมความยาวคลื่นที่มาจากสายเชื่อมโยงที่ 6 ที่เป็นคู่ของสายเชื่อมโยงที่ 5 เอง

สำหรับกรณีค่ากำลังสัญญาณที่ลดทอนลงไปในนั้นก็จะเป็นไปตามสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณขาเข้า P_{in} กับกำลังสัญญาณขาออก P_{out} ที่ถูกปรับแก้ใหม่ดังนี้

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{N-1}, \quad (2.12)$$

โดยที่ N คือ ดีกรีของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ

จากสมการที่ (2.12) สัญญาณขาเข้า P_{in} เมื่อเข้าสู่ $N \times N$ PSC จะกระจายออก $N-1$ พอร์ตขาออกด้วยกำลังเท่าๆกันเท่ากับ P_{out} เราเรียกค่าการสูญเสียข้างต้นอันเนื่องมาจากกำลังสัญญาณขาเข้าอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟซึ่งถูกลดทอนไปดังสมการ (2.12) ว่าการสูญเสียจากการกระจายสัญญาณ (splitting loss) [21]

เนื่องจากการลดทอนกำลังสัญญาณ เราจำเป็นต้องมีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงเพื่อขยายสัญญาณให้อุปกรณ์รับสัญญาณทางแสงสามารถตรวจจับสัญญาณได้ การสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า อัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงมีค่าคงที่เท่ากันตลอดช่วงแบนด์วิธ [8], [10], [22-24]

จากสมมติฐานดังกล่าว เราได้แบบจำลองของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง [8] ดังนี้

$$\frac{P_{in}}{P_{sat}} = \frac{1}{G-1} \cdot \ln\left(\frac{G_0}{G}\right), \tag{2.13}$$

โดยที่ P_{in} คือ ระดับกำลังสัญญาณขาเข้าทั้งหมดรวมทุกความยาวคลื่น

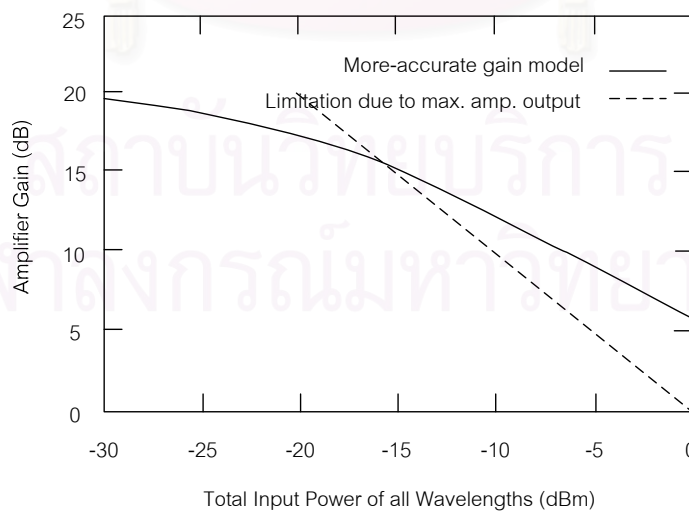
P_{sat} คือ กำลังสัญญาณอิ่มตัวภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง [mW]

G คือ อัตราขยายสัญญาณที่ได้รับจริง (actual gain achieved)

G_0 คือ อัตราขยายสัญญาณขนาดเล็ก (small signal gain)

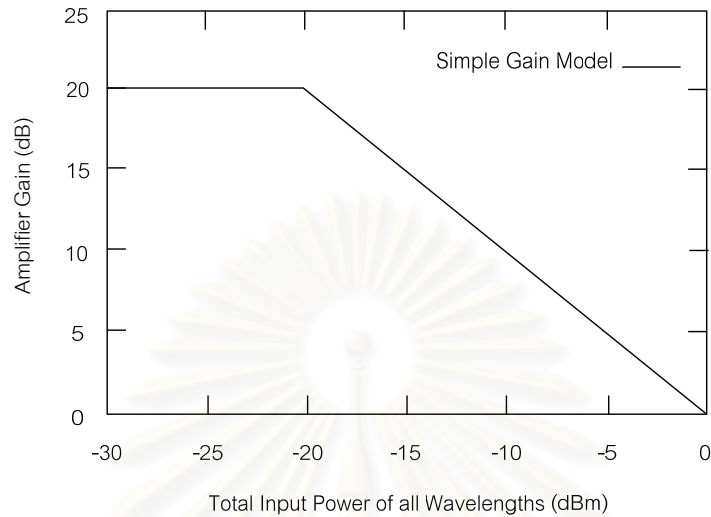
สมการที่ (2.13) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_{in} กับ G โดยที่ G_0 และ P_{sat} เป็นค่าคงตัวมีค่าประมาณ 1.43 และ 100 mW ตามลำดับ [8]

รูปที่ 2.11 เป็นกราฟซึ่งแกนตั้งแสดงค่าของอัตราขยายสัญญาณของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง G [dB] ส่วนแกนนอนแสดงค่าของกำลังสัญญาณขาเข้าทั้งหมดของทุกความยาวคลื่น (total Input Power of all Wavelengths: P_{in} [dBm]) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงโดยเส้นทึบ จากกราฟจะเห็นว่าค่า P_{in} ในช่วงประมาณ -15 dB ถึง 0 dB ความสัมพันธ์ของ G กับ P_{in} จะเป็นดังเส้นประเนื่องมาจากผลของการอิ่มตัวของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง



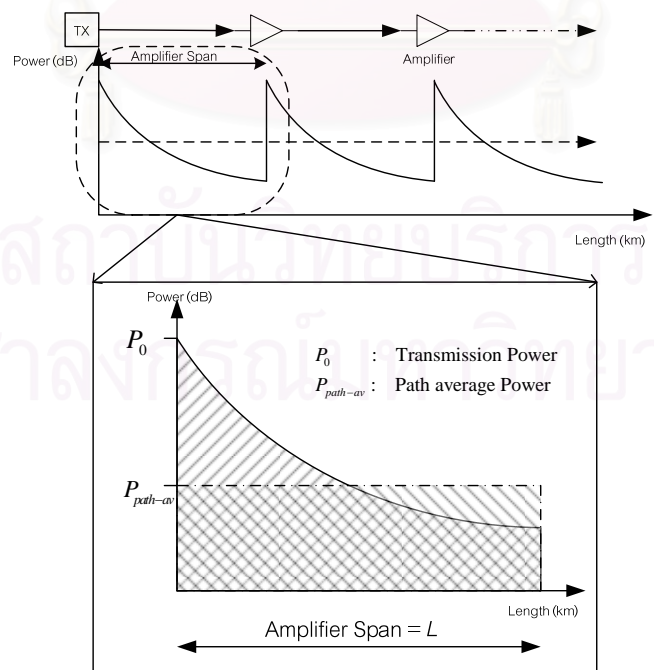
รูปที่ 2.11 แบบจำลองอัตราขยายสัญญาณอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง [8]

รูปที่ 2.12 แสดงค่าโดยประมาณของอัตราขยายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงโดยให้มีค่าคงที่ประมาณ 19.72 dB เมื่อกำลังสัญญาณขาเข้ามีค่าอยู่ในช่วง [-30,-19.72] dBm



รูปที่ 2.12 แบบจำลองอัตราขยายสัญญาณของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงโดยประมาณ [8]

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่ากำลังส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงแบบกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง (path average power) ซึ่งมีความแม่นยำเพียงพอในการจำลองระบบ จากรูปที่ 2.13 เราจะเห็นว่าพื้นที่ใต้รูปเส้นโค้งจะมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งแสดงให้เห็นการใช้ค่าแทนการใช้ค่ากำลังสัญญาณทางแสงที่ลดทอนสัญญาณตามระยะทาง



รูปที่ 2.13. การเฉลี่ยกำลังส่งของสัญญาณแบบเฉลี่ยตามระยะทาง

โดยเราสามารถหาค่ากำลังสัญญาณทางแสงคงที่เพื่อทำการจำลองระบบได้จากสมการที่ (2.14) เราจะได้ค่ากำลังของสัญญาณเฉลี่ยตามคาบการขยายสัญญาณ (amplifier span) ที่กำหนดเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณผ่านโครงข่ายจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ

$$P_{path-av} = \frac{1}{L} \int_0^L P_0 e^{-\alpha z} dz, \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{\alpha[\text{dB}]}{4.343}, \quad (2.15)$$

- เมื่อ $P_{path-av}$ คือ ค่ากำลังสัญญาณทางแสงเฉลี่ยตามระยะทาง [mW]
 P_0 คือ ค่ากำลังสัญญาณทางแสงจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงหรือจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง [mW]
 L คือ คาบการขยายสัญญาณ (km)
 α คือ ค่าการลดทอนสัญญาณ (km^{-1})

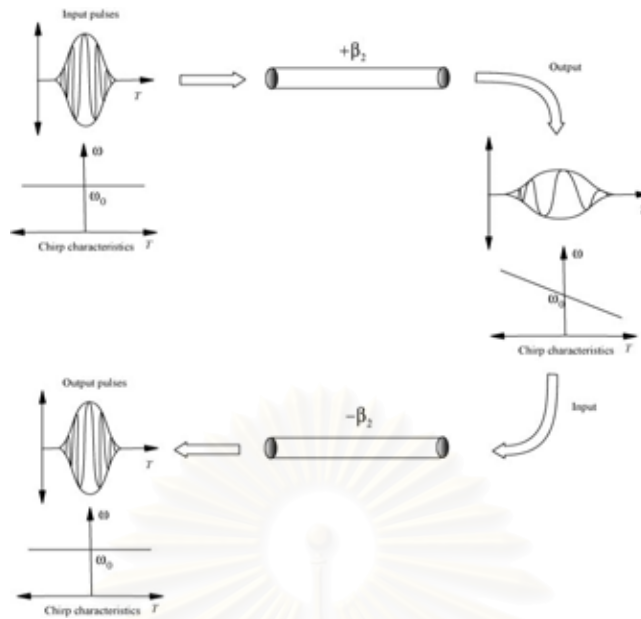
2.4 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน (Dispersion management technique)

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการ (2.16)

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0, \quad (2.16)$$

- โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/km/nm]
 D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]
 L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]
 L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]

เทคนิคการจัดการความเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD (β_2) ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า GVD (β_2) ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ เราสามารถแปลงค่าดิสเพอร์ชันกับ GVD ได้ดังสมการ (2.17)



รูปที่ 2.14 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน

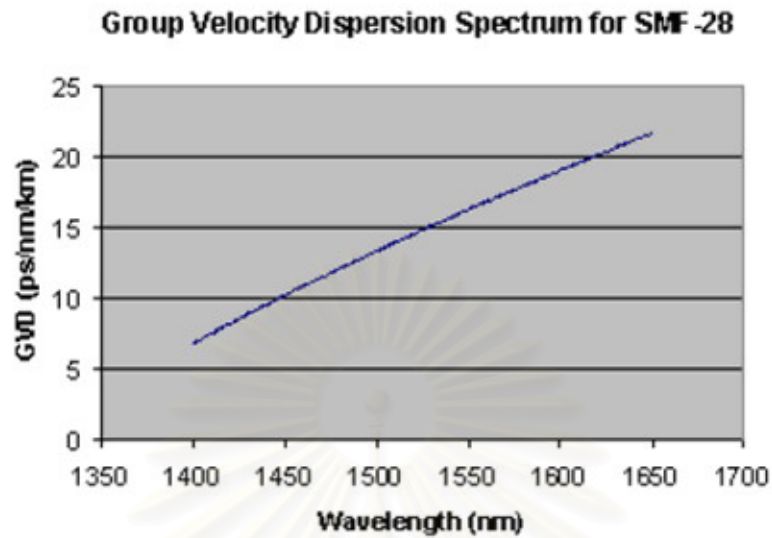
$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \tag{2.17}$$

- โดยที่ D คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]
- c คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 2.99739×10^8 m/s
- λ คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]
- β_2 คือ ค่า GVD [ps^2/km]

นอกจากนี้การที่ทำการวางความยาวคลื่นโดยให้มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ยังช่วยลดผลเสียจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เนื่องจากการมีค่าดิสเพอร์ชันที่จะส่งผลทำให้เกิดการลดลงของค่ากำลังสัญญาณสูงสุด (peak power) ของสัญญาณ ดังนั้นดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่ากำลังสัญญาณมีที่สูงก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังของสัญญาณน้อยลงโดยการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่ไม่พอดีมี 2 กรณีคือการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเกินค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณ (dispersion overcompensation) และการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันต่ำกว่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณ

2.4.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองระบบ

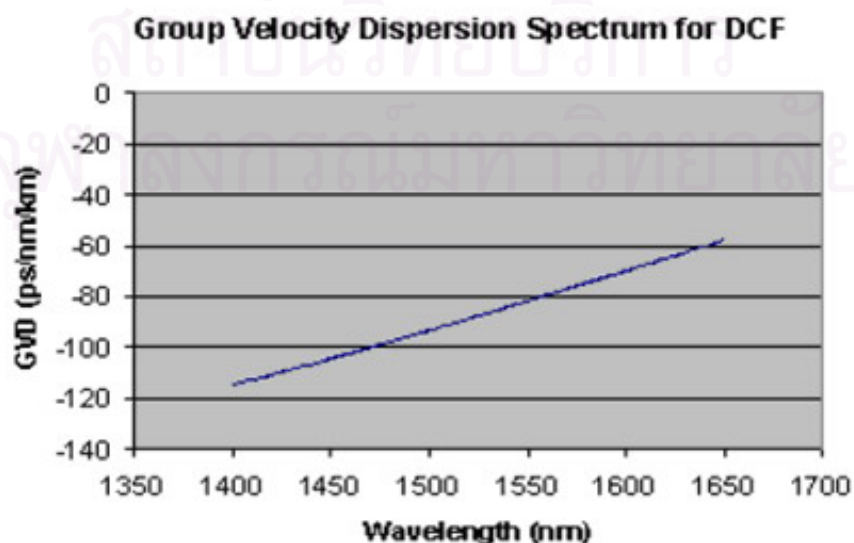
วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีที่ใช้ได้จริงสำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน โดยในการทดลองเบื้องต้นเราได้กำหนดค่าความยาวคลื่นตาม 25-GHz-grid ITU ให้แต่ละสถานี และใช้เส้น



รูปที่ 2.15. การกระจายความเร็วกลุ่มของ SMF-28

รูปที่ 2.15 แสดงคุณลักษณะของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณทางแสงโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชัน ส่วนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันนั้นในการทดลองได้ใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน 2 ชนิดคือ

- 1) เส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันแบบไม่ชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Non slope compensated dispersion compensating fiber: NSC-DCF) มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ -82 ps/km/nm ที่ 1550 nm ด้วยความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ $0.25 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันของ NSC-DCF และความยาวของ NSC-DCF ในหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสะสมของเส้นใยแสง G.652 ในระยะทาง 100 กิโลเมตร



รูปที่ 2.16. การกระจายความเร็วกลุ่มของ DCF

ในการคำนวณหาค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์ NSC-DCF เพื่อใช้ในการจำลองระบบเราจำเป็นต้องคำนวณหาความยาวของเส้นใยแสง NSC-DCF โดยหาได้จากสมการ (2.18)

$$L_{NSC-DCF} = \frac{AD}{D}, \quad (2.18)$$

ซึ่งที่ความยาวคลื่น 1550 nm ของ SMF มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm ซึ่งอุปกรณ์ชดเชยสัญญาณได้ 100 กิโลเมตร ดังนั้นอุปกรณ์นี้จะให้ดิสเพอร์ชันเท่ากับ -1650 ps/km/nm และที่ความยาวคลื่น 1550 nm ของ NSC-DCF มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ -82 ps/km/nm ดังนั้นเราสามารถทำการคำนวณหาระยะของ NSC-DCF ได้จาก

$$L_{NSC-DCF} = \frac{1650}{82} = 20.12195 \text{ km}$$

ดังนั้นความยาวของ NSC-DCF ที่เลือกใช้ในการจำลองระบบคือ 20 กิโลเมตร

- 2) เส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันแบบชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Slope compensation DCF: SC-DCF) [25] โดย DCF นี้มีคุณสมบัติชดเชยความชันของดิสเพอร์ชันได้ 100% และทำงานในช่วงความยาวคลื่นแถบความถี่ซี (C-band) เพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ G.652 ในระยะทาง 100 กิโลเมตร โดยลักษณะอุปกรณ์เป็นดังรูปที่ 2.17 ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้อุปกรณ์นี้ในการทดสอบสมการเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้นมาโดยหน่วยชดเชยการดิสเพอร์ชันนี้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1 ซึ่งนำมากำหนดค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์แบบ SC-DCF



รูปที่ 2.17. Avanex's 100% Slope Compensating DCUs over C-band

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญสำหรับมอดูลความยาวทั่วไป

Modul Description	Measured Dispersion (ps/km)					
	at 1525 nm		at 1545 nm		at 1565 nm	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
DCM-10-SMF-C	-159	-145	-170	-158	-184	-168
DCM-20-SMF-C	-315	-293	-337	-319	-364	-340
DCM-30-SMF-C	-629	-588	-673	-640	-727	-682
DCM-40-SMF-C	-942	-883	-1009	-960	-1090	-1024
DCM-50-SMF-C	-1251	-1183	-1340	-1286	-1448	-1371
DCM-60-SMF-C	-1560	-1482	-1671	-1611	-1805	-1718

โดยในการคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์แบบ SC-DCF เราต้องใช้ข้อมูลจาก [25] ซึ่งจากเอกสารรายละเอียดอุปกรณ์กำหนดให้สมการบทนิยามของการชดเชยความชันในดิสเพอร์ชัน (Definition of dispersion slope compensation) เป็นดังสมการ (2.19) และทำการแทนค่า $K_{NDSF}^{1545} = 275 \text{ nm}$ จะได้ดังสมการที่ (2.20)

$$SC = \frac{k_{NDSK}^{1545}}{K_{DCF}^{1545}} = \frac{\left(\frac{D_{NDSF}^{1545}}{S_{NDSF}^{1545}} \right)}{\left(\frac{D_{DSF}^{1545}}{S_{DSF}^{1545}} \right)} = 1 \quad (2.19)$$

$$S_{DCF}^{1545} = \frac{D_{DCF}^{1545}}{275} \text{ ps/nm}^2 \quad (2.20)$$

จากตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นที่ 1545 nm มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเฉลี่ย -1641 ps/nm ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาความชันดิสเพอร์ชันสะสมได้

$$S_{DCF}^{1545} = \frac{-1641}{275} = -5.9673 \text{ ps/nm}^2$$

ในการทดลองเบื้องต้นเราได้ทำการจำลองโครงข่ายตัวอย่างขึ้นมา 4 โครงข่ายเป็นไปตาม [7] แต่ได้ทำการเพิ่มความยาวในข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายและกำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย

บทที่ 3

การกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุด

โครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณเป็นที่รู้จักดีในฐานะโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและสามารถส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (transmitter) ไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ (receiver) ได้ โดยการวางที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงในโครงข่ายประเภทนี้ได้ถูกนำมาศึกษาจนแล้ว [7], [8] แต่เนื่องจากโครงข่ายที่มีอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟซึ่งไม่สามารถแก้ไขผลกระทบของสัญญาณที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและผลกระทบจากเคอร์ได้ทำให้การกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันและการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์มีความน่าสนใจมาก ในบทนี้จะเป็นรายละเอียดในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากดิสเพอร์ชันโดยจะกล่าวถึงการกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันซึ่งมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ส่วนการลดผลกระทบจากเคอร์ด้วยการจัดสรรความยาวคลื่นจะนำเสนอในบทที่ 5

3.1 การกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชัน (Dispersion Compensation unit placement solution)

การกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันมีความน่าสนใจและจำเป็นต่อโครงข่ายทางแสงแบบแพร่และเลือกสัญญาณ ในการหาผลตอบของจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณได้กำหนดขั้นตอนไว้ทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)

การทดสอบความเป็นไปได้ของโครงข่ายต้องการให้ทุกสัญญาณจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณควรจะไปยังปลายทางด้วยกำลังของสัญญาณมากพอที่อุปกรณ์รับสัญญาณจะตรวจจับได้

$$P_{\max} - 10 \log(DG_{i\max} - 1) - 10 \log(|\lambda_{j\max}|) - \sigma_{ij} \geq P_{\text{sen}}, \quad (3.1)$$

โดย P_{\max} คือ กำลังขาออกสูงสุดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dBm]

P_{sen} คือ กำลังของสัญญาณต่ำสุดที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์รับสัญญาณสามารถตรวจจับได้ [dBm]

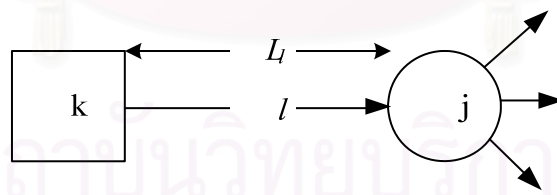
- $DG_{i\max}$ คือ จำนวนขาทั้งหมดของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i (ชนิดไม่สะท้อนกลับ)
- $\lambda_{j\max}$ คือ จำนวนความยาวคลื่นในสายเชื่อมโยงที่ l ที่เชื่อมไปยังอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i
- σ_{ij} คือ การสูญเสียพลังงานทั้งหมดเช่น ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (insertion loss), กำลังสูญเสียจากการต่อสาย (splicing loss), และกำลังส่วนเผื่อ (power margin) ซึ่งพิจารณาจากสายเชื่อมโยงที่ j ที่เชื่อมไปยังอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i จนกว่าสัญญาณจะออกจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i [dBm]

ในสมการ (3.1) หมายถึงเมื่อกำลังของสัญญาณสูงสุดที่โครงข่ายสามารถรองรับได้ถูกแบ่งแยกไปตามแต่ละขาออกของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟที่มีจำนวนขาออกมากที่สุดแล้วแต่ความยาวคลื่นต้องสามารถตรวจจับโดยอุปกรณ์รับสัญญาณได้ เราจะพิจารณาเฉพาะสายเชื่อมโยงที่ j กับอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i สำหรับทดสอบโดยใช้เงื่อนไข $(DG_{i\max} - 1)|\lambda_{j\max}|$ ที่มีค่ามากที่สุดภายในโครงข่าย

3.1.2 การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต (Generate the constraints)

3.1.2.1 เงื่อนไขขอบเขตของสายเชื่อมโยง (Link Constraints)

เราจะทำการสร้างสมการเงื่อนไขสำหรับการวางหน่วยขดเคเบิลสเปิร์ชันสำหรับสายเชื่อมโยง l ซึ่งเชื่อมระหว่างสถานี k และอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ j ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 โดยเราสามารถกำหนดสมการขอบเขตของสายเชื่อมโยง l ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1. สายเชื่อมโยงระหว่างสถานีไปยัง PSC

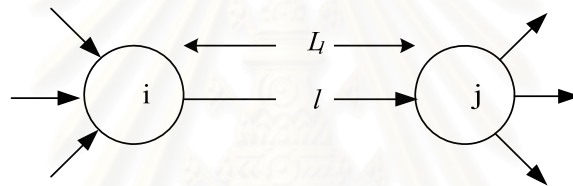
$$(D_k \times L_l) + (D_{comp_k} \times N_l) = AD_{jk}, \quad (3.2)$$

- โดย AD_{jk} คือ ชุดของค่าดีสเปิร์ชันสะสมของสัญญาณจากสถานี k บนอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ j
- k คือ หมายเลขประจำสถานีของโครงข่ายโดยมีค่า $1 \leq k \leq S$
- S คือ จำนวนสถานีที่มีในโครงข่ายซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดใน โครงข่าย

- D_k คือ ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่นจากสถานี k
- L_l คือ ความยาวของสายเชื่อมโยงที่ l
- $Dcomp_k$ คือ ค่าดิสเพอร์ชันที่จะได้รับการชดเชยจากหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่นจากสถานี k
- N_l คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในสายเชื่อมโยง l

ในสมการ (3.2) แสดงค่าสะสมดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นที่อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟปลายทางสามารถคำนวณได้จากค่าสะสมการดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นที่สถานีต้นทางซึ่งจะยังไม่มีดิสเพอร์ชันและค่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อส่งผ่านไปตามเส้นใยแสงและลดลงด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเมื่อค่าสะสมดิสเพอร์ชันมีค่าสะสมถึง D_{max}

จากนั้นทำการสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตระหว่างอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i กับอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ j ตามแสดงในรูปที่ 3.2 เราจะได้สมการดังสมการที่ (3.3)

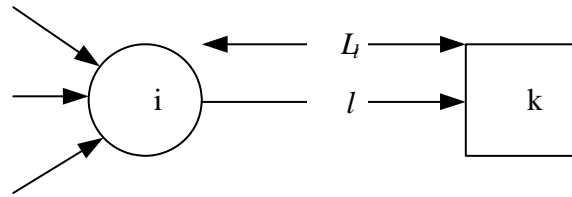


รูปที่ 3.2. สายเชื่อมโยงระหว่าง PSCs

$$AD_{ik} + (D_k \times L_l) + (Dcomp_k \times N_l) = AD_{jk}, \quad (3.3)$$

โดย AD_{ik} คือ ชุดของค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณจากสถานี k บน อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i

ซึ่งในสมการ (3.3) แสดงค่าสะสมดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นที่อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟปลายทางสามารถคำนวณได้จากค่าสะสมดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นที่อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟต้นทางซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่งผ่านไปตามเส้นใยแสงและลดลงด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเมื่อค่าสะสมดิสเพอร์ชันมีค่าสะสมถึง D_{max} โดย D_{max} คือค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเกิดผิดเพี้ยนของสัญญาณจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้ ต่อมาเราจะทำการพิจารณาสายเชื่อมโยงระหว่างสถานีกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟซึ่งจะมีด้วยกัน 2 กรณี โดยกรณีแรกคือสายเชื่อมโยงที่ส่งผ่านสัญญาณจากสถานีไปยังอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟและอีกกรณีหนึ่งคือสายเชื่อมโยงที่ส่งสัญญาณจากสถานีอื่นมายังสถานีปลายทาง



รูปที่ 3.3. ข่ายเชื่อมโยงระหว่าง PSC ไปยังสถานี

และในรูปที่ 3.3 แสดงข่ายเชื่อมโยง l ซึ่งเชื่อมระหว่างอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ i กับสถานี k โดยเราสามารถกำหนดสมการขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงได้ดังนี้

$$AD_{ik} + (D_k \times L_l) + (D_{comp_k} \times N_l) = ADS_k, \quad (3.4)$$

โดย ADS_k คือ ค่าดีสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณจากสถานีอื่นที่มาสิ้นสุดที่สถานี k ในสมการ (3.4) แสดงค่าสะสมดีสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นที่สถานีปลายทางสามารถคำนวณได้จากค่าสะสมดีสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นที่อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่งผ่านไปตามเส้นใยแสงและลดลงด้วยหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันเมื่อค่าสะสมดีสเพอร์ชันมีค่าสะสมถึง D_{max}

3.1.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน (Dispersion Constraints)

สำหรับแต่ละความยาวคลื่น เราต้องการให้ค่าดีสเพอร์ชันสะสมบนอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟและสถานีมีค่าน้อยกว่า D_{max} และมากกว่า $-D_{max}$ ดังนี้

$$-D_{max} \leq AD_{iS} \leq D_{max}, \quad (3.5)$$

$$-D_{max} \leq ADS_k \leq D_{max}, \quad (3.6)$$

โดย D_{max} คือ ค่าดีสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเกิดผิดเพี้ยนของสัญญาณจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้

3.1.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนอุปกรณ์ชดเชยดีสเพอร์ชัน (Integrity Constraints)

สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง l

$$N_l \text{ ต้องเป็นจำนวนเต็ม} \quad (3.7)$$

3.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$\text{Minimize } N = \sum_l N_l, \quad (3.8)$$

โดย N คือ จำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันทั้งหมดบนโครงข่าย

3.1.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต (Solve the constraints equations)

เราสามารถเลือกใช้โปรแกรมแก้สมการเชิงเส้นต่างๆ ในการแก้สมการเหล่านี้เช่น โปรแกรม Xpress MP [26] และ โปรแกรม Cplex [27] เป็นต้น ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม Xpress MP ในการหาผลเฉลยเนื่องจากเนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีวิธีการใช้ที่ง่าย และมีการประมวลผลที่รวดเร็วโดยมีรูปแบบโปรแกรมคร่าวๆ เป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 ใส่ชื่อชุดข้อมูล

การใช้ชื่อชุดข้อมูลเพื่อให้เราไม่เกิดความสับสนเมื่อเรียกโปรแกรมขึ้นมาแก้ไข โดยชื่อโปรแกรมจะเป็นตัวบอกว่าชุดอสมการที่เราต้องการหาผลเฉลยสูงสุดเป็นอสมการเกี่ยวกับอะไร ตัวอย่างรูปแบบคำสั่งมีเช่น model "network" เป็นต้น

ส่วนที่ 2 เรียกชุดคำสั่งที่ต้องการใช้งาน

การใช้งานคำสั่งใดต้องเรียกใช้ชุดคำสั่งนั้นก่อน เพื่อให้โปรแกรมได้จัดเตรียมพื้นที่และฟังก์ชันการใช้งานคำสั่งต่างๆ ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมสำหรับชุดอสมการที่เราได้เขียนไว้เป็นชุดอสมการเชิงเส้น จึงต้องเรียกใช้ชุดคำสั่งที่มีชื่อว่า mmpxrs ตัวอย่างรูปแบบการเรียกใช้ชุดคำสั่งคือ uses "mmpxrs"

ส่วนที่ 3 การประกาศตัวแปรทั่วไป

3.1 คำสั่งเริ่มการประกาศตัวแปร

ในการประกาศตัวแปรจะต้องใช้คำสั่งเริ่มการประกาศตัวแปร เพื่อกำหนดขอบเขตเริ่มต้นของการประกาศตัวแปร ตัวอย่างรูปแบบการเรียกใช้ชุดคำสั่งเช่น Declarations

3.2 ประกาศตัวแปร

ในส่วนนี้เป็นการประกาศตัวแปรที่ต้องใช้ในชุดอสมการโดยชนิดของตัวแปรที่ใช้จะเป็นชนิดทั่ว ๆ ไป คือ ชนิด mpvar ซึ่งมีรูปแบบการประกาศตัวแปรเช่น X:mpvar เป็นต้น

3.3 คำสั่งจบการประกาศตัวแปร

คำสั่งจบการประกาศตัวแปรเป็นการจบขอบเขตในการประกาศตัวแปร เพื่อให้โปรแกรมเริ่มเข้าสู่ส่วนชุดอสมการ รูปแบบคำสั่งจบการประกาศตัวแปรคือ end-declarations

ส่วนที่ 4 ชุดอสมการกำหนดขอบเขต

ในส่วนนี้จะเป็นการใส่ชุดอสมการที่เราได้จากหัวข้อเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงและเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันซึ่งจะเป็นการกำหนดขอบเขตค่าตัวแปร จากนั้นจึงใช้โปรแกรมหาค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ออกมา รูปแบบชุดข้อมูลจึงเป็นรูปแบบเดียวกับชุดอสมการในหัวข้อเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงและเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน

ส่วนที่ 5 ประกาศตัวแปรจำนวนเต็ม

ค่าจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันที่ได้ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีค่าเป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจึงต้องเขียนคำสั่งเพิ่มเพื่อกำหนดให้จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันเป็นจำนวนเต็ม รูปแบบการกำหนดตัวแปรให้เป็นจำนวนเต็มเช่น $X \text{ is_integer}$ เป็นต้น

ส่วนที่ 6 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของโปรแกรม เนื่องจากเป็นส่วนที่กำหนดคำตอบที่เราต้องการว่าเป็นค่าที่มากที่สุด หรือเป็นค่าที่น้อยที่สุด ซึ่งค่าที่ต้องการในที่นี่เป็นค่าน้อยที่สุดจึงได้รูปแบบคำสั่งเช่น maximize(ค่าที่ต้องการหา) หรือ minimize(ค่าที่ต้องการหา) เป็นต้น

ส่วนที่ 7 จบโปรแกรม

เมื่อเราเขียนโปรแกรมเสร็จแล้ว จำเป็นต้องเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมรู้ว่าข้อมูลที่เรากำลังต้องการเขียนเสร็จสิ้นแล้ว โปรแกรมจึงดำเนินการหาค่าตัวแปรที่ต้องการได้ รูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการจบโปรแกรมคือ end-model

ซึ่งผลเฉลยที่ได้เราจะได้จากระเบียบวิธีขั้นตอนในการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันมีดังนี้

1. จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย
2. ค่าติสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่นในทุกอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟและทุกสถานี

จากนั้นจึงทำการคำนวณหาตำแหน่งการติดตั้งและค่าชดเชยในแต่ละความยาวคลื่นของแต่ละหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชัน

3.1.4 การวางตำแหน่งหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชัน

เราจะทำการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นที่มีค่าติสเพอร์ชันสะสมถึงค่า D_{\max} ยกเว้นระยะสุดท้ายก่อนเข้าสู่อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวต่อไปอาจมีการชดเชยค่าติสเพอร์ชันสะสมก่อนกระจายสัญญาณเพื่อลดจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันที่ต้องใช้หลังกระจายสัญญาณไปยังข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดลองบนโครงข่ายตัวอย่างของ การกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุด

ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้เสนอตามบทที่ 3 บนตัวอย่างโครงข่ายต่างๆ ของแล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะเป็นการจำลองการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันบนโครงข่ายประเภทแพร์และเลือกสัญญาณจำนวน 4 ตัวอย่างพร้อมทั้งการคำนวณหาตำแหน่งและค่าติสเพอร์ชันสะสมของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟและค่าติสเพอร์ชันสะสมที่อุปกรณ์รับสัญญาณของทุกสถานีเพื่อตรวจสอบว่าผลการจำลองการวางหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันว่าเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตหรือไม่

4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่ายทางแสง [2]

- 1) ค่าพลังงานของอุปกรณ์ส่งสัญญาณกำหนดค่าแบบกำลังเฉลี่ยตามระยะทาง (path average power)
- 2) ชนิดของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟเป็นแบบไม่สะท้อนกลับ (non-reflective passive star couple)
- 3) อัตราการส่งสัญญาณ 10 Gbps
- 4) สำหรับตัวแปรของโครงข่ายกำหนดให้

ตัวแปรของโครงข่าย	คำนิยาม
S	จำนวนสถานีทั้งหมดในโครงข่ายหรือจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในโครงข่าย
M	จำนวนอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟทั้งหมดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยง link ทั้งหมดในโครงข่าย
N	จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันทั้งหมดในโครงข่าย

ค่าของ N จะได้ภายหลังจากทำการคำนวณหาจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันแล้ว

- 5) สำหรับตัวแปรของข่ายเชื่อมโยงค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยง l เมื่อ $1 \leq l \leq L$ เป็นดังต่อไปนี้

ตัวแปรของข่ายเชื่อมโยง	คำนิยาม
L_l	ความยาวของข่ายเชื่อมโยงที่ l
λ_l	เซตของความยาวคลื่นภายในข่ายเชื่อมโยง l
D_{\max}	ค่าดิสเพอร์ชันสูงสุดที่หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสามารถชดเชยได้
N_l	จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่ l

- 6) สำหรับตัวแปรของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ i เมื่อ $1 \leq i \leq M$ เป็นดังต่อไปนี้

ตัวแปรของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ	คำนิยาม
DG_i	อันดับของตัวแปรของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ i

- 7) ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) [28]

ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก 4 dB

- 8) รายการส่วนเพิ่มอื่นๆ (Margin Requirements) [1]

ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion) 1 dB

ค่าส่วนเพิ่มจาก SPM (SPM margin) 0.5 dB

ค่าส่วนเพิ่มจาก XPM (XPM margin) 0.5 dB

- 9) ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบมีดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 [21]. ค่าพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	พิสัย	ค่า
P_{sen}	ค่ากำลังสัญญาณต่ำสุดที่อุปกรณ์รับสัญญาณทางสามารรถตรวจจับได้	-30dBm at 1Gbps	-30 dBm
D_{\max}^*	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมมากที่สุด	≤ 1600 ps/nm ≥ -1600 ps/nm	≤ 1600 ps/nm ≥ -1600 ps/nm

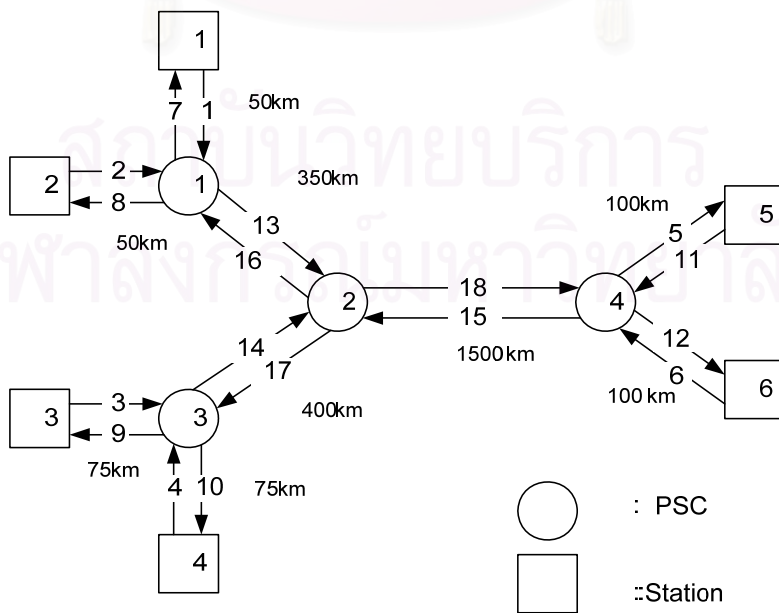
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	พิสัย	ค่า
$P_{NONLIN,max}$	ค่ากำลังสัญญาณรวมสูงสุด在线ใยแสง	10-17 dBm	10 dBm
P_{max}	ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงสามารถให้แก่อะบบ		0 dBm
α	ค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสง		0.2 dB/km

*ค่าดีสเพอร์ชันสะสมมากที่สุดที่โครงข่ายทางแสงสามารถทนได้ที่อัตราการส่ง 10 Gbps [29]

4.2 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง

การจำลองระบบจะทำการส่งผ่านสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดคลื่นเดียว (single-mode fiber: SMF, ITU-T G.652) โดยมีค่าดีสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm ที่ 1550 nm และความชันของค่าดีสเพอร์ชันที่ 0.05 ps/nm²/km และหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันทั้งสองแบบคือเส้นใยแสงชดเชยดีสเพอร์ชันแบบไม่ชดเชยความชันของดีสเพอร์ชันและเส้นใยแสงชดเชยดีสเพอร์ชันแบบชดเชยความชันของดีสเพอร์ชันดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.1 นำมาทำการจำลองระบบตามโครงข่ายตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่างดังนี้

4.2.1 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.1. โครงข่ายตัวอย่างที่ 1

เมื่อกำหนดโครงข่ายตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.1 เป็นโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย สถานีส่งและรับสัญญาณจำนวน 6 สถานีและมีอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ จำนวน 4 PSCs โดยระยะห่างระหว่างแต่ละจุดเชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ 4.1 แล้วจึงทำการดำเนินการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีตามที่ได้กล่าวมาโดยโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 นี้มี $DG_{i_{max}}$ เท่ากับ 3, $\lambda_{j_{max}}$ เท่ากับ 4, และส่วนเพิ่มของระบบ (system margin) เท่ากับ 6 dB

4.2.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1. และสมการ (3.1) เราได้ผลการตรวจสอบดังนี้

$$0\text{dBm} - 10\log(2) - 10\log(4) - 6 = -15.03\text{dBm}$$

ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าระบบมีความเป็นไปได้เนื่องจากค่าพลังงานที่อุปกรณ์รับสัญญาณมีค่ามากกว่า P_{sen} จากนั้นทำการกำหนดความยาวคลื่นตาม 25-GHz-grid ITU ให้แต่ละสถานีและ คำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ รวมทั้งค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์ทั้ง NSC-DCUs และ SC-DCUs ได้ดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าชดเชย ดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

Station	λ [nm]	D_{SMF} [ps/nm/km]	$D_{NSC-DCF}$ [ps/nm/km]	NSC-DCUs Length [km]	$D_{comp_{NSC-DCF}}$ [ps/nm]	$D_{comp_{SC-DCF}}$ [ps/nm]
S1	1550.12	16.5060	-81.9700	20	-1639.4	-1670.9
S2	1549.92	16.4960	-82.0200	20	-1640.4	-1669.7
S3	1549.72	16.4860	-82.0700	20	-1641.4	-1668.5
S4	1549.52	16.4760	-82.1200	20	-1642.4	-1667.3
S5	1549.32	16.4660	-82.1700	20	-1643.4	-1666.1
S6	1549.12	16.4560	-82.2200	20	-1644.4	-1664.9

ในการคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SMF สามารถคำนวณได้จากคุณลักษณะของ SMF ตามรูปที่ 2.15 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1550.12 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{1550.12} = 16.5 + 0.05 \times (1550.12 - 1550) = 16.5060 \text{ ps/km/nm}$$

ส่วนการคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ NSC-DCUs สามารถคำนวณได้จากคุณลักษณะของ NSC-DCUs ตามรูปที่ 2.16 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1550.12 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{comp1550.12} = (-82) + 0.25 \times (1550.12 - 1550) = -81.97 \text{ ps/nm}$$

แล้วจึงนำค่านี้มาคูณกับความยาว NSC-DCUs ที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ดังนี้ ให้ความยาวคลื่น 1550 nm เราจะได้รับค่าชดเชยดิสเพอร์ชันจาก NSC-DCUs เท่ากับ -1639.4 ps/nm

สุดท้ายการคำนวณค่าชดเชยดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SC-DCUs สามารถคำนวณได้จากคุณลักษณะของ SC-DCUS ตามตารางที่ 2.1 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1550.12 nm คำนวณได้โดยจากเอกสารรายละเอียดอุปกรณ์ที่ความยาวคลื่น 1525 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1521 ps/nm และความชันดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ -5.9673 ps/nm² ดังนี้

$$D_{comp1550.12} = (-1521) + (-5.9673) \times (1550.12 - 1525) = 1670.9 \text{ ps/nm}$$

4.2.1.2 การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต (Generate the constraints)

4.2.1.2.1 สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตข่ายเชื่อมโยง (Link constraints)

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงแบ่งเป็น 3 กรณี

1) เงื่อนไขขอบเขตจากสถานีไปยัง PSC

การสร้างเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงอันดับแรกต้องทำการระบุความยาวคลื่นจากสถานีทุกสถานีภายในโครงข่ายทางแสงดังรูปที่ 17 ไปยัง PSC แล้วจึงจำแนกความยาวคลื่นลงบนข่ายเชื่อมโยง ซึ่งสามารถดูได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงจากสถานีไปยัง PSC

สถานีต้นทาง	PSC ปลายทาง	ข่ายเชื่อมโยง	
		หมายเลขข่ายเชื่อมโยง	ความยาวคลื่นที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง [nm]
S1	PSC1	1	1550.12
S2	PSC1	2	1549.92
S3	PSC3	3	1549.72

สถานีต้น ทาง	PSC ปลายทาง	ข่ายเชื่อมต่อ	
		หมายเลขข่ายเชื่อมต่อ	ความยาวคลื่นที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมต่อ [nm]
S4	PSC3	4	1549.52
S5	PSC4	5	1549.32
S6	PSC4	6	1549.12

จากนั้นจึงทำการสร้างสมการหาจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบน
นข่ายเชื่อมต่อที่เชื่อมระหว่างสถานีกับ PSC ชุดสมการรูปแบบนี้สามารถหาได้จากสมการ
(3.4) รูปแบบสมการบนข่ายเชื่อมต่อแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการหาจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมต่อที่เชื่อม
จากสถานีไปยัง PSC

ข่ายเชื่อมต่อ	รูปแบบสมการ
ข่ายเชื่อมต่อที่ 1	$0 + (D_1 \times 50) + (D_{comp_1} \times n_1) = D_{11}$
ข่ายเชื่อมต่อที่ 2	$0 + (D_2 \times 50) + (D_{comp_2} \times n_2) = D_{12}$
ข่ายเชื่อมต่อที่ 3	$0 + (D_3 \times 75) + (D_{comp_3} \times n_3) = D_{33}$
ข่ายเชื่อมต่อที่ 4	$0 + (D_4 \times 75) + (D_{comp_4} \times n_4) = D_{34}$
ข่ายเชื่อมต่อที่ 5	$0 + (D_5 \times 100) + (D_{comp_5} \times n_5) = D_{45}$
ข่ายเชื่อมต่อที่ 6	$0 + (D_6 \times 80) + (D_{comp_6} \times n_6) = D_{46}$

จากสมการที่กำหนดด้านบนนี้เราจะทำการแทนค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นใน
พจน์ที่ 2 และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงในพจน์ที่ 3 โดยสมการ
ข้างต้นสามารถใช้ได้ทั้งสำหรับ NSC-DCUs และ SC-DCUs

2) เงื่อนไขขอบเขตจาก PSC ไปยัง PSC

การสร้างเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมต่อจาก PSC ไปยัง PSC นั้นจะประกอบไปด้วย
ข่ายเชื่อมต่อสองเส้นซึ่งเป็นคู่ขนานกันโดยคุณสมบัติที่ไม่สะท้อนกลับของ PSC จะทำให้ข่าย
เชื่อมต่อคู่ขนานจะต้องส่งผ่านความยาวคลื่นที่ไม่ซ้ำกันซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านขั้วเชื่อมโยงจาก PSC ไปยัง PSC

PSC ต้นทาง	PSC ปลายทาง	ขั้วเชื่อมโยงขาไป		ขั้วเชื่อมโยงขากลับ	
		หมายเลข ขั้วเชื่อมโยง	ความยาวคลื่นที่ ส่งผ่านขั้วเชื่อมโยง [nm]	หมายเลข ขั้ว เชื่อมโยง	ความยาวคลื่นที่ ส่งผ่านขั้วเชื่อมโยง [nm]
PSC1	PSC2	13	1550.12, 1549.92	16	1549.72, 1549.52, 1549.32, 1549.12
PSC3	PSC2	14	1549.72, 1549.52	17	1550.12, 1549.92, 1549.32, 1549.12
PSC4	PSC2	15	1549.32, 1549.12	18	1550.12, 1549.92, 1549.72, 1549.52

จากนั้นจึงทำการสร้างสมการหาจำนวนหน่วยชุดเซกเมนต์ชั้นบนขั้วเชื่อมโยงที่เชื่อมระหว่าง PSC กับ PSC ชุดสมการรูปแบบนี้สามารถหาได้จากสมการ (3.3) รูปแบบสมการบนขั้วเชื่อมโยงแสดงไว้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมการหาจำนวนหน่วยชุดเซกเมนต์ชั้นบนขั้วเชื่อมโยงที่เชื่อมจาก PSC ไปยัง PSC

ขั้วเชื่อมโยง	รูปแบบสมการ
ขั้วเชื่อมโยงที่ 13	$D_{11} + (D_1 \times 350) + (D_{comp_1} \times n_{13}) = D_{21}$ $D_{12} + (D_2 \times 350) + (D_{comp_2} \times n_{13}) = D_{22}$
ขั้วเชื่อมโยงที่ 14	$D_{33} + (D_3 \times 400) + (D_{comp_3} \times n_{14}) = D_{23}$ $D_{34} + (D_4 \times 400) + (D_{comp_4} \times n_{14}) = D_{24}$
ขั้วเชื่อมโยงที่ 15	$D_{45} + (D_5 \times 1500) + (D_{comp_5} \times n_{15}) = D_{25}$ $D_{46} + (D_6 \times 1500) + (D_{comp_6} \times n_{15}) = D_{26}$
ขั้วเชื่อมโยงที่ 16	$D_{23} + (D_3 \times 350) + (D_{comp_3} \times n_{16}) = D_{13}$ $D_{24} + (D_4 \times 350) + (D_{comp_4} \times n_{16}) = D_{14}$ $D_{25} + (D_5 \times 350) + (D_{comp_5} \times n_{16}) = D_{15}$ $D_{26} + (D_6 \times 350) + (D_{comp_6} \times n_{16}) = D_{16}$
ขั้วเชื่อมโยงที่ 17	$D_{21} + (D_1 \times 400) + (D_{comp_1} \times n_{17}) = D_{31}$ $D_{22} + (D_2 \times 400) + (D_{comp_2} \times n_{17}) = D_{32}$ $D_{25} + (D_5 \times 400) + (D_{comp_5} \times n_{17}) = D_{35}$ $D_{26} + (D_6 \times 400) + (D_{comp_6} \times n_{17}) = D_{36}$

ข่ายเชื่อมโยง	รูปแบบสมการ
ข่ายเชื่อมโยงที่ 18	$D_{21} + (D_1 \times 1500) + (Dcomp_1 \times n_{18}) = D_{41}$ $D_{22} + (D_2 \times 1500) + (Dcomp_2 \times n_{18}) = D_{42}$ $D_{23} + (D_3 \times 1500) + (Dcomp_3 \times n_{18}) = D_{43}$ $D_{24} + (D_4 \times 1500) + (Dcomp_4 \times n_{18}) = D_{44}$

จากสมการที่กำหนดด้านบนนี้เราจะทำการแทนค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละความยาวคลื่นในพจน์ที่ 2 และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงในพจน์ที่ 3 โดยสมการข้างต้นสามารถใช้ได้ทั้งสำหรับ NSC-DCUs และ SC-DCUs

3) เงื่อนไขขอบเขตจาก PSC ไปยังสถานี

ส่วนสุดท้ายของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจากข่ายเชื่อมโยงคือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมจาก PSC ไปยังสถานี ซึ่งสามารถแสดงความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านในแต่ละข่ายเชื่อมโยงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงจาก PSC ไปยังสถานี

PSC ต้นทาง	สถานีปลายทาง	ข่ายเชื่อมโยงขาไป	
		หมายเลขข่ายเชื่อมโยง	ความยาวคลื่นที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง [nm]
PSC1	S1	7	1549.92, 1549.72, 1549.52, 1549.32, 1549.12
PSC1	S2	8	1550.12, 1549.72, 1549.52, 1549.32, 1549.12
PSC3	S3	9	1550.12, 1549.92, 1549.52, 1549.32, 1549.12
PSC3	S4	10	1550.12, 1549.92, 1549.72, 1549.32, 1549.12
PSC4	S5	11	1550.12, 1549.92, 1549.72, 1549.52, 1549.12
PSC4	S6	12	1550.12, 1549.92, 1549.72, 1549.52, 1549.32

จากนั้นจึงทำการสร้างสมการหาจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมระหว่าง PSC กับสถานี ชุดสมการรูปแบบนี้สามารถหาได้จากสมการ (3.4) รูปแบบสมการบนข่ายเชื่อมโยงแสดงไว้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สมการหาจำนวนหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมจาก PSC ไปยังสถานี

ข่ายเชื่อมโยง	รูปแบบสมการ
ข่ายเชื่อมโยงที่ 7	$D_{12} + (D_2 \times 50) + (Dcomp_2 \times n_7) = S_{12}$ $D_{13} + (D_3 \times 50) + (Dcomp_3 \times n_7) = S_{13}$ $D_{14} + (D_4 \times 50) + (Dcomp_4 \times n_7) = S_{14}$ $D_{15} + (D_5 \times 50) + (Dcomp_5 \times n_7) = S_{15}$ $D_{16} + (D_6 \times 50) + (Dcomp_6 \times n_7) = S_{16}$
ข่ายเชื่อมโยงที่ 8	$D_{11} + (D_1 \times 50) + (Dcomp_1 \times n_8) = S_{21}$ $D_{13} + (D_3 \times 50) + (Dcomp_3 \times n_8) = S_{23}$ $D_{14} + (D_4 \times 50) + (Dcomp_4 \times n_8) = S_{24}$ $D_{15} + (D_5 \times 50) + (Dcomp_5 \times n_8) = S_{25}$ $D_{16} + (D_6 \times 50) + (Dcomp_6 \times n_8) = S_{26}$
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9	$D_{31} + (D_1 \times 75) + (Dcomp_1 \times n_9) = S_{31}$ $D_{32} + (D_2 \times 75) + (Dcomp_2 \times n_9) = S_{32}$ $D_{34} + (D_4 \times 75) + (Dcomp_4 \times n_9) = S_{34}$ $D_{35} + (D_5 \times 75) + (Dcomp_5 \times n_9) = S_{35}$ $D_{36} + (D_6 \times 75) + (Dcomp_6 \times n_9) = S_{36}$
ข่ายเชื่อมโยงที่ 10	$D_{31} + (D_1 \times 75) + (Dcomp_1 \times n_{10}) = S_{41}$ $D_{32} + (D_2 \times 75) + (Dcomp_2 \times n_{10}) = S_{42}$ $D_{33} + (D_3 \times 75) + (Dcomp_3 \times n_{10}) = S_{43}$ $D_{35} + (D_5 \times 75) + (Dcomp_5 \times n_{10}) = S_{45}$ $D_{36} + (D_6 \times 75) + (Dcomp_6 \times n_{10}) = S_{46}$
ข่ายเชื่อมโยงที่ 11	$D_{41} + (D_1 \times 100) + (Dcomp_1 \times n_{11}) = S_{51}$ $D_{42} + (D_2 \times 100) + (Dcomp_2 \times n_{11}) = S_{52}$ $D_{43} + (D_3 \times 100) + (Dcomp_3 \times n_{11}) = S_{53}$ $D_{44} + (D_4 \times 100) + (Dcomp_4 \times n_{11}) = S_{54}$ $D_{46} + (D_6 \times 100) + (Dcomp_6 \times n_{11}) = S_{56}$
ข่ายเชื่อมโยงที่ 12	$D_{41} + (D_1 \times 80) + (Dcomp_1 \times n_{12}) = S_{61}$ $D_{42} + (D_2 \times 80) + (Dcomp_2 \times n_{12}) = S_{62}$ $D_{43} + (D_3 \times 80) + (Dcomp_3 \times n_{12}) = S_{63}$ $D_{44} + (D_4 \times 80) + (Dcomp_4 \times n_{12}) = S_{64}$ $D_{45} + (D_5 \times 80) + (Dcomp_5 \times n_{12}) = S_{65}$

4.2.1.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน (Dispersion Constraints)

เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันที่ PSC และสถานีจะเป็นการกำหนดค่าดิสเพอร์ชัน
 สะสมของแต่ละความยาวคลื่นที่ PSC และที่สถานีต่างๆ ไม่ให้เกินค่า $|D_{\max}|$ โดยเราทำการ
 เลือกราคา $D_{\max} = |1600|$ [22] เราสามารถเขียนนอสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน
 สะสมบน PSC และสถานีได้ตามตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันบน PSC ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ข่ายเชื่อมโยง	รูปแบบสมการ
PSC1	$-1600 \leq D_{11} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{12} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{13} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{14} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{15} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{16} \leq 1600$
PSC2	$-1600 \leq D_{21} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{22} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{23} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{24} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{25} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{26} \leq 1600$
PSC3	$-1600 \leq D_{31} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{32} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{33} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{34} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{35} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{36} \leq 1600$
PSC4	$-1600 \leq D_{41} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{42} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{43} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{44} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{45} \leq 1600$ $-1600 \leq D_{46} \leq 1600$

ตารางที่ 4.9 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันที่ PSC เพื่อกำหนดค่าดิสเพอร์ชัน
 สหสมของแต่ละความยาวคลื่นที่ PSC ต่างๆ ไม่ให้เกินค่า $|D_{\max}|$

ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันบนสถานีในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

สถานี	รูปแบบสมการ
S1	$-1600 \leq S_{12} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{13} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{14} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{15} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{16} \leq 1600$
S2	$-1600 \leq S_{21} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{23} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{24} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{25} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{26} \leq 1600$
S3	$-1600 \leq S_{31} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{32} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{34} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{35} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{36} \leq 1600$
S4	$-1600 \leq S_{41} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{42} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{43} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{45} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{46} \leq 1600$
S5	$-1600 \leq S_{51} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{52} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{53} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{54} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{56} \leq 1600$
S6	$-1600 \leq S_{61} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{62} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{63} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{64} \leq 1600$ $-1600 \leq S_{65} \leq 1600$

ตารางที่ 4.10 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันที่สถานีเพื่อกำหนดค่าดิสเพอร์ชัน
 สหสมของแต่ละความยาวคลื่นที่สถานีต่างๆ ไม่ให้เกินค่า $|D_{\max}|$

4.2.1.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม (Integrality Constraints)

สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง / จำนวนหน่วยขดเซยที่ติดตั้งในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$N_l = \{x : x \in \mathbb{N} \text{ and } x \in \{0\}\}, \quad (4.4)$$

4.2.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\text{Minimize } N_{\min} = \sum_{l=1}^L N_l, \quad (4.5)$$

ในส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการ (4.5) จะเป็นการกำหนดการหาหน่วยขดเซยที่น้อยที่สุดในโครงข่ายทางแสงที่สามารถเป็นไปได้ตามเงื่อนไขขอบเขตทั้งหมด

4.2.1.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต (Solve the constraints equations)

เมื่อทำการกำหนดสมการเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ และทำการแก้สมการเชิงเส้นแล้วจะได้ผลเฉลยดังตารางที่ 4.11 ซึ่งจะได้ผลเฉลยของค่าสะสมดีสเปอร์ชันที่ทุกอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ, ค่าสะสมดีสเปอร์ชันที่ทุกสถานี, จำนวนหน่วยขดเซยดีสเปอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง, และจำนวนหน่วยขดเซยดีสเปอร์ชันทั้งหมดที่ใช้ในตัวอย่างโครงข่ายที่ 1

ตารางที่ 4.11 จำนวนหน่วยขดเซยดีสเปอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์		พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	
ชนิดของหน่วยขดเซยดีสเปอร์ชัน	NSC-DCU	SC-DCU	ชนิดของหน่วยขดเซยดีสเปอร์ชัน	NSC-DCU	SC-DCU
D_{11}	-814.1	-845.6	D_{25}	51.2	-312
D_{12}	-815.6	-844.9	D_{26}	19.2	-308.8
D_{13}	469.75	252.95	D_{31}	89.6	1508.5
D_{14}	453.5	254.3	D_{32}	73.6	1508.9
D_{15}	-759.3	452.8	D_{33}	-404.95	1236.45
D_{16}	-798.8	456.1	D_{34}	-406.7	1235.7
D_{21}	44.8	-81.2	D_{35}	64	1276.1
D_{22}	36.8	-80.4	D_{36}	24	1278.9
D_{23}	1265.25	-511.65	D_{41}	212.8	1285.2
D_{24}	1256.5	-510.4	D_{42}	174.8	1287.8

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	
	NSC-DCU	SC-DCU
ชนิดของหน่วย ชุดเซย์ดิสเพอร์ชัน		
D_{43}	1373.25	858.35
D_{44}	1334.5	861.4
D_{45}	3.2	-19.5
D_{46}	1.2	-19.3
S_{12}	9.2	-20.1
S_{13}	1294.05	1077.25
S_{14}	1277.3	1078.1
S_{15}	64	1276.1
S_{16}	24	1278.9
S_{21}	11.2	-20.3
S_{23}	1294.05	1077.25
S_{24}	1277.3	1078.1
S_{25}	64	1276.1
S_{26}	24	1278.9
S_{31}	1327.55	1075.55
S_{32}	1310.8	1076.4
S_{34}	829	804.1
S_{35}	1298.95	844.95
S_{36}	1258.2	848.2
S_{41}	1327.55	1075.55
S_{42}	1310.8	1076.4
S_{43}	831.5	804.4
S_{45}	1298.95	844.95
S_{46}	1258.2	848.2
S_{51}	224	1264.9

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	
	NSC-DCU	SC-DCU
ชนิดของหน่วย ชุดเซย์ดิสเพอร์ชัน		
S_{52}	184	1267.7
S_{53}	1380.45	838.45
S_{54}	1339.7	841.7
S_{56}	2.4	-38.6
S_{61}	224	1264.9
S_{62}	184	1267.7
S_{63}	1380.45	838.45
S_{64}	1339.7	841.7
S_{65}	6.4	-39
n_1	1	1
n_2	1	1
n_3	1	0
n_4	1	0
n_5	1	1
n_6	1	1
n_7	0	0
n_8	0	0
n_9	0	1
n_{10}	0	1
n_{11}	1	1
n_{12}	1	1
n_{13}	3	3
n_{14}	3	5
n_{15}	15	14
n_{16}	4	3

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	
ชนิดของหน่วย ชุดเซยดิสเพอร์ชัน	NSC-DCU	SC-DCU
n_{17}	4	3
n_{18}	15	15
N_{\min}	52	51

จากผลเฉลยในตารางที่ 4.11 เราพบว่าจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชัน (N_{\min}) ทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs มีจำนวนการใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันไม่ต่างกันนักโดย SC-DCUs มีการใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยกว่า NSC-DCUs เพียงตัวเดียว แต่โดยทั่วไปแล้วหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันแบบ SC-DCUs จะมีราคาสูงกว่าหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันแบบ NSC-DCUs ดังนั้นเทคนิคนี้ช่วยทำให้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันแบบ NSC-DCUs มีจำนวนอุปกรณ์พอกับอุปกรณ์ชุดเซยดิสเพอร์ชันแบบ SC-DCUs

4.2.1.4 การวางตำแหน่งหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชัน

การวางหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมถึงค่า D_{\max} สำหรับตัวอย่างโครงข่ายที่ 1 และใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชัน NSC-DCUs มีรายละเอียดการวางหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดการวางหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCUs

ข่าย เชื่อมโยง ที่	ลักษณะ ข่าย เชื่อมโยง	ความ ยาว ข่าย เชื่อมโยง [km]	จำนวน DCU ใน ข่าย เชื่อมโยง	ดัชนี DCU	ความ ยาวคลื่น ที่ส่งผ่าน ในข่าย เชื่อมโยง [nm]	ค่าดิสเพอร์ ชัน [ps/nm/km]	ลักษณะช่วง ของข่าย เชื่อมโยง	ระยะทาง ของช่วง ข่าย เชื่อมโยง [km]	ค่าดิสเพอร์ ชันสะสมต้น ทางของ ข่าย เชื่อมโยง [ps/nm]	ค่าดิสเพอร์ ชันหลัง ชุดเซยด้วย DCU [ps/nm]	ค่าดิสเพอร์ ชันสะสมที่ ปลายทาง [ps/nm]
1	S1-PSC1	50	1	1	1550.12	16.506	S1- PSC1(DCU1)	50	0	-814.1	-814.1
2	S2-PSC1	50	1	2	1549.92	16.496	S2- PSC1(DCU2)	50	0	-815.6	-815.6
3	S3-PSC3	75	1	3	1549.72	16.486	S3- PSC3(DCU3)	75	0	-404.95	-404.95
4	S4-PSC3	75	1	4	1549.52	16.476	S4- PSC3(DCU4)	75	0	-406.7	-406.7

5	S5-PSC4	100	1	5	1549.32	16.466	S5-DCU5	97	0	-46.198	
				N/A	1549.32	16.466	DCU5-PSC4	3	-46.198	N/A	3.2
6	S6-PSC4	100	1	6	1549.12	16.456	S6-DCU6	97	0	-48.168	
				N/A	1549.12	16.456	DCU6-PSC4	3	-48.168	N/A	1.2
7	PSC1-S1	50	0	N/A	1549.92	16.496	PSC1-S1	50	-815.6	N/A	9.2
					1549.72	16.486			469.75	N/A	1294.05
					1549.52	16.476			453.5	N/A	1277.3
					1549.32	16.466			-759.3	N/A	64
					1549.12	16.456			-798.8	N/A	24
8	PSC1-S2	50	0	N/A	1550.12	16.506	PSC1-S2	50	-814.1	N/A	11.2
					1549.72	16.486			469.75	N/A	1294.05
					1549.52	16.476			453.5	N/A	1277.3
					1549.32	16.466			-759.3	N/A	64
					1549.12	16.456			-798.8	N/A	24
9	PSC3-S3	75	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S3	75	89.6	N/A	1327.55
					1549.92	16.496			73.6	N/A	1310.8
					1549.52	16.476			-406.7	N/A	829
					1549.32	16.466			64	N/A	1298.95
					1549.12	16.456			24	N/A	1258.2
10	PSC3-S4	75	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S4	75	89.6	N/A	1327.55
					1549.92	16.496			73.6	N/A	1310.8
					1549.72	16.486			-404.95	N/A	831.5
					1549.32	16.466			64	N/A	1298.95
					1549.12	16.456			24	N/A	1258.2
11	PSC4-S5	100	1	7	1550.12	16.506	PSC4-DCU7	13	212.8	-1212.02	
					1549.92	16.496			174.8	-1251.15	
					1549.72	16.486			1373.25	-53.83	
					1549.52	16.476			1334.5	-93.71	
					1549.12	16.456			1.2	-1429.3	
				N/A	1550.12	16.506	DCU7-S5	87	-1212.02	N/A	224
					1549.92	16.496			-1251.15	N/A	184
					1549.72	16.486			-53.83	N/A	1380.45
					1549.52	16.476			-93.71	N/A	1339.7
					1549.12	16.456			-1429.27	N/A	2.4
12	PSC4-S6	100	1	8	1550.12	16.506	PSC4-DCU8	13	212.8	-1212.02	
					1549.92	16.496			174.8	-1251.15	
					1549.72	16.486			1373.25	-53.832	
					1549.52	16.476			1334.5	-93.712	
					1549.32	16.466			3.2	-1426.14	
				N/A	1550.12	16.506	DCU8-S6	87	-1212.02	N/A	224
					1549.92	16.496			-1251.15	N/A	184
					1549.72	16.486			-53.832	N/A	1380.45
					1549.52	16.476			-93.712	N/A	1339.7
					1549.32	16.466			-1426.14	N/A	6.4

13	PSC1- PSC2	350	3	9	1550.12	16.506	PSC1-DCU9	146	-814.1	-43.624					
					1549.92	16.496			-815.6	-47.584					
				10	1550.12	16.506	DCU9-DCU10	99	-43.624	-48.93					
					1549.92	16.496			-47.584	-54.88					
				11	1550.12	16.506	DCU10-	99	-48.93	-54.236					
					1549.92	16.496	DCU11		-54.88	-62.176					
				N/A	1550.12	16.506	DCU11-PSC2	6	-54.236	N/A	44.8				
					1549.92	16.496			-62.176	N/A	36.8				
14	PSC3- PSC2	400	3	12	1549.72	16.486	PSC3-DCU12	121	-404.95	-51.544					
					1549.52	16.476			-406.7	-55.504					
				13	1549.72	16.486	DCU12-	100	-51.544	-44.344					
					1549.52	16.476	DCU13		-55.504	-50.304					
				14	1549.72	16.486	DCU13-	99	-44.344	-53.63					
					1549.52	16.476	DCU14		-50.304	-61.58					
				N/A	1549.72	16.486	DCU14-PSC2	80	-53.63	N/A	1265.25				
					1549.52	16.476			-61.58	N/A	1256.5				
				15	PSC4- PSC2	1500	15	15	1549.32	16.466	PSC4-DCU15	96	3.2	-59.464	
									1549.12	16.456			1.2	-63.424	
16	1549.32	16.466	DCU15-					100	-59.464	-56.264					
	1549.12	16.456	DCU16						-63.424	-62.224					
17	1549.32	16.466	DCU16-					100	-56.264	-53.064					
	1549.12	16.456	DCU17						-62.224	-61.024					
18	1549.32	16.466	DCU17-					100	-53.064	-49.864					
	1549.12	16.456	DCU18						-61.024	-59.824					
19	1549.32	16.466	DCU18-					100	-49.864	-46.664					
	1549.12	16.456	DCU19						-59.824	-58.624					
20	1549.32	16.466	DCU19-					100	-46.664	-43.464					
	1549.12	16.456	DCU20						-58.624	-57.424					
21	1549.32	16.466	DCU20-					99	-43.464	-56.73					
	1549.12	16.456	DCU21						-57.424	-72.68					
22	1549.32	16.466	DCU21-					100	-56.73	-53.53					
	1549.12	16.456	DCU22						-72.68	-71.48					
23	1549.32	16.466	DCU22-					100	-53.53	-50.33	23				
	1549.12	16.456	DCU23						-71.48	-70.28					
24	1549.32	16.466	DCU23-					100	-50.33	-47.13	24				
	1549.12	16.456	DCU24						-70.28	-69.08					
25	1549.32	16.466	DCU24-	100	-47.13	-43.93	25								
	1549.12	16.456	DCU25		-69.08	-67.88									
26	1549.32	16.466	DCU25-	99	-43.93	-57.196	26								
	1549.12	16.456	DCU26		-67.88	-83.136									
27	1549.32	16.466	DCU26-	100	-57.196	-53.996	27								
	1549.12	16.456	DCU27		-83.136	-81.936									
28	1549.32	16.466	DCU27-	100	-53.996	-50.796									
	1549.12	16.456	DCU28		-81.936	-80.736									

16	PSC2- PSC1	350	4	29	1549.32	16.466	DCU28-	100	-50.796	-47.596	
					1549.12	16.456	DCU29		-80.736	-79.536	
				N/A	1549.32	16.466	DCU29-PSC2	6	-47.596	N/A	51.2
					1549.12	16.456			-79.536	N/A	19.2
				30	1549.72	16.486	PSC2-DCU30	20	1265.25	-46.43	
					1549.52	16.476			1256.5	-56.38	
					1549.32	16.466			51.2	-1262.88	
					1549.12	16.456			19.2	-1296.08	
31	1549.72	16.486	DCU30- DCU31	99	-46.43	-55.716					
	1549.52	16.476			-56.38	-67.656					
	1549.32	16.466			-1262.88	-1276.146					
	1549.12	16.456			-1296.08	-1311.336					
32	1549.72	16.486	DCU31- DCU32	100	-55.716	-48.516					
	1549.52	16.476			-67.656	-62.456					
	1549.32	16.466			-1276.146	-1272.946					
	1549.12	16.456			-1311.336	-1310.136					
33	1549.72	16.486	DCU32- DCU33	100	-48.516	-41.316					
	1549.52	16.476			-62.456	-57.256					
	1549.32	16.466			-1272.946	-1269.746					
	1549.12	16.456			-1310.136	-1308.936					
N/A	1549.72	16.486	DCU33-PSC1	31	-41.316	N/A	469.75				
	1549.52	16.476			-57.256	N/A	453.5				
	1549.32	16.466			-1269.746	N/A	-759.3				
	1549.12	16.456			-1308.936	N/A	-798.8				
17	PSC2- PSC3	400	4	34	1550.12	16.506	PSC2-DCU34	94	44.8	-43.036	
					1549.92	16.496			36.8	-52.976	
					1549.32	16.466			51.2	-44.396	
					1549.12	16.456			19.2	-78.336	
				35	1550.12	16.506	DCU34- DCU35	99	-43.036	-48.342	
					1549.92	16.496			-52.976	-60.272	
					1549.32	16.466			-44.396	-57.662	
					1549.12	16.456			-78.336	-93.592	
				36	1550.12	16.506	DCU35- DCU36	99	-48.342	-53.648	
					1549.92	16.496			-60.272	-67.568	
					1549.32	16.466			-57.662	-70.928	
					1549.12	16.456			-93.592	-108.848	
				37	1550.12	16.506	DCU36- DCU37	100	-53.648	-42.448	
					1549.92	16.496			-67.568	-58.368	
					1549.32	16.466			-70.928	-67.728	
					1549.12	16.456			-108.848	-107.648	
				N/A	1550.12	16.506	DCU37-PSC3	8	-42.448	N/A	89.6
					1549.92	16.496			-58.368	N/A	73.6
					1549.32	16.466			-67.728	N/A	64
					1549.12	16.456			-107.648	N/A	24

18	PSC2- PSC4	1500	15	38	1550.12	16.506	PSC2-DCU15	20	44.8	-1264.48	
					1549.92	16.496			36.8	-1273.68	
					1549.72	16.486			1265.25	-46.43	
					1549.52	16.476			1256.5	-56.38	
				39	1550.12	16.506	DCU15- DCU16	99	-1264.48	-1269.786	
					1549.92	16.496			-1273.68	-1280.976	
					1549.72	16.486			-46.43	-55.716	
					1549.52	16.476			-56.38	-67.656	
				40	1550.12	16.506	DCU16- DCU17	100	-1269.786	-1258.586	
					1549.92	16.496			-1280.976	-1271.776	
					1549.72	16.486			-55.716	-48.516	
					1549.52	16.476			-67.656	-62.456	
				41	1550.12	16.506	DCU17- DCU18	99	-1258.586	-1263.892	
					1549.92	16.496			-1271.776	-1279.072	
					1549.72	16.486			-48.516	-57.802	
					1549.52	16.476			-62.456	-73.732	
				42	1550.12	16.506	DCU18- DCU19	100	-1263.892	-1252.692	
					1549.92	16.496			-1279.072	-1269.872	
					1549.72	16.486			-57.802	-50.602	
					1549.52	16.476			-73.732	-68.532	
				43	1550.12	16.506	DCU19- DCU20	100	-1252.692	-1241.492	
					1549.92	16.496			-1269.872	-1260.672	
					1549.72	16.486			-50.602	-43.402	
					1549.52	16.476			-68.532	-63.332	
				44	1550.12	16.506	DCU20- DCU21	99	-1241.492	-1246.798	
					1549.92	16.496			-1260.672	-1267.968	
					1549.72	16.486			-43.402	-52.688	
					1549.52	16.476			-63.332	-74.608	
				45	1550.12	16.506	DCU21- DCU22	100	-1246.798	-1235.598	
					1549.92	16.496			-1267.968	-1258.768	
					1549.72	16.486			-52.688	-45.488	
					1549.52	16.476			-74.608	-69.408	
				46	1550.12	16.506	DCU22- DCU23	99	-1235.598	-1240.904	
					1549.92	16.496			-1258.768	-1266.064	
					1549.72	16.486			-45.488	-54.774	
					1549.52	16.476			-69.408	-80.684	
				47	1550.12	16.506	DCU23- DCU24	100	-1240.904	-1229.704	
					1549.92	16.496			-1266.064	-1256.864	
					1549.72	16.486			-54.774	-47.574	
					1549.52	16.476			-80.684	-75.484	
				48	1550.12	16.506	DCU24- DCU25	99	-1229.704	-1235.01	
					1549.92	16.496			-1256.864	-1264.16	
					1549.72	16.486			-47.574	-56.86	
					1549.52	16.476			-75.484	-86.76	

				49	1550.12	16.506	DCU25- DCU26	100	-1235.01	-1223.81	
					1549.92	16.496			-1264.16	-1254.96	
					1549.72	16.486			-56.86	-49.66	
					1549.52	16.476			-86.76	-81.56	
				50	1550.12	16.506	DCU26- DCU27	100	-1223.81	-1212.61	
					1549.92	16.496			-1254.96	-1245.76	
					1549.72	16.486			-49.66	-42.46	
					1549.52	16.476			-81.56	-76.36	
				51	1550.12	16.506	DCU27- DCU28	99	-1212.61	-1217.916	
					1549.92	16.496			-1245.76	-1253.056	
					1549.72	16.486			-42.46	-51.746	
					1549.52	16.476			-76.36	-87.636	
				52	1550.12	16.506	DCU28- DCU29	100	-1217.916	-1206.716	
					1549.92	16.496			-1253.056	-1243.856	
					1549.72	16.486			-51.746	-44.546	
					1549.52	16.476			-87.636	-82.436	
N/A	1550.12	16.506	DCU29-PSC4	86	-1206.716	N/A	212.8				
	1549.92	16.496			-1243.856	N/A	174.8				
	1549.72	16.486			-44.546	N/A	1373.25				
	1549.52	16.476			-82.436	N/A	1334.5				

รายละเอียดการหาตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันดังที่แสดงในตารางที่ 4.12 คำนวณจากผลเฉลยเงื่อนไขของเขตตามตารางที่ 4.11 เช่น ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งหมดที่ใช้ในข่ายเชื่อมโยงที่ 14 มีจำนวน 3 หน่วย ซึ่งสามารถหาตำแหน่งได้จากการคิดถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกความยาวคลื่นใน PSC#3 ที่ส่งผ่านไปยัง PSC#2 ซึ่งมีจำนวน 2 ความยาวคลื่นคือ 1549.72 และ 1549.52 nm โดยมีค่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ PSC#3 คือ -404.95 และ -406.7 ps/nm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่น 1549.72 nm จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเนื่องจากมีค่าสะสมดิสเพอร์ชันมากกว่าอีกหนึ่งความยาวคลื่น การคำนวณหาตำแหน่งการวางดัชนีนีหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ 12

$$\text{ระยะทางระหว่าง PSC\#3 กับ DCU\#12} = \frac{(D_{\max} - D_{33})}{D_{1549.72\text{nm}}} = \frac{(1600 - (-404.95))}{16.486}$$

$$= 121.615 \text{ km (หรือประมาณ 121 กิโลเมตร)}$$

ดังนั้นจึงทำการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน DCU#12 ห่างจาก PSC#3 เป็นระยะทาง 121 กิโลเมตรแล้วทำการคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทั้งสองความยาวคลื่นหลังทำการวาง DCU#12 ดังนี้

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.72 nm

$$\begin{aligned} AD_{1549.72@DCU\#12} &= [D_{33} + (D_{1549.72} \times L)] + D_{comp_{1549.72}} \\ &= [(-404.95) + (16.486 \times 121)] + (-1641.4) \\ &= -51.544 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.52 nm

$$\begin{aligned} AD_{1549.52@DCU\#12} &= [D_{34} + (D_{1549.52} \times L)] + D_{comp_{1549.52}} \\ &= [(-406.7) + (16.476 \times 121)] + (-1642.4) \\ &= -55.504 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

การคำนวณหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันที่ 13

การหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันที่ 13 นั้นจะเห็นว่าความยาวคลื่น 1549.72 nm จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันเนื่องจากมีค่าสะสมดีสเพอร์ชันมากกว่าอีกหนึ่งความยาวคลื่นเช่นเดียวกับการหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันที่ 12

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางระหว่าง DCU\#13 กับ DCU\#12} &= \frac{(D_{\max} - AD_{1549.72@DCU\#12})}{D_{1549.72nm}} = \frac{(1600 - (-51.544))}{16.486} \\ &= 100.178 \text{ km (หรือประมาณ 100 กิโลเมตร)} \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงทำการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชัน DCU#13 ห่างจาก DCU#12 เป็นระยะทาง 100 กิโลเมตรแล้วทำการคำนวณหาค่าดีสเพอร์ชันสะสมของทั้งสองความยาวคลื่นหลังทำการวาง DCU#13 ดังนี้

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.72 nm

$$\begin{aligned} AD_{1549.72@DCU\#13} &= [AD_{1549.72@DCU\#12} + (D_{1549.72} \times L)] + D_{comp_{1549.72}} \\ &= [(-51.544) + (16.486 \times 100)] + (-1641.4) \\ &= -44.344 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.52 nm

$$\begin{aligned} AD_{1549.52@DCU\#13} &= [AD_{1549.52@DCU\#12} + (D_{1549.52} \times L)] + D_{comp_{1549.52}} \\ &= [(-55.504) + (16.476 \times 100)] + (-1642.4) \\ &= -50.304 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

การคำนวณหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ 14

การหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ 14 นั้นจะเห็นว่าความยาวคลื่น 1549.72 nm จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเนื่องจากมีค่าสะสมดิสเพอร์ชันมากกว่าอีกหนึ่งความยาวคลื่นเช่นเดียวกับการหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ 12 และ 13

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางระหว่าง DCU\#14 กับ DCU\#13} &= \frac{(D_{\max} - AD_{1549.72@DCU\#13})}{D_{1549.72nm}} = \frac{(1600 - (-44.344))}{16.486} \\ &= 99.74 \text{ km (หรือประมาณ 99 กิโลเมตร)} \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงทำการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน DCU#14 ห่างจาก DCU#13 เป็นระยะทาง 99 กิโลเมตรแล้วทำการคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทั้งสองความยาวคลื่นหลังทำการวาง DCU#14 ดังนี้

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.72 nm

$$\begin{aligned} AD_{1549.72@DCU\#14} &= [AD_{1549.72@DCU\#13} + (D_{1549.72} \times L)] + D_{comp1549.72} \\ &= [(-44.344) + (16.486 \times 99)] + (-1641.4) \\ &= -53.63 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.52 nm

$$\begin{aligned} AD_{1549.52@DCU\#14} &= [AD_{1549.52@DCU\#13} + (D_{1549.52} \times L)] + D_{comp1549.52} \\ &= [(-50.304) + (16.476 \times 99)] + (-1642.4) \\ &= -61.58 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

หลังจากทำการหาตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่ 14 ทั้ง 3 หน่วยแล้วจะเห็นว่าระยะทางในการส่งผ่านจาก PSC#3 ไปยัง PSC#2 ยังเหลืออีก 80 กิโลเมตร ดังนั้นการคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทั้งสองความยาวคลื่นบน PSC#2 สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.72 nm

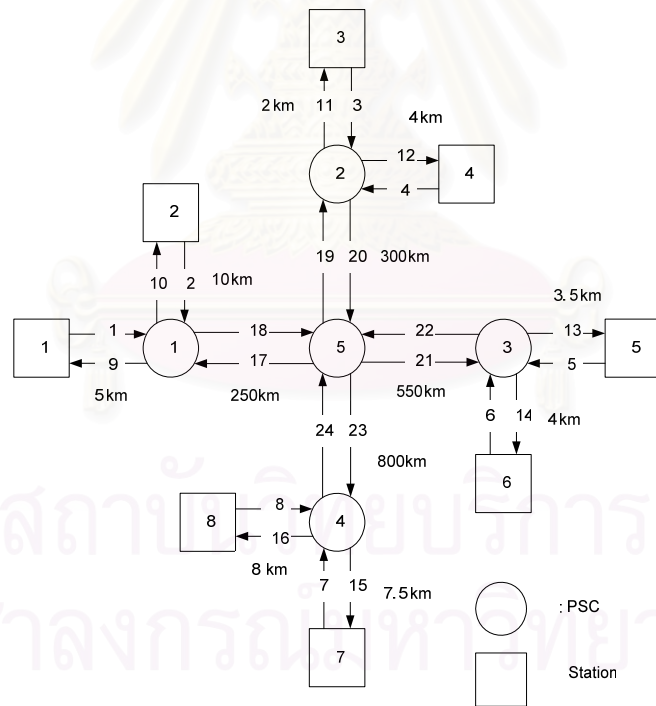
$$\begin{aligned} D_{23} &= [AD_{1549.72@DCU\#14} + (D_{1549.72} \times L)] \\ &= [(-53.63) + (16.486 \times 80)] \\ &= 1265.25 \text{ ps/nm} \end{aligned}$$

- สำหรับความยาวคลื่น 1549.52 nm

$$\begin{aligned}
 D_{24} &= [AD_{1549.52@DCU\#14} + (D_{1549.52} \times L)] \\
 &= [(-61.58) + (16.476 \times 80)] + \\
 &= 1256.5 \text{ ps/nm}
 \end{aligned}$$

หลังจากการคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมบน PSC#2 จะพบว่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทั้งสองความยาวคลื่นมีค่าไม่เกิน $|D_{\max}|$ และเมื่อเทียบกับผลเฉลยในตารางที่ 4.11 แล้วจะเห็นว่าคำตอบที่ได้ตรงกันทั้งจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงที่ 14 และค่าดิสเพอร์ชันสะสมบน PSC#2 และจากการคำนวณหารายละเอียดการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งหมดของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCUs คำตอบที่ได้จากระเบียบวิธีการที่กำหนดนั้นเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตซึ่งหมายถึงไม่มีตำแหน่งใดบนโครงข่ายตัวอย่างที่มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินค่า $|D_{\max}|$ จึงทำให้การแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 สามารถดำเนินการได้

4.2.2 โครงข่ายตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.2. โครงข่ายตัวอย่างที่ 2

เมื่อกำหนดโครงข่ายตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.2 เป็นโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีส่งและรับสัญญาณจำนวน 8 สถานีและมี PSC จำนวน 5 PSCs แล้วจึงทำการดำเนินการระบายชั้นตอณวิธีตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นโดยโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 นี้มี $DG_{i\max} = 4, \lambda_{j\max} = 6,$ และ system margin = 6 dB

- การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 และสมการ (3.1) เราได้ผลการตรวจสอบดังนี้

$$0\text{dBm} - 10\log(3) - 10\log(6) - 6 = -18.553\text{dBm}$$

ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าระบบมีความเป็นไปได้เนื่องจากค่าพลังงานที่อุปกรณ์รับสัญญาณมีค่ามากกว่า P_{sen} จากนั้นทำการกำหนดความยาวคลื่นตาม 25-GHz-grid ITU ให้แต่ละสถานีและคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ รวมทั้งค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์ทั้ง NSC-DCUs และ SC-DCUs ได้ดังตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 2

Station	λ [nm]	D_{SMF} [ps/nm/km]	$D_{NSC-DCF}$ [ps/nm/km]	NSC-DCUs Length [km]	$D_{comp_{NSC-DCF}}$ [ps/nm]	$D_{comp_{SC-DCF}}$ [ps/nm]
S1	1550.12	16.5060	-81.9700	20	-1639.4	-1670.9
S2	1549.92	16.4960	-82.0200	20	-1640.4	-1669.7
S3	1549.72	16.4860	-82.0700	20	-1641.4	-1668.5
S4	1549.52	16.4760	-82.1200	20	-1642.4	-1667.3
S5	1549.32	16.4660	-82.1700	20	-1643.4	-1666.1
S6	1549.12	16.4560	-82.2200	20	-1644.4	-1664.9
S7	1548.92	16.4460	-82.2700	20	-1645.4	-1663.7
S8	1548.72	16.4360	-82.3200	20	-1646.4	-1662.5

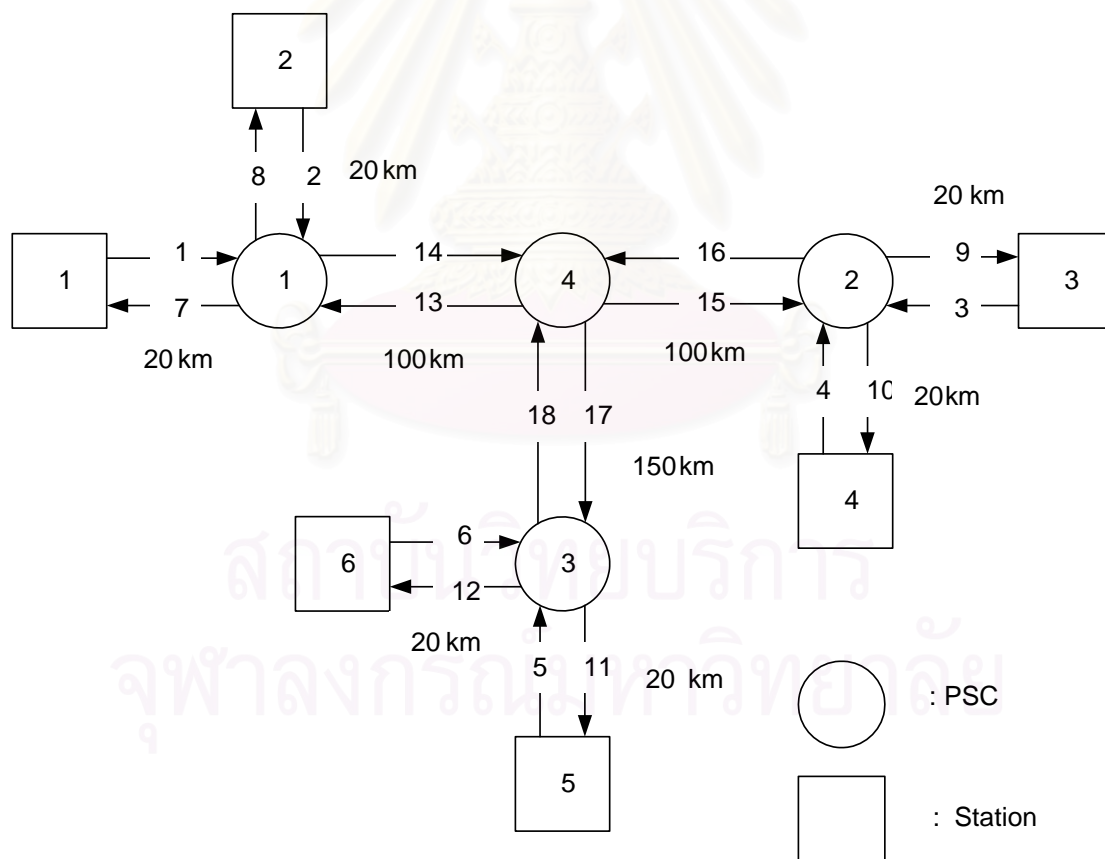
แล้วทำการสร้างสมการขอบเขตตามระเบียบวิธีขั้นตอนที่ได้กำหนดขึ้นและหาผลเฉลยเหมือนที่ทำในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ได้ผลเฉลยดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 2

Types of DCUs	Sample Network # 2
Non slope compensated DCU	38
100%-slope-compensated DCU	38

จากผลเฉลยในตารางที่ 4.14 เราพบว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs มีจำนวนการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเท่ากัน แต่โดยทั่วไปแล้วหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCUs จะมีราคาสูงกว่าหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCUs ดังนั้นเราสามารถเปลี่ยนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCUs แทน SC-DCUs ได้เพื่อลดต้นทุนของโครงข่าย

4.2.3 โครงข่ายตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.3. โครงข่ายตัวอย่างที่ 3

เมื่อกำหนดโครงข่ายตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.3 เป็นโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีส่งและรับสัญญาณจำนวน 6 สถานีและมี PSC จำนวน 4 PSCs แล้วจึงทำการดำเนินระเบียบ

ขั้นตอนวิธีตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นโดยโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 นี้มี $DG_{i\max} = 3$, $\lambda_{j\max} = 4$, และ system margin = 6 dB

- การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 และสมการ (3.1) เราได้ผลการตรวจสอบดังนี้

$$\text{0dBm} - 10\log(2) - 10\log(4) - 6 = -15.03\text{dBm}$$

ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าระบบมีความเป็นไปได้เนื่องจากค่าพลังงานที่อุปกรณ์รับสัญญาณมีค่ามากกว่า P_{sen} จากนั้นทำการกำหนดความยาวคลื่นตาม 25-GHz-grid ITU ให้แต่ละสถานีและคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ รวมทั้งค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์ทั้ง NSC-DCUs และ SC-DCUs ได้ดังตาราง 4.15

ตารางที่ 4.15 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ 3

Station	λ [nm]	D_{SMF} [ps/nm/km]	$D_{NSC-DCF}$ [ps/nm/km]	NSC-DCUs Length [km]	$D_{comp_{NSC-DCF}}$ [ps/nm]	$D_{comp_{SC-DCF}}$ [ps/nm]
S1	1550.12	16.5060	-81.9700	20	-1639.4	-1670.9
S2	1549.92	16.4960	-82.0200	20	-1640.4	-1669.7
S3	1549.72	16.4860	-82.0700	20	-1641.4	-1668.5
S4	1549.52	16.4760	-82.1200	20	-1642.4	-1667.3
S5	1549.32	16.4660	-82.1700	20	-1643.4	-1666.1
S6	1549.12	16.4560	-82.2200	20	-1644.4	-1664.9

แล้วทำการสร้างสมการขอบเขตตามระเบียบวิธีขั้นตอนที่ได้กำหนดขึ้นและหาผลเฉลยเหมือนที่ทำในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ได้ผลเฉลยดังตารางที่ 4.16

เมื่อกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างดังรูปที่ 4.4 เป็นโครงข่ายตัวอย่างที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีส่งและรับสัญญาณจำนวน 18 สถานีและมี PSC จำนวน 10 PSCs แล้วจึงทำการดำเนินระเบียบขั้นตอนวิธีตามที่ได้กล่าวมาโดยโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 นี้มี $DG_{i_{\max}} = 5$, $\lambda_{j_{\max}} = 10$, และ $\text{system margin} = 6 \text{ dB}$

- การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)
จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 และสมการ (3.1) เราได้ผลการตรวจสอบดังนี้

$$0\text{dBm} - 10\log(4) - 10\log(10) - 6 = -22.02 \text{ dBm}$$

ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าระบบมีความเป็นไปได้เนื่องจากค่าพลังงานที่อุปกรณ์รับสัญญาณมีค่ามากกว่า P_{sen} จากนั้นทำการกำหนดความยาวคลื่นตาม 25-GHz-grid ITU ให้แต่ละสถานีและคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ รวมทั้งค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของอุปกรณ์ทั้ง NSC-DCUs และ SC-DCUs ได้ดังตาราง 4.17

ตารางที่ 4.17 การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs ของแต่ละความยาวคลื่นในโครงข่ายที่ 4

Station	λ [nm]	D_{SMF} [ps/nm/km]	$D_{\text{comp}_{NSC-DCF}}$ [ps/nm]	$D_{\text{comp}_{SC-DCF}}$ [ps/nm]
S1	1550.12	16.506	-1639.4	-1670.90
S2	1549.92	16.496	-1640.4	-1669.71
S3	1549.72	16.486	-1641.4	-1668.51
S4	1549.52	16.476	-1642.4	-1667.32
S5	1549.32	16.466	-1643.4	-1666.12

Station	λ [nm]	D_{SMF} [ps/nm/km]	$D_{comp_{NSC-DCF}}$ [ps/nm]	$D_{comp_{SC-DCF}}$ [ps/nm]
S6	1549.12	16.456	-1644.4	-1664.93
S7	1548.92	16.446	-1645.4	-1663.74
S8	1548.71	16.4355	-1646.45	-1662.48
S9	1548.51	16.4255	-1647.45	-1661.29
S10	1548.32	16.416	-1648.4	-1660.16
S11	1548.12	16.406	-1649.4	-1658.96
S12	1547.92	16.396	-1650.4	-1657.77
S13	1547.72	16.386	-1651.4	-1656.58
S14	1547.52	16.376	-1652.4	-1655.38
S15	1547.32	16.366	-1653.4	-1654.19
S16	1547.12	16.356	-1654.4	-1653.00
S17	1546.92	16.346	-1655.4	-1651.80
S18	1546.72	16.336	-1656.4	-1650.61

ทำการสร้างสมการขอบเขตตามระเบียบวิธีขั้นตอนที่ได้กำหนดขึ้นและหาผลเฉลยได้ดังตารางที่

4.18

ตารางที่ 4.18 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 4

Types of DCUs	Sample Network # 4
Non slope compensated DCU	83
100%-slope-compensated DCU	83

จากผลเฉลยในตารางที่ 4.18 เราพบว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCUs และ SC-DCUs มีจำนวนการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเท่ากัน แต่โดยทั่วไปแล้วหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCUs จะมีราคาสูงกว่าหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCUs ดังนั้นเราสามารถ
ใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCUs แทน SC-DCUs ได้เพื่อลดต้นทุนของโครงข่าย

ระเบียบวิธีสำหรับการกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพที่ได้กำหนดขึ้นสามารถใช้งานกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันได้ทั้งแบบ NSC-DCUs และ SC-DCUs ในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณและจากการใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้กำหนดขึ้นกับโครงข่ายตัวอย่างทั้งสองเราสามารถหาจำนวนอุปกรณ์น้อยที่สุดสำหรับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งสองแบบที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างทั้งสองได้ เราพบว่าเราต้องใช้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน ทำให้เราสามารถเลือกใช้ NSC-DCUs ซึ่งมีต้นทุนถูกกว่าแทน SC-DCUs ที่มีราคาแพงได้โดยการกำหนดตำแหน่งการวางอุปกรณ์ตามระเบียบวิธีที่กำหนดขึ้น

บทที่ 5

เทคนิคการลดผลกระทบความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบของเคอร์

โครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณเป็นที่รู้จักดีในฐานะโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและสามารถส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (transmitter) ไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ (receiver) ได้ โดยการวางเหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงในโครงข่ายประเภทนี้ได้ถูกนำมาศึกษาาก่อนแล้ว [7], [8] แต่เนื่องจากโครงข่ายที่มีอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟซึ่งไม่สามารถแก้ไขผลกระทบของสัญญาณที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและผลกระทบจากเคอร์ได้ทำให้การกำหนดระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการลดผลกระทบความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์มีความน่าสนใจมาก ในบทนี้จะเป็นในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากผลกระทบของเคอร์ด้วยการลดผลกระทบความยาวคลื่นซึ่งในส่วนแรกจะเป็นเทคนิคที่จะนำมาใช้ในการลดผลกระทบของเคอร์และส่วนสุดท้ายจะเป็นรายละเอียดของระเบียบขั้นตอนวิธีการลดผลกระทบความยาวคลื่นซึ่งมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน

5.1 เทคนิคการลดผลกระทบความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์

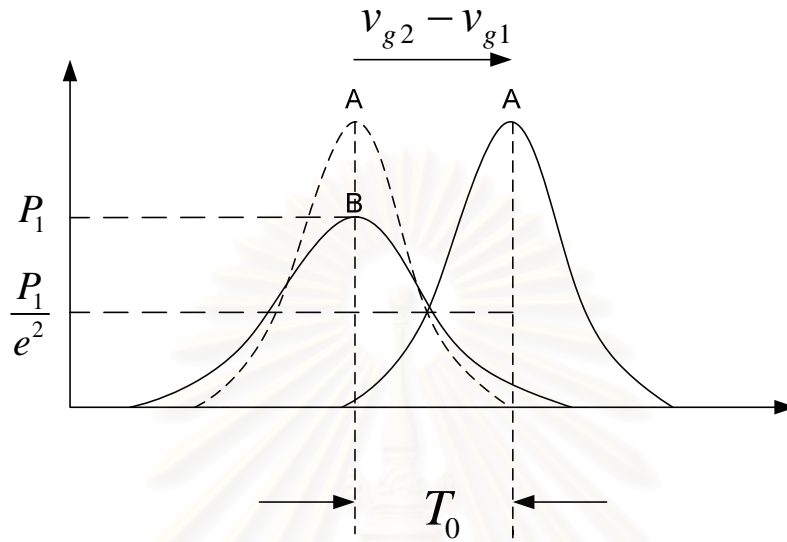
ผลกระทบจากเคอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ SPM, XPM, และ FWM โดยสองประเภทหลังจะเป็นผลกระทบจากสัญญาณข้างเคียงทำให้สัญญาณเกิดการผิดเพี้ยนขึ้น เราใช้การลดผลกระทบความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบของเคอร์โดยวิธีนี้จะช่วยลดค่าความยาววอล์กออฟ (walk-off length) ทำให้ XPM, และ FWM มีผลกระทบต่อระบบลดลงและพร้อมกันนี้ยังส่งผลต่อการผิดเพี้ยนของการจับคู่ทางเฟส (phase matching) ของ FWM ด้วย

5.1.1 การลดผลกระทบของ XPM

การลดค่าความยาววอล์กออฟนั้นจะต้องอาศัยความแตกต่างกันของความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นที่ไม่เท่ากัน ตามรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าความเร็วกลุ่มมีค่าสูงสุดอยู่ ณ ตำแหน่งค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์และหากทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วกลุ่มจากความยาวคลื่นที่ต่างกันมากๆ ความเร็วกลุ่มจะยิ่งมีความแตกต่างกันมากขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าความยาววอล์กออฟมีระยะสั้นลง ดังนั้นผลกระทบของเคอร์จะส่งผลกระทบต่อระบบน้อยลง โดยคำนวณค่าความยาววอล์กออฟได้จากสมการที่ (5.1)

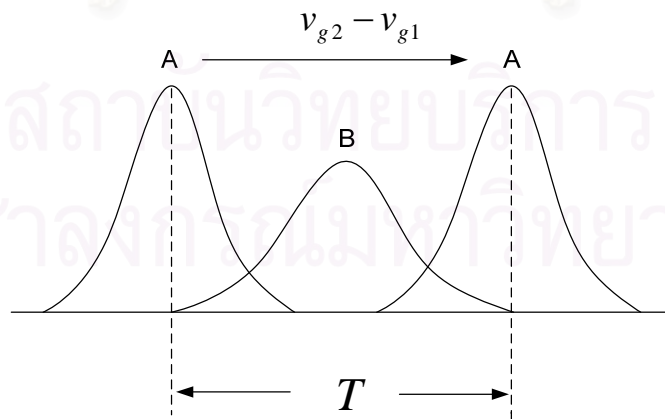
$$L_w = \frac{T_0}{|d|}, \quad (5.1)$$

- เมื่อ L_w คือ ความยาววอล์กออฟ
- T_0 คือ ความกว้างพัลส์ที่ผ่านจากตำแหน่งเดิมมาครึ่งพัลส์ (half width)
- d คือ การผิดคู่ของความเร็วกลุ่ม (group velocity mismatch) = $\frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1}v_{g2}}$



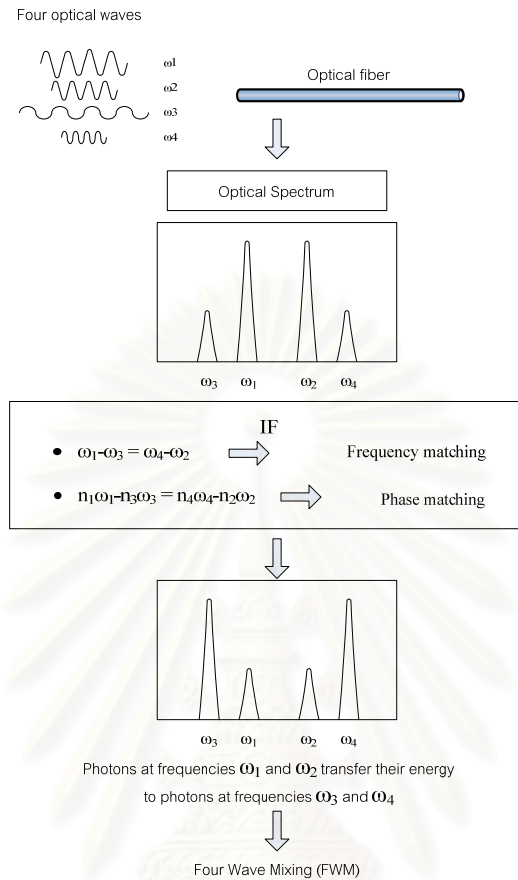
รูปที่ 5.1. ความยาววอล์กออฟ

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นช่วงความกว้างพัลส์ที่ผ่านจากตำแหน่งเดิมมาครึ่งพัลส์ หรือ T_0 โดยพัลส์ A มีความเร็วกลุ่ม v_{g2} ส่วนพัลส์ B ซึ่งเป็นพัลส์อ้างอิงมีความเร็วกลุ่ม v_{g1} แต่ระยะการส่งผลกระทบของ XPM จะเป็นดังรูปที่ 5.2 คือจะเกิดผลกระทบตลอดช่วงพัลส์ (T) ที่มีการวิ่งตัดกันของสัญญาณ



รูปที่ 5.2. ช่วงการเกิดผลกระทบจาก XPM

5.1.2 การลดผลกระทบของ FWM



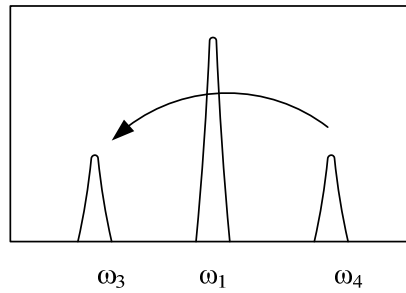
รูปที่ 5.3. Four Wave Mixing (FWM)

จากรูปที่ 5.3. และหัวข้อ 2.2.3 จะเห็นว่าเงื่อนไขในการเกิดขึ้นของ FWM นั้นมีด้วยกัน 3 ข้อ หากขาดข้อใดข้อหนึ่ง FWM ก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดังนั้นการลดโอกาสการเกิดเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งก็จะเป็นการลดโอกาสการเกิด FWM ขึ้นในระบบ

5.1.2.1 เงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (Frequencies matching)

ในระบบการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM) จะกำหนดให้ช่องสัญญาณแต่ละช่องมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (channel spacing) เท่าๆ กันดังนั้นเงื่อนไขการจับคู่ความถี่จึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

5.1.2.2 เงื่อนไขการจับคู่เฟส (Phase matching)



รูปที่ 5.4. กรณีเสื่อมคลายของ FWM (degenerate case of FWM)

พารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าสูงสุดของ FWM ในระบบนั้นแสดงด้วยการจับคู่ทางเฟส (phase mismatch : k) คือ $k=0$ โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (5.2) [16] ในกรณีเสื่อมคลาย (degenerate case) คือ $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ เมื่อ ω_0 คือคลื่นปั๊ม (pump wave) ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของ FWM แสดงดังรูปที่ 5.4

$$k = \Delta k_M + \Delta k_W + \Delta k_{NL} = 0, \quad (5.2)$$

เมื่อ Δk_M คือ การเกิดการผิดคู่จากวัสดุ
 Δk_W คือ การเกิดการผิดคู่จากท่อนำคลื่น
 Δk_{NL} คือ การเกิดการผิดคู่จากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น

ในกรณีเสื่อมคลายเราสามารถประมาณค่าการผิดคู่ได้ดังนี้

$$\Delta k_M \approx \beta_2 \Omega_s^2 \quad (5.3)$$

เมื่อ β_2 คือ สัมประสิทธิ์ของ GVD ที่คลื่นปั๊ม ω_0
 Ω_s คือ การเลื่อนความถี่ (frequency shift)

$$\Delta k_W \approx 0 \quad (5.4)$$

$$\Delta k_{NL} \approx 2\gamma P_0 \quad (5.5)$$

เมื่อ γ คือ พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้น [W^{-1} / km]
 P_0 คือ กำลังสัญญาณปั๊ม [dB]

จากสมการ (5.3) - (5.5) เราสามารถเขียนสมการ (5.2) ใหม่ได้ดังนี้

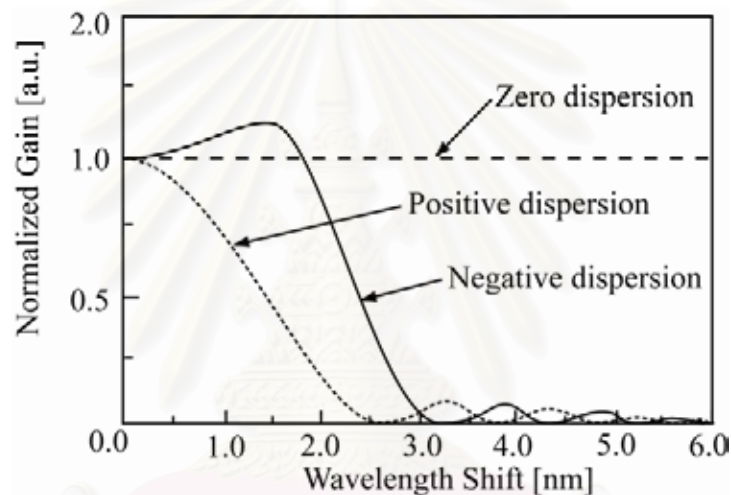
$$k = \beta_2 \Omega_s^2 + 2\gamma P_0 \quad (5.6)$$

จากสมการ (5.6) จะเห็นว่าเงื่อนไขการจับคู่ทางเฟสจะมีค่าเท่ากับศูนย์ก็ต่อเมื่อกำหนดให้สัญญาณปั๊มมีค่าความยาวคลื่นที่ดิสเพอร์ชันเป็นบวก ($\beta_2 < 0$) จึงจะทำให้ระบบได้รับผลจาก FWM มากที่สุด แต่ถ้าเรากำหนดให้ความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์จะทำให้เงื่อนไขการจับคู่ทางเฟสคงที่เท่ากับ $2\gamma P_0$ ซึ่งจะส่งผลให้ทุกความยาวคลื่นในระบบได้รับผลของ FWM จากสัญญาณปั๊ม

ดังนั้นในการลดผลกระทบจาก FWM จึงไม่ควรกำหนดให้ความยาวคลื่นของสัญญาณพัมป์มีค่าดีสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้การเพิ่มค่าดีสเพอร์ชันก็จะเป็นการลดผลกระทบของเคอร์อีกด้วย

5.1.2.3 การเกิด FWM จะเกิดเมื่อสัญญาณทุกความยาวคลื่นวิ่งซ้อนทับกัน

การลดระยะเวลาที่ทุกความยาวคลื่นวิ่งซ้อนทับกันนั้นจะต้องอาศัยความแตกต่างกันของความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นที่ไม่เท่ากัน ตามรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าความเร็วกลุ่มมีค่าสูงสุดอยู่ ณ ตำแหน่งค่าดีสเพอร์ชันเป็นศูนย์และหากทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วกลุ่มจากความยาวคลื่นที่ต่างกันมากๆ ความเร็วกลุ่มจะยิ่งมีความแตกต่างกันมากขึ้นซึ่งจะทำให้ระยะเวลาที่ทุกความยาวคลื่นวิ่งซ้อนทับกันสั้นลงเช่นเดียวกับความยาววอล์กออฟ



รูปที่ 5.5. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายออร์แมลไลซ์ของผลกระทบจากเคอร์กับการเลื่อนทางความยาวคลื่น (Kerr effect normalized gain VS wavelength shift)

จากรูปที่ 5.5 แสดงความแรงของปรากฏการณ์เคอร์ที่ระยะห่างของช่องสัญญาณจะเห็นว่าค่าความยาวคลื่นของสัญญาณพัมป์ที่มีดีสเพอร์ชันเป็นศูนย์นั้นจะทำให้ทุกช่องสัญญาณได้รับผลกระทบของเคอร์ แต่ถ้าเลือกค่าความยาวคลื่นของสัญญาณพัมป์ที่มีดีสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ผลกระทบของเคอร์จะลดลงตามระยะห่างของช่องสัญญาณและค่าดีสเพอร์ชันของแต่ละช่องสัญญาณ

5.2 การกำหนดระเบียบวิธีขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากเคอร์

การกำหนดแนวทางของระเบียบวิธีขั้นตอนวิธีในการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายทางแสงแบบแพร์สัญญาณและเลือกสัญญาณเพื่อลดผลกระทบของเคอร์มีทั้งหมด 3 ขั้นตอนดังนี้

5.2.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)

การทดสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility) เพื่อยืนยันว่าทุกๆ ที่ในโครงข่ายสามารถตรวจจับความยาวคลื่นที่แต่ละสถานีส่งผ่านสัญญาณออกมาได้โดยใช้สมการ (5.7) ในการตรวจสอบเช่นเดียวกับการวางหน่วยขดเคเบิลใยแก้ว

$$P_{\max} - 10\log(DG_{i_{\max}} - 1) - 10\log(|\lambda_{j_{\max}}|) - \sigma_{ij} \geq p_{sen}, \quad (5.7)$$

โดย P_{\max} คือ กำลังขาออกสูงสุดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dBm]

P_{sen} คือ กำลังของสัญญาณต่ำสุดที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์รับสัญญาณสามารถตรวจจับได้ [dBm]

$DG_{i_{\max}}$ คือ จำนวนขาทั้งหมดของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i (ชนิดไม่สะท้อนกลับ)

$\lambda_{j_{\max}}$ คือ จำนวนความยาวคลื่นมากสุดในข่ายเชื่อมโยงที่ l ที่เชื่อมไปยังอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i

σ_{ij} คือ การสูญเสียพลังงานทั้งหมดเช่น ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (insertion loss), กำลังสูญเสียจากการต่อสาย (splicing loss), และกำลังส่วนเผื่อ (power margin) ซึ่งพิจารณาจากข่ายเชื่อมโยงที่ j ที่เชื่อมไปยังอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i จนกว่าสัญญาณจะออกจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i [dBm]

ในสมการ (5.7) จะเหมือนกับสมการ (3.1) คือเมื่อกำลังของสัญญาณสูงสุดที่โครงข่ายสามารถรองรับได้ถูกแบ่งแยกไปตามแต่ละขาออกของอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟที่มีจำนวนขาออกมากที่สุดแล้วแต่ละความยาวคลื่นต้องสามารถตรวจจับโดยอุปกรณ์รับสัญญาณได้ เราจะพิจารณาเฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่ j กับอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟตัวที่ i สำหรับทดสอบโดยใช้เงื่อนไข $(DG_{i_{\max}} - 1)|\lambda_{j_{\max}}|$ ที่มีค่ามากที่สุดในการข่าย

5.2.2 การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต (Generate the constraints)

5.2.2.1 เงื่อนไขขอบเขตความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทางแสง

ขั้นตอนแรกในการสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตนั้นเราจะเลือกความยาวคลื่นตามคำแนะนำของ International Telecommunication Union (ITU) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (5.8)

$$M_{total} = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_s\}, \quad (5.8)$$

โดย M_{total} คือ ชุดความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทางแสง
 S คือ จำนวนสถานีทั้งหมดของโครงข่ายทางแสง

5.2.2.2 เงื่อนไขการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่สถานีในโครงข่ายทางแสง

การจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่สถานีนั้นเราจะใช้ความยาวคลื่นที่กำหนดตามมาตรฐาน ITU จากขั้นตอนแรกและจัดสรรความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับแต่ละสถานีในทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด

แต่ละรูปแบบนั้นเราจะดำเนินการระบุความยาวคลื่นที่มีการส่งผ่านในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดในโครงข่ายที่ละรูปแบบตามสมการ (5.9)

$$M_i = \{ \lambda_n : \lambda_n \in \lambda_{total} \}, \quad (5.9)$$

โดย M_i คือ ชุดความยาวคลื่นทั้งหมดที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง i
 i คือ หมายเลขระบุนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายทางแสงซึ่ง $1 \leq i \leq L$
 L คือ จำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดภายในโครงข่ายทางแสง
 λ_n คือ ความยาวคลื่นลำดับที่ n ที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง i ซึ่ง $1 \leq n \leq S$
 S คือ จำนวนสถานีทั้งหมดของโครงข่ายทางแสง

เมื่อได้ชุดความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายทางแสงแล้ว เราจะทำการเรียงค่าความยาวคลื่นจากมากไปน้อยในทุกชุดความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงเพื่อนำไปใช้ในการในขั้นตอนต่อไป

5.2.2.3 เงื่อนไขการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณทั้งหมดภายในโครงข่าย

หลังจากกำหนดชุดความยาวคลื่นและเรียงความยาวคลื่นจากมากไปน้อยให้แก่ข่ายเชื่อมโยงแล้วเราจะทำการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณที่ติดกันในข่ายเชื่อมโยงตามสมการ (5.10)

$$SCS_i = \sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} - \lambda_{i(j+1)}), \quad (5.10)$$

โดย SCS_i คือ ผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณที่ติดกันในข่ายเชื่อมโยง i
 λ_{ij} คือ ความคลื่นลำดับที่ j บนข่ายเชื่อมโยงที่ i

5.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

รูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นที่สามารถลดผลกระทบของเคอร์รี่ได้นั้นจะต้องมีค่าผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณที่ติดกันในทุกข่ายเชื่อมโยงบนโครงข่ายทางแสงมากที่สุดตามสมการ (5.11)

$$\text{Maximize } SCS = \sum_{i=1}^L SCS_i, \quad (5.11)$$

โดย SCS คือ ผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณที่ติดกันในทุกข่ายเชื่อมโยงบนโครงข่าย
ทางแสง

5.2.3 การแก้สมการเงื่อนไขขอบเขต (Solve the constraints equations)

ในการสร้างและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบ
ของเคอร์รี่จะดำเนินการด้วยโปรแกรมภาษา C/C++



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดลองจำลองทางคณิตศาสตร์ของ เทคนิคการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบของเคอร์

ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรความยาวคลื่นร่วมกับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้เสนอตามบทที่ 3 บนตัวอย่างโครงข่ายแล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะนำเอาระเบียบวิธีขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่นมาใช้ในการกำหนดความยาวของแต่ละสถานีที่ใช้ในการส่งสัญญาณก่อนที่จะทำการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตามระเบียบวิธีขั้นตอนที่กำหนดขึ้นหลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณระหว่างการจำลองระบบที่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นกับการจำลองระบบที่ไม่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่น

6.1 การจัดสรรความยาวคลื่นบนโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ

การจัดสรรความยาวคลื่นบนโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เป็นโครงข่ายสำหรับการจำลองการจัดสรรความยาวคลื่นโดยขั้นตอนแรกในการจัดสรรความยาวคลื่นตามระเบียบวิธีขั้นตอนที่กำหนดในบทที่ 3 คือการตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย ขั้นตอนที่สองคือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของระบบ สุดท้ายเป็นการแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตของระบบ

6.1.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของโครงข่าย (Test feasibility of the network)

ซึ่งจากผลการคำนวณในหัวข้อ 4.2.1.1 พบว่าระบบมีความเป็นไปได้เนื่องจากค่าพลังงานที่อุปกรณ์รับสัญญาณมีค่ามากกว่า P_{sen} ดังนั้นทุกส่วนในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 สามารถตรวจจับสัญญาณได้เสมอ

6.1.2 สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขต (Generate the constraints)

6.1.2.1 เงื่อนไขขอบเขตความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายทางแสง

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ซึ่งใช้ในการจำลองระบบการจัดสรรความยาวคลื่นมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานีและอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟจำนวน 4 ตัว ในการสร้างเงื่อนไขขอบเขตความยาวคลื่นนี้จะต้องกำหนดความยาวคลื่นทั้งหมด 6 ความยาวคลื่นตามการแนะนำของ 25-GHz-grid ITU ดังนี้

$$M_{total} = \{1549.12, 1549.32, 1549.52, 1549.72, 1549.92, 1550.12\}$$

6.1.2.2 เงื่อนไขการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่สถานีในโครงข่ายทางแสง

เมื่อกำหนดความยาวคลื่นทั้งหมดที่ใช้ในระบบแล้วจึงกำหนดความยาวคลื่นที่จะใช้ในแต่ ละสถานี จากจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานีและความยาวคลื่นทั้งหมดที่จะถูกกำหนดให้ใช้ งานในแต่ละสถานีจำนวน 6 ความยาวคลื่นดังนั้นสามารถจัดสรรรูปแบบการกำหนดความ ยาวคลื่นได้ทั้งหมด 720 รูปแบบซึ่งสามารถดูตัวอย่างรูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นได้ดัง ตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างรูปแบบการจัดความยาวคลื่นให้แก่สถานีบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ชุด	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]
1	1549.12	1549.72	1549.32	1549.92	1549.52	1550.12
2	1549.12	1549.72	1549.32	1549.92	1550.12	1549.52
3	1549.12	1549.72	1549.32	1550.12	1549.52	1549.92
4	1549.12	1549.72	1549.32	1550.12	1549.92	1549.52
5	1549.12	1549.72	1549.52	1549.92	1549.32	1550.12
6	1549.12	1549.72	1549.52	1549.92	1550.12	1549.32
7	1549.12	1549.72	1549.52	1550.12	1549.32	1549.92
8	1549.12	1549.72	1549.52	1550.12	1549.92	1549.32
9	1549.12	1549.72	1549.92	1549.32	1549.52	1550.12
10	1549.12	1549.72	1549.92	1549.32	1550.12	1549.52
11	1549.12	1549.72	1549.92	1549.52	1549.32	1550.12
12	1549.12	1549.72	1549.92	1549.52	1550.12	1549.32
13	1549.12	1549.72	1550.12	1549.32	1549.52	1549.92
14	1549.12	1549.72	1550.12	1549.32	1549.92	1549.52
15	1549.12	1549.72	1550.12	1549.52	1549.32	1549.92
16	1549.12	1549.72	1550.12	1549.52	1549.92	1549.32
17	1549.12	1549.92	1549.32	1549.72	1549.52	1550.12
18	1549.12	1549.92	1549.32	1549.72	1550.12	1549.52
19	1549.12	1549.92	1549.32	1550.12	1549.52	1549.72
20	1549.12	1549.92	1549.32	1550.12	1549.72	1549.52

ชุด	ความยาว	ความยาว	ความยาว	ความยาว	ความยาว	ความยาว
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
21	1549.12	1549.92	1549.52	1549.72	1549.32	1550.12
22	1549.12	1549.92	1549.52	1549.72	1550.12	1549.32
23	1549.12	1549.92	1549.52	1550.12	1549.32	1549.72
24	1549.12	1549.92	1549.52	1550.12	1549.72	1549.32

6.1.2.3 เงื่อนไขการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณทั้งหมดภายในโครงข่าย

หลังจากกำหนดชุดความยาวคลื่นและเรียงความยาวคลื่นจากมากไปน้อยให้แก่ข่ายเชื่อมโยงแล้วเราจะทำการหาผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณที่ติดกันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง (Summation of Channel Spacing: *SCS*) ตามสมการ (5.10) ตัวอย่างการหาระยะห่างช่องสัญญาณในแต่ละข่ายเชื่อมโยงเมื่อเราเลือกชุดการจัดสรรความยาวคลื่นตามชุดข้อมูลที่ 1 ตามตารางที่ 6.1 คือ

ชุด	ความยาว	ความยาว	ความยาว	ความยาว	ความยาว	ความยาว
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
1	1549.12	1549.72	1549.32	1549.92	1549.52	1550.12

แล้วจึงทำการหาระยะห่างช่องสัญญาณในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เช่น

การหาระยะห่างช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงที่ 18

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ข่ายเชื่อมโยงที่ 18 ส่งผ่านสัญญาณของสถานีที่ 1, 2, 3, และ 4 จาก PSC#2 ไปยัง PSC#4 ดังนั้นจากสมการที่ (5.9) เราจะได้ชุดความยาวคลื่นบนข่ายเชื่อมโยงที่ 18 ดังนี้

$$M_{14} = \{1549.12, 1549.72, 1549.32, 1549.92\}$$

และทำการคำนวณหาระยะห่างช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงที่ 18 ได้จากสมการที่ (5.10) ดังนี้

$$\begin{aligned} SCS_{14} &= [(1549.92 - 1549.72) + (1549.72 - 1549.32) + (1549.32 - 1549.12)] \\ &= 0.8 \text{ nm} \end{aligned}$$

เมื่อทำการรวมค่า *SCS* จากทุกขั้วเชื่อมโยงสำหรับชุดข้อมูลที่ 1 เราจะได้ค่า *SCS* เท่ากับ 10 nm

6.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

รูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นที่สามารถลดผลกระทบของเคอร์รี่ได้นั้นจะต้องมีค่าผลรวมระยะห่างของช่องสัญญาณที่ติดกันในทุกขั้วเชื่อมโยงบนโครงข่ายทางแสงมากที่สุดตามสมการ (5.11) นั้นสำหรับโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ได้รูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นที่มีค่า *SCS* มากที่สุดทั้งหมด 288 รูปแบบจากทั้งหมด 720 รูปแบบที่เป็นไปได้ โดยให้ค่า *SCS* สูงสุดที่ 10 nm ซึ่งสามารถดูตัวอย่างผลบางส่วนได้จากตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่า *SCS* สำหรับบางชุดข้อมูล

ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ค่า <i>SCS</i> [nm]
1549.12	1549.72	1549.32	1549.92	1549.52	1550.12	10
1550.12	1549.92	1549.72	1549.32	1549.52	1549.12	9
1550.12	1549.92	1549.72	1549.52	1549.32	1549.12	8.4

6.1.3 การแก้สมการเงื่อนไขขอบเขต (Solve the constraints equations)

การแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตใช้การเขียนโปรแกรมภาษา C/C++ เพื่อหารูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นซึ่งมีค่าสะสมระยะห่างช่องสัญญาณทั้งโครงข่ายที่มีค่ามากที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์

6.2 การวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณระหว่างการจำลองระบบที่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นกับการจำลองระบบที่ไม่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่น

การวิเคราะห์ผลของคุณภาพสัญญาณในหัวข้อนี้เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของระเบียบวิธีขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่นที่สามารถลดผลกระทบของเคอร์รี่ได้มากเพียงใดและดีกว่าระบบที่ไม่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นอย่างไร ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณจะแบ่งออกเป็น

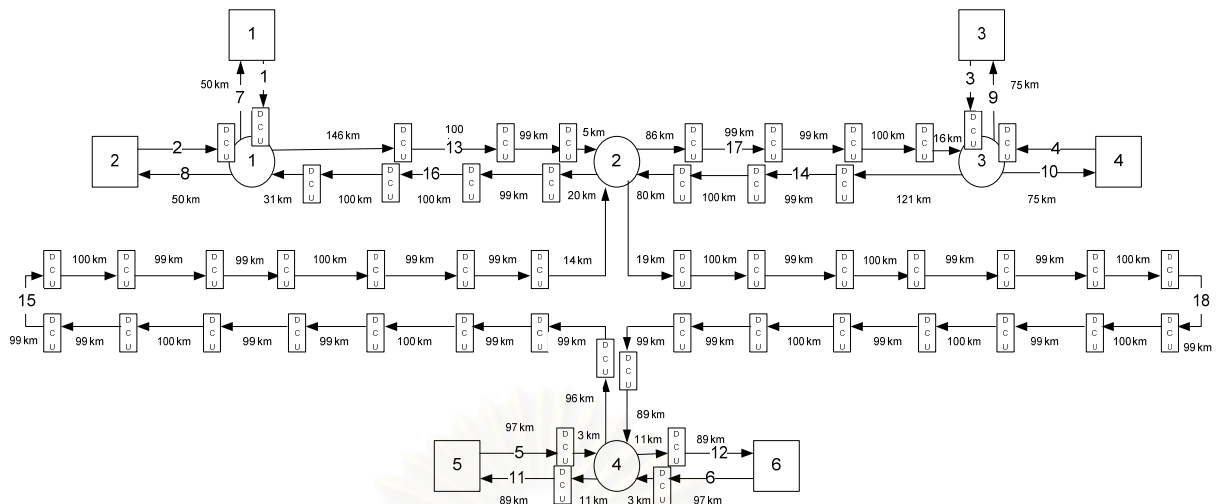
- 1) การจำลองโครงข่ายตัวอย่างและตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันหลังทำการจัดสรรความยาวคลื่น
- 2) การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณ

6.2.1 การจำลองโครงข่ายตัวอย่างและตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังทำการจัดสรรความยาวคลื่น

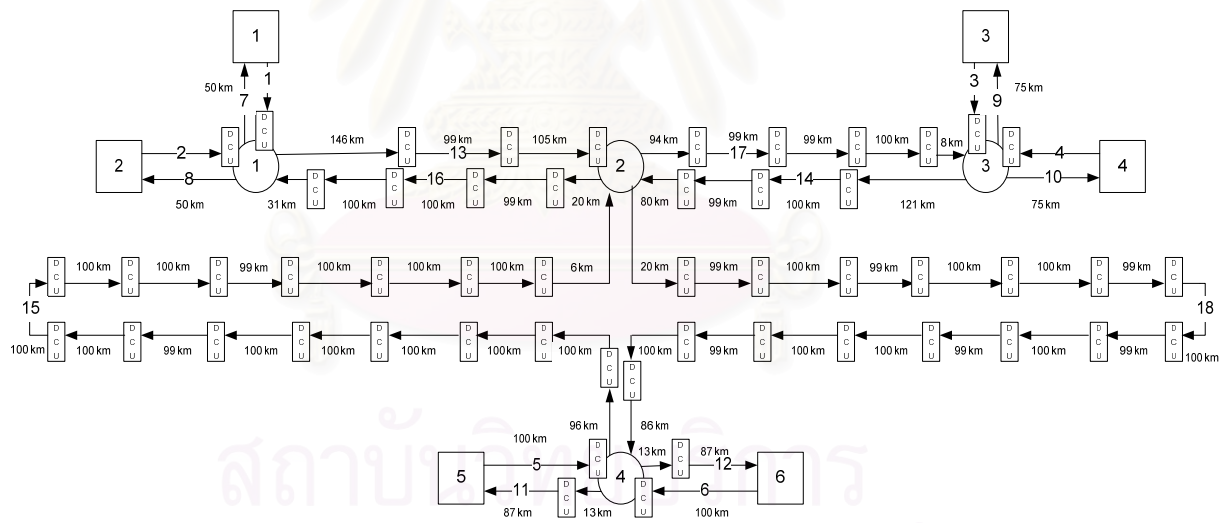
การจำลองโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 หลังมีการจัดสรรความยาวคลื่นนั้นจะต้องทำการกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใหม่ตามระเบียบวิธีขั้นตอนการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันโดยใช้ชุดข้อมูลชุดที่ 1 ตามตารางที่ 6.1 ในการส่งผ่านสัญญาณซึ่งผลการกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันของโครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวและรูปที่ 6.2 คือตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันของโครงข่ายที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยมีรายละเอียดการกำหนดความยาวคลื่นให้แก่ละสถานีดังตารางที่ 6.3 และการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiSystem 4.0 กับระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นและไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3 รายละเอียดการกำหนดความยาวคลื่นให้แก่ละสถานี

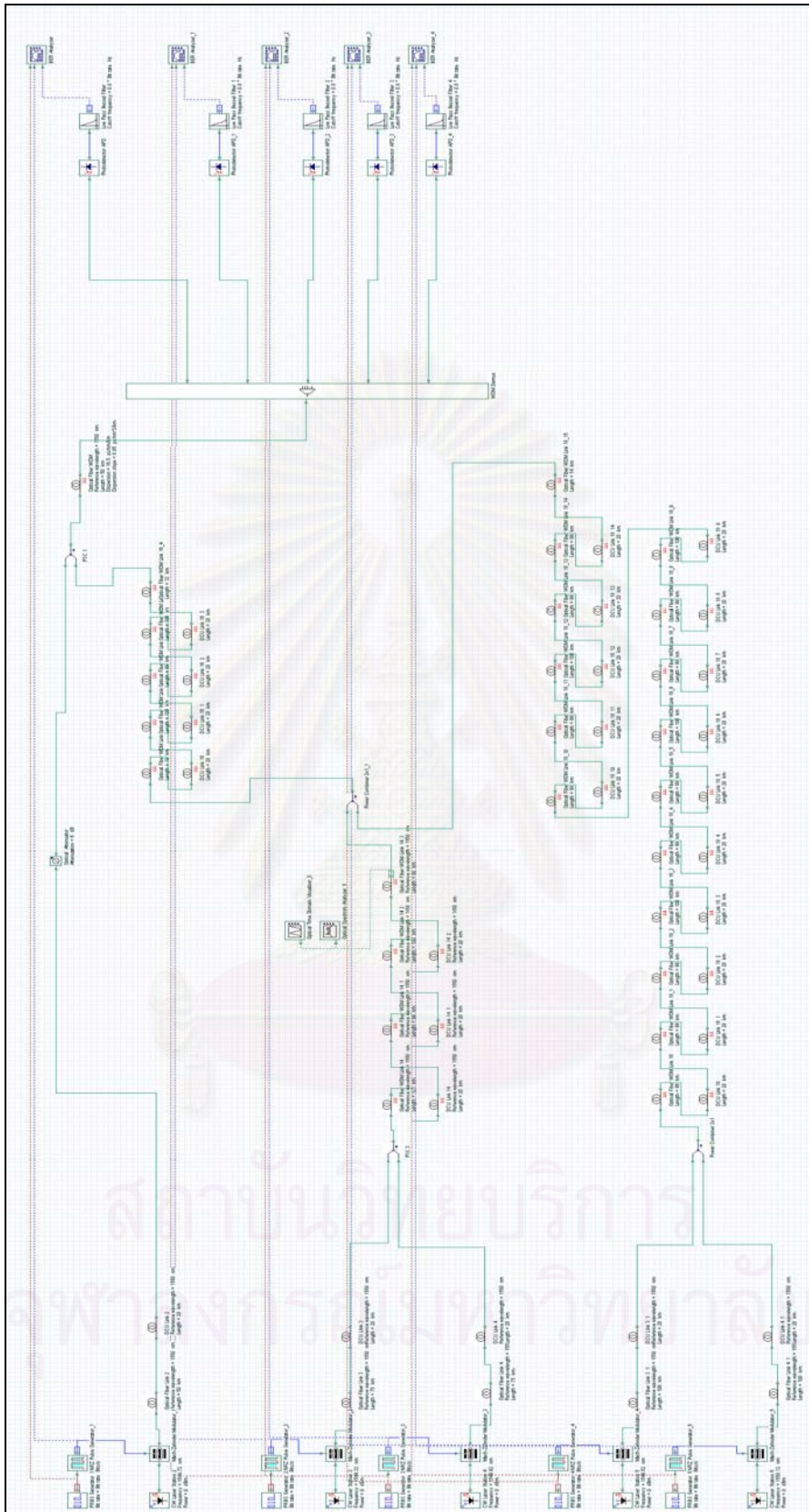
ระบบ	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ความยาว [nm]	ค่า SCS [nm]
มีการจัดสรร ความยาว คลื่น	1549.12	1549.72	1549.32	1549.92	1549.52	1550.12	10
ไม่มีการ จัดสรรความ ยาวคลื่น	1550.12	1549.92	1549.72	1549.52	1549.32	1549.12	8.4



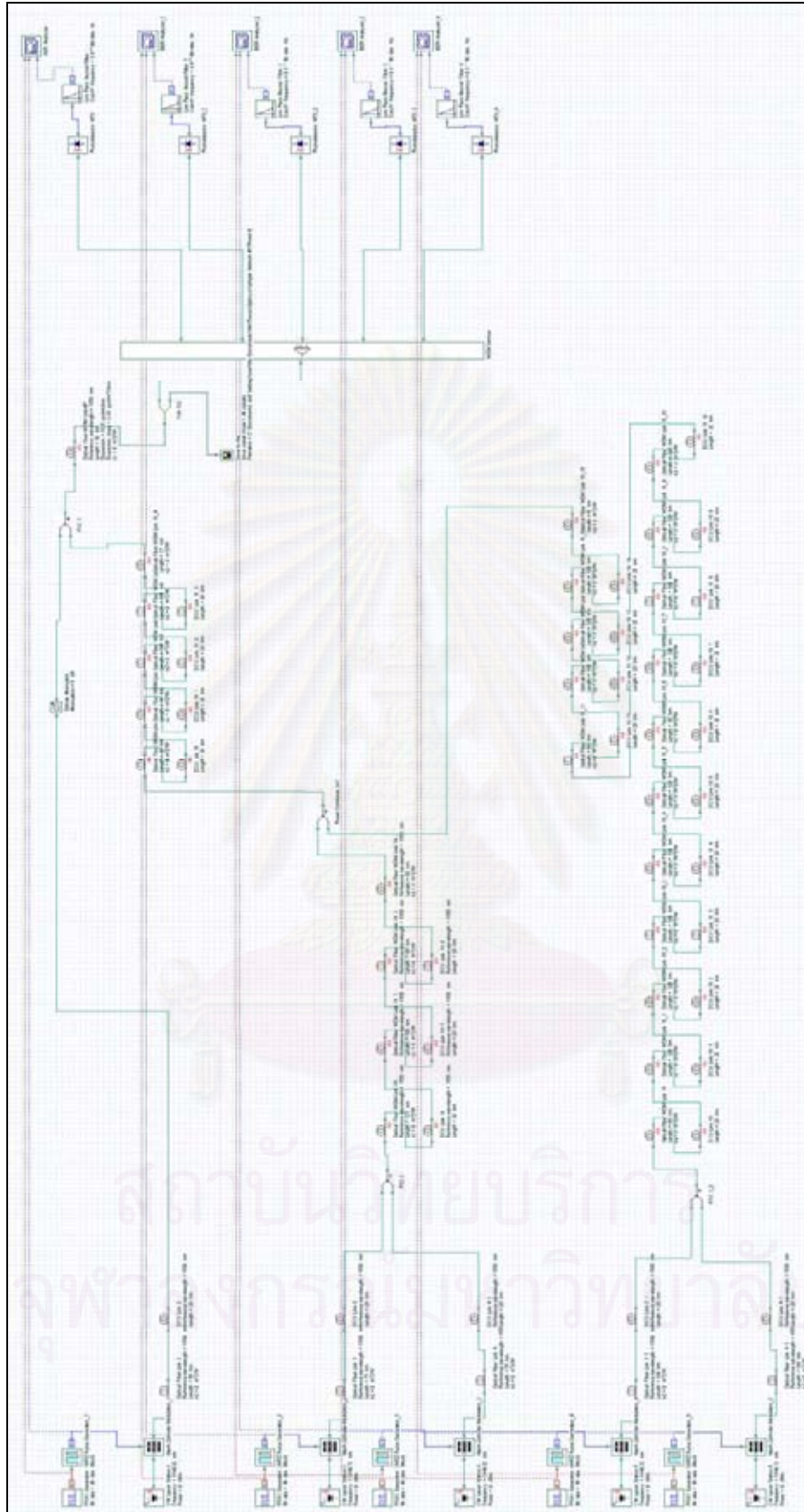
รูปที่ 6.1. ตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน
ในตัวอย่างที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น



รูปที่ 6.2. ตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน
ในตัวอย่างที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น



รูปที่ 6.3. ตัวอย่างการจำลองระบบเพื่อตรวจสอบสัญญาณด้วยโปรแกรม OptiSystem 4.0 ในระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น



รูปที่ 6.4. ตัวอย่างการจำลองระบบเพื่อดูคุณภาพสัญญาณด้วยโปรแกรม OptiSystem 4.0 ในระบบที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น

จากรูปที่ 6.3 และ 6.4 เป็นการจำลองระบบด้วยโปรแกรม OptiSystem 4.0 ในระบบที่มีและไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นซึ่งต่างกันที่ระยะห่างของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและความยาวคลื่นในการส่งผ่านสัญญาณของแต่ละสถานี โดยในการทั้งสองระบบใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มอดูเลตแบบไม่กลับสู่ศูนย์ (Non Return to Zero modulation : NRZ) ความยาวลำดับสุ่มบิตเทียม (pseudo random bit length) 1024 บิต ที่อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps การกำหนดตำแหน่งการวางของการส่งผ่านสัญญาณด้วยความยาวคลื่นทั้ง 2 รูปแบบมีจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเท่ากันคือ 52 หน่วย แต่แตกต่างกันที่ระยะห่างของแต่ละหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

6.2.2 การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณ

การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณเพื่อเปรียบระหว่างโครงข่ายที่ใช้และไม่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นนั้นจะทำการดูคุณภาพสัญญาณจากอุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 โดยในการจำลองโครงข่ายจะใช้โปรแกรม OptiSystem ซึ่งได้รับการรับรองว่าผลการจำลองตรงกับการทดลองจริงและใช้พารามิเตอร์ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) ในการตัดสินคุณภาพของสัญญาณโดยค่า Q factor ซึ่ง Q เป็นตัวชี้วัดที่น่าเชื่อถือได้ในการประมาณอัตราการผิดพลาดของบิต (Bit Error Rate: BER) สำหรับการจำลองระบบของออนออฟคีย์อิง (On-Off Keying: OOK) Q factor สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6.1)

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (6.1)$$

เมื่อ $|\mu_1 - \mu_0|$ คือ ระยะห่างระหว่างความเข้มสัญญาณของบิต "1" และบิต "0"
 $\sigma_1 + \sigma_0$ คือ ผลรวมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มสัญญาณที่บริเวณระดับของบิต "1" และบิต "0"

สำหรับการจำลองระบบในวิทยานิพนธ์นี้ค่า Q ที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 7 ($BER < 10^{-12}$) การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณนั้นอุปกรณ์รับสัญญาณจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อหาค่า Q factor สูงสุดด้วยการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันหลังทำการแยกช่องสัญญาณ (dispersion post-compensation) โดยเราจะทำการแบ่งการตรวจสอบคุณภาพสัญญาณออกเป็น 2 ส่วนคือ

2.1) การกำหนดให้กำลังส่งสัญญาณเป็นดังค่ากำลังสูงสุด (P_{max}) แล้วทำการเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณของการใช้ความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบ

เมื่อกำหนดค่าการขยายสัญญาณของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงที่ 40 km เราสามารถคำนวณหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางได้จากสมการที่ (2.12), (2.13) และตารางที่ 4.1 ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{path-av} &= \frac{1}{40} \int_0^{40} (1 \times 10^{-3}) e^{-\left(\frac{0.2}{4.343}z\right)} dz \\
 &= 0.4565 \text{ mW} \\
 &= -3.4056 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นกำลังส่งสัญญาณของอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงของโครงข่ายทั้งสองรูปแบบการกำหนดความยาวคลื่นจะถูกกำหนดไว้ที่ 0.4565 mW หรือ -3.4056 dB และทำการจำลองระยะเพื่อดูคุณภาพสัญญาณโดยได้ผลดังตารางที่ 6.4 สำหรับโครงข่ายที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นและตารางที่ 6.5 สำหรับโครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 0.4565 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 0.4565 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชันที่	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.2	9.95417	9.2	10.18587
3	1549.72	1294.05	4.0765	7.2	12.3424
4	1549.52	1277.3	3.94011	5.2	11.8947
5	1549.32	64	8.08661	332.52	8.76271
6	1549.12	24	11.17776	330.32	13.81257

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 0.4565 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 0.4565 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชันที่	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.2	6.80913	336.92	7.46
3	1549.32	1260.55	7.10632	-326.12	9.78
4	1549.92	1310.8	6.84187	998.96	8.21
5	1549.52	104	8.16703	334.72	9.20
6	1550.12	224	10.34954	394.83	10.47

จากตารางที่ 6.4 และตารางที่ 6.5 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นจะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 6.8 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 3.9 แต่เมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบสามารถผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด

2.2) การเพิ่มกำลังส่งสัญญาณเพื่อดูความสามารถในการทนต่อผลกระทบของเคอร์

ในส่วนนี้จะทำการเพิ่มค่ากำลังส่งสัญญาณจาก 0.4565 mW เป็น 1.0-1.5 mW เพื่อดูความสามารถในการทนต่อผลกระทบจากเคอร์ของรูปแบบการกำหนดความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบโดยได้ผลตารางที่ 6.6 – 6.17

- กำลังส่งสัญญาณ 1.0 mW

ตารางที่ 6.6 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.0 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.0 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.20	10.15	174.16	10.49
3	1549.72	1294.05	4.28	172.06	10.46
4	1549.52	1277.30	4.40	169.96	10.47
5	1549.32	64.00	4.99	661.84	7.32
6	1549.12	24.00	5.47	494.88	8.55

ตารางที่ 6.7 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.0 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.0 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.20	6.89	336.92	7.57
3	1549.32	1260.55	7.91	497.18	9.85
4	1549.92	1310.80	7.81	1163.92	8.98
5	1549.52	104.00	5.40	664.24	7.80
6	1550.12	224.00	6.71	671.44	8.43

จากตารางที่ 6.6 และตารางที่ 6.7 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น จะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 5.4 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 4.28 ซึ่งเป็นคุณภาพสัญญาณที่ยอมรับไม่ได้ดังนั้น จึงต้องมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบสามารถผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด

- กำลังส่งสัญญาณ 1.1 mW

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น ที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.1 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.1 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.2	10.11	174.16	10.47
3	1549.72	1294.05	4.31	172.06	10.16
4	1549.52	1277.3	4.46	174.16	10.47
5	1549.32	64	4.55	661.84	7.11
6	1549.12	24	4.89	659.44	8.36

ตารางที่ 6.9 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.1 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.1 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.20	6.90	336.92	7.51
3	1549.32	1260.55	8.00	497.18	9.76
4	1549.92	1310.80	7.95	1163.92	9.10
5	1549.52	104.00	4.98	664.24	7.62
6	1550.12	224.00	6.17	671.44	8.21

จากตารางที่ 6.8 และตารางที่ 6.9 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น จะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 4.98 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 4.31 ซึ่งเป็นคุณภาพสัญญาณที่ยอมรับไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบสามารถผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- กำลังส่งสัญญาณ 1.2 mW

ตารางที่ 6.10 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.2 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.2 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.2	10.06	339.12	10.48
3	1549.72	1294.05	4.34	172.06	9.84
4	1549.52	1277.3	4.51	169.96	9.57
5	1549.32	64	4.15	661.84	6.83
6	1549.12	24	4.40	659.44	7.83

ตารางที่ 6.11 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.2 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.2 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.2	6.91	336.92	7.43
3	1549.32	1260.55	8.07	497.18	9.63
4	1549.92	1310.8	8.07	1163.92	9.17
5	1549.52	104	4.61	664.24	7.42
6	1550.12	224	5.68	836.50	8.04

จากตารางที่ 6.10 และตารางที่ 6.11 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น จะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 4.61 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 4.15 ซึ่งเป็นคุณภาพสัญญาณที่ยอมรับไม่ได้ดังนั้น จึงต้องมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นแบบไม่จัดสรรความยาวคลื่นนั้นมีหนึ่งช่องสัญญาณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ส่วนการกำหนดความยาวคลื่นแบบมีการจัดสรรความยาวคลื่นทุกช่องสัญญาณผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด

- กำลังส่งสัญญาณ 1.3 mW

ตารางที่ 6.12 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.3 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.3 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.20	10.01	339.12	10.49
3	1549.72	1294.05	4.36	172.06	9.51
4	1549.52	1277.30	4.54	334.72	9.33
5	1549.32	64.00	3.80	661.84	6.51
6	1549.12	24.00	3.98	824.00	7.35

ตารางที่ 6.13 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.3 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.3 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.20	6.90	336.92	7.34
3	1549.32	1260.55	8.13	497.18	9.47
4	1549.92	1310.80	8.15	1163.92	9.21
5	1549.52	104.00	4.27	664.24	7.18
6	1550.12	224.00	5.23	836.50	7.92

จากตารางที่ 6.12 และตารางที่ 6.13 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น จะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 4.27 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 3.80 ซึ่งเป็นคุณภาพสัญญาณที่ยอมรับไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นแบบไม่จัดสรรความยาวคลื่นนั้นมีหนึ่งช่องสัญญาณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ส่วนการกำหนดความยาวคลื่นแบบมีการจัดสรรความยาวคลื่นทุกช่องสัญญาณผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด

- กำลังส่งสัญญาณ 1.4 mW

ตารางที่ 6.14 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.4 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.4 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.20	9.96	339.12	10.49
3	1549.72	1294.05	4.38	172.06	9.18
4	1549.52	1277.30	4.57	334.72	9.08
5	1549.32	64.00	3.49	826.50	6.22
6	1549.12	24.00	3.63	824.00	7.00

ตารางที่ 6.15 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.4 mW

โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.4 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.20	6.88	336.92	7.25
3	1549.32	1260.55	8.17	497.18	9.29
4	1549.92	1310.80	8.21	1163.92	9.20
5	1549.52	104.00	3.97	829.00	6.97
6	1550.12	224.00	4.83	836.50	7.74

จากตารางที่ 6.14 และตารางที่ 6.15 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น จะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 3.97 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 3.49 ซึ่งเป็นคุณภาพสัญญาณที่ยอมรับไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นแบบไม่จัดสรรความยาวคลื่นนั้นมีหนึ่งช่องสัญญาณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ส่วนการกำหนดความยาวคลื่นแบบมีการจัดสรรความยาวคลื่นมีหนึ่งช่องสัญญาณคือช่องสัญญาณจากสถานีที่ 5 ซึ่งใช้ความยาวคลื่น 1549.52 nm ที่มีค่า Q factor น้อยกว่า 7 แต่เมื่อคิดจาก BER จะมีค่า BER $< 10^{-12}$ ดังนั้นจึงได้ทำการจำลองกำลังส่งสัญญาณของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 mW เพื่อดูความสามารถในการทนต่อผลกระทบของเคอร์

- กำลังส่งสัญญาณ 1.5 mW

ตารางที่ 6.16 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.5 mW

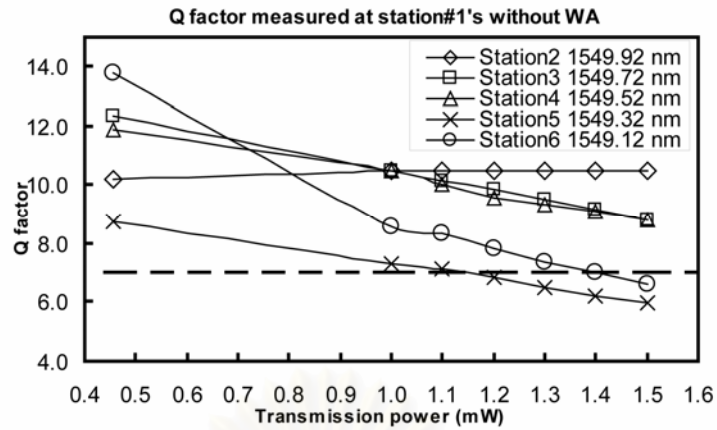
โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.5 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.92	9.20	9.91	339.12	10.48
3	1549.72	1294.05	4.39	172.06	8.83
4	1549.52	1277.30	4.58	334.72	8.80
5	1549.32	64.00	3.21	826.50	5.95
6	1549.12	24.00	3.32	824.00	6.63

ตารางที่ 6.17 ข้อมูลคุณภาพสัญญาณของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นที่อุปกรณ์รับสัญญาณของสถานีที่ 1 ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.5 mW

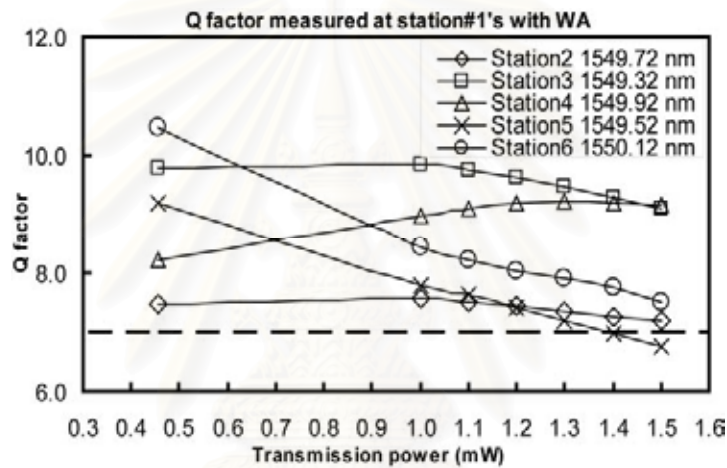
โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อมีการจัดสรรความยาวคลื่นส่งสัญญาณด้วยจำนวนบิต 1024 บิต, อัตราส่งข้อมูล 10 Gbps ด้วยกำลังส่งสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง 40 km 1.5 mW					
สถานีที่	ความ	สัญญาณเมื่อไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน		สัญญาณเมื่อมีการชดเชยดิสเพอร์ชัน	
		ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่	Q Factor สูงสุด
2	1549.72	7.20	6.88	336.92	7.20
3	1549.32	1260.55	8.20	497.18	9.10
4	1549.92	1310.80	8.23	1163.92	9.15
5	1549.52	104.00	3.69	829.00	6.76
6	1550.12	224.00	4.47	836.50	7.51

จากตารางที่ 6.16 และตารางที่ 6.17 จะเห็นว่าในกรณีสัญญาณที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน หลังการแยกช่องสัญญาณนั้นคุณภาพของสัญญาณจากระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น จะมีคุณภาพดีกว่าคุณภาพของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยโดยค่า Q factor ต่ำสุดของสัญญาณจากการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 3.97 ส่วน Q factor ต่ำสุดของสัญญาณที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่นอยู่ที่ 3.49 ซึ่งเป็นคุณภาพสัญญาณที่ยอมรับไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยดิสเพอร์ชันหลังการแยกช่องสัญญาณเพื่อหาค่า Q factor ที่ดีที่สุดพบว่าคุณภาพสัญญาณจากการกำหนดความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบไม่สามารถผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด

จากผลการจำลองระบบเพื่อดูความสามารถในการทนผลกระทบจากเคอร์ชของระบบการกำหนดความยาวคลื่นทั้งสองรูปแบบโดยการเพิ่มกำลังส่งของสัญญาณนั้นพบว่าระบบที่กำหนดความยาวคลื่นโดยไม่ใช้การจัดสรรความยาวคลื่นจะสามารถใช้กำลังส่งสัญญาณสูงสุดที่ 1.2 mW ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.5 ส่วนระบบที่กำหนดความยาวคลื่นซึ่งใช้ระเบียบวิธีขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่นที่กำหนดจะสามารถใช้กำลังส่งสัญญาณสูงสุดที่ 1.4 mW ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5. คุณภาพสัญญาณของระบบที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น



รูปที่ 6.6. คุณภาพสัญญาณของระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น

จากผลการจำลองระบบตามรูปที่ 6.5 และ 6.6 พบว่าช่องสัญญาณที่มีค่า Q ต่ำที่สุดคือช่องสัญญาณที่ 5 ของทั้งสองระบบเป็นผลมาจากระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณจากสถานีที่ 5 และ 6 มายังสถานีที่ 1 มีระยะทางมากที่สุดคือ 2000 km แต่ที่ช่องสัญญาณ 5 มีคุณภาพต่ำกว่าช่องสัญญาณที่ 6 เนื่องจากเมื่อช่องสัญญาณที่ 5 และ 6 ถูกส่งผ่านมายัง PSC#2 จะมีช่องสัญญาณเพิ่มอีก 2 ช่องสัญญาณจากสถานีที่ 3 และ 4 ทำให้ช่องสัญญาณที่ 5 ได้รับผลกระทบของเคอร์มากกว่าช่องสัญญาณที่ 6 เนื่องจากเป็นช่องสัญญาณที่อยู่บริเวณตรงกลางสามารถรับผลกระทบของเคอร์จากช่องสัญญาณรอบข้างได้โดยง่าย ส่วนช่องสัญญาณที่ 6 เป็นช่องริมสุดทำให้ได้รับผลกระทบของเคอร์เพียงด้านเดียว นอกจากนี้จะเห็นว่าช่องสัญญาณจากสถานีที่ 2 จะมีคุณภาพของสัญญาณไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มกำลังส่งเนื่องจากมีระยะทางส่งผ่านสัญญาณที่สั้นคือ 100 km ทำให้คุณภาพของช่องสัญญาณ 2 ไม่ได้รับผลกระทบจากเคอร์มากนัก

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผล

เมื่อทำการศึกษาโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นโครงข่ายแบบหนึ่งของการสื่อสารทางแสงที่อุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นแบบแพสซีฟทั้งหมดและมีต้นทุนในการติดตั้งต่ำทำให้มีความน่าสนใจอย่างมากในการที่จะขยายขนาดโครงข่ายจากเครือข่ายเข้าถึงไปเป็นโครงข่ายนครหลวงหรือโครงข่ายระยะไกลแต่การขยายขนาดโครงข่ายก็จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณจากดีสเพอร์ชันและผลกระทบของเคอร์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอระเบียบวิธีขั้นตอนการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันและระเบียบวิธีขั้นตอนวิธีในการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบจากดีสเพอร์ชันและเคอร์บนโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณตามลำดับ

จากการจำลองระบบในส่วนการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างที่กำหนดขึ้นพบว่าระเบียบวิธีขั้นตอนวิธีที่เสนอสามารถหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยในแต่ละช่องเชื่อมโยงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั่นคือการกำหนดตำแหน่งการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันจะวางได้ก็ต่อเมื่อมีช่องสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งมีค่าดีสเพอร์ชันสะสมใกล้ $|D_{\max}|$ มากที่สุดซึ่งส่งผลทำให้จำนวนของหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณหรืออีกนัยหนึ่งคือทำให้ค่าดีสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณอยู่ในช่วงค่าสะสมดีสเพอร์ชันที่ยังสามารถแก้ไขฟื้นคืนคุณภาพสัญญาณได้ นอกจากนี้ผลเฉลยของค่าดีสเพอร์ชันสะสมของทุกความยาวคลื่นบน PSC และสถานีมีความถูกต้องซึ่งสามารถตรวจได้จากการคำนวณเช่นกัน ส่วนผลการจำลองระบบของระเบียบวิธีขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อลดผลกระทบของเคอร์พบว่าสามารถลดผลกระทบจากเคอร์และเพิ่มความสามารถในการทนต่อผลกระทบจากเคอร์ได้โดยระบบที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นสามารถส่งสัญญาณที่กำลังส่งสัญญาณและค่า Q factor โดยรวมที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีการจัดสรรความยาวคลื่น

7.2 ข้อเสนอแนะ

ระเบียบวิธีขั้นตอนการวางหน่วยชดเชยที่ได้กำหนดขึ้นยังไม่สามารถกำหนดระยะและตำแหน่งในการวางหน่วยชดเชยได้ทันทีซึ่งจะต้องผ่านการคำนวณหาตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากค่าดิสเพอร์ชันสะสมบนอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟหรือสถานีซึ่งทำให้เกิดความล่าช้า ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระเบียบวิธีขั้นตอนการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจึงควรพัฒนาให้สามารถคำนวณตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากการกำหนดระเบียบวิธีขั้นตอนเลยทันที



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Bob Chomycz. FIBER OPTIC INSTALLER'S FIELD MANUAL : McGraw Hill, 2000.
- [2] Mohsen Kavehrad and Mahmoud Tabiani. Selective-Broadcast Optical Passive Star Coupler Design for Dense WDM Networks. IEEE Photon. Technol. Lett. 3. (May 1991) : 487-489.
- [3] Mohsen Kavehrad and Mahmoud Tabiani. A Selective-Broadcast Passive Star Coupler for Self-Routing Dense Wavelength Division Multiplexed Optical Networks. J. Lightwave Technology. 9 (Oct. 1991) : 1278-1288.
- [4] Milan Khanal, Chang Joon Chae, and Rodney S. Tucker. Selective Broadcasting of Digital Video Signals Over a WDM Passive Optical Network. IEEE Photonics Tech. Lett. 17 (Sept 2005) : 1992-1994.
- [5] Milan Khanal, Chang Joon Chae, and Rodney S. Tucker. Optimum Operating Conditions of a WDM Passive Optical Network with Selective Video Broadcasting Capability through a Single Modulator. IEEE TuG2, 2005.
- [6] June-Koo Rhee, Ioannis Tomkos, and Ming-Jun Li. A Broadcast-and-Select OADM Optical Network With Dedicated Optical-Channel Protection. J. Lightwave Technology. 21 (Jan. 2003) : 25-31.
- [7] B. Ramamurthy, Jason Iness, and Biswanorth Mukherjee. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Equally Powered-Wavelengths Case. J. Lightwave Technology. 16 (Sept. 1998) : 1560-1569.
- [8] B. Ramamurthy, Jason Iness, and Biswanorth Mukherjee. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Unequally Powered-Wavelengths Case. J. Lightwave Technology. 6 (Dec. 1998) : 755-767.
- [9] P. Kaewplung, P. Ketmanee, T. Lolurlert. Dispersion Compensation in Broadcast-and-Selective Optical Network. In Proceedings Lasers and Electro-Optics CLEO/Pacific Rim 2005. Pacific Rim Conference (2005).
- [10] C.-S. Li, F.F.-K Tong, C. J. Georgiou, and M. Cheng. Gain equalization in metropolitan and wide area optical networks using optical amplifiers. in Proceedings, IEEE INFOCOM' 94, (June 1994) : 130-137.

- [11] Hiroaki Harai, Masayuki Murata, and Hideo Miyahara. Performance Analysis of Wavelength Assignment Policies in All-Optical Network with Limited-Range Wavelength Conversion. IEEE J. Sel. Areas Communication. 16. (Sept. 1998) : 1051-1060.
- [12] Bo Li, and Xianwen Chu. Routing and Wavelength Assignment VS. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks. IEEE Optical Communication. (Aug. 2003).
- [13] Jianping Wang, and Biao Chen. Dynamic Wavelength Assignment for Multicast in All-Optical WDM Network to Maximize the Network Capacity. IEEE J. Sel. Areas Communication. 21. (Oct. 2003).
- [14] Jianping Wang, Xiangtong Qi, and Biao Chen. Wavelength Assignment for Multicast in All-Optical WDM Network with Splitting Constraints. IEEE/ACM Transactions on Networking. 14. (Feb. 2006) : 169-182.
- [15] G.Keiser. Optical fiber communications 3rd edition. Singapore : McGraw Hill, 2000.
- [16] Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics 3rd edition. New York : Academic Press, 2001.
- [17] A. Wonfor. Uncooled 40 Gbps Transmission Over 40 km Single Mode Fiber Using Multi-Level Modulation of a Highly Linear Laser. in Proceedings Optical Fiber Communication Conference. (2004) : MF60.
- [18] Tutorial DWDM prerequisite training : Fujitsu, 2002.
- [19] B. Ramamurthy, and B. Mukherjee. Design of Optical WDM Networks. Massachusetts : Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [20] B. Ramamurthy. Optical WDM Networks: Principles and Practice, chapter 2. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [21] B. Mukherjee. Optical Communication Networks. New York : McGraw-Hill, 1997.
- [22] B. Ramamurthy, J. Iness, B. Mukherjee. Minimizing the Number of Optical Amplifiers Needed to Support a Multi-Wavelength Optical LAN/MAN. in Proc. Of IEEE INFOCOM '97. 1. (1997) : 261-268.

- [23] M. Tachibana, R. L. Laming, P. R. Morkel, and D. N. Payne. Erbium-doped fiber amplifier with flattened gain spectrum. IEEE Photonics Technology Letters. 3. (1991) : 118-120.
- [24] M. Potenza. Optical fiber amplifiers for telecommunication system. IEEE Communications Magazine. 34. (1996) : 96-102.
- [25] Data Sheet of PowerForm™ DCM® Modules for Single-Mode Fiber, C-Band : Avanex, 2005.
- [26] Optical Communication System Design Software OptiSystem 4.0 : Optiwave, 2005.
- [27] www.ilog.com/products/cplex
- [28] C. A. Brackett. Dense wavelength division multiplexing network: Principles and applications. IEEE J. on Selected Areas in Comm. 8(6). (1990) : 948-964.
- [29] N. Antoniadou, Aleksandra Boskovic, Ioannis Tomkos, Nicholas Madamopoulos, Mirim Lee, Ioannis Roudas, David Pastel, Manish Sharma, and Michael J. Yadlowsky. IEEE J. Sel. Areas Commun. 20. (Jan. 2002) : 149-165.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก. รายละเอียดการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชัน
ของโครงข่ายตัวอย่างอื่น ๆ**

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 โดยใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU

ข่าย เชื่อมโยง ที่	ลักษณะ ข่าย เชื่อมโยง	ความ ยาว ข่าย เชื่อมโยง [km]	จำนวน DCU ใน ข่าย เชื่อมโยง	ดัชนี DCU	ความ ยาวคลื่น ที่ส่งผ่าน ในข่าย เชื่อมโยง [nm]	ค่าดีสเพอร์ ชัน [ps/nm/km]	ลักษณะช่วง ของข่าย เชื่อมโยง	ระยะทาง ของช่วง ข่าย เชื่อมโยง [km]	ค่าดีสเพอร์ ชันสะสมต้น ทางของ ข่าย เชื่อมโยง [ps/nm]	ค่าดีสเพอร์ ชันหลัง ชดเชยด้วย DCU [ps/nm]	ค่าดีสเพอร์ ชันสะสมที่ ปลายทาง [ps/nm]
1	S1-PSC1	5	0	N/A	1550.12	16.506	S1-PSC1	5	0	N/A	82.53
2	S2-PSC1	10	0	N/A	1549.92	16.496	S2-PSC1	10	0	N/A	164.96
3	S3-PSC2	2	0	N/A	1549.72	16.486	S3-PSC2	2	0	N/A	32.972
4	S4-PSC2	4	0	N/A	1549.52	16.476	S4-PSC2	4	0	N/A	65.904
5	S5-PSC3	3.5	0	N/A	1549.32	16.466	S5-PSC3	3.5	0	N/A	57.631
6	S6-PSC3	4	0	N/A	1549.12	16.456	S6-PSC3	4	0	N/A	65.824
7	S7-PSC4	7.5	0	N/A	1548.92	16.446	S7-PSC4	7.5	0	N/A	123.345
8	S8-PSC4	8	0	N/A	1548.72	16.436	S8-PSC4	8	0	N/A	131.488
9	PSC1-S1	5	0	N/A	1549.92	16.496	PSC1-S1	5	164.96	N/A	247.44
					1549.72	16.486			893.272	N/A	975.702
					1549.52	16.476			915.704	N/A	998.084
					1549.32	16.466			83.231	N/A	165.561
					1549.12	16.456			75.424	N/A	157.704
					1548.92	16.446			937.645	N/A	1019.875
					1548.72	16.436			925.288	N/A	1007.468
10	PSC1-S2	10	0	N/A	1550.12	16.506	PSC1-S2	10	82.53	N/A	247.59
					1549.72	16.486			893.272	N/A	1058.132
					1549.52	16.476			915.704	N/A	1080.464
					1549.32	16.466			83.231	N/A	247.891
					1549.12	16.456			75.424	N/A	239.984
					1548.92	16.446			937.645	N/A	1102.105
					1548.72	16.436			925.288	N/A	1089.648
11	PSC2-S3	2	0	N/A	1550.12	16.506	PSC2-S3	2	-675.57	N/A	-642.558
					1549.92	16.496			-604.64	N/A	-571.648
					1549.52	16.476			65.904	N/A	98.856
					1549.32	16.466			-736.869	N/A	-703.937
					1549.12	16.456			-746.176	N/A	-713.264
					1548.92	16.446			114.545	N/A	147.437
					1548.72	16.436			100.688	N/A	133.56
12	PSC2-S4	4	0	N/A	1550.12	16.506	PSC2-S4	4	-675.57	N/A	-609.546
					1549.92	16.496			-604.64	N/A	-538.656
					1549.72	16.486			32.972	N/A	98.916

					1549.32	16.466			-736.869	N/A	-671.005	
					1549.12	16.456			-746.176	N/A	-680.352	
					1548.92	16.446			114.545	N/A	180.329	
					1548.72	16.436			100.688	N/A	166.432	
13	PSC3-S5	3.5	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S5	3.5	172.13	N/A	229.901	
					1549.92	16.496			238.56	N/A	296.296	
					1549.72	16.486			914.872	N/A	972.573	
					1549.52	16.476			931.304	N/A	988.97	
					1549.12	16.456			65.824	N/A	123.42	
					1548.92	16.446			935.245	N/A	992.806	
					1548.72	16.436			916.888	N/A	974.414	
14	PSC3-S6	4	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S6	4	172.13	N/A	238.154	
					1549.92	16.496			238.56	N/A	304.544	
					1549.72	16.486			914.872	N/A	980.816	
					1549.52	16.476			931.304	N/A	997.208	
					1549.32	16.466			57.631	N/A	123.495	
					1548.92	16.446			935.245	N/A	1001.029	
					1548.72	16.436			916.888	N/A	982.632	
15	PSC4-S7	7.5	0	N/A	1550.12	16.506	PSC4-S7	7.5	-619.57	N/A	-495.775	
					1549.92	16.496			-558.64	N/A	-434.92	
					1549.72	16.486			112.172	N/A	235.817	
					1549.52	16.476			123.104	N/A	246.674	
					1549.32	16.466			-720.869	N/A	-597.374	
					1549.12	16.456			-740.176	N/A	-616.756	
					1548.72	16.436			131.488	N/A	254.758	
16	PSC4-S8	8	0	N/A	1550.12	16.506	PSC4-S8	8	-619.57	N/A	-487.522	
					1549.92	16.496			-558.64	N/A	-426.672	
					1549.72	16.486			112.172	N/A	244.06	
					1549.52	16.476			123.104	N/A	254.912	
					1549.32	16.466			-720.869	N/A	-589.141	
					1549.12	16.456			-740.176	N/A	-608.528	
					1548.92	16.446			123.345	N/A	254.913	
17	PSC5 - PSC1	250	2	1	1549.72	16.486	PSC5-DCU1	90	54.572	-103.088		
					1549.52	16.476			81.504	-78.056		
					1549.32	16.466			-746.469	-907.929		
					1549.12	16.456			-749.776	-913.136		
					1548.92	16.446			116.945	-48.315		
					1548.72	16.436			109.088	-58.072		
					2	1549.72	16.486	DCU1-DCU2	100	-103.088	-95.888	
						1549.52	16.476			-78.056	-72.856	
						1549.32	16.466			-907.929	-904.729	
						1549.12	16.456			-913.136	-911.936	
						1548.92	16.446			-48.315	-49.115	
						1548.72	16.436			-58.072	-60.872	

				N/A	1549.72	16.486	DCU2-PSC1	60	-95.888	N/A	893.272
					1549.52	16.476			-72.856	N/A	915.704
					1549.32	16.466			-904.729	N/A	83.231
					1549.12	16.456			-911.936	N/A	75.424
					1548.92	16.446			-49.115	N/A	937.645
					1548.72	16.436			-60.872	N/A	925.288
18	PSC1 - PSC5	250	3	3	1550.12	16.506	PSC1-DCU3	86	82.53	-137.354	
					1549.92	16.496			164.96	-56.784	
				4	1550.12	16.506	DCU3-DCU4	100	-137.354	-126.154	
					1549.92	16.496			-56.784	-47.584	
				5	1550.12	16.506	DCU4- DCU5(PSC5)	64	-126.154	-709.17	-709.17
					1549.92	16.496			-47.584	-632.24	-632.24
19	PSC5 - PSC2	300	3	6	1550.12	16.506	PSC5-DCU6	90	-709.17	-863.03	
					1549.92	16.496			-632.24	-788	
					1549.32	16.466			-746.469	-907.929	
					1549.12	16.456			-749.776	-913.136	
					1548.92	16.446			116.945	-48.315	
					1548.72	16.436			109.088	-58.072	
				7	1550.12	16.506	DCU6-DCU7	100	-863.03	-851.83	
					1549.92	16.496			-788	-778.8	
					1549.32	16.466			-907.929	-904.729	
					1549.12	16.456			-913.136	-911.936	
					1548.92	16.446			-48.315	-49.115	
					1548.72	16.436			-58.072	-60.872	
				8	1550.12	16.506	DCU7-DCU8	100	-851.83	-840.63	
					1549.92	16.496			-778.8	-769.6	
					1549.32	16.466			-904.729	-901.529	
					1549.12	16.456			-911.936	-910.736	
					1548.92	16.446			-49.115	-49.915	
					1548.72	16.436			-60.872	-63.672	
				N/A	1550.12	16.506	DCU8-PSC2	10	-840.63	N/A	-675.57
					1549.92	16.496			-769.6	N/A	-604.64
					1549.32	16.466			-901.529	N/A	-736.869
					1549.12	16.456			-910.736	N/A	-746.176
					1548.92	16.446			-49.915	N/A	114.545
					1548.72	16.436			-63.672	N/A	100.688
20	PSC2 - PSC5	300	3	9	1549.72	16.486	PSC2-DCU9	93	32.972	-75.23	
					1549.52	16.476			65.904	-44.228	
				10	1549.72	16.486	DCU9-DCU10	99	-75.23	-84.516	
					1549.52	16.476			-44.228	-55.504	
				11	1549.72	16.486	DCU10- DCU11	100	-84.516	-77.316	
					1549.52	16.476			-55.504	-50.304	
				N/A	1549.72	16.486	DCU11-PSC5	8	-77.316	N/A	54.572
					1549.52	16.476			-50.304	N/A	81.504

21	PSC5 - PSC3	550	5	12	1550.12	16.506	PSC5-DCU12	90	-709.17	-863.03	
					1549.92	16.496			-632.24	-788	
					1549.72	16.486			54.572	-103.088	
					1549.52	16.476			81.504	-78.056	
					1548.92	16.446			116.945	-48.315	
					1548.72	16.436			109.088	-58.072	
				13	1550.12	16.506	DCU12- DCU13	100	-863.03	-851.83	
					1549.92	16.496			-788	-778.8	
					1549.72	16.486			-103.088	-95.888	
					1549.52	16.476			-78.056	-72.856	
					1548.92	16.446			-48.315	-49.115	
					1548.72	16.436			-58.072	-60.872	
				14	1550.12	16.506	DCU13- DCU14	100	-851.83	-840.63	
					1549.92	16.496			-778.8	-769.6	
					1549.72	16.486			-95.888	-88.688	
					1549.52	16.476			-72.856	-67.656	
					1548.92	16.446			-49.115	-49.915	
					1548.72	16.436			-60.872	-63.672	
				15	1550.12	16.506	DCU14- DCU15	100	-840.63	-829.43	
					1549.92	16.496			-769.6	-760.4	
					1549.72	16.486			-88.688	-81.488	
					1549.52	16.476			-67.656	-62.456	
					1548.92	16.446			-49.915	-50.715	
					1548.72	16.436			-63.672	-66.472	
				16	1550.12	16.506	DCU15- DCU16	100	-829.43	-818.23	
					1549.92	16.496			-760.4	-751.2	
					1549.72	16.486			-81.488	-74.288	
					1549.52	16.476			-62.456	-57.256	
					1548.92	16.446			-50.715	-51.515	
					1548.72	16.436			-66.472	-69.272	
N/A	1550.12	16.506	DCU16-PSC3	60	-818.23	N/A	172.13				
	1549.92	16.496			-751.2	N/A	238.56				
	1549.72	16.486			-74.288	N/A	914.872				
	1549.52	16.476			-57.256	N/A	931.304				
	1548.92	16.446			-51.515	N/A	935.245				
	1548.72	16.436			-69.272	N/A	916.888				
22	PSC3 - PSC5	550	6	17	1549.32	16.466	PSC3-DCU17	93	57.631	-54.431	
					1549.12	16.456			65.824	-48.168	
				18	1549.32	16.466	DCU17- DCU18	100	-54.431	-51.231	
					1549.12	16.456			-48.168	-46.968	
				19	1549.32	16.466	DCU18- DCU19	100	-51.231	-48.031	
					1549.12	16.456			-46.968	-45.768	
				20	1549.32	16.466	DCU19- DCU20	100	-48.031	-44.831	
					1549.12	16.456			-45.768	-44.568	

				21	1549.32	16.466	DCU20-	99	-44.831	-58.097	
					1549.12	16.456	DCU21		-44.568	-59.824	
				22	1549.32	16.466	DCU21-	58	-58.097	-746.469	-746.469
					1549.12	16.456	DCU22		-59.824	-749.776	-749.776
23	PSC5 - PSC4	800	8	23	1550.12	16.506	PSC5- DCU23	92	-709.17	-830.018	
					1549.92	16.496			-632.24	-755.008	
					1549.72	16.486			54.572	-70.116	
					1549.52	16.476			81.504	-45.104	
					1549.32	16.466			-746.469	-874.997	
					1549.12	16.456			-749.776	-880.224	
				24	1550.12	16.506	DCU23- DCU24	99	-830.018	-835.324	
					1549.92	16.496			-755.008	-762.304	
					1549.72	16.486			-70.116	-79.402	
					1549.52	16.476			-45.104	-56.38	
					1549.32	16.466			-874.997	-888.263	
					1549.12	16.456			-880.224	-895.48	
				25	1550.12	16.506	DCU24- DCU25	100	-835.324	-824.124	
					1549.92	16.496			-762.304	-753.104	
					1549.72	16.486			-79.402	-72.202	
					1549.52	16.476			-56.38	-51.18	
					1549.32	16.466			-888.263	-885.063	
					1549.12	16.456			-895.48	-894.28	
				26	1550.12	16.506	DCU25- DCU26	100	-824.124	-812.924	
					1549.92	16.496			-753.104	-743.904	
					1549.72	16.486			-72.202	-65.002	
					1549.52	16.476			-51.18	-45.98	
					1549.32	16.466			-885.063	-881.863	
1549.12	16.456	-894.28	-893.08								
27	1550.12	16.506	DCU26- DCU27	99	-812.924	-818.23					
	1549.92	16.496			-743.904	-751.2					
	1549.72	16.486			-65.002	-74.288					
	1549.52	16.476			-45.98	-57.256					
	1549.32	16.466			-881.863	-895.129					
	1549.12	16.456			-893.08	-908.336					
28	1550.12	16.506	DCU27- DCU28	100	-818.23	-807.03					
	1549.92	16.496			-751.2	-742					
	1549.72	16.486			-74.288	-67.088					
	1549.52	16.476			-57.256	-52.056					
	1549.32	16.466			-895.129	-891.929					
	1549.12	16.456			-908.336	-907.136					
29	1550.12	16.506	DCU28- DCU29	100	-807.03	-795.83					
	1549.92	16.496			-742	-732.8					
	1549.72	16.486			-67.088	-59.888					
	1549.52	16.476			-52.056	-46.856					

					1549.32	16.466			-891.929	-888.729	
					1549.12	16.456			-907.136	-905.936	
				30	1550.12	16.506	DCU29- DCU30	99	-795.83	-801.136	
					1549.92	16.496			-732.8	-740.096	
					1549.72	16.486			-59.888	-69.174	
					1549.52	16.476			-46.856	-58.132	
					1549.32	16.466			-888.729	-901.995	
					1549.12	16.456			-905.936	-921.192	
				N/A	1550.12	16.506	DCU30- PSC4	11	-801.136	N/A	-619.57
					1549.92	16.496			-740.096	N/A	-558.64
					1549.72	16.486			-69.174	N/A	112.172
					1549.52	16.476			-58.132	N/A	123.104
					1549.32	16.466			-901.995	N/A	-720.869
					1549.12	16.456			-921.192	N/A	-740.176
24	PSC4 - PSC5	800	8	31	1548.92	16.446	PSC4- DCU31	89	123.345	-58.361	
					1548.72	16.436			131.488	-52.108	
				32	1548.92	16.446	DCU31- DCU32	100	-58.361	-59.161	
					1548.72	16.436			-52.108	-54.908	
				33	1548.92	16.446	DCU32- DCU33	100	-59.161	-59.961	
					1548.72	16.436			-54.908	-57.708	
				34	1548.92	16.446	DCU33- DCU34	100	-59.961	-60.761	
					1548.72	16.436			-57.708	-60.508	
				35	1548.92	16.446	DCU34- DCU35	100	-60.761	-61.561	
					1548.72	16.436			-60.508	-63.308	
				36	1548.92	16.446	DCU35- DCU36	101	-61.561	-45.915	
					1548.72	16.436			-63.308	-49.672	
				37	1548.92	16.446	DCU36- DCU37	100	-45.915	-46.715	
					1548.72	16.436			-49.672	-52.472	
				38	1548.92	16.446	DCU37- DCU38	100	-46.715	-47.515	
					1548.72	16.436			-52.472	-55.272	
				N/A	1548.92	16.446	DCU38- PSC5	10	-47.515	N/A	116.945
					1548.72	16.436			-55.272	N/A	109.088

สถาบันวิจัยประชากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU

ข่าย เชื่อมโยง ที่	ลักษณะ ข่าย เชื่อมโยง	ความ ยาว ข่าย เชื่อมโยง [km]	จำนวน ข่าย เชื่อมโยง ใน ข่าย เชื่อมโยง	ดัชนี DCU	ความ ยาวคลื่น ที่ส่งผ่าน ในข่าย เชื่อมโยง [nm]	ค่าดีสเพอร์ ชัน [ps/nm/km]	ลักษณะช่วง ของข่าย เชื่อมโยง	ระยะทาง ของช่วง ข่าย เชื่อมโยง [km]	ค่าดีสเพอร์ ชันสะสมต้น ทางของ ข่าย เชื่อมโยง [ps/nm]	ค่าดีสเพอร์ ชันหลัง ชดเชยด้วย DCU [ps/nm]	ค่าดีสเพอร์ ชันสะสมที่ ปลายทาง [ps/nm]
1	S1-PSC1	20	0	N/A	1550.12	16.506	S1-PSC1	20	0	N/A	330.12
2	S2-PSC1	20	0	N/A	1549.92	16.496	S2-PSC1	20	0	N/A	329.92
3	S3-PSC2	20	0	N/A	1549.72	16.486	S3-PSC2	20	0	N/A	329.72
4	S4-PSC2	20	0	N/A	1549.52	16.476	S4-PSC2	20	0	N/A	329.52
5	S5-PSC3	20	0	N/A	1549.32	16.466	S5-PSC3	20	0	N/A	329.32
6	S6-PSC3	20	0	N/A	1549.12	16.456	S6-PSC3	20	0	N/A	329.12
7	PSC1-S1	20	0	N/A	1549.92	16.496	PSC1-S1	20	329.92	659.84	659.84
					1549.72	16.486			344.12	673.84	673.84
					1549.52	16.476			339.92	669.44	669.44
					1549.32	16.466			1159.02	1488.34	1488.34
					1549.12	16.456			1154.32	1483.44	1483.44
8	PSC1-S2	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC1-S2	20	330.12	660.24	660.24
					1549.72	16.486			344.12	673.84	673.84
					1549.52	16.476			339.92	669.44	669.44
					1549.32	16.466			1159.02	1488.34	1488.34
					1549.12	16.456			1154.32	1483.44	1483.44
9	PSC2-S3	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC2-S3	20	352.52	682.64	682.64
					1549.92	16.496			348.32	678.24	678.24
					1549.52	16.476			329.52	659.04	659.04
					1549.32	16.466			1159.02	1488.34	1488.34
					1549.12	16.456			1154.32	1483.44	1483.44
10	PSC2-S4	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC2-S4	20	352.52	682.64	682.64
					1549.92	16.496			348.32	678.24	678.24
					1549.72	16.486			329.72	659.44	659.44
					1549.32	16.466			1159.02	1488.34	1488.34
					1549.12	16.456			1154.32	1483.44	1483.44
11	PSC3-S5	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S5	20	1177.82	1507.94	1507.94
					1549.92	16.496			1173.12	1503.04	1503.04
					1549.72	16.486			1168.42	1498.14	1498.14
					1549.52	16.476			1163.72	1493.24	1493.24
					1549.12	16.456			329.12	658.24	658.24
12	PSC3-S6	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S6	20	1177.82	1507.94	1507.94
					1549.92	16.496			1173.12	1503.04	1503.04
					1549.72	16.486			1168.42	1498.14	1498.14

					1549.52	16.476			1163.72	1493.24	1493.24
					1549.32	16.466			329.32	658.64	658.64
13	PSC4 - PSC1	100	0	N/A	1549.72	16.486	PSC4-PSC1	100	-1304.48	344.12	344.12
					1549.52	16.476			-1307.68	339.92	339.92
					1549.32	16.466			-487.58	1159.02	1159.02
					1549.12	16.456			-491.28	1154.32	1154.32
14	PSC1 - PSC4	100	2	1	1550.12	16.506	PSC1-DCU1	76	330.12	-54.824	
					1549.92	16.496			329.92	-56.784	
				2	1550.12	16.506	DCU1-DCU2 (PSC4)	24	-54.824	-1298.08	-1298.08
					1549.92	16.496			-56.784	-1301.28	-1301.28
15	PSC4 - PSC2	100	0	N/A	1550.12	16.506	PSC4-PSC2	100	-1298.08	352.52	352.52
					1549.92	16.496			-1301.28	348.32	348.32
					1549.32	16.466			-487.58	1159.02	1159.02
					1549.12	16.456			-491.28	1154.32	1154.32
16	PSC4 - PSC2	100	2	3	1549.72	16.486	PSC4-DCU3	77	329.72	-42.258	
					1549.52	16.476			329.52	-44.228	
				4	1549.72	16.486	DCU3-DCU4 (PSC2)	23	-42.258	-1304.48	-1304.48
					1549.52	16.476			-44.228	-1307.68	-1307.68
17	PSC4 - PSC3	150	0	N/A	1550.12	16.506	PSC4-PSC3	150	-1298.08	1177.82	1177.82
					1549.92	16.496			-1301.28	1173.12	1173.12
					1549.72	16.486			-1304.48	1168.42	1168.42
					1549.52	16.476			-1307.68	1163.72	1163.72
18	PSC3 - PSC4	150	2	5	1549.32	16.466	PSC3-DCU5	77	329.32	-46.198	
					1549.12	16.456			329.12	-48.168	
				6	1549.32	16.466	DCU5-DCU6 (PSC4)	73	-46.198	-487.58	-487.58
					1549.12	16.456			-48.168	-491.28	-491.28

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดการวางหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันของโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันชนิด SC-DCU

ข่าย เชื่อมโยง ที่	ลักษณะ ข่าย เชื่อมโยง	ความ ยาว ข่าย เชื่อมโยง [km]	จำนวน DCU ใน ข่าย เชื่อมโยง	ดัชนี DCU	ความ ยาวคลื่น ที่ส่งผ่าน ในข่าย เชื่อมโยง [nm]	ค่าดีสเพอร์ ชัน [ps/nm/km]	ลักษณะช่วง ของข่าย เชื่อมโยง	ระยะทาง ของช่วง ข่าย เชื่อมโยง [km]	ค่าดีสเพอร์ ชันสะสมต้น ทางของ ข่าย เชื่อมโยง [ps/nm]	ค่าดีสเพอร์ ชันหลัง ชดเชยด้วย DCU [ps/nm]	ค่าดีสเพอร์ ชันสะสมที่ ปลายทาง [ps/nm]
1	S1-PSC1	20	0	N/A	1550.12	16.506	S1-PSC1	20	0	N/A	330.12
2	S2-PSC1	20	0	N/A	1549.92	16.496	S2-PSC1	20	0	N/A	329.92
3	S3-PSC2	20	0	N/A	1549.72	16.486	S3-PSC2	20	0	N/A	329.72
4	S4-PSC2	20	0	N/A	1549.52	16.476	S4-PSC2	20	0	N/A	329.52
5	S5-PSC3	20	0	N/A	1549.32	16.466	S5-PSC3	20	0	N/A	329.32
6	S6-PSC3	20	0	N/A	1549.12	16.456	S6-PSC3	20	0	N/A	329.12
7	PSC1-S1	20	0	N/A	1549.92	16.496	PSC1-S1	20	329.92	659.84	659.84
					1549.72	16.486			289.92	619.64	619.64
					1549.52	16.476			290.12	619.64	619.64
					1549.32	16.466			1113.62	1442.94	1442.94
					1549.12	16.456			1113.32	1442.44	1442.44
8	PSC1-S2	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC1-S2	20	330.12	660.24	660.24
					1549.72	16.486			289.92	619.64	619.64
					1549.52	16.476			290.12	619.64	619.64
					1549.32	16.466			1113.62	1442.94	1442.94
					1549.12	16.456			1113.32	1442.44	1442.44
9	PSC2-S3	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC2-S3	20	289.52	619.64	619.64
					1549.92	16.496			289.72	619.64	619.64
					1549.52	16.476			329.52	659.04	659.04
					1549.32	16.466			1113.62	1442.94	1442.94
					1549.12	16.456			1113.32	1442.44	1442.44
10	PSC2-S4	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC2-S4	20	289.52	619.64	619.64
					1549.92	16.496			289.72	619.64	619.64
					1549.72	16.486			329.72	659.44	659.44
					1549.32	16.466			1113.62	1442.94	1442.94
					1549.12	16.456			1113.32	1442.44	1442.44
11	PSC3-S5	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S5	20	1114.82	1444.94	1444.94
					1549.92	16.496			1114.52	1444.44	1444.44
					1549.72	16.486			1114.22	1443.94	1443.94
					1549.52	16.476			1113.92	1443.44	1443.44
					1549.12	16.456			329.12	658.24	658.24
12	PSC3-S6	20	0	N/A	1550.12	16.506	PSC3-S6	20	1114.82	1444.94	1444.94
					1549.92	16.496			1114.52	1444.44	1444.44
					1549.72	16.486			1114.22	1443.94	1443.94

					1549.52	16.476			1113.92	1443.44	1443.44
					1549.32	16.466			329.32	658.64	658.64
13	PSC4 - PSC1	100	0	N/A	1549.72	16.486	PSC4-PSC1	100	-1358.68	289.92	289.92
					1549.52	16.476			-1357.48	290.12	290.12
					1549.32	16.466			-532.98	1113.62	1113.62
					1549.12	16.456			-532.28	1113.32	1113.32
14	PSC1 - PSC4	100	2	1	1550.12	16.506	PSC1-DCU1	76	330.12	-86.324	
					1549.92	16.496			329.92	-86.084	
				2	1550.12	16.506	DCU1-DCU2 (PSC4)	24	-86.324	-1361.08	-1361.08
					1549.92	16.496			-86.084	-1359.88	-1359.88
15	PSC4 - PSC2	100	0	N/A	1550.12	16.506	PSC4-PSC2	100	-1361.08	289.52	289.52
					1549.92	16.496			-1359.88	289.72	289.72
					1549.32	16.466			-532.98	1113.62	1113.62
					1549.12	16.456			-532.28	1113.32	1113.32
16	PSC4 - PSC2	100	2	3	1549.72	16.486	PSC4-DCU3	77	329.72	-69.358	
					1549.52	16.476			329.52	-69.128	
				4	1549.72	16.486	DCU3-DCU4 (PSC2)	23	-69.358	-1358.68	-1358.68
					1549.52	16.476			-69.128	-1357.48	-1357.48
17	PSC4 - PSC3	150	0	N/A	1550.12	16.506	PSC4-PSC3	150	-1361.08	1114.82	1114.82
					1549.92	16.496			-1359.88	1114.52	1114.52
					1549.72	16.486			-1358.68	1114.22	1114.22
					1549.52	16.476			-1357.48	1113.92	1113.92
18	PSC3 - PSC4	150	2	5	1549.32	16.466	PSC3-DCU5	77	329.32	-68.898	
					1549.12	16.456			329.12	-68.668	
				6	1549.32	16.466	DCU5-DCU6 (PSC4)	73	-68.898	-532.98	-532.98
					1549.12	16.456			-68.668	-532.28	-532.28

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

P. Jarupoom, N. Kulsuwan, and P. Kaewplung, “*Optimal placement of dispersion compensation unit in long-haul broadcast and selective DWDM passive optical network,*” in the proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2006), Kaohsiung, Taiwan, Jul 3-7, 2006, 1P-5.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรีดา จารุภูมิ เกิดวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย