

การวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุด  
ในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวน



นายอิสมาอีล โมฮารรา

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

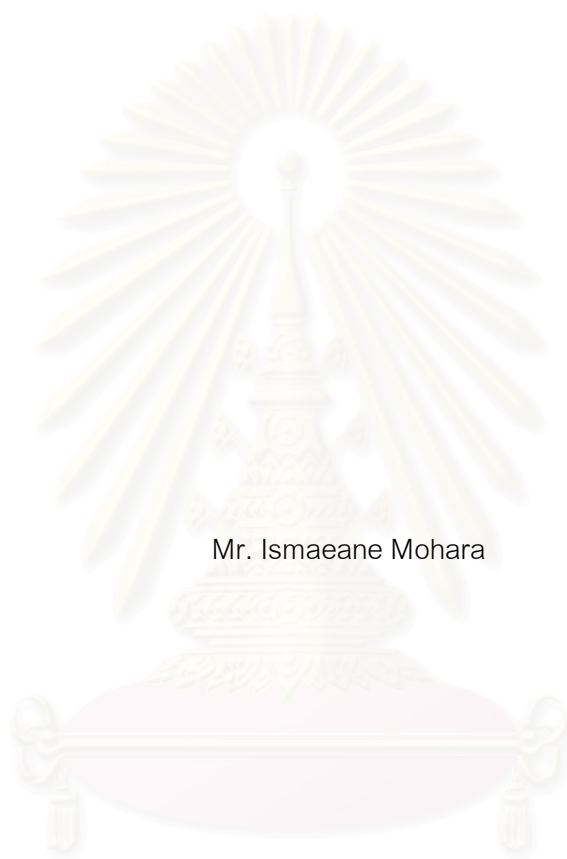
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMUM PLACEMENT OF DISPERSION COMPENSATION UNIT  
IN DWDM RING NETWORKS



Mr. Ismaeane Mohara

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

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University



อิสมาอีล โมฮารา : การวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็ม ลักษณะวงแหวน (OPTIMUM PLACEMENT OF DISPERSION COMPENSATION UNIT IN DWDM RING NETWORKS) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 138 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและในกรณีที่เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันชนิด non-slope-compensated DCU (NSC-DCU) และ slope-compensated DCU (SC-DCU) โดยมีหลักการคือ สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณของทุกทราฟฟิกโดยไม่คิดผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณและการกำหนดอสมการเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชันไม่ให้มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินกว่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่สามารถยอมรับได้

จากการทดลองวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิด โดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอลงบนโครงข่ายตัวอย่างที่มีทั้งหมด 4 สถานีซึ่งมีความยาวของสายเชื่อมโยงรวม 775 กิโลเมตร เพื่อเปรียบเทียบจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิด ผลเฉลยที่ได้รับจากอัลกอริทึมคือ จำเป็นต้องใช้หน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิด 14 ตัวบนโครงข่ายที่ทำงานปกติ และจำเป็นต้องใช้หน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน NSC-DCU ชนิด 16 ตัว SC-DCU 15 ตัวบนเส้นใยแสงทำงานและจำเป็นต้องใช้หน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิด 16 ตัวบนเส้นใยแสงสำรองกรณีมีสายเชื่อมโยงเสียหายภายในโครงข่าย

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4970711021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTICAL FIBER TRANSMISSION / RING NETWORK / DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING / DISPERSION / DISPERSION SLOPE / DISPERSION COMPENSATING UNIT / SINGLE LINK FAILURE / PROTECTION SCHEME.

ISMAEANE MOHARA: OPTIMUM PLACEMENT OF DISPERSION COMPENSATION UNIT IN DWDM RING NETWORKS. THESIS ADVISOR: PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 138 pp.

This thesis first time introduces an optimal algorithm for placing the dispersion compensation unit (DCU) in DWDM ring network in order to compensate for the accumulated fiber dispersion in the network. Our proposed algorithm can be applied for both non-slope-compensated and slope-compensated DCUs, in both normally operated network and network where a link failure is protected by the wavelength algorithm and the span protection algorithm. Our method is implemented by analyzing all possible light paths between any two nodes in the network, then, generate and solve the constraints. Finally the DCUs are placed in the network at the most suitable position where at least one wavelength exhibits the accumulated dispersion that reaches the acceptable accumulated dispersion.

By demonstrating our proposes method using both types of DCUs on a sample network which consist of 4 nodes with total length of 775 km. We obtained equivalent number of 14 DCUs for both SC-DCU and NS-DCU in normally operated network. Beside, we found that 16 NSC-DCUs and 15 SC-DCUs are necessary for installing in the working fiber, while the equivalent number of 16 DCUs for both SC-DCU and NS-DCU are required for the protection fiber.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering  
Field of study Electrical Engineering  
Academic year 2007

Student's signature.....  
Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง ซึ่งมีส่วนช่วยในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานอันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อมผ่านทางคำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงหลักการคิดเชิงวิเคราะห์และเชิงวิพากษ์ ตลอดจนคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์เปรียบเสมือนรากฐานและแรงผลักดันที่สำคัญให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา (Cooperation Project between department of electrical engineering and private sector research and development) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี (2549-2550)

สิ่งดีๆ ที่ได้รับจากบุคคลทุกท่านล้วนเป็นส่วนสำคัญในการรังสรรค์ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จ ดังนั้นจึงไม่มีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฏ
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 .....	14
2.3 เทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน .....	16
2.4 ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางแสง .....	17
2.4.1 wavelength division multiplexing .....	17
2.4.2 dense wavelength division multiplexing .....	18
2.4.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานการทำงานของระบบ DWDM.....	18
2.5 โครงข่ายลักษณะ Synchronous Digital Hierarchy.....	26
2.5.1 มาตรฐาน SONET / SDH.....	27
2.5.2 การป้องกันความเสียหายในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวน.....	29
2.5.2.1 การป้องกันความเสียหายในโครงข่ายแบบทางเดียว .....	30

2.5.2.2 การป้องกันความเสียหายในโครงข่ายแบบสองทาง.....	32
2.5.3 การป้องกันความเสียหายที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์.....	36
2.5.3.1 การป้องกันความเสียหายบนเส้นใยแสงทำงาน.....	36
2.5.3.1.1 ความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอสำหรับส่งสัญญาณ.....	37
2.5.3.1.1.1 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนวงเดียว.....	37
2.5.3.1.1.2 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนสองวง.....	39
2.5.3.2 การป้องกันความเสียหายโดยใช้เส้นใยแสงสำรอง.....	41
3. ระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน.....	43
3.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปโหนดปลายทาง.....	43
3.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	47
3.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด.....	47
3.2.2 เงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน.....	49
3.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม.....	49
3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	49
3.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	49
3.4 การคำนวณตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน.....	51
3.4.1 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงาน.....	52
3.4.2 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง.....	53
4. ระเบียบขั้นตอนวิธีและผลเฉลยการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีโครงข่ายทำงานปกติ.....	54
4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย.....	54
4.2 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง.....	54
4.2.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองโครงข่าย.....	54
4.2.2 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1.....	58
4.2.2.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปโหนดปลายทาง.....	58
4.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	59
4.2.2.2.1 เงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด.....	59
4.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน.....	62
4.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม.....	64
4.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	64



4.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	64
4.2.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน.....	66
4.2.2.4.1 การวางตำแหน่ง NSC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง.....	66
4.2.2.4.2 การวางตำแหน่ง SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง.....	78
4.2.3 โครงข่ายส่วนหนึ่งของโครงข่าย Optical Pan-European Network (OPEN) .....	82
5. ระเบียบขั้นตอนวิธีและผลเฉลยการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีที่เกิดความเสียหายกับ ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย.....	89
5.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย.....	89
5.2 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง.....	90
5.2.1 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยกลไกการกู่ คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน.....	90
5.2.1.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปโหนดปลายทาง.....	91
5.2.1.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	91
5.2.1.2.1 เงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด.....	91
5.2.1.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน.....	95
5.2.1.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม.....	97
5.2.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	97
5.2.1.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	97
5.2.2 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยกลไกการกู่ คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง.....	98
5.2.2.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปโหนดปลายทาง.....	99
5.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	99
5.2.2.2.1 เงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด.....	99
5.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน.....	103
5.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม.....	105
5.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	105
5.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	105
5.2.3 การวางตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน.....	106
5.2.3.1 การวางตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงาน.....	106

5.2.3.2 การวางตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรวจ.....	109
5.3 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN.....	115
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	123
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	123
6.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน .....	124
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	127
รายการอ้างอิง.....	128
ภาคผนวก.....	131
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	139



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชัน .....	12
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานแบบ SONET และ SDH.....	29
ตารางที่ 3.1 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติ.....	44
ตารางที่ 3.2 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณสำหรับกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงเมื่อเกิด ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 23 และ 32.....	45
ตารางที่ 3.3 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณสำหรับกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงเมื่อเกิด ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43.....	45
ตารางที่ 3.4 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณสำหรับกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงเมื่อเกิด ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 14 และ 41.....	45
ตารางที่ 3.5 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณสำหรับกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงเมื่อเกิด ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ 21.....	46
ตารางที่ 3.6 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protectionเมื่อ เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 23 และ 32.....	46
ตารางที่ 3.7 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protectionเมื่อ เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43.....	46
ตารางที่ 3.8 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protectionเมื่อ เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 41 และ 14.....	46
ตารางที่ 3.9 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protectionเมื่อ เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ 21.....	47
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดที่สำคัญสำหรับมอดูลความยาว .....	57
ตารางที่ 4.2 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NSC-DCU และ SC-DCU ที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ .....	61
ตารางที่ 4.3 สมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ 3 ความยาวคลื่น กรณีโครงข่ายทำงานปกติ .....	61
ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นกรณีโครงข่าย ตัวอย่างที่ 1 ทำงานปกติ .....	63
ตารางที่ 4.5 ผลเฉลยจากการทำ MILP optimization กรณีโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ทำงานปกติ...	65
ตารางที่ 4.6 รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยง กรณีโครงข่ายที่ 1 ทำงานปกติ .....	67

ตารางที่ 4.7	สมการชดเชยดีสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงด้วย NSC-DCU.....	68
ตารางที่ 4.8	สมการชดเชยดีสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงด้วย SC-DCU.....	78
ตารางที่ 4.9	ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานภายในโครงข่ายส่วน หนึ่งของ OPEN กรณีโครงข่ายทำงานปกติ.....	83
ตารางที่ 5.1	ค่าดีสเพอร์ชันของ SMF, NSC-DCU และ SC-DCU ที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยการกู้คืนสัญญาณโดยดลเปลี่ยนความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงทำงาน .....	94
ตารางที่ 5.2	เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 7 ความยาวคลื่นด้วย การกู้คืนสัญญาณโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงทำงาน ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1.....	95
ตารางที่ 5.3	ผลเฉลยจำนวน NSC-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยการกู้คืนสัญญาณโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น .....	98
ตารางที่ 5.4	ค่าดีสเพอร์ชันของ SMF, NSC-DCU และ SC-DCU ที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วย การกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงสำรอง span protection.....	102
ตารางที่ 5.5	เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 4 ความยาวคลื่นด้วยการกู้ คืนสัญญาณวิธี span protection ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	103
ตารางที่ 5.6	ผลเฉลยจำนวน NSC-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงสำรองโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection .....	106
ตารางที่ 5.7	รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณและค่าดีสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นบนเส้นใยแสงทำงานใน แต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย ตัวอย่างที่ 1.....	107
ตารางที่ 5.8	รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณและค่าดีสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นบนเส้นใยแสงสำรองใน แต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย ตัวอย่างที่ 1.....	110
ตารางที่ 5.9	ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานภายในโครงข่ายส่วน หนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย .....	117
ตารางที่ 5.10	ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรองภายในโครงข่ายส่วน หนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย .....	118
ตารางที่ 6.1	ค่าความยาวคลื่น ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณและจำนวนช่องสัญญาณของการ ส่งสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ.....	125

ตารางที่ 6.2 ผลเฉลี่ยจากการปรับค่าโครงข่ายด้วยตัวคูณแบบเชิงเส้น ..... 126



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 อัตราการสูญเสียพลังงานในแต่ละตัวกลางที่ความถี่ต่าง ๆ .....	2
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง .....	7
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณในเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น .....	9
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายความเร็วกลุ่มในแต่ละความยาวคลื่น .....	11
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่น .....	12
รูปที่ 2.5 พัลส์สัญญาณที่ซ้อนทับกัน .....	13
รูปที่ 2.6 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน .....	16
รูปที่ 2.7 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น .....	17
รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารแบบ DWDM .....	20
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของคัปเปลอร์แบบระนาบ .....	22
รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของออปติคัลฟิลเตอร์ .....	23
รูปที่ 2.11 การทำงานของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDFA .....	25
รูปที่ 2.12 โครงสร้างพื้นฐานของ OADM .....	25
รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของ OXC ที่ใช้ optical planar waveguide .....	26
รูปที่ 2.14 basic SONET building block .....	27
รูปที่ 2.15 basic SDH building block .....	28
รูปที่ 2.16 add-drop multiplexer ในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวน .....	30
รูปที่ 2.17 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวกรณีทำงานปกติ .....	31
รูปที่ 2.18 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง หนึ่งในโครงข่ายทั้งในเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง .....	32
รูปที่ 2.19 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางกรณีทำงานปกติ .....	33
รูปที่ 2.20 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง หนึ่งในโครงข่ายบนเส้นใยแสงทำงาน .....	34
รูปที่ 2.21 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง หนึ่งในโครงข่ายทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง .....	35
รูปที่ 2.22 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนวงเดียว .....	37
รูปที่ 2.23 การจัดสรรความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในโครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนวงเดียว .....	38

รูปที่ 2.24	โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกัน.....	39
รูปที่ 2.25	การจัดสรรความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในโครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกัน.....	40
รูปที่ 2.26	กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection ที่ใช้ในการจำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์.....	42
รูปที่ 3.1	โครงข่ายตัวอย่างใช้ในการอธิบายการส่งผ่านสัญญาณในกรณีโครงข่ายทำงานปกติและในกรณีเกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย.....	44
รูปที่ 3.2	การส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง .....	48
รูปที่ 3.3	ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันจำนวน $n$ ตัวบนสายเชื่อมโยง XY .....	51
รูปที่ 4.1	การกระจายความเร็วกลุ่มของ SMF ITU-T G.652 .....	55
รูปที่ 4.2	การกระจายความเร็วกลุ่มของ NSC-DCU.....	55
รูปที่ 4.3	Avanex's 100 % SC-DCU .....	56
รูปที่ 4.4	โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	58
รูปที่ 4.5	ตำแหน่ง NSC-DCU ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ .....	77
รูปที่ 4.6	ค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการวางตำแหน่งของ NSC-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ .....	77
รูปที่ 4.7	ตำแหน่ง SC-DCU ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ.....	80
รูปที่ 4.8	ค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการวางตำแหน่งของ SC-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ.....	80
รูปที่ 4.9	โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN .....	82
รูปที่ 4.10	ตำแหน่งของ NSC-DCU ภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ.....	85
รูปที่ 4.11	ตำแหน่งของ SC-DCU ภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ .....	86
รูปที่ 4.12	ค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการวางตำแหน่งของ NSC-DCU บนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีโครงข่ายทำงานปกติ .....	87

รูปที่ 4.13 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของการเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการวางตำแหน่งของ SC-DCU บนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีโครงข่ายทำงานปกติ .....	87
รูปที่ 5.1 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	90
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของ NSC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	112
รูปที่ 5.3 ตำแหน่งของ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	112
รูปที่ 5.4 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของสัญญาณจากการวางตำแหน่งของ NSC-DCU กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	114
รูปที่ 5.5 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของสัญญาณจากการวางตำแหน่งของ SC-DCU กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 .....	114
รูปที่ 5.6 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN .....	115
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของ NSC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย .....	119
รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย .....	120
รูปที่ 5.9 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของสัญญาณจากการวางตำแหน่งของ NSC-DCU กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ....	122
รูปที่ 5.10 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของสัญญาณจากการวางตำแหน่งของ SC-DCU กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ....	122



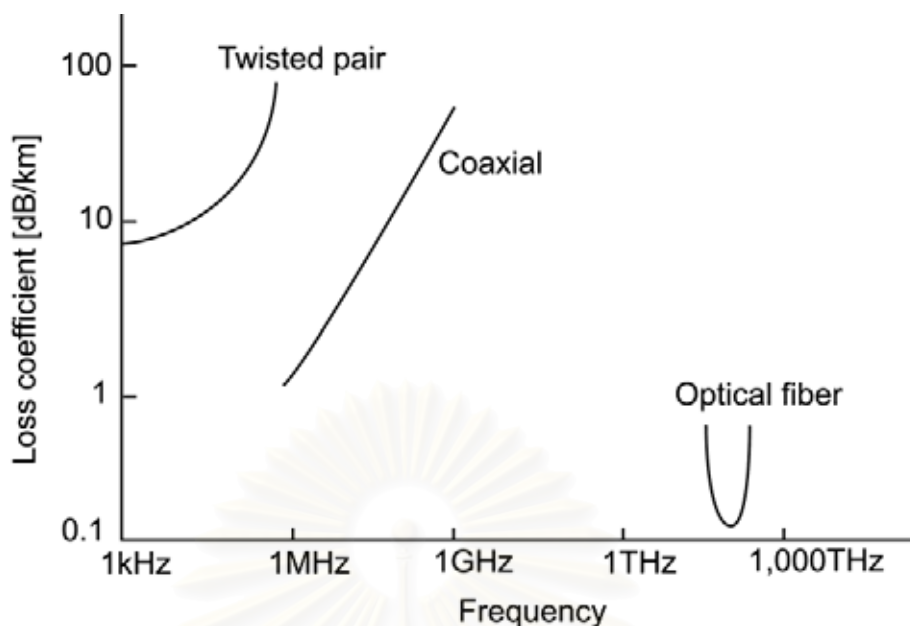
# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลมีความสำคัญอย่างมากในเชิงธุรกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ดังนั้นการพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารจึงได้รับความสนใจทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจากนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญมากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวที่มีส่วนช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาการติดต่อสื่อสารจะอยู่ในรูปของการส่งสัญญาณไฟฟ้าในระดับเมกะเฮิรตซ์ผ่านเส้นทองแดงชนิดสายคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือในระดับกิกะเฮิรตซ์ผ่านสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) แต่เนื่องด้วยปริมาณการใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth) ในระบบสื่อสารข้อมูล (transmission system) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากจึงมีการพัฒนาการสื่อสารทางแสง (optical communication) เพื่อรองรับคลื่นพาห้ในหลายระดับ การสื่อสารข้อมูลผ่านตัวกลางที่เป็นเส้นใยแสง (optical fiber) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นเช่น มีอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางการส่งข้อมูลต่ำ (dB/km) และสามารถส่งสัญญาณด้วยความถี่ที่สูงกว่าตัวกลางชนิดอื่นดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.1 ทำให้ใช้จำนวนอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) และจำนวนอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) ที่น้อยกว่า อีกทั้งเส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาต่อการติดตั้ง นอกจากนี้เส้นใยแสงผลิตมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้สัญญาณมีความถูกต้องสูงข่าวสารที่ส่งไปกับแสงจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ดังนั้นการแอบลักลอบใช้สัญญาณทางแสงจึงไม่สามารถกระทำได้ นอกจากนี้ที่ได้กล่าวมาเส้นใยแสงยังมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้นที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นจึงสามารถนำเส้นใยแสงไปใช้ได้ นำด้วยอายุการใช้งานที่ยาวนานอีกทั้งความต้องการในการบำรุงรักษายังน้อยมาก [1]



รูปที่ 1.1 อัตราการสูญเสียพลังงานในแต่ละตัวกลางที่มีความถี่ค่าต่าง ๆ [1]

จากข้อดีดังกล่าวโครงข่ายทางแสง (optical network) ที่มีเส้นใยแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นโครงข่ายแกนหลัก (core network) โครงข่ายขนส่งระยะไกล (long haul network) โครงข่ายบริเวณกว้าง (wide-area-network : WAN) และโครงข่ายระดับเมือง (metropolitan-area-network : MAN) [4] แต่เนื่องจากความต้องการข้อมูลอย่างไม่มีขีดจำกัดของผู้ใช้ทำให้โครงข่ายทางแสงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบเครื่องขยายสัญญาณแสงแบบอีดีเอฟเอ (EDFA) เพื่อลดอัตราการสูญเสียในเส้นใยแสงในปี ค.ศ. 1998 การจัดการผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน (dispersion) ด้วยวิธีการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน (dispersion management) การส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM) และการใช้วิธีสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugation : OPC) เพื่อลดผลกระทบของดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity effect) เป็นต้น การพัฒนาดังกล่าวทำให้เกิดประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณและสามารถใช้ทรัพยากรแบนด์วิดท์อย่างคุ้มค่ายิ่งขึ้น นอกจากนี้ผลจากความแพร่หลายของมาตรฐาน SONET / SDH (synchronous optical network and synchronous digital hierarchy) [3], [28] ในระบบการสื่อสารเพื่อส่งผ่านข้อมูลประเภทต่าง ๆ เช่น เสียง (voice), วิดีโอ (video) และข้อมูล (data) ผ่านไปในโครงข่ายหรือส่งผ่านระหว่างโครงข่ายด้วยลักษณะของข้อมูลแบบต่าง ๆ เช่น T1/E1, T2/E2, T3/E3, T4/E4 เป็นต้น ทำให้สามารถรองรับข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ประกอบกับการเข้ามามีบทบาทของ

เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น dense wavelength division multiplexing (DWDM) [5] ในโครงข่ายทางแสงซึ่งมีหลักการ คือ มัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณแสงจำนวนหนึ่งรวมกันโดยอาศัยคลื่นพาที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันส่งไปในเส้นใยแสงเดียวกันด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (channel spacing : CS) ที่มีขนาดที่ใกล้กันยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ความจุที่สูงและใช้ทรัพยากรแบนด์วิดท์ได้สูงสุดตามต้องการ ดังนั้นการอัปเกรด (upgrade) อุปกรณ์ภายในโครงข่ายให้รองรับการเปลี่ยนแปลงจากเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์แบบเดิมคือ time division multiplexing (TDM) ไปสู่ เทคโนโลยี DWDM จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยการอัปเกรดอุปกรณ์ดังกล่าวในโครงข่ายวงแหวนสามารถทำได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบโครงข่ายลักษณะอื่น นอกจากนี้ในการสื่อสารข้อมูลหากมีความเสียหาย (failure) เกิดขึ้นในโครงข่ายจะทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลเป็นจำนวนมากดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการสร้างความน่าเชื่อถือ (reliability) ให้กับการทำงานของโครงข่าย ในโครงข่ายวงแหวนมีลักษณะการป้องกันข้อมูลจากความเสียหาย (protection scheme) ที่เป็นเอกลักษณ์และมีประสิทธิภาพสูง จะเห็นได้จากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันความเสียหายในโครงข่ายลักษณะวงแหวน [6],[ 9], [27] พบว่ามาตรการหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันความเสียหายของโครงข่ายคือ การเผื่อความจุสำรอง (spare capacity) ในเส้นใยแสงสำรอง (protection fiber) เพื่อรองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย โดยความเสียหายประเภทที่พบได้มากที่สุดได้แก่ ความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย (single-link failure) [27] ซึ่งสามารถป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพด้วยการควบคุมและจัดการโครงข่ายแบบอัตโนมัติผ่านสวิตช์ที่มีการทำงานไม่ซับซ้อน [26] ของโครงข่ายลักษณะวงแหวน

นอกจากนี้ม้งานวิจัยที่มุ่งให้ความสนใจในการออกแบบโครงข่ายลักษณะวงแหวนด้วยการมัลติเพล็กซ์แบบเชิงความยาวคลื่น รวมทั้งการออกแบบโครงข่ายด้วยเทคโนโลยี DWDM ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายเป็นแบบอ้อมมันต์ (passive component) เช่น อุปกรณ์เพิ่มลดช่องสัญญาณทางแสง optical add-drop multiplexer (OADM) และ transparent optical cross connect (OXC) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานในโดเมนทางแสง (optical domain) มีการจัดการสัญญาณภายในโครงข่ายด้วยแสงนำไปสู่แนวคิดของ network transparency [6]-[8], [12] คือไม่มีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์และพลังงานแสง (E/O/E) ทำให้มีการส่งข้อมูลด้วยความถี่ที่สูงขึ้นโดยไม่ได้รับผลของปัญหาคอขวด (bottleneck) ที่ขีดจำกัดทางอิเล็กทรอนิกส์ความถี่ 40 GHz นำไปสู่การขยายขนาดโครงข่ายเพื่อเพิ่มความจุและการใช้งานแบนด์วิดท์สูงสุดจากโครงข่ายเข้าถึง (access network) ไปยังโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นปัญหาทางด้านกำลังสัญญาณก็จะมีผลมากขึ้นด้วยเช่นกัน [20] ประกอบกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณมีราคาสูง ทำให้มีความพยายามในการสร้าง

ระเบียบขั้นตอนวิธีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงด้วยจำนวนอุปกรณ์น้อยสุด [15], [21]-[22] โดยได้ทำการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงด้วยวิธี link-by-link [13] และ global method [10]-[11] นอกจากนี้ปัญหาทางด้านกำลังสัญญาณแล้วนั้น การส่งสัญญาณระยะทางไกลโดยใช้สัญญาณหลายช่องสัญญาณมัลติเพล็กซ์รวมในเส้นใยแสงเดียวกัน เมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงระยะทางหนึ่งจะเกิดผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน คือ การขยายออกของพัลส์สัญญาณ (pulse broadening) เกิดส่วนของพัลส์สัญญาณที่ทับซ้อนกัน (inter symbol interference: ISI) ยังผลให้ความหมายของการสื่อสารข้อมูลเกิดความผิดพลาดไป โดยเฉพาะในการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลที่สูง [4], [27] จึงจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [16]-[18] งานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นในการศึกษาและแก้ไขผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [14] และงานวิจัยที่นำเสนอการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (broadcast and selective network) [6], [9] ที่สามารถลดดิสเพอร์ชันในแต่ละช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยในการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีสำหรับวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนจึงนำไปสู่แนวทางและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

## 1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนออัลกอริทึม (algorithm) สำหรับการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion compensating unit: DCU) อย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนด้วยจำนวนอุปกรณ์น้อยสุดเพื่อลดต้นทุนโครงข่ายในส่วนชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน โดยไม่คิดผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ และกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย ด้วยการตั้งสมมติฐานว่าจำนวนช่องสัญญาณ ความยาวของสายเชื่อมโยงในโครงข่าย และระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่จำเป็นต้องใช้ในโครงข่าย อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ได้ทั้งในหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันชนิด non-slope-compensated DCU (NSC-DCU) และ slope-compensated DCU (SC-DCU) [30] โดยจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อมีอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นมีค่าดิสเพอร์ชันสะสม (accumulated dispersion) สูงถึงค่าดิสเพอร์ชันที่สามารถยอมรับได้ (acceptable accumulated dispersion) [30] ผลที่จะได้รับจากระเบียบขั้นตอนวิธีคือ ตำแหน่งและจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันในแต่ละสายเชื่อมโยงและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณที่ทุกโหนดปลายทาง สอดทำนำอัลกอริทึมที่

สร้างขึ้นไปใช้ในการจำลองโครงข่ายที่มีใช้งานอยู่จริง (real-exist network) เพื่อเปรียบเทียบจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน โครงข่ายที่สนใจได้แก่ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan-European Network (OPEN) [31]

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

นำเสนออัลกอริทึมและระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวน ทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายโดยไม่คิดผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณ

### 1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณในตัวกลางเส้นใยแสงโดยเฉพาะผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน
2. ศึกษาคุณสมบัติโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวน
3. ศึกษาโครงข่ายทางแสงที่ส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีดีดับเบิลยูดีเอ็ม การวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงในโครงข่ายวงแหวน การจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันในโครงข่าย broadcast and select ในบทความวิชาการเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานในวิทยานิพนธ์
4. สร้างอัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงภายในโครงข่าย
5. ทดสอบและปรับปรุงอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นกับโครงข่ายตัวอย่าง
6. ทดลองอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นกับโครงข่ายตัวอย่างที่มีใช้งานอยู่จริงโดยโครงข่ายที่สนใจได้แก่โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN
7. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
8. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. อัลกอริทึมและระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนสามารถประยุกต์ใช้ได้กับกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย
2. ทำการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันภายในเงื่อนไขที่ไม่มีผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
3. หน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ NSC-DCU และ SC-DCU โดยมีระยะการชดเชยเมื่อเทียบกับเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652 คือหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันสามารถชดเชยได้พอดีที่ระยะทาง 100 กิโลเมตร (dispersion level) [30]
4. เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะมีการจัดสรรเส้นทางการส่งสัญญาณขึ้นใหม่ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณสองลักษณะ ได้แก่ การกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานแบบ path protection และการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงสำรองแบบ span protection [23], [26], [29]

### 1.6 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ

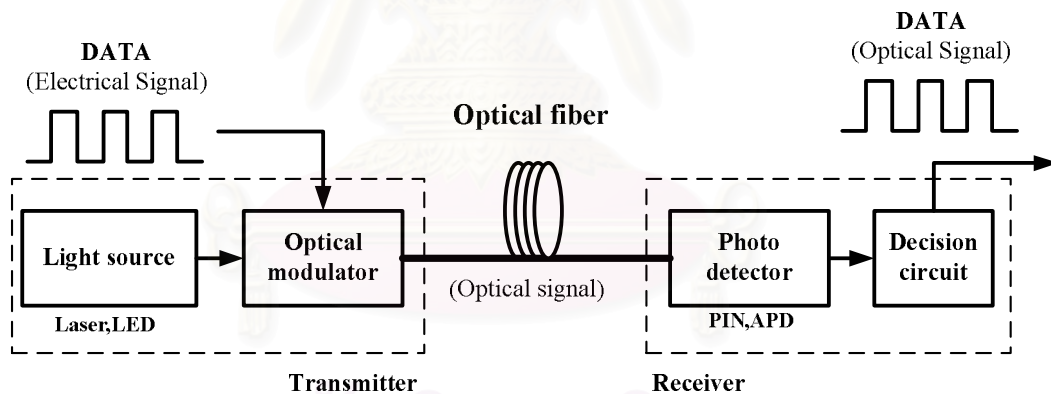
1. ความรู้เกี่ยวกับพื้นฐานการทำงานและกลไกการกู้คืนสัญญาณของโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวน
2. อัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันภายในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย
3. การระบุชนิดของหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดในโครงข่ายที่มีใช้งานอยู่จริงเพื่อลดต้นทุนของโครงข่ายและสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาคูปรกรณ์ประเภทอื่น ๆ ในระบบสื่อสารทางแสงได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐานการส่งสัญญาณทางแสง

ทฤษฎีพื้นฐานการส่งสัญญาณทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงและอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบ ส่วนที่สองเป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ปรัชญาการที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ เช่น การลดทอนกำลังสัญญาณ ปรัชญาการบิดเบี้ยวและความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ส่วนที่สามเป็นเทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรัชญาการบิดเบี้ยว ส่วนที่สี่เป็นการอธิบายการทำงานระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงเชิงความยาวคลื่น และอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบ ส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงรายละเอียดการทำงานของโครงข่ายวงแหวนตามมาตรฐาน SDH และการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายของโครงข่ายลักษณะวงแหวน

#### 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง [4]

อุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (optical transmitter) เส้นใยแสง (optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (optical receiver) โดยการมอดูเลตสัญญาณแสงมีอยู่สองประเภท คือ การมอดูเลตภายนอก (external modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) และ อุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (modulator) แยกออกจากกัน ส่วนอีกประเภทจะเป็นการมอดูเลตโดยตรง (direct modulation) [4] ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์เพียงชุดเดียว 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 เส้นใยแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสงที่ใช้งานอยู่จะเป็นเส้นใยแสงโหมดเดียว (single mode fiber: SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (attenuation coefficient) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (multi-mode fiber: MMF) ที่มีราคาถูกกว่า ส่วนเส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion-shifted fiber: DSF) จะมีคุณสมบัติพิเศษคือ ความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion) จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่น 1550 nm ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด และเส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1550 nm ค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ (non-zero dispersion-shifted fiber: NZDSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

## 2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

สัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สมการที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงจะเป็นไปตามสมการของ Maxwell โดยเริ่มต้นจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุด จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า nonlinear schrödinger equation (NLSE) [3]

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

โดยที่  $A$  เป็น Envelope ของสัญญาณ  $\alpha$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน  $\beta_2$  เป็นค่า group-velocity dispersion (GVD)  $\gamma$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient)  $z$  เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง และ  $T$  เป็นกรอบเวลาที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม ( $v_g$ ) แสดงในสมการที่ (2.2)

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

ในพจน์ทางขวามือของสมการที่ (2.1) แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อสัญญาณ  $A$  ซึ่งประกอบด้วย การลดทอนสัญญาณ ( $\alpha$ ) เมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงาน



ของสัญญาณแสงลดต่ำลงและเราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สองทางขวามือของสมการที่ (2.1) คือ GVD ( $\beta_2$ ) เป็นผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก สำหรับพจน์สุดท้ายทางขวามือของสมการที่ (2.1) คือ ผลกระทบของเคอร์ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงซึ่งจะทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออก ความรุนแรงของเคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง เพื่อที่จะดูผลกระทบแต่ละปัจจัยในสมการที่ (2.1) ต่อสัญญาณ เราสามารถแยกคิดผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัญญาณได้ในหัวข้อถัดไป ดังนี้

## 2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ

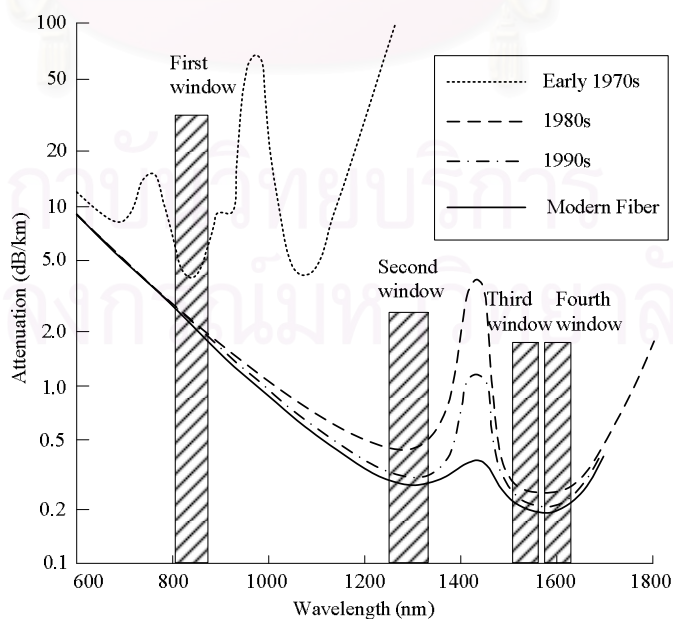
การสูญเสียกำลังสัญญาณเป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณ [2] ดังนี้

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

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

$P(0)$  คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$\alpha$  คือ ค่าคงตัวของการลดทอน [dB/km]

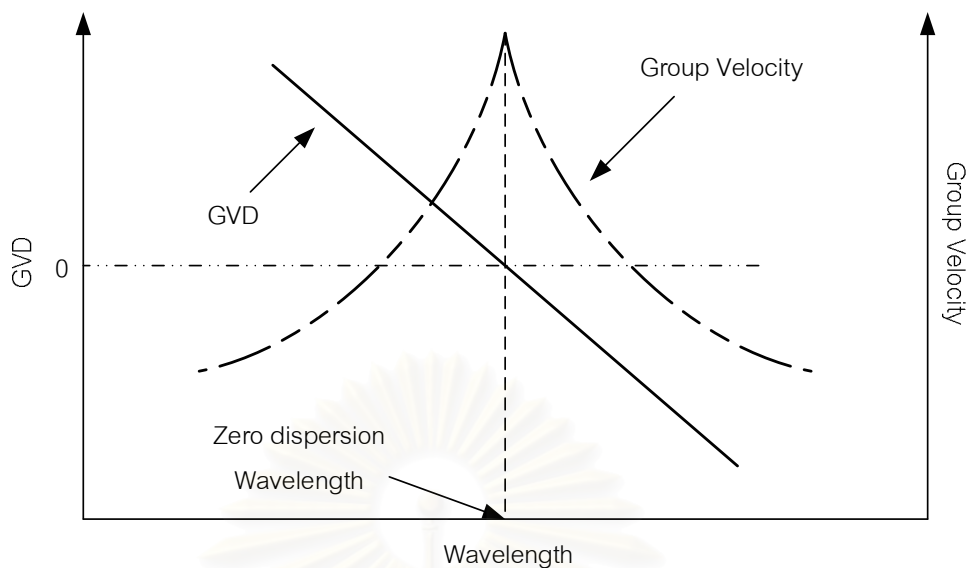


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณในเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [2]

สำหรับค่าคงตัวการลดทอน  $\alpha$  นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 4 เส้นโดยเส้นที่สองจากบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างสุดเส้นที่บ่งชี้แสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกาและจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (rayleigh scattering) ซึ่งทำให้อัตราการสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูปที่ 2.2 หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นประสลับจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ต่อมาในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการทำงานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm [4]

### 2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง

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



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายของความเร็วกลุ่ม  
ในแต่ละความยาวคลื่น [2]

โดยทั่วไปดิสเพอร์ชันที่เกิดในเส้นใยแสงมีสองประเภทได้แก่ inter-modal dispersion ในเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (multi-mode fiber: MMF) และดิสเพอร์ชันแบบภายในแผนคลื่นหรืออติสเพอร์ชันภายในสีสัญญาณ (chromatic dispersion) ในเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single-mode fiber: SMF) เนื่องด้วยการสื่อสารข้อมูลในโครงข่ายระยะทางไกลด้วยอัตราข้อมูลที่สูงกว่าเส้นใยแสงแบบ SMF มีช่วงแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลที่กว้างและมีอัตราการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าเส้นใยแสงแบบ MMF ดังนั้น chromatic dispersion ซึ่งเป็นการขยายตัวของพัลส์ที่เกิดขึ้นในโหมดเดียว (single mode) เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว ผลของดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันจึงส่งผลกับโครงข่ายทางแสง ความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าที่แตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ zero-dispersion wavelength (ZDWL) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_g = \left[ \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right]^{(-1)} = \beta_1^{(-1)} \quad (2.4)$$

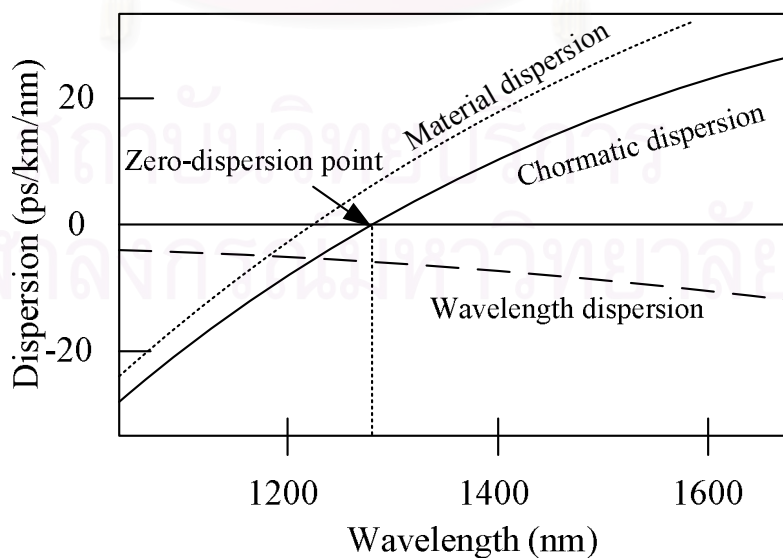
$$\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\partial \beta_1}{\partial \omega} = \frac{\partial \left( \frac{1}{v_g} \right)}{\partial \omega} \tag{2.5}$$

$$D = \left[ \frac{(-2\pi c \beta_2)}{\lambda^2} \right] \tag{2.6}$$

- โดยที่  $D$  คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]  
 $c$  คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ =  $2.9974 \times 10^8$  m/s  
 $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]  
 $\beta_2$  คือ ค่า GVD [ $\text{ps}^2/\text{km}$ ]

ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชัน

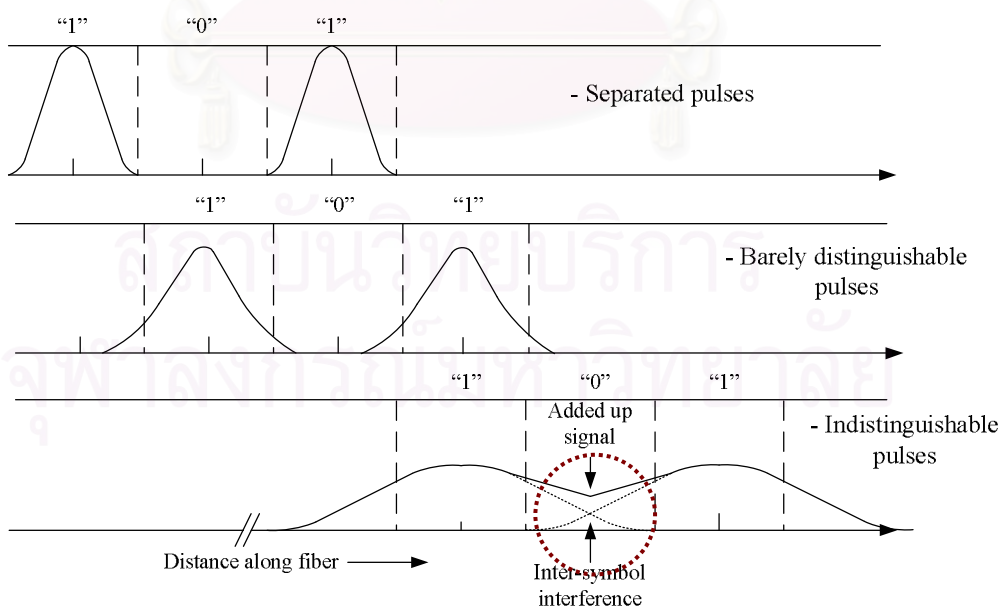
Normal Dispersion Region ส่วนประกอบความยาวคลื่นมาก สามารถเคลื่อนที่เร็วกว่าส่วน ประกอบที่มีความยาวคลื่นน้อย	Anomalous Dispersion Region ส่วนประกอบความยาวคลื่นน้อย สามารถเคลื่อนที่เร็วกว่าส่วน ประกอบที่มีความยาวคลื่นมาก
$D < 0$	$D > 0$
$\beta_2 > 0$	$\beta_2 < 0$



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่น [2]

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



รูปที่ 2.5. พัลส์สัญญาณที่ซ้อนทับกัน [2]

ส่วนการประวิงระหว่างโมดเป็นผลของแต่ละโมดการเดินทางของแสงในตัวกลางที่มีความแตกต่างกันของค่าความเร็วกลุ่มที่ความถี่เดียวกันซึ่งเกิดในเส้นใยแสงแบบหลายโมดซึ่งมีผลรุนแรงกว่าเส้นใยแสงแบบโมดเดียว

### 2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

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 (2.7)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T}, \quad (2.7)$$

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

$\phi_{NL}$  คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

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

$$\phi_{NL} = n_2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) L |E_0|^2 = n_2 k_0 L |E_0|^2, \quad (2.8)$$

โดยที่  $n_2$  คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$L$  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) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ของสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่

เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห้มีความถี่ที่ต่างออกไป เหนียวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม ปกติแล้วเมื่อ 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห้เป็น  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง นอกจากทั้ง 2 สัญญาณแสงจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของทั้ง 2 สัญญาณแสงในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์ นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลของมันจะมีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้ [3]

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2), \quad (2.9)$$

เมื่อ  $|E_0|^2$  คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห้  $\omega_1$   
 $|E_1|^2$  คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห้  $\omega_2$

- 3.) four wave mixing (FWM) เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไข การจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กัน และกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ มาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ ( $f_4$ ) จากสัญญาณความถี่  $f_1, f_2, f_3$  ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.10)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3, \quad (2.10)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3, \quad (2.11)$$

โดยที่  $k_n$  คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่  $n$

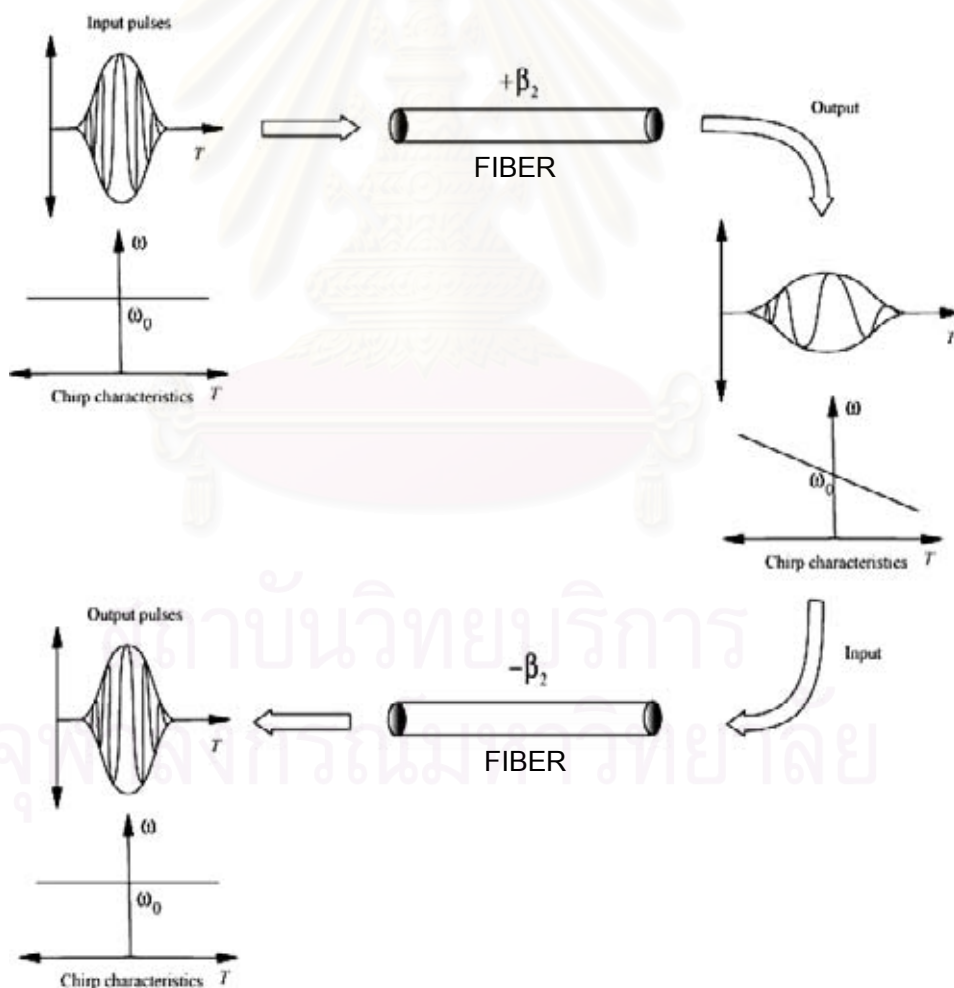
ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่า intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (ghost pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มีอคูเลตสัญญาณเชิงเลขแบบออน-ออฟ (ON-OFF keying: OOK) สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเลื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

### 2.3 เทคนิคการแก้ไขสัญญาณความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.12)

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \tag{2.12}$$

- 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]



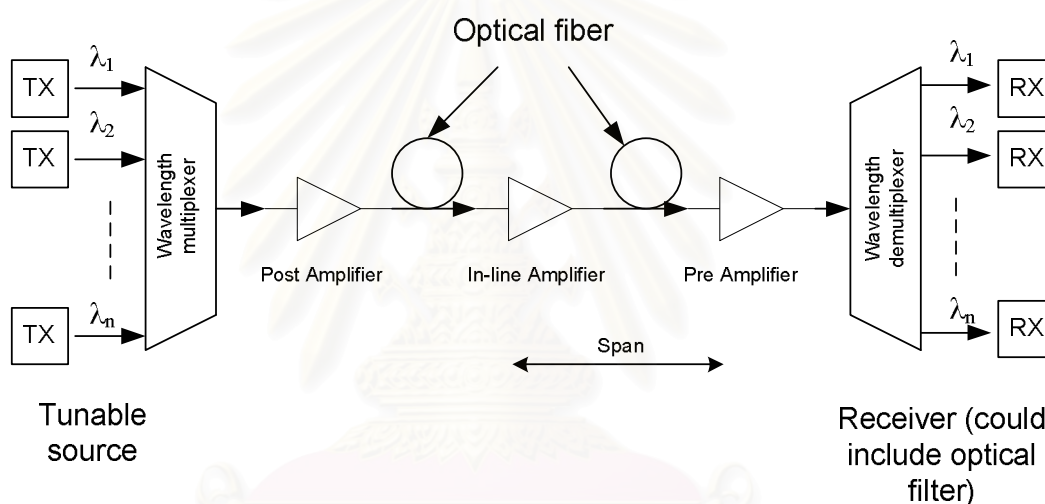
รูปที่ 2.6 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [4]



เทคนิคการขจัดความเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD ( $\beta_2$ ) ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า GVD ( $\beta_2$ ) ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ เราสามารถแปลงค่าดิสเพอร์ชันกับ GVD โดยใช้สมการที่ (2.6)

## 2.4 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณทางแสง

### 2.4.1 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing)



รูปที่ 2.7 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น [4]

เส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์มหาศาลให้เราเลือกใช้งานตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 800 nm ถึง 1,600 nm [4] ซึ่งมีจำนวนความยาวคลื่นมากมายเพียงพอกับการใช้งานทั้งการส่งข้อมูล ภาพ และเสียงด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูง ในเทคโนโลยี WDM ข้อมูลแต่ละชุดจะถูกครอบครองโดยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ในรูปที่ 2.7 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นมีสัญญาณจำนวน  $n$  ความยาวคลื่นถูกมัลติเพลกซ์และส่งไปตามเส้นใยแสงเส้นเดียว ช่วงแรกของเทคโนโลยีระบบ WDM จะเป็นการส่งความยาวคลื่นเพียง 2, 4, 8, 12, และ 16 ความยาวคลื่นโดยใช้ส่งสัญญาณในระยะทางสั้นๆ เทคโนโลยีในระยะถัดมาคือ coarse WDM (CWDM) และ dense WDM (DWDM) ในเทคโนโลยี CWDM มีระยะห่างของความยาวคลื่นอยู่ที่ 20 nm (3000 GHz) มีจำนวนความยาวคลื่นอยู่ที่ 18 ความยาวคลื่นและถูกจำกัดอยู่ที่พิสัยความยาวคลื่น 1270 nm ถึง 1610 nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 ส่วนเทคโนโลยี DWDM มีระยะห่างของแต่

ละความยาวคลื่นอาจจะอยู่ที่ 200, 100, 50, หรือ 25 GHz มีจำนวนช่องสัญญาณให้สามารถใช้ได้จำนวนนับร้อยช่องสัญญาณ การส่งผ่านสัญญาณในระยะทางไกลสามารถส่งสัญญาณไปได้หลายพันกิโลเมตรโดยจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ส่วนระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (span) ต้องไม่ให้มีระยะทางมากเกินไปจนกำลังสัญญาณที่ถูกลดทอนลงไม่สามารถตรวจจับได้หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางแสง (optical signal-to-noise ratio: OSNR) มีค่าต่ำแสดงถึงประสิทธิภาพที่ไม่ดีของระบบ [10], [22]

#### 2.4.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Dense Wavelength Division Multiplexing)

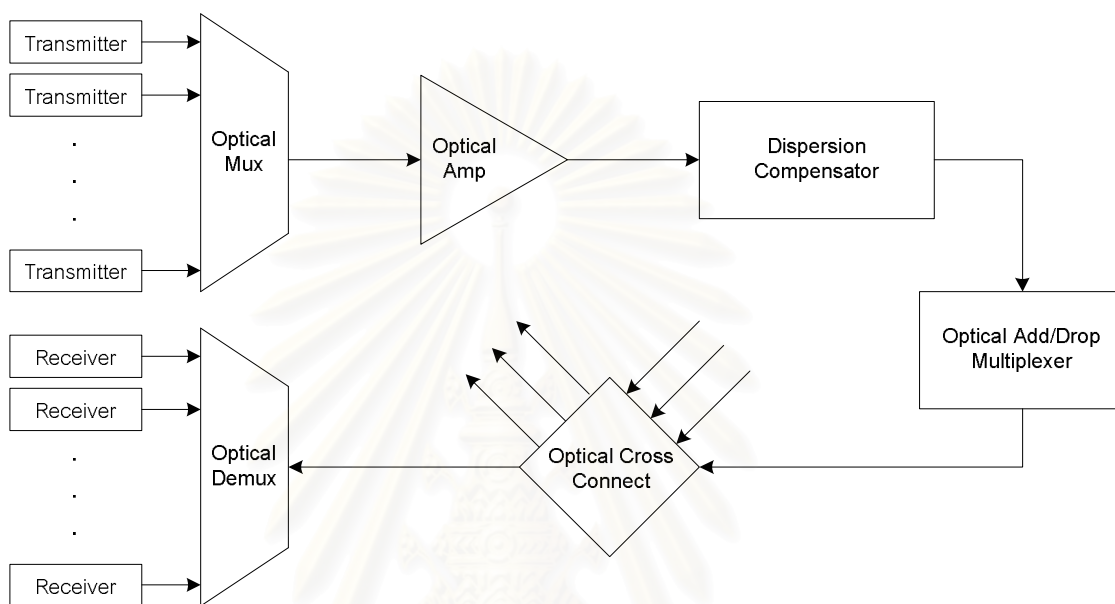
ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นแบบ DWDM พัฒนามาจากระบบสื่อสารทางแสงด้วยเส้นใยแสงที่แต่เดิมใช้เพียงแสงสีเดียวหรือแสงที่มีค่าความยาวคลื่นคงที่เพียงค่าเดียว เช่น 1.33 หรือ 1.55 ไมครอน เป็นต้น ระบบสื่อสารข้อมูลหลายช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงที่ผ่านมา คือระบบ TDM/PCM ที่ใช้ระบบสายส่งที่เป็นสายทองแดงและระบบ SDH ที่ใช้เส้นใยแสงสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วหลายระดับ ตัวอย่างเช่นความเร็วที่อัตรา 2.5 Gb/s ซึ่งเป็นของระบบ STM-16 ที่ใช้ระบบสายส่ง OC-48 STM-16 นี้ใช้เส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว โดยใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียวเป็นคลื่นพาห์สำหรับส่งข้อมูลหลายช่องสัญญาณที่ถูกจัดรวมกันด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (multiplex) ด้วยวงจรถอดสัญญาณแม้ว่าระบบสื่อสารจะส่งข้อมูลได้เร็วถึง 2.5 Gb/s แต่ยังคงมีความพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มความเร็วมากขึ้นไปอีก ได้แก่ การเพิ่มอัตราเร็วจากระบบเดิมที่อยู่ซึ่งสามารถพัฒนาระบบเดิมให้มีขีดการทำงานเพิ่มขึ้นได้อีก ถึง 40 Gb/s แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของขีดจำกัดด้านความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ และอีกวิธีคือการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในเส้นใยแสงเส้นเดิมเทคนิคนี้สามารถกระทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเส้นใยแสงเดิมในระบบก็ยังพอสามารถรองรับขีดการทำงานนี้ได้ ซึ่งจากแนวคิดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบสื่อสารสัญญาณแบบ WDM ซึ่งพัฒนามาเป็น DWDM ในปัจจุบัน [25]

##### 2.4.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในการทำงานของระบบ DWDM

ในระบบ WDM ใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.33 และ 1.55 ไมครอน แทนช่องสัญญาณอิสระรวมกันทางแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่สามารถเพิ่มช่องสัญญาณที่อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นแสงได้มากนัก เพราะแสงในแต่ละช่องสัญญาณมีความยาวคลื่นต่างกันมาก จะมีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้ ไม่

เท่ากันด้วย ผลลัพธ์ก็คือ ในระบบสื่อสารทางไกลต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่น เป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และระบบมีความยุ่งยาก การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้เคียงกัน โดยเป็นแสงในในช่วงของหน้าตาความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง เช่น ในระบบปัจจุบัน มักจะเลือกช่องหน้าตาความยาวคลื่นแสงในช่วง 1.55 ไมครอน และความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีช่วงห่างกัน (channel spacing : CS) ไม่ถึง 1 ไมครอน หรือมากกว่า 1 ไมครอนเล็กน้อย เช่นในระบบ DWDM ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจประกอบไปด้วยความยาวคลื่นแสง 1550, 1551, 1552, ..., 1557 ไมครอน ซึ่งหมายถึงมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ CS เท่ากับ 1 ไมครอน การกำหนดให้ CS มีค่าน้อย หมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรตเพิ่มมากขึ้นด้วย โครงสร้างพื้นฐานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบ DWDM เป็นระบบสื่อสารแบบทางเดียว (simplex) แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 เริ่มจาก transmitter ทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งเข้าสู่เส้นใยแสง transmitter หนึ่งชุดจะส่งแสงออกมา 1 ความยาวคลื่น ถือเป็น 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งข้อมูลแสงหนึ่งช่องสัญญาณนี้ อาจถูกมัลติเพล็กซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีบิตเรตสูงมาก เช่น 2.5 Gb/s หรือ 10 Gb/s จากนั้นแสงทุกช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการทางแสงด้วย optical multiplexer ส่งไปยังปลายทางด้วยเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว ข้อมูลที่เดินทางในระหว่างเส้นทางจะถูกลดทอนสัญญาณทำให้แสงมีค่าความเข้มแสงอ่อนลง จึงต้องมี optical amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกัน ให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกลๆ ได้สัญญาณข้อมูลที่ส่งในระบบมักเป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล สัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสงจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ทำให้สัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ผลลัพธ์คือ การถูกจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบ DWDM จึงต้องมีอุปกรณ์ dispersion compensator เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดการเดินทาง เนื่องจากระบบ DWDM มีความยาวคลื่นแสงหลายค่า ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย ยิ่งระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมากผลกระทบของดิสเพอร์ชันมากขึ้นด้วย ในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่หรือโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง เรามักจะนึกถึงระบบ SDH/SONET โครงข่ายจะถูกจัดให้มีโครงสร้างเป็นรูป (loop) หรือวงแหวน (ring) โดยในช่วงระหว่างสถานี ระบบสามารถขยายการติดต่อเข้ากับสถานีอื่นได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า add / drop ซึ่งระบบ DWDM เองก็ต้องมีอุปกรณ์ชนิดนี้เหมือนกัน เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับระบบเดิมที่มีอยู่ก่อนได้โดยการทำงานของอุปกรณ์จะเป็นการจัดการทางแสง OADM ซึ่งย่อมาจาก optical add / drop multiplexer และในสถานีสื่อสารที่ทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่ จะต้องมีอุปกรณ์ cross connect ทำหน้าที่ตัดต่อหรือเลือกเส้นทางของ

ข้อมูลในระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ ในระบบ DWDM อุปกรณ์นี้เรียกว่า optical cross connect หรือ OXC เมื่อข้อมูลเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงที่รวมทุกช่องสัญญาณจะถูกแยกออกให้เป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์เชิงแสงที่เรียกว่า optical demultiplexer ซึ่งมักมีหลักการการทำงานตรงข้ามกับ optical multiplexer



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารแบบ DWDM [25]

ระบบ DWDM เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถใช้กับระบบสื่อสารได้ทั้งขนาดเล็กและใหญ่ ทั้งการสื่อสารกันแบบ point-to-point การสื่อสารด้วยระบบ LAN หรือในโครงข่ายขนาดใหญ่อย่าง SDH/SONET ring network โดยมีอุปกรณ์ในการใช้งาน (component) อยู่น้อยต่างกันตามขนาดของโครงข่าย ทั้งที่เป็นอุปกรณ์ประเภทแอ็กทีฟ (active component) ที่ต้องการป้อนพลังงานจากภายนอก และอุปกรณ์ประเภทแพสซีฟ (passive component) ที่สามารถทำงานได้เลยโดยไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกดังนี้

## Transmitter

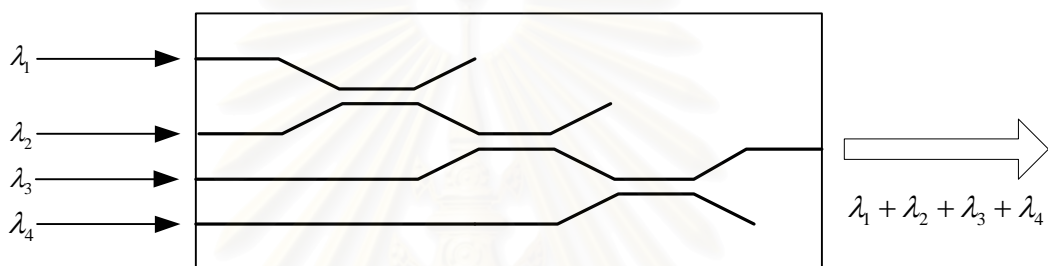
ตัวส่งสัญญาณแสงเลเซอร์ไดโอด (LD: laser diode) ต้องมีค่าความกว้างแถบสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกหรือที่เรียกว่าไลน์วิดท์ (linewidth) แคบเพื่อลดผลของการเกิด chromatic dispersion ในระบบ DWDM ไลน์วิดท์ของ LD ต้องมีค่าแคบมากโดยจะต้องไม่มากไปกว่าระยะ CS มิฉะนั้นจะเกิดการรบกวน (interference) ระหว่างช่องสัญญาณ ถ้า CS ของระบบมีค่า 1 นาโนเมตร แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็น LD ที่มี linewidth น้อยกว่า 1 นาโนเมตร ด้วย LD ที่มีสเปกแบบนี้มีราคาสูง จากความต้องการตรงนี้ ทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) สำหรับ LD แบบใหม่ๆ ร่วมกับเทคโนโลยีของการกรองแสงด้วยฟิลเตอร์ทางแสงเพื่อใช้กับระบบ DWDM ในเชิงพาณิชย์ได้ ในช่วงแรกๆ ของการวิจัยมีการหาแหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากๆ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดปรับค่าได้ (tunable laser source) ซึ่งมีราคาแพงมาก การมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้ากับแสง เทคนิคทางวงจรรีเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรสวิตซ์ ซึ่งจะเรียกเทคนิคนี้ว่า การมอดูเลตแบบภายใน (internal modulation) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตเพื่อรวมข้อมูลเข้ากับแสง ในรูปของสัญญาณแสงโดยตรง เทคนิคนี้เรียกว่า การมอดูเลตแบบภายนอก (external modulation) เมื่อแสงเดินทางอยู่ในตัวกลางหนึ่งซึ่งอาจเป็นอากาศ หรือภายในเส้นใยแสง หรือท่อแก้วแบบระนาบ (optical planar waveguide) ในช่วงหนึ่งที่ถูกกระทำให้ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางในช่วงที่แสงเดินทางเปลี่ยนแปลงไป หากสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหนี้ได้ ก็จะสามารถควบคุมคุณสมบัติของแสงที่เดินทางได้ด้วยเช่นกัน อุปกรณ์ในการมอดูเลตแบบภายนอกนี้จะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทได้แก่ อุปกรณ์ประเภทรีเล็กโตรออปติกส์ (electro-optic devices) ซึ่งอาศัยสนามไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของท่อนำสัญญาณแสงโดยตรง และอุปกรณ์ประเภทอะคูสโตออปติกส์ (acousto-optic devices) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของท่อนำสัญญาณแสง โดยที่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า

## Multiplexer (Mux)

คัปเปิลอร์เส้นใยแสง (optical fiber coupler) เป็นการรวมแสงจากแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงโดยตรง สัญญาณแสงสองช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกส่งเข้าสู่เส้นใยแสงต่างเส้นกัน เมื่อแสงเดินทางผ่านคัปเปิลอร์ แสงทั้งสองความยาวคลื่นจะถูกรวมกันหลังจากเดินทางออกจากคัปเปิลอร์ ในทางปฏิบัติ อาจเลือกใช้แสงขาออกเพียงเส้นเดียว ในกรณีที่ต้องการรวมแสงหลายช่องสัญญาณ ก็ออกแบบให้คัปเปิลอร์มีจำนวนเส้นใยแสงด้านอินพุตให้เท่ากับจำนวน

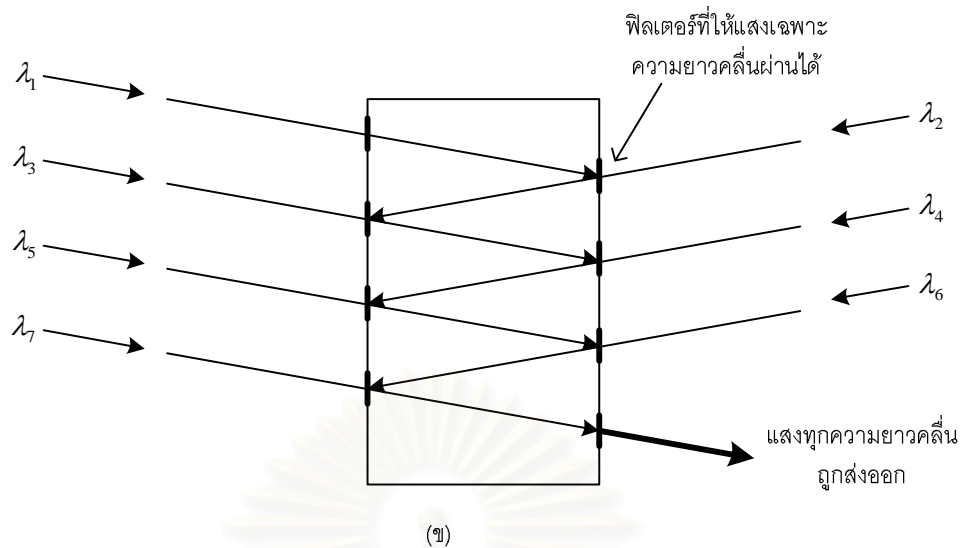
ช่องสัญญาณตามต้องการโดยอาจกำหนดให้เส้นใยแสงขาออกมีเพียงเส้นเดียวก็ได้ อุปกรณ์ชนิดคัปเปลอร์เส้นใยแสงนี้ ถือเป็นอุปกรณ์ประเภทแพสซีฟ

คัปเปลอร์แบบระนาบ (optical planar coupler) มีหลักการทำงานเหมือนคัปเปลอร์เส้นใยแสง เพียงแต่ท่อนำสัญญาณแสงจะเป็นแบบระนาบ ไม่ได้เป็นเส้นใยแสง ท่อนำสัญญาณเป็นเส้นหนาฝังตัวอยู่บนแผ่นฐานรูปสี่เหลี่ยมที่อาจเป็นแผ่นแก้วไลต์หรือแผ่นเวเฟอร์ มีการทำงานเพื่อคัปปลิงแสง เกิดในช่วงที่ท่อนำแสงอยู่ใกล้กันเป็นระยะทางช่วงหนึ่ง หากต้องการให้คัปเปลอร์ทำงานรวมช่องสัญญาณแสงหลายช่อง อาจเพิ่มโครงสร้างให้มีความซับซ้อนขึ้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของคัปเปลอร์แบบระนาบ [27]

ออปติคอลลฟิลเตอร์ (optical filter) เป็นการรวมแสงเมื่อตัวกลางแสงเป็นอากาศ หลักการทำงานพื้นฐานใช้เทคโนโลยีของฟิล์มบาง (thin film) ที่ทำจากวัสดุที่กำหนด เคลือบลงบนผิวระนาบของแผ่นแก้วใส ซึ่งการเคลือบฟิล์มบางนี้อาจมีหลายชั้น และแต่ละชั้นอาจใช้วัสดุที่ไม่เหมือนกัน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ ทำให้แสงที่เดินทางผ่านบางความยาวคลื่นถูกบดบังกั้นไว้ในขณะที่แสงบางความยาวคลื่นสามารถเดินทางผ่านออกไปได้ คล้ายกับหลักการทำงานของตัวดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexer) จากคุณสมบัติตรงนี้ ถ้านำมาจัดโครงสร้างเป็นกล่องเล็กๆ โดยภายในกล่องเป็นตัวกลางที่แสงทุกความยาวคลื่นผ่านได้ ที่ข้างกล่องจะจะมีช่องให้แสงผ่านโดยจะมีออปติคอลลฟิลเตอร์ปิดกั้นไว้ ฟิลเตอร์นี้ออกแบบให้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการผ่านได้เท่านั้น ถ้าเป็นแสงย่านความยาวคลื่นอื่นจะเกิดการสะท้อน ทำให้ที่เอาต์พุตสุดท้ายเกิดเป็นแสงรวมที่มีทุกความยาวคลื่น (ทุกช่องสัญญาณ) ส่งออก และพร้อมที่จะเดินทางสู่ปลายทางต่อไป เทคโนโลยีของฟิล์มบางนี้ อาจใช้เคลือบที่หน้าตัดตอนปลายของเส้นใยแสง เพื่อทำให้เส้นใยแสงเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นฟิลเตอร์ไปด้วยก็ได้



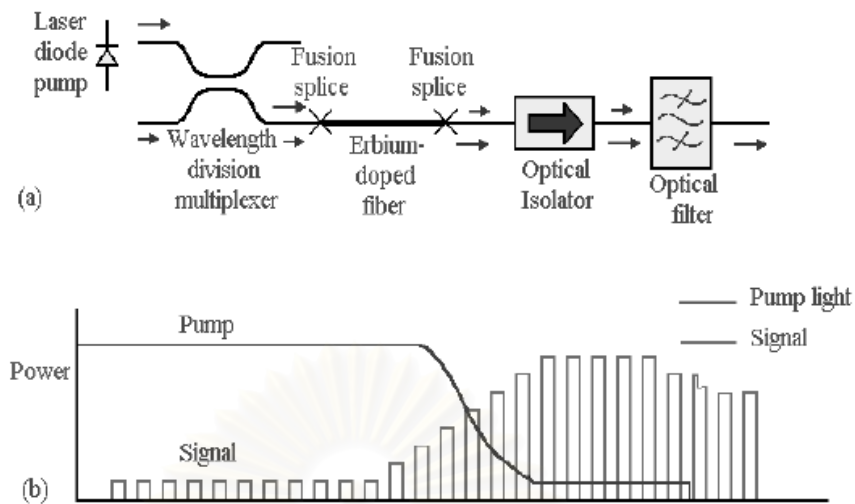
รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของออปติคอลลฟิลเตอร์ [27]

### Optical Amplifier (OA)

หลักการทำงานของสถานีขยายสัญญาณแสงอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่ใช้การกระตุ้นพลังงานจากภายนอกเข้าไปในสสาร แล้วทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลง จากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกที่ป้อนให้จะต้องคายพลังงานส่วนเกินนั้นออกมาในรูปของพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสสารเพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลับสู่สภาวะเดิมได้ หากเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมพลังงานส่วนเกินที่อิเล็กตรอนคายออกก็จะกลายเป็นพลังงานของแสงตามต้องการ ในการสร้าง optical fiber amplifier (OFA) วัสดุที่สามารถเปล่งแสงสีเดียวกับแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสง ในกระบวนการของ fiber amplifier มีหลายชนิด เช่น ธาตุเออร์เบียม (Erbium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน และธาตุนีโอดิเมียม (Neodymium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.33 ไมครอน เป็นต้น ในทางปฏิบัติเส้นใยแสงชนิดพิเศษจะถูกสร้างขึ้นให้มีส่วนประกอบของสารเหล่านี้ในส่วนของคอร์ของเส้นใยแสง ในระบบสื่อสารปัจจุบันมักเลือกใช้ธาตุเออร์เบียมผสมเข้ากับเนื้อแก้วในส่วนของคอร์ของเส้นใยแสง ทำให้เส้นใยแสงชนิดนี้ถูกเรียกว่า erbium-doped fiber หรือ EDF ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยแสงธรรมดาทั่วไป และเมื่อนำ EDF มาใช้ในการขยายสัญญาณแสงจะเรียกว่า erbium-doped fiber amplifier (EDFA) แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงชนิด EDF จะมีการลดทอนสัญญาณและเกิดปรากฏการณ์ dispersion ถ้าทำการกระตุ้นเส้นใยแสงพิเศษนี้ด้วยการป้อนพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ให้กับ EDF ข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน ที่เดินทางผ่านเข้าไปใน EDF จะถูกทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมกันทางความเข้ม

แสงของสัญญาณเดิมที่นำข้อมูล กับสัญญาณแสงที่เปล่งออกมาใหม่จากการกระตุ้นพลังงานเข้าไป โดยแสงทั้งสองนี้ต้องมีขนาดความยาวคลื่นที่ตรงกันจึงเสมือนกับการขยายสัญญาณข้อมูลแสงที่เดินทางในระบบสายส่งให้มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งจะเดินทางไปในระยะทางที่ไกลออกไป โครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDF ต่อแทรกเข้าไปในระบบสายส่ง ข้อมูลแสงในระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน จะเดินทางผ่านคัปเปิลอร์เส้นใยแสง (fiber coupler) ออกไป ในขณะที่สัญญาณอินพุตอีกทางหนึ่งของคัปเปิลอร์เส้นใยแสง จะถูกป้อนด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 980 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้น EDF แสงทั้งสองที่เดินทางรวมกันออกจากคัปเปิลอร์ในช่วงของเส้นใยแสงธรรมดาจะไม่มีอะไรเกิดขึ้น ข้อมูลแสงเดิมก็ยังคงมีความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในส่วนของ EDF แสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่าเป็นการปั๊ม (pump) และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาเพื่อรักษาสภาวะของตัวเองมัน จะได้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน เมื่อรวมกับข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน ก็จะทำให้สัญญาณพัลส์แสงมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นตามความยาวของ EDF และสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแสงธรรมดาที่เป็นสายส่งได้ต่อไป ในขณะที่เดียวกันพลังงานของแสงที่นำมาปั๊ม (ที่ 980 นาโนเมตร) ก็จะมีค่าลดลงและจางหายไปในที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดความยาวของ EDF ที่มีค่ามากๆ มิได้หมายความว่า จะทำให้ความสามารถในการขยายสัญญาณแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอด้วย แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดความยาวที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น อุปกรณ์ optical Isolator ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของแสงให้เดินทางไปในทิศทางที่ต้องการและไม่สะท้อนกลับมารบกวนระบบ

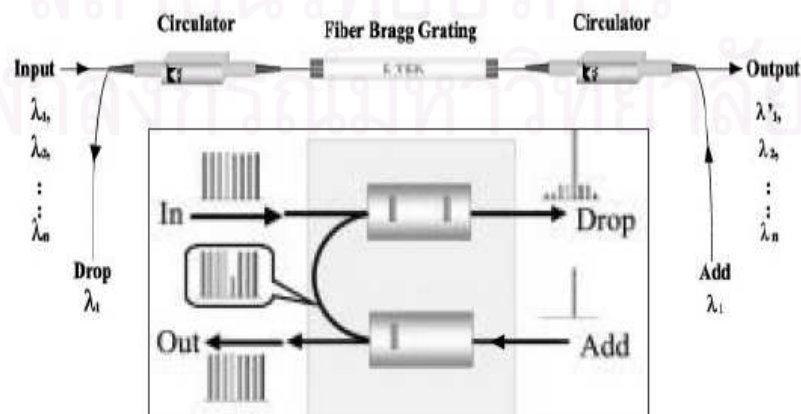




รูปที่ 2.11 การทำงานของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDFA [27]

#### Optical Add/Drop Multiplexer (OADM)

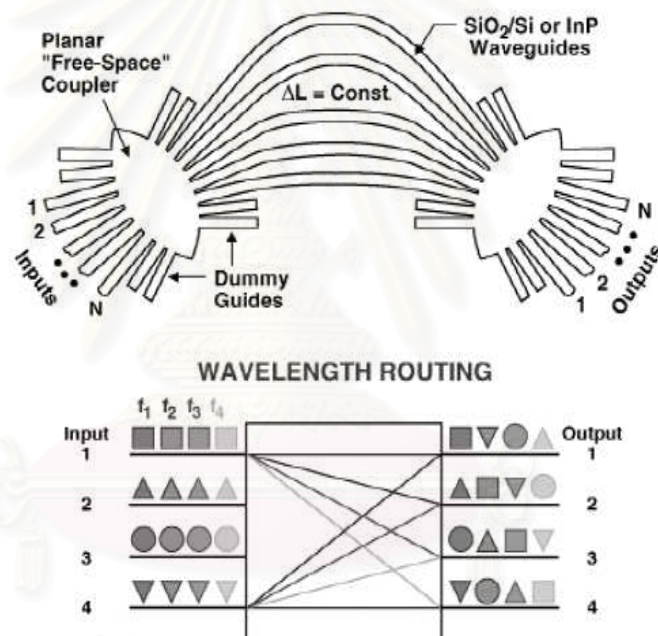
OADM ทำหน้าที่ให้สถานีในระบบสื่อสารสามารถรับข้อมูลแสง (drop) เฉพาะช่องสัญญาณที่กำหนด และใส่ข้อมูลแสง (add) ไปยังปลายทางโดยใช้ช่องสัญญาณ OADM ยังสามารถแทรกเพิ่มเข้าไปในสายส่งเดิมในช่วงระหว่างสถานีได้ หลักการทำงานพื้นฐานของ OADM ใช้ FBG เป็นอุปกรณ์หลักในการเลือกช่องสัญญาณ FBG จะสะท้อนความยาวคลื่นแสงกลับผ่าน circulator เพื่อ drop ช่องสัญญาณออกไป ในทำนองเดียวกัน ข้อมูลในช่องสัญญาณจะถูกส่งออกหรือ add เข้าไปที่อีกด้านหนึ่งของ FBG ซึ่งแสงจะเดินทางผ่าน circulator ผ่านเข้าไปใน FBG แล้วสะท้อนกลับผ่าน circulator ส่งออกไปยังปลายทาง ลักษณะของ FBG และ circulator ที่เป็นเส้นใยแสงในทางปฏิบัติ มีความยาวเพียง 5-15 เซนติเมตร เท่านั้น



รูปที่ 2.12 โครงสร้างพื้นฐานของ OADM [27]

## Optical Cross Connect (OXC)

OXC เปรียบเสมือนกับสถานีเลือกเปลี่ยนเส้นทางไปยังปลายทางที่ต้องการ โครงสร้างของ OXC ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากมักมีการนำไปใช้งานกับโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ ท่อนำแสงแบบระนาบ (optical planar waveguide) ที่มีทางเดินแสงขาเข้า หลายช่องสัญญาณ เมื่อแสงเดินทางผ่านไปในช่วงกลางที่โค้งและมีลักษณะขนานกัน แสงจะเกิดการคัปปลิง (coupling) ระหว่างท่อหนึ่งไปสู่อีกท่อหนึ่งที่ต้องการแล้วออกไปยังปลายทางได้ ทั้งนี้คุณสมบัติการคัปปลิงแสงจะขึ้นกับความยาวของท่อนำแสง ลักษณะความโค้ง ระยะที่ท่อนำแสงห่างกัน ไปจนถึงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่เป็นท่อนำแสงและฐาน (substrate) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ OXC ที่ใช้ optical planar waveguide [27]

## 2.5 โครงข่ายลักษณะ Synchronous Digital Hierarchy (SDH)

SDH เป็นมาตรฐานสากลของโครงข่ายสื่อสารสัญญาณความเร็วสูงมีความทันสมัยมากในการสื่อสารสัญญาณและการบริหารจัดการโครงข่ายเทคโนโลยีของ SDH ช่วยให้ network operator สามารถตอบสนองความต้องการใช้ capacity ของช่องสัญญาณของผู้ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว โครงข่าย SDH สามารถถูกออกแบบสร้างให้มีความสามารถในการกู้คืนสัญญาณอย่างอัตโนมัติในกรณีที่มีปัญหาขัดข้องเกิดขึ้นกับเครือข่าย ทำให้โครงข่ายมีความสามารถในการใช้การได้ที่สูงขึ้น

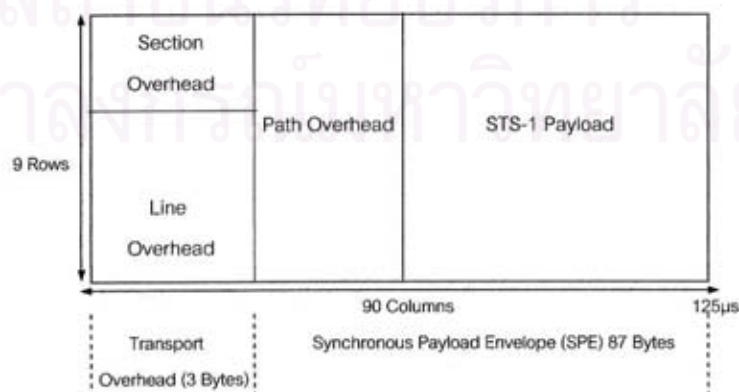
การจัดโครงสร้างการมัลติเพล็กซ์ของสัญญาณ SDH ได้ช่วยให้สามารถต่อไขว้ (cross-connect) ช่องสัญญาณ low-order ที่อยู่ภายในช่องสัญญาณ high-order ได้โดยไม่ต้องมีมัลติเพล็กซ์สัญญาณทั้งหมดออกก่อน [26]

### 2.5.1 มาตรฐาน SONET/SDH

SONET/SDH เป็นมาตรฐานของระบบการสื่อสารข้อมูล (transmission system) ที่มีลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกันใช้ในการส่งผ่านข้อมูลประเภทต่าง ๆ เช่น voice, video, data ในโครงข่ายและระหว่างโครงข่ายเช่น อัตราการส่งข้อมูล, วิธีการมัลติเพล็กซ์, รูปแบบการฟอร์มเมต และ OAM & P เป็นต้น SONET เป็นมาตรฐานที่มีการกำหนดใช้ในทวีปอเมริกาในขณะที่ SDH เป็นมาตรฐานที่มีการกำหนดใช้งานในทวีปยุโรปและทวีปเอเชีย SONET/SDH มีการส่งผ่านข้อมูลโดยกำหนดลักษณะข้อมูลเป็น T1/E1 (T2/E2, T3/E3, T4/E4 ...) ซึ่งสามารถรองรับความต้องการเพิ่มเติมในการส่งข้อมูลที่จะเกิดขึ้นมาตรฐานทั้ง 2 ก็มีความแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

1. basic building block ของมาตรฐาน SONET เรียกว่า synchronous transport signal level1 (STS-1) ประกอบขึ้นด้วย 90 x 9 (columns x rows) STS-1 มีอัตราการส่งข้อมูล (line rate) เท่ากับ 51.84 Mbps และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นด้วยการมัลติเพล็กซ์โดย bit interleaved synchronous multiplexer เป็นจำนวน N เฟรม จาก STS-1 ไปสู่ STS-N โดยที่ N = 1, 3, 12, 24, 48, 192 ดังนั้นอัตราการส่งข้อมูลใน STS-N มีค่าเท่ากับ N x 51.84 Mbps (เช่น ในกรณีของ STS-3 อัตราการส่งข้อมูลมีค่าเท่ากับ 3 x 51.84 Mbps = 155.52 Mbps) โดยโครงสร้างในส่วนที่เป็น overhead ส่งผลให้ความจุในการส่งผ่านข้อมูล (transmission capacity) ลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

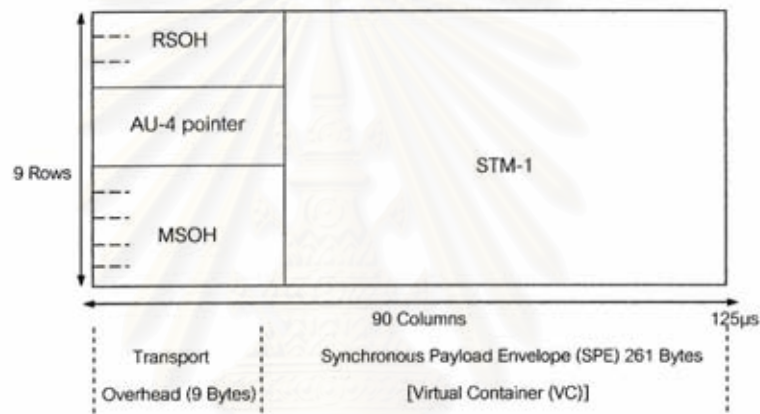
$$\text{transmission capacity} = 9 \times 87 \times (125 \mu s)^{(-1)} \times 8 \left( \frac{\text{bits}}{\text{byte}} \right) = 50.112 \text{ Mbps}$$



รูปที่ 2.14 basic SONET building block [1]

2. basic building block ของมาตรฐาน SDH เรียกว่า synchronous transport module level1 (STM-1) ประกอบขึ้นด้วย 270 x 9 (columns x rows) STM-1 มีอัตราการส่งข้อมูล (line rate) เท่ากับ 155.52 Mbps และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เป็นจำนวน N เฟรม จาก STM-1 ไปสู่ STM-N โดยที่ N = 1, 4, 16, 64 ดังนั้นอัตราการส่งข้อมูลใน STM-N มีค่าเท่ากับ N x 155.52 Mbps (กำหนดโดยมาตรฐานของ G.707) เนื่องจากโครงสร้างในส่วนที่เป็น overhead ส่งผลให้ความจุในการส่งผ่านข้อมูลลดลงซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{transmission capacity} = 9 \times (270 - 9) \times (125 \mu s)^{(-1)} \times 8 \left( \frac{\text{bits}}{\text{byte}} \right) = 150.336 \text{ Mbps}$$



รูปที่ 2.15 basic SDH building block [1]

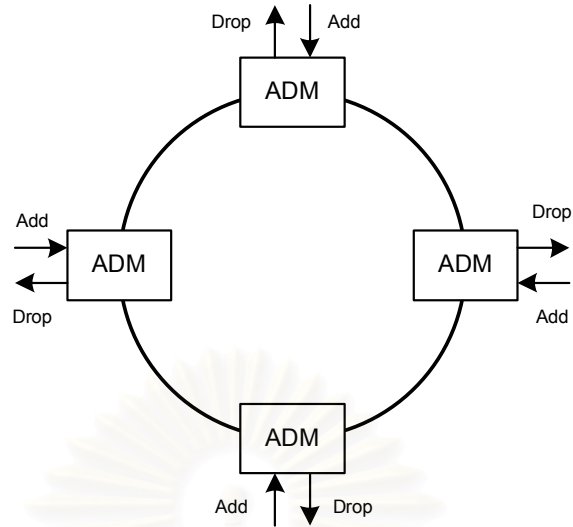
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานแบบ SONET และ SDH

Level	SONET	SDH	Line rate (Mbps)	SONET capacity (28 T1s = T3)	SDH capacity (63 E1s = E3)
OC-1	STS-1	-	51.84	1 x 28 T1s	1 x 21 E1s
OC-3	STS-3	STM-1	155.52	3 x 28 T1s	1 x 63 E1s
OC-12	STS-12	STM-4	622.08	12 x 28 T1s	4 x 63 E1s
OC-48	STS-48	STM-16	2,488.32	48 x 28 T1s	16 x 63 E1s
OC-192	STS-192	STM-64	9,953.28	192 x 28 T1s	64 x 63 E1s

การมัลติเพลกซ์ในมาตรฐาน SDH เริ่มต้นด้วยการ mapping สัญญาณที่มีอัตราเร็วแตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งาน bandwidth เข้าสู่ containers (Cs) ส่วนของ Cs จะรวมกันกับส่วนของ path over head (POH) ได้เป็น virtual containers (Cs + POH = VCs) ยกตัวอย่างเช่น C-4 ซึ่งประกอบขึ้นด้วย 260 x 9 (columns x rows) รวมกันกับส่วนของ POH ได้เป็นสัญญาณ VC-4 ส่วนนี้จะรวมกันกับ AU-4 pointer ขนาด 9 bytes ได้เป็นสัญญาณ AU-4 (AUG) จากนั้นส่วนของ transport overhead ซึ่งประกอบขึ้นด้วย RSOH และ MSOH จะถูกเพิ่มลงไปเป็นสัญญาณ AU-4 ได้เป็นสัญญาณ STM-1

## 2.5.2 การป้องกันความเสียหายในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวน

โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนเกิดจากการเชื่อมโยงกันเป็นลูปปิด ที่แต่ละสถานีมี add-drop multiplexer (ADM) หน้าที่หลักของ ADM คือ การเพิ่มและดึงช่องสัญญาณในสายออกมาใช้งานได้ เครือข่ายแบบวงแหวนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โครงข่ายวงแหวนแบบทางเดียว (uni-directional ring) และ โครงข่ายวงแหวนแบบสองทิศทาง (bi-directional ring) ในโครงข่ายวงแหวนแบบทางเดียวทราฟฟิกใช้งานจะวิ่งรอบวงแหวนในทิศทางเดียวกันเท่านั้น แต่ถ้าเป็นโครงข่ายวงแหวนแบบสองทิศทางทราฟฟิกที่รับและส่งจะมีทั้งสองทิศทางคือทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา คือระยะทางการส่งผ่านสัญญาณที่สั้นกว่า (short path) สำหรับการส่งผ่านสัญญาณในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและระยะทางการส่งผ่านสัญญาณที่ยาวกว่า (long path) สำรองไว้สำหรับการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายที่เกิดขึ้น

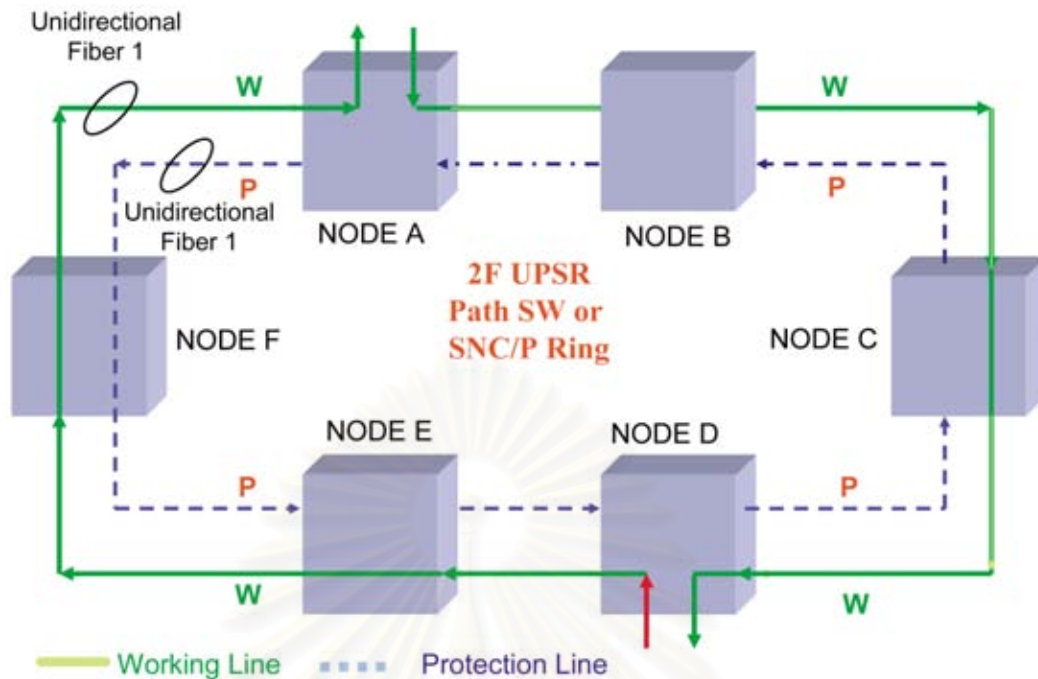


รูปที่ 2.16 add-drop multiplexer ในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวน [24]

#### 2.5.2.1 การป้องกันความเสียหายของโครงข่ายแบบทางเดียว

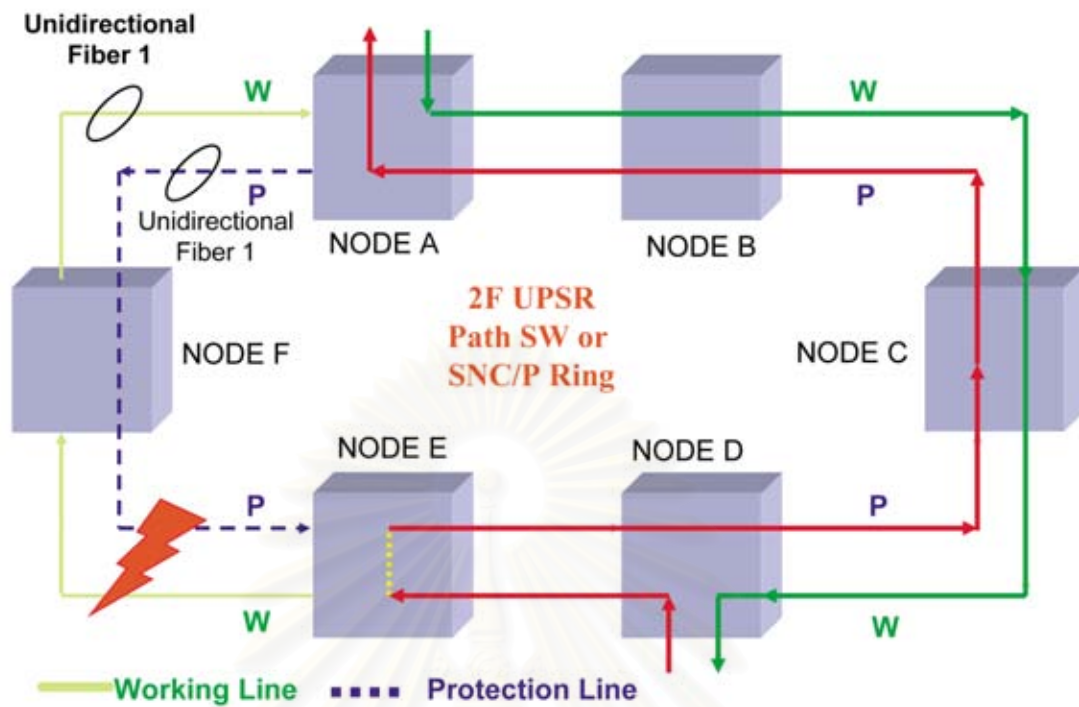
โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวประกอบด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองอย่างละเส้น ในกรณีโครงข่ายทำงานปกติการส่งผ่านสัญญาณจะวิ่งรอบวงแหวนในทิศทางเดียวตั้งนั้น การส่งผ่านสัญญาณระหว่างคู่โหนด ๆ ในโครงข่ายจะใช้เส้นทางโดยรอบของโครงข่าย เช่น การส่งผ่านสัญญาณจากโหนด A ไปยังโหนด D จะส่งผ่านสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานในทิศทางเข็มนาฬิกา A-B-C-D และทิศทางเข็มนาฬิกา D-E-F-A สำหรับการส่งผ่านสัญญาณจากโหนด D ไปยังโหนด A ดังรูปที่ 2.17

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวกรณีทำงานปกติ [26]

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทั้งในเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวจะมีการจัดสรรเส้นทางส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่มีความเสียหายเกิดขึ้นจะเกิดทั้งในเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง เช่น กรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง EF การส่งผ่านสัญญาณจากโหนด A ไปยังโหนด D ยังคงเป็นไปในลักษณะเดิมเนื่องจากไม่ได้รับผลจากความเสียหายที่เกิดขึ้น ต่างจากการส่งผ่านสัญญาณจากโหนด D ไปยังโหนด A สัญญาณไม่สามารถส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง EF ได้ ดังนั้นสัญญาณที่ส่งผ่านไปบนเส้นใยแสงทำงานจาก D ไป E จะวนกลับไปบนเส้นใยแสงสำรองเพื่อเลี่ยงความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง EF เข้าสู่โหนด D-C-B-A บนเส้นใยแสงสำรอง ดังรูปที่ 2.18

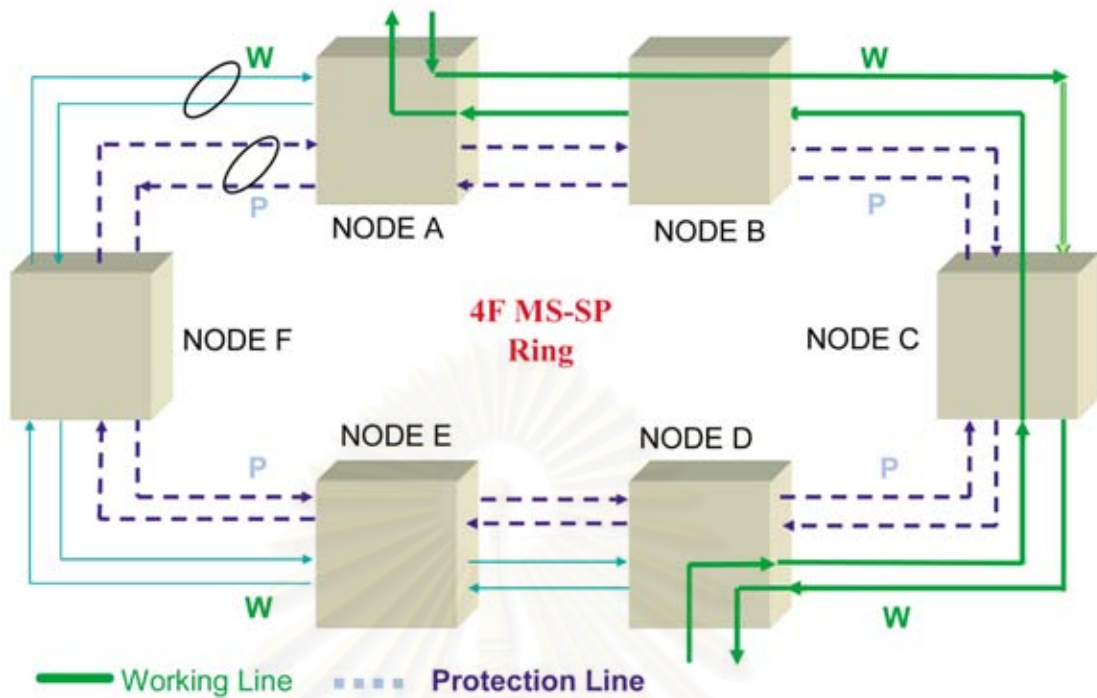


รูปที่ 2.18 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวกรณีที่เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายทั้งในเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง [26]

#### 2.5.2.2 การป้องกันความเสียหายของโครงข่ายแบบสองทาง

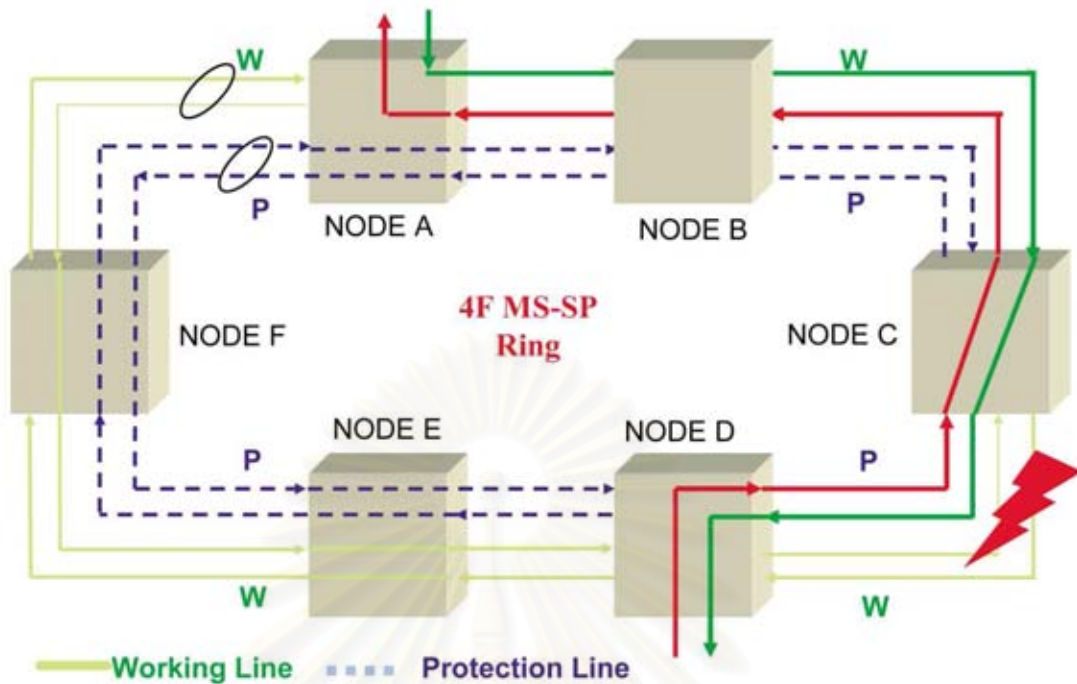
โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางประกอบด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองอย่างละสอง ในกรณีโครงข่ายทำงานปกติการส่งผ่านสัญญาณจะเกิดทั้งสองทิศทางคือ ทั้งทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงทำงานทั้งสองเส้น เช่น การส่งผ่านสัญญาณจากโหนด A ไปยังโหนด D จะส่งผ่านสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงาน A-B-C-D ในทิศตามเข็มนาฬิกาและการส่งผ่านสัญญาณจากโหนด D ไปยังโหนด A บนเส้นใยแสงทำงานอีกเส้นที่เหลือในทิศทวนเข็มนาฬิกา D-C-B-A สำหรับ ดังรูปที่ 2.19





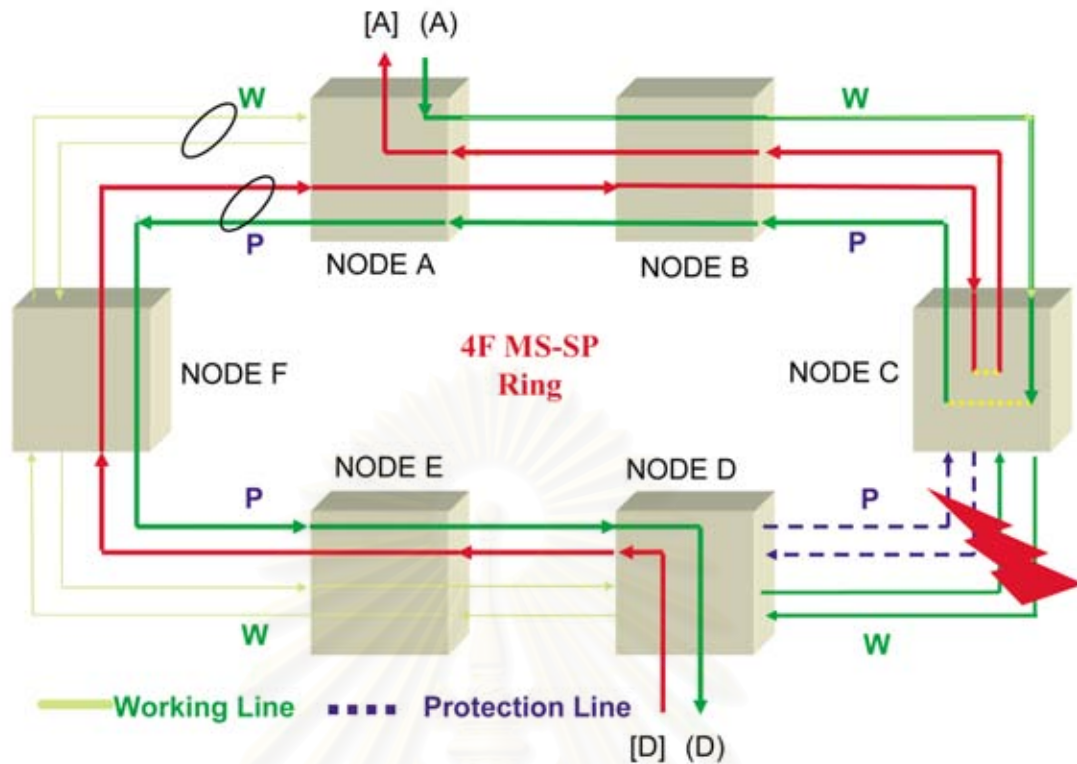
รูปที่ 2.19 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางกรณีทำงานปกติ [26]

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับสายเชื่อมโยงหนึ่งบนเส้นใยแสงทำงานในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวจะมีการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงสายเชื่อมโยงที่มีความเสียหายเกิดขึ้นโดยใช้เส้นใยแสงสำรองเช่น กรณีที่เกิดความเสียหายกับเส้นใยแสงทำงานของสายเชื่อมโยง CD การส่งผ่านสัญญาณจากโหนด A ไปยังโหนด D ยังคงเป็นไปในลักษณะเดิมสำหรับเส้นทาง A-B-C เนื่องจากไม่ได้รับผลจากความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังจากนั้นสัญญาณจะถูกสวิตช์ไปบนเส้นใยแสงสำรองบนเส้นทาง C-D ส่วนการส่งผ่านสัญญาณจากโหนด D ไปยังโหนด A สัญญาณจะผ่านไปบนเส้นใยแสงสำรองสำหรับเส้นทาง D-C เพื่อเลี่ยงความเสียหายที่เกิดบนเส้นใยแสงทำงานของสายเชื่อมโยง CD จากนั้นสัญญาณจะถูกสวิตช์ไปบนเส้นใยแสงทำงานสำหรับเส้นทาง C-B-A ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางกรณีที่เกิดความเสียหาย  
กับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายบนเส้นใยแสงทำงาน [26]

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองในโครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบทางเดียวจะมีการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่มีความเสียหายโดยใช้ทั้งเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองเช่นกรณีที่เกิดความเสียหายกับเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยง CD การส่งผ่านสัญญาณจากโหนด A ไปยังโหนด D จะเริ่มต้นที่ (A) บนโหนด A ส่งผ่านไปบนเส้นใยแสงทำงานทิศตามเข็มนาฬิกาสำหรับเส้นทาง A-B-C จากนั้นสัญญาณจะถูกวนกลับไปบนเส้นใยแสงสำรอง โหนด C เพื่อเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง CD สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปบนเส้นใยแสงสำรองในทิศวนเข็มนาฬิกาสำหรับเส้นทาง C-B-A-F-E-D สู่จุด D ที่ (D) ส่วนการส่งผ่านสัญญาณจากโหนด D ไปยังโหนด A จะเริ่มต้นที่ [D] บนโหนด D ส่งผ่านสัญญาณไปบนเส้นใยแสงสำรองทิศตามเข็มนาฬิกาสำหรับเส้นทาง D-E-F-A-B-C จากนั้นสัญญาณจะถูกวนกลับไปบนเส้นใยแสงทำงาน ณ โหนด C เพื่อเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง CD สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปบนเส้นใยแสงทำงานในทิศวนเข็มนาฬิกาสำหรับเส้นทาง C-B-A สู่จุด A ที่ [A] ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โครงข่าย SDH ลักษณะวงแหวนแบบสองทางกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง [26]

นอกจากที่ได้นำเสนอไปกลไกสำหรับการป้องกันความเสียหายของโครงข่ายลักษณะวงแหวนยังมีอีกหลายลักษณะ โดยแนวแนวทางในการป้องกันโครงข่ายจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่จัดขึ้นใหม่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.5.3 การป้องกันความเสียหายที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์

การนำโครงข่าย SDH มาใช้ร่วมกับเส้นใยแสงทำให้ทราฟฟิกที่วิ่งในเครือข่ายมีปริมาณสูงมาก จึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันโครงข่ายที่ดีเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบมากนักจากผลเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ ความเสียหายที่พบบ่อยคือความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย [33] โดยมีแนวทางในการป้องกันโครงข่ายคือ การจัดหาวิถีสำรอง (spare path) ให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่าในวงแหวนเพื่อป้องกันผลกระทบจากความเสียหาย (failure) วิถีสำรองหมายถึง เส้นทางสำรอง (spare route) และ ความยาวคลื่นสำรอง (spare wavelength) ณ ที่นี้จะพิจารณาโครงข่ายวงแหวนที่มีการส่งผ่านสัญญาณได้ทั้งสองทิศทางโดยมีกลไกการกักตุนสัญญาณตามลักษณะเส้นทางที่จัดให้วิถีสำรองสำหรับทราฟฟิกที่ถูกกระทบเมื่อโครงข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเกิดความเสียหายดังต่อไปนี้

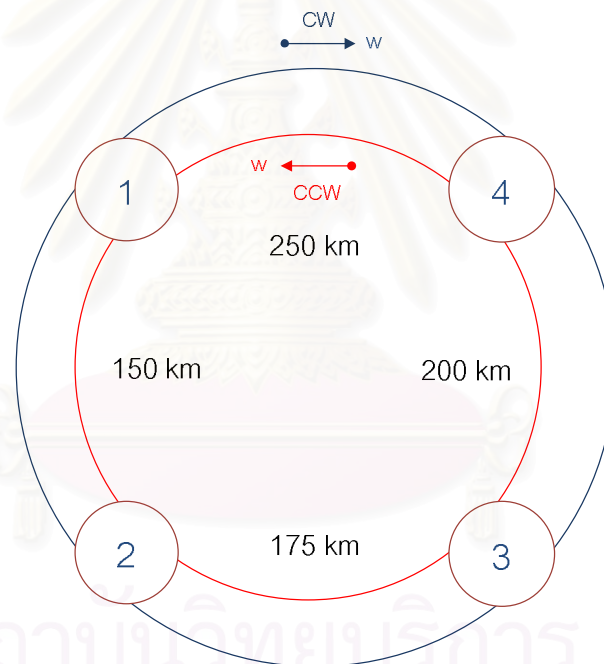
#### 2.5.3.1 การป้องกันความเสียหายบนเส้นใยแสงทำงานแบบ path protection

การป้องกันความเสียหายของโครงข่ายบนเส้นใยแสงทำงานแบบ path protection โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงทำงาน (wavelength protection) มีหลักการทำงานคือ เมื่อเกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย สถานีทุกสถานีจะสามารถรับรู้เส้นทางที่ขาดและทำการจัดสรรเส้นทางส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่โดยการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณความยาวคลื่นของแต่ละสัญญาณส่งผ่านไปบนเส้นใยแสงทำงานในทิศทางข้ามกันกับเส้นทางเดิม เนื่องจากเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างคู่สถานีในวงแหวนมีเพียง 2 ทิศทางเท่านั้น คือ ในทิศตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา เส้นทางในการส่งผ่านสัญญาณด้วยกลไกการกักตุนสัญญาณในลักษณะนี้โครงข่ายจะต้องมีจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่ยังเหลือว่างสำหรับการส่งข้อมูลเพื่อใช้ในการกักตุนสัญญาณจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงข่ายกล่าวคือ จำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณทั้งหมดจะมีจำนวนมากกว่าจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งผ่านสัญญาณทั่วทั้งโครงข่าย [26]

### 2.5.3.1.1 จำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอสำหรับส่งผ่านสัญญาณ

การอธิบายวิธีคำนวณหาจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณ เราใช้โครงข่ายตัวอย่างสองลักษณะคือ โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนวงเดียว (single ring network) [4], [26] และโครงข่ายลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกัน (2-ring network intersected) โดยกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงาน ระเบียบขั้นตอนวิธีการคำนวณหาความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 2.5.3.1.1.1 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนวงเดียว



รูปที่ 2.22 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนวงเดียว

การอธิบายวิธีการคำนวณหาความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายวงแหวนวงเดียวอธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

#### 1) ระบุเส้นทางและระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่าย

เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายลักษณะวงแหวนวงเดียวตามรูปที่ 2.22 มีดังนี้

- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 1 ได้แก่ 123 / 143 ระยะทาง 325 km / 450 km ตามลำดับ
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 2 ได้แก่ 214 / 234 ระยะทาง 350 km / 375 km ตามลำดับ

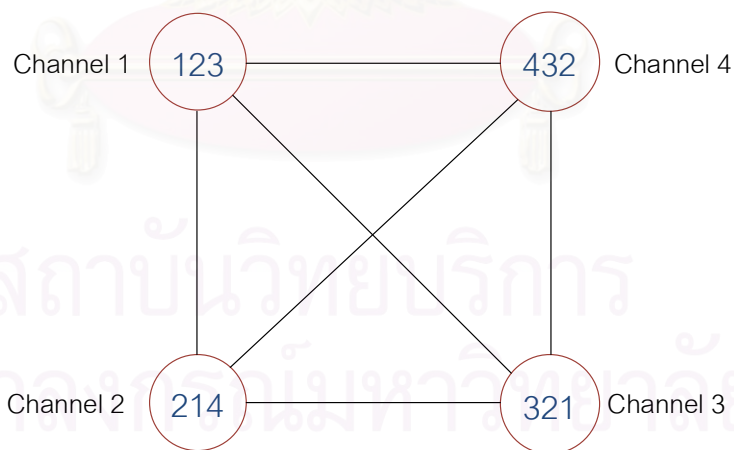
- สัญญาณเริ่มต้นที่โนดที่ 3 ได้แก่ 341 / 321 ระยะทาง 450 km / 325 km ตามลำดับ
- สัญญาณเริ่มต้นที่โนดที่ 4 ได้แก่ 412 / 432 ระยะทาง 400 km / 375 km ตามลำดับ

2) เลือกเส้นทางในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายด้วยเงื่อนไข shortest path

เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายลักษณะวงแหวนวงเดียวตามรูปที่ 2.22 ด้วยเงื่อนไข shortest path มีดังนี้

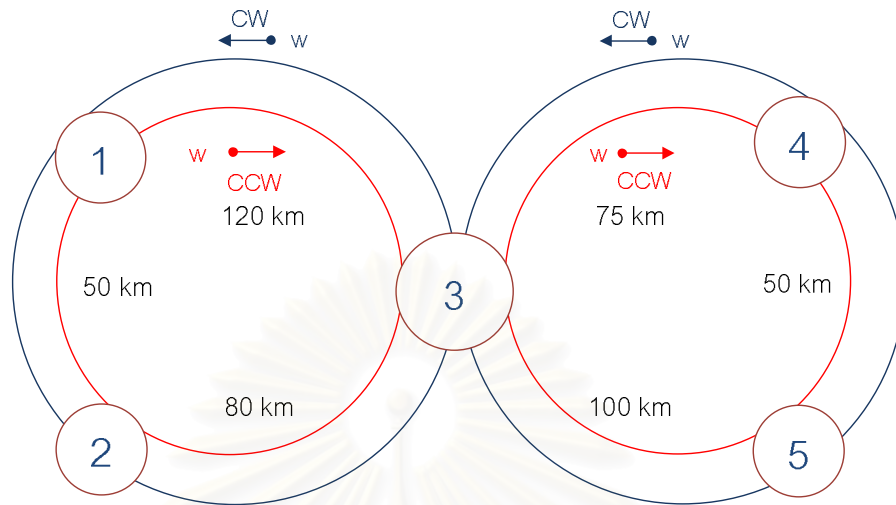
- สัญญาณเริ่มต้นที่โนดที่ 1 ได้แก่ 123 ระยะทาง 325 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โนดที่ 2 ได้แก่ 214 ระยะทาง 350 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โนดที่ 3 ได้แก่ 321 ระยะทาง 325 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โนดที่ 4 ได้แก่ 432 ระยะทาง 375 km

3) แทนเส้นทางในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายด้วยเงื่อนไข shortest path ให้เป็นโนดของโครงข่ายลักษณะวงแหวนวงเดียว จากนั้นลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างโนดโดยมีเงื่อนไขว่าที่ปลายทั้งสองของเส้นเชื่อมจะไม่มีการจัดสรรด้วยความยาวคลื่นค่าเดียวกัน จะได้ว่าความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายวงแหวนแบบวงเดียวตามรูปที่ 2.22 คือ 4 ความยาวคลื่น ดังนี้



รูปที่ 2.23 การจัดสรรความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในโครงข่ายลักษณะวงแหวนแบบวงเดียว

### 2.5.3.1.1.2 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 2.24 โครงข่ายตัวอย่างลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกัน

การอธิบายวิธีการคำนวณหาความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกันอธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

#### 1) ระบุเส้นทางและระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่าย

เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกันตามรูปที่ 2.24 มีดังนี้

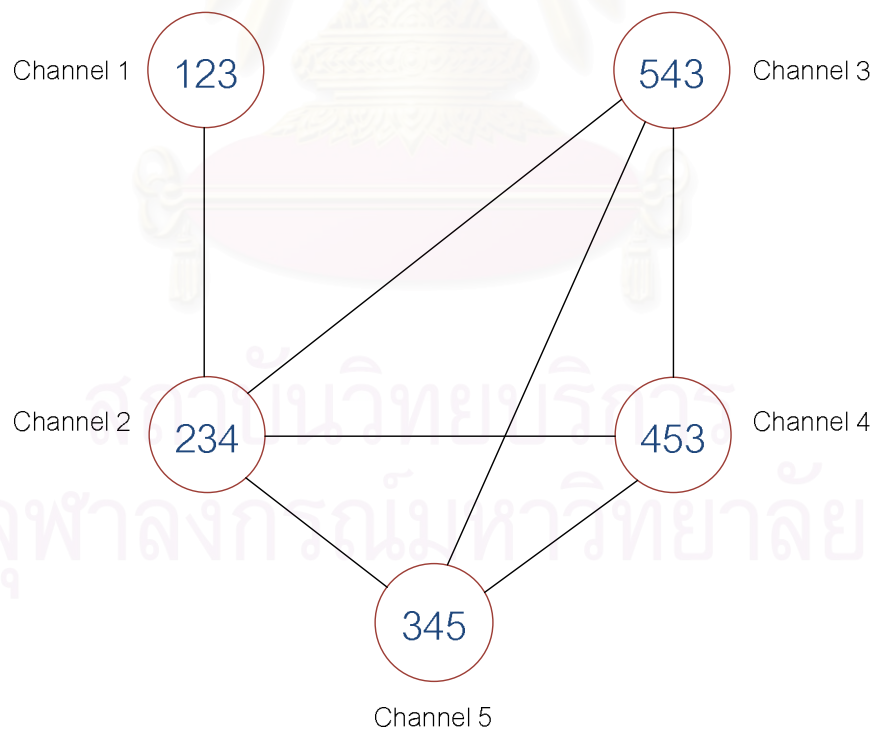
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 1 ได้แก่ 123 / 132 / 134 / 135 ระยะทาง 130 km / 200 km / 195 km / 220 km ตามลำดับ
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 2 ได้แก่ 213 / 231 / 234 / 235 ระยะทาง 170 km / 200 km / 155 km / 180 km ตามลำดับ
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 3 ได้แก่ 312 / 321 / 345 / 354 ระยะทาง 170 km / 130 km / 125 km / 150 km ตามลำดับ
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 4 ได้แก่ 453 / 435 / 431 / 432 ระยะทาง 150 km / 175 km / 195 km / 155 km ตามลำดับ
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 5 ได้แก่ 543 / 534 / 531 / 532 ระยะทาง 125 km / 175 km / 220 km / 180 km ตามลำดับ

2) เลือกเส้นทางในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายด้วยเงื่อนไข shortest path

เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกันตามรูปที่ 2.24 ด้วยเงื่อนไข shortest path มีดังนี้

- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 1 ได้แก่ 123 ระยะทาง 130 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 2 ได้แก่ 234 ระยะทาง 155 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 3 ได้แก่ 345 ระยะทาง 125 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 4 ได้แก่ 453 ระยะทาง 150 km
- สัญญาณเริ่มต้นที่โหนดที่ 5 ได้แก่ 543 ระยะทาง 125 km

3) แทนเส้นทางในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายด้วยเงื่อนไข shortest path ให้เป็นโหนดของโครงข่ายลักษณะวงแหวนสองวงที่เชื่อมต่อกัน จากนั้นลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดโดยมีเงื่อนไขว่าที่ปลายทั้งสองของเส้นเชื่อมจะไม่มีการจัดสรรด้วยความยาวคลื่นค่าเดียวกัน จะได้ว่าความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายวงแหวนแบบสองวงที่เชื่อมต่อกันตามรูปที่ 2.24 คือ 5 ความยาวคลื่น ดังนี้

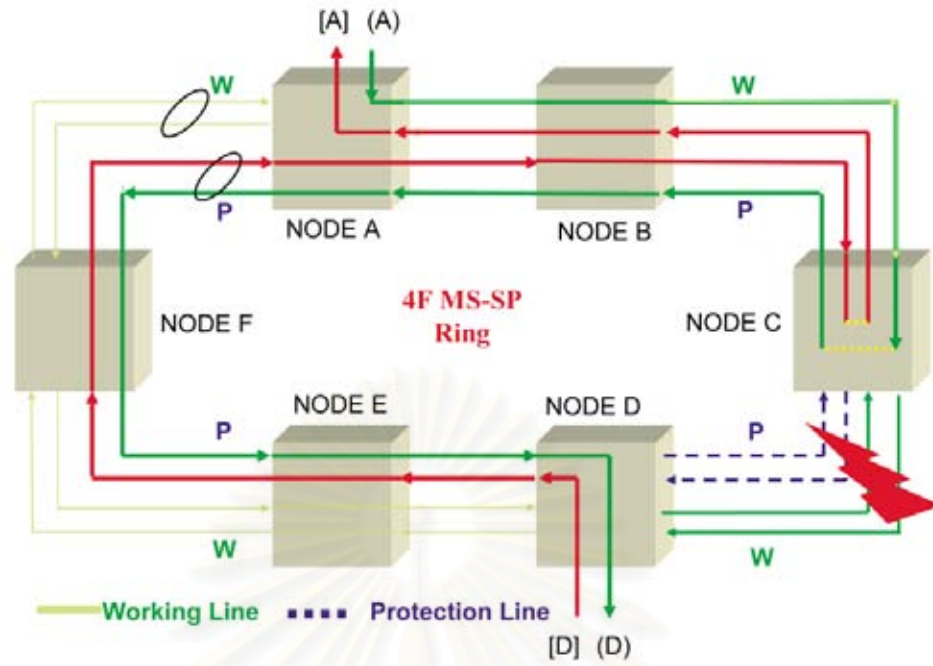


รูปที่ 2.25 การจัดสรรความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในโครงข่ายวงแหวนแบบสองวงเชื่อมต่อกัน



### 2.5.3.2 การป้องกันความเสียหายโดยใช้เส้นใยแสงสำรอง

การป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายเชื่อมต่อใยใด ๆ ภายในโครงข่ายบนเส้นใยแสงสำรอง (span protection) มีหลักการการทำงานคือ เมื่อเกิดความเสียหายกับสายเชื่อมต่อใยภายในโครงข่ายสถานีที่อยู่ติดกับสายเชื่อมต่อใยที่เสียหายเท่านั้นจะรับรู้ ทราฟฟิกที่ถูกรบกวนด้วยสายเชื่อมต่อใยที่เกิดความเสียหายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อเลี่ยงเฉพาะสายเชื่อมต่อใยที่เกิดความเสียหายเท่านั้น คือ สถานีที่อยู่ติดกับสายเชื่อมต่อใยที่เสียหายจะวนสัญญาณกลับไปในทิศทางตรงกันข้ามบนเส้นใยสำรอง (loop back) จนกระทั่งเมื่อสัญญาณส่งมาถึงสถานีที่ติดกันกับสายเชื่อมต่อใยที่เสียหายอีกด้าน สัญญาณข้อมูลจะถูกวนกลับอีกครั้งหนึ่งจากเส้นใยสำรองกลับสู่เส้นใยทำงานดั้งเดิม ดังนั้นในวิธีนี้สถานีต้นทางและปลายทางไม่จำเป็นต้องรับรู้และเปลี่ยนเส้นทาง โดยในการส่งผ่านสัญญาณด้วยเส้นทางใหม่นั้นใช้เส้นใยแสงคนละเส้นกับเส้นใยแสงเดิม จึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนช่องความยาวคลื่นในการส่งผ่านสัญญาณเหมือนในวิธีการป้องกันความเสียหายของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงทำงาน ทำให้มีกลไกการกู้คืน (restoration) ที่เร็วกว่าอย่างไรก็ตามการวนสัญญาณกลับเพื่อหลีกเลี่ยงสายเชื่อมต่อใยที่เสียหาย สัญญาณจะถูกส่งผ่านด้วยระยะทางที่มากกว่าทำให้เกิดการประวิงเวลามากกว่าในวิธีแรก (ในวงแหวนที่มีขนาด  $n$  โหนด สัญญาณที่ถูกรวนกลับจะต้องอ้อมเป็นระยะทาง  $n-1$  สายเชื่อมต่อใย) [29] กลไกการกู้คืนสัญญาณลักษณะนี้แสดงในรูปที่ 2.26 และได้อธิบายหลักการไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.5.2.2



รูปที่ 2.26 กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection ที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์ [26]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

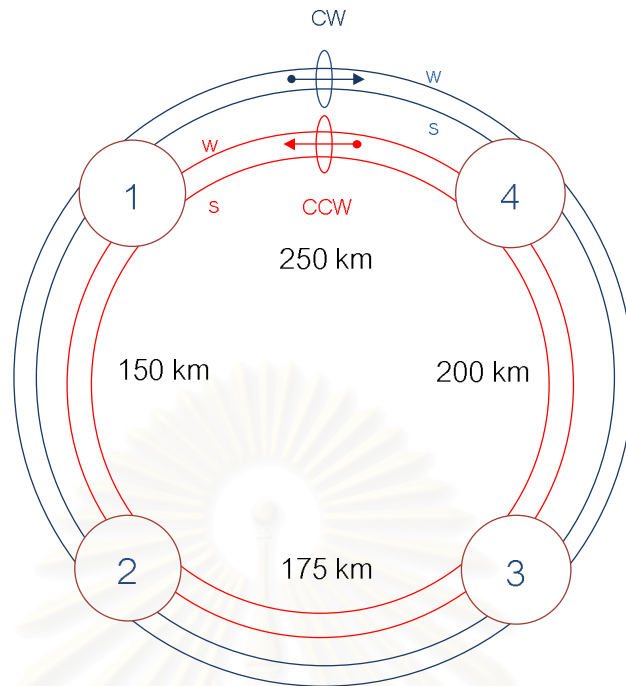
## บทที่ 3

### ระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

โครงข่ายลักษณะวงแหวนที่มีการมัลติเพลกซ์แบบเชิงความยาวคลื่น รวมทั้งการออกแบบโครงข่ายด้วยเทคโนโลยี DWDM แสงนำไปสู่แนวคิดของ network transparency คือไม่มีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์และพลังงานแสง การส่งข้อมูลด้วยความถี่ที่สูงขึ้นโดยจึงไม่ได้รับผลของปัญหาคอขวด ที่ขีดจำกัดทางอิเล็กทรอนิกส์ความถี่ 40 GHz ทำให้สามารถขยายขนาดโครงข่ายเพื่อเพิ่มความจุและการใช้งานแบนด์วิดท์สูงสุด อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณระยะทางไกลโดยใช้สัญญาณหลายช่องสัญญาณมัลติเพลกซ์รวมในเส้นใยแสงเดียวกันเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงระยะทางหนึ่งจะเกิดผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จึงจำเป็นต้องมีการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน อัลกอริทึมสำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงในโครงข่ายวงแหวนด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั้งกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติมีขั้นตอนวิธี 4 ขั้นตอนดังนี้

#### 3.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติการระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (shortest-path) ส่วนในกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะมีการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายขึ้นใหม่ตามกลไกการกู้คืนสัญญาณของโครงข่ายวงแหวนทั้งสองลักษณะตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 และ 2.5.3 บทที่ 2 คือกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน สำหรับการส่งสัญญาณที่มีจำนวนความยาวคลื่นมากกว่าจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอต่อการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายโดยพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่ามากที่สุด (longest-path) บนเส้นใยแสงทำงานเท่านั้น และในกรณีที่ส่งสัญญาณที่มีจำนวนความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอต่อการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายการกู้คืนสัญญาณที่เสียหายจะเป็นไปตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection ซึ่งเกิดทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองดังนี้



รูปที่ 3.1 โครงข่ายตัวอย่างใช้ในการอธิบายเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณในกรณี  
โครงข่ายทำงานปกติและในกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.1 เป็นโครงข่ายลักษณะวงแหวนตามมาตรฐาน SONET / SDH ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงประกอบด้วยเส้นใยแสง 4 เส้นคือเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองอย่างละสองเส้นที่สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ทั้งสองทิศทาง การจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติและการจัดสรรเส้นทางขึ้นใหม่ในกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย เราจะพิจารณาทุกกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection และ span protection สามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

สัญญาณส่งจาก โหนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโหนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โหนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โหนดที่ 4
1__2	2__1	3__2__1	4__1
1__2__3	2__3	3__2	4__3__2
1__4	2__3__4	3__4	4__3

ตารางที่ 3.2 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection เมื่อเกิดความชำรุดเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 23 และ 32

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1__2	2__1	3__4__1	4__1
1__4__3	2__1__4__3	3__4__1__2	4__1__2
1__4	2__1__4	3__4	4__3

ตารางที่ 3.3 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection เมื่อเกิดความชำรุดเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1__2	2__1	3__2__1	4__1
1__2__3	2__3	3__2	4__1__2
1__4	2__1__4	3__2__1__4	4__1__2__3

ตารางที่ 3.4 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection เมื่อเกิดความชำรุดเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 14 และ 41

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1__2	2__1	3__2__1	4__3__2__1
1__2__3	2__3	3__2	4__3__2
1__2__3__4	2__3__4	3__4	4__3

ตารางที่ 3.5 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 21 และ 12

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1_4_3_2	2_3_4_1	3_4_1	4_1
1_4_3	2_3	3_2	4_3_2
1_4	2_3_4	3_4	4_3

ตารางที่ 3.6 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 23 และ 32

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1_2	2_1	3_4_1_2_1	4_1
1_2_1_4_3	2_1_4_3	3_4_1_2	4_3_4_1_2
1_4	2_1_4_3_4	3_4	4_3

ตารางที่ 3.7 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1_2	2_1	3_2_1	4_1
1_2_3	2_3	3_2	4_1_2_3_2
1_4	2_3_2_1_4	3_2_1_4	4_1_2_3

ตารางที่ 3.8 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 41 และ 14

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1_2	2_1	3_2_1	4_3_2_1
1_2_3	2_3	3_2	4_3_2
1_2_3_4	2_3_4	3_4	4_3

ตารางที่ 3.9 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่โดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับสายเชื่อมโยง 12 และ 21

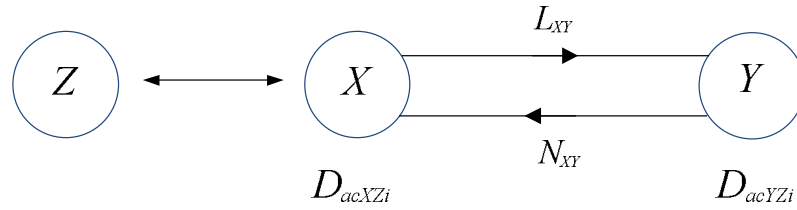
สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่ง จากโนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4
1_4_3_2	2_3_4_1	3_2_3_4_1	4_1
1_4_3_2_3	2_3	3_2	4_3_2
1_4	2_3_4	3_4	4_3

### 3.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางส่งสัญญาณในตารางที่ 3.1 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติ เส้นทางส่งผ่านสัญญาณในตารางที่ 3.2 – 3.4 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานแบบ wavelength protection และเส้นทางส่งผ่านสัญญาณในตารางที่ 3.5 – 3.9 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองแบบ span protection กรณีที่เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทาง (path constraints) อสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน (maximum dispersion constraints) เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม (integrality constraint) และการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) [14]

#### 3.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนด

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณจากโนดต้นทาง  $Z$  ไปยังโนดปลายทาง  $X$  และ  $Y$  โดยที่สัญญาณสามารถส่งถึงกันได้ทั้งสองทิศทาง เราสามารถกำหนดสมการขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางใด ๆ ภายในโครงข่ายได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 การส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง

$$D_{acXZi} + (D_i \times L_{XY}) + (D_{compi} \times N_{XY}) = D_{acYZi} \quad (3.1)$$

- โดย  $D_{acXZi}$  คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทาง X เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ส่งผ่านมาจากโหนดต้นทาง Z
- $D_{acYZi}$  คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทาง Y เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ส่งผ่าน มาจากโหนดต้นทาง Z
- $D_i$  คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น  $\lambda_i$
- $D_{compi}$  คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่  $\lambda_i$
- $L_{XY}$  คือ ความยาวของสายเชื่อมโยง XY
- $N_{XY}$  คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนสายเชื่อมโยง XY
- ( subscript's' สำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง )

ในสมการที่ (3.1) พิจารณาจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ส่งผ่านสัญญาณสามารถมีจำนวนที่มากกว่า, น้อยกว่า หรือเท่ากับจำนวนโหนดทั้งหมดภายในโครงข่าย ค่าดิสเพอร์ชันสะสม  $D_{acXZi}$  ที่โหนดปลายทาง X เมื่อชุดสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งผ่านมาจากโหนดต้นทาง Z จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสง SMF ความยาว  $L_{XY}$  เป็นค่าเท่ากับ  $D_i \times L_{XY}$  ในขณะเดียวกันค่าดิสเพอร์ชันสะสมดังกล่าวจะถูกชดเชยด้วยหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่วางลงบนสายเชื่อมโยง XY จำนวน  $N_{XY}$  ตัวการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันนั้นแสดงด้วยค่า  $D_{compi} \times N_{XY}$  สุดท้ายจะได้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมสิ้นสุดที่โหนดปลายทาง Y คือค่า  $D_{acYZi}$



### 3.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

สำหรับแต่ละความยาวคลื่น เราต้องการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสม ณ โหนดปลายทาง Y จาก โหนดต้นทาง Z มีค่าน้อยกว่า  $D_{\max}$  (acceptable accumulated dispersion) และมากกว่า  $-D_{\max}$  ดังนี้

$$-D_{\max} \leq D_{acYZi} \leq D_{\max} \quad (3.2)$$

โดย  $D_{\max}$  คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเกิดผิดเพี้ยนของสัญญาณจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้

### 3.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น

$$N_{XY} = \{x : x \in I^+ \cup \{0\}\} \quad (3.3)$$

### 3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\text{Minimize} \left\{ N = \sum_{X,Y=1}^n N_{XY} \right\} \quad (3.4)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการกำหนดจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่าย ในขณะที่เดียวกันจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้ (เมื่อ  $n$  คือ จำนวนโหนดทั้งหมดที่มีในโครงข่าย)

## 3.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การแก้ปัญหา Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) เพื่อทำ optimization หาผลเฉลยจากสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตในหัวข้อที่ 3.2 โดยเลือกใช้โปรแกรม Xpress MP

[19] ในการประมวลผลเนื่องจากเนื่องจากโปรแกรมมีวิธีการใช้งานที่ง่าย และมีการประมวลผลที่รวดเร็วโดยมีรูปแบบการทำงานของโปรแกรมดังนี้

### 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

ในส่วนนี้เป็นการประกาศตัวแปรที่ต้องใช้ในชุดอสมการ โดยชนิดของตัวแปรที่ใช้จะเป็นชนิดทั่ว ๆ ไป คือ ชนิด mpvar ซึ่งมีรูปแบบการประกาศตัวแปรเช่น X:mpvar เป็นต้น

#### 3.3 คำสั่งจบการประกาศตัวแปร

คำสั่งจบการประกาศตัวแปรเป็นการจบขอบเขตในการประกาศตัวแปร เพื่อให้โปรแกรมเริ่มเข้าสู่ส่วนชุดอสมการ รูปแบบคำสั่งจบการประกาศตัวแปรคือ end-declarations

### ส่วนที่ 4 ชุดอสมการกำหนดขอบเขต

ในส่วนนี้จะเป็นการใส่ชุดสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงและเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันซึ่งจะเป็นการกำหนดขอบเขตค่าตัวแปร จากนั้นจึงใช้โปรแกรมหาค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ออกมา รูปแบบชุดข้อมูลจึงเป็นรูปแบบเดียวกับชุดอสมการในหัวข้อเงื่อนไขขอบเขตของข่ายเชื่อมโยงและเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน

### ส่วนที่ 5 ประกาศตัวแปรจำนวนเต็ม

จำนวนหน่วยขดเซยดีสเพอร์ชันที่ได้ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงพิจารณาเป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจึงต้องเขียนคำสั่งเพิ่มเพื่อกำหนดให้จำนวนหน่วยขดเซยดีสเพอร์ชันเป็นจำนวนเต็ม รูปแบบการกำหนดตัวแปรให้เป็นจำนวนเต็มเช่น X is\_integer เป็นต้น

### ส่วนที่ 6 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

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

### ส่วนที่ 7 จบโปรแกรม

เมื่อเราเขียนโปรแกรมเสร็จแล้ว จำเป็นต้องเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมรู้ว่าข้อมูลที่เราต้องการเขียนเสร็จสิ้นแล้ว โปรแกรมจึงดำเนินการหาค่าตัวแปรที่ต้องการได้ รูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการจบโปรแกรมคือ end-model

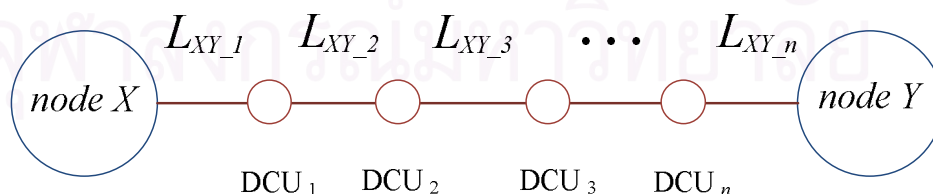
ผลเฉลยที่ได้เราจะได้จากอัลกอริทึมการวางแผนหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งมีดังนี้

1. จำนวนหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นในแต่ละเส้นใยแสง
2. ค่าดีสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่นที่ทุกโหนดปลายทางภายในโครงข่าย

นำผลเฉลยที่ได้จากการดำเนินการของโปรแกรมมาใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงโดยการคำนวณอย่างละเอียดจะนำเสนอในส่วนถัดไปบทที่ 3 และ บทที่ 4

### 3.4 การคำนวณตำแหน่งของหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้น

การกำหนดตำแหน่งหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นลงในโครงข่าย จะนำผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3 มาใช้คำนวณเพื่อระบุตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย โดยเราจะวางแผนหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นที่มีค่าดีสเพอร์ชันสะสมสูงถึงค่า  $D_{max}$  โดยการชดเชยดีสเพอร์ชันของหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.5) ดังนี้



รูปที่ 3.3. ตำแหน่งของหน่วยผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชั้นจำนวน  $n$  ตัวบนข่ายเชื่อมโยง XY

$$\begin{aligned}
D_{acXZi} + (D_i \times L_{XY\_1}) &= D_{XY\_1i} \\
D_{XY\_1i} + D_{compi} + (D_i \times L_{XY\_2}) &= D_{XY\_2i} \\
D_{XY\_2i} + D_{compi} + (D_i \times L_{XY\_3}) &= D_{XY\_3i} \\
&\vdots \\
D_{XY\_(n-2)i} + D_{compi} + (D_i \times L_{XY\_(n-1)}) &= D_{XY\_(n-1)i} \\
D_{XY\_(n-1)i} + D_{compi} + (D_i \times L_{XY\_n}) &= D_{acYZi}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

- โดย  $DCU_n$  คือ หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวที่  $n$  บนข่ายเชื่อมโยง XY
- $L_{XY\_n}$  คือ ระยะทางระหว่างหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวที่  $n-1$  และ  $n$  บนข่ายเชื่อมโยง XY
- $D_{XY\_ni}$  คือ ดิสเพอร์ชันสะสมก่อนวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวที่  $n$  บนข่ายเชื่อมโยง XY เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ส่งมาจากโหนดต้นทาง Z (subscript's' สำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง)

ในสมการที่ (3.5) ค่าดิสเพอร์ชันสะสม  $D_{acXZi}$  ที่โหนดปลายทาง X ของชุดสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) ที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง Z จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสง SMF ความยาว  $L_{XY\_1}$  เป็นค่าเท่ากับ  $D_i \times L_{XY\_1}$  ได้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสม  $D_{XY\_1i}$  ในกรณีที่มีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นที่มีค่า  $D_{XY\_1i}$  เพิ่มสูงจนถึงค่า  $D_{max}$  เราจะวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวแรก  $DCU_1$  บนข่ายเชื่อมโยง XY ทันที จากนั้นดิสเพอร์ชันสะสมจะถูกชดเชยด้วยค่า  $D_{compi}$  ของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน  $DCU_1$  ขั้นตอนการชดเชยดิสเพอร์ชันจะทำซ้ำไปจนถึงตำแหน่งของ  $DCU_n$  ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดทั้งข่ายเชื่อมโยง XY สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน สุดท้ายดิสเพอร์ชันสะสมของทุกชุดสัญญาณจะเพิ่มขึ้นด้วยค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสง SMF ความยาว  $L_{XY\_n}$  เป็นค่าเท่ากับ  $D_i \times L_{XY\_n}$  ได้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมสิ้นสุดที่โหนดปลายทาง Y คือค่า  $D_{acYZi}$

### 3.4.1 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงาน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงทำงาน จะพิจารณาแยกอิสระจากการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานจะพิจารณาจากผลเฉลี่ยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยง รูปแบบของการส่งผ่าน

สัญญาณความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงทำงาน และค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นที่โนดต้นทางในแต่ละ  
 ละเอียดเชื่อมโยงที่ได้จากการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตในหัวข้อที่ 3.3 มาใช้ในการ  
 คำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละละเอียด  
 เชื่อมโยง โดยเราจะวางอุปกรณ์ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาว  
 คลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมสูงถึงค่า  $D_{\max}$

### 3.4.2 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงสำรองทั้งชนิด NSC-  
 DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงสำรองจะพิจารณาจากผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน  
 น้อยสุดบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละละเอียดเชื่อมโยง รูปแบบของการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่น  
 บนเส้นใยแสงสำรอง และค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นที่โนดต้นทางในแต่ละละเอียดเชื่อมโยงที่ได้จาก  
 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตในหัวข้อที่ 3.3 โดยนำผลจากตำแหน่งของหน่วยชดเชย  
 ดิสเพอร์ชันที่วางบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละละเอียดเชื่อมโยงมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่  
 เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรองด้วย เนื่องจากการกู้คืนสัญญาณที่  
 เสียหายตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection จะเกิดทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและ  
 เส้นใยแสงสำรอง โดยเราจะวางอุปกรณ์ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่ง  
 ความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมสูงถึงค่า  $D_{\max}$

## บทที่ 4

### ระเบียบขั้นตอนวิธีและผลเฉลยการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน กรณีทีโครงข่ายทำงานปกติ

ในบทนี้นำเสนอระเบียบขั้นตอนวิธีและผลเฉลยของการจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีทีโครงข่ายทำงานปกติตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้เสนอในบทที่ 3 ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 พร้อมทั้งอธิบายการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

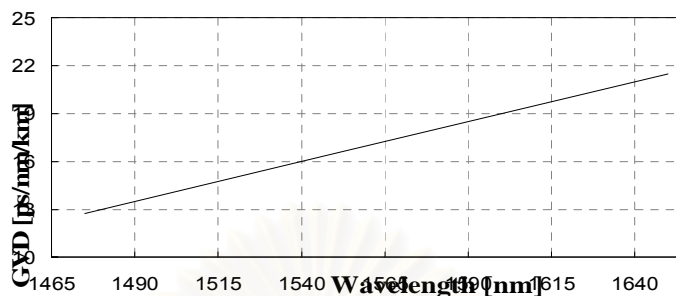
#### 4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย

- 1) ทำการสร้างอัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเงื่อนไขที่ไม่มีผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
- 2) หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 กิโลเมตร [30]
- 3) กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 และโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN เป็นโครงข่ายลักษณะวงแหวนตามมาตรฐาน SONET/SDH สามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงาน

#### 4.2 การจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง

##### 4.2.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองโครงข่าย

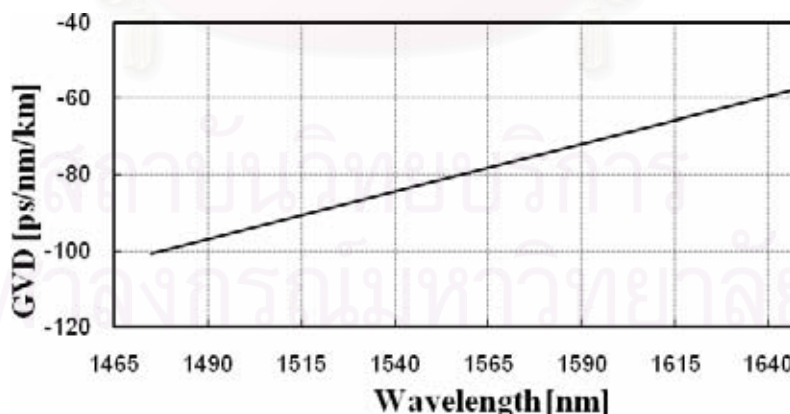
การวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน โดยใช้เส้นใยแสงแบบโหมดคลื่นเดี่ยวมีค่าดิสเพอร์ชัน ( $D$ ) เท่ากับ  $16.5 \text{ ps/km/nm}$  ที่ความยาวคลื่น  $1,550 \text{ nm}$  และมีความชันค่าดิสเพอร์ชัน ( $D'$ ) ที่  $0.05 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$



รูปที่ 4.1 การกระจายความเร็วกลุ่มของ SMF ITU-T G.652 [30]

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ ส่วนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในการทดลองใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน 2 ชนิดคือ

- 1) Non slope compensated dispersion compensating unit: NSC-DCU มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ  $-82 \text{ ps/km/nm}$  ที่  $1550 \text{ nm}$  ด้วยความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่  $0.25 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  รูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับดิสเพอร์ชันของ NSC-DCU



รูปที่ 4.2 การกระจายความเร็วกลุ่มของ NSC-DCU [30]

การคำนวณหาค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ NSC-DCU ในการจำลองโครงข่ายเราจะคำนวณหาความยาวของเส้นใยแสง NSC-DCU จากสมการที่ (4.1)

$$L_{NSC-DCU} = \frac{(D_{SMF@1,550nm}) \times (DL)}{(D_{NSC-DCU@1,550nm})} \quad (4.1)$$

หน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันระบุค่าชดเชยในหน่วย ps/km/nm แต่เนื่องจากลักษณะหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่เป็นอุปกรณลักษณะ black block ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยซึ่งบรรจุอยู่ใน NSC-DCU โดยพิจารณาจากข้อมูลในรูปที่ 4.2 ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ของ SMF มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm ซึ่ง หน่วยชดเชยสัญญาณมีค่า dispersion level เท่ากับ 100 km [30] ดังนั้น หน่วยชดเชยนี้จะให้ดิสเพอร์ชันเท่ากับ -1650 ps/km/nm และที่ความยาวคลื่น 1550 nm NSC-DCU มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ -82 ps/km/nm ดังนั้นเราสามารถทำการคำนวณหาระยะของ NSC-DCU ได้จาก

$$L_{NSC-DCU} = \frac{(-16.50) \times (100)}{(-82)} = 20.122km \quad (4.2)$$

ดังนั้นความยาวของ NSC-DCU ที่เลือกใช้ในการจำลองระบบคือ 20 km

2) Slope compensated dispersion compensating unit: SC-DCU มีคุณสมบัติชดเชยความชันของดิสเพอร์ชันได้ 100% เพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ G.652 ในระยะทาง 100 km ลักษณะหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 4.3 และมีรายละเอียดที่สำคัญสำหรับความยาวในตารางที่ 4.1 เพื่อนำมากำหนดค่าดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ SC-DCU



รูปที่ 4.3 Avianex's 100% SC-DCU [30]



ตารางที่ 4.1 รายละเอียดที่สำคัญสำหรับมอดูลความยาวทั่วไป [30]

modul description	measured dispersion [ ps / km ]					
	at 1,525 nm		at 1,545 nm		at 1,565 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

การคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ SC-DCU จะใช้ข้อมูลจากเอกสารรายละเอียดหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน การแทนค่าสมการบทนิยามของการชดเชยความชันในดิสเพอร์ชัน (definition of dispersion slope compensation) แสดงไว้ในสมการที่ (4.3) โดยแทน  $K_{NDSF}^{1545} = 275$  nm [30] ตามสมการที่ (4.4)

$$SC = \frac{k_{NDSK}^{1545}}{K_{DCF}^{1545}} = \frac{\left( \frac{D_{NDSF}^{1545}}{S_{NDSF}^{1545}} \right)}{\left( \frac{D_{DSF}^{1545}}{S_{DSF}^{1545}} \right)} = 1 \quad (4.3)$$

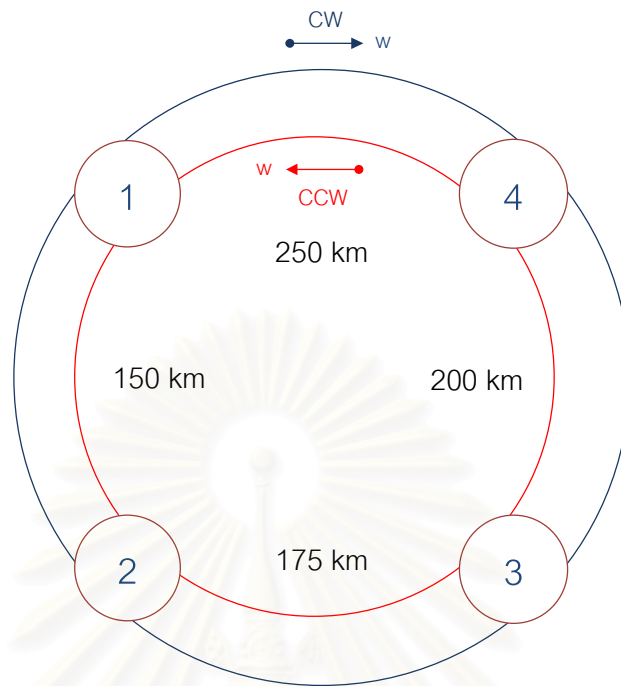
$$S_{DCF}^{1545} = \frac{D_{DCF}^{1545}}{275} \text{ ps/nm}^2 \quad (4.4)$$

จากตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นที่ 1,545 nm มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเฉลี่ย -1,641 ps/nm ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาความชันดิสเพอร์ชันสะสมได้ดังนี้

$$S_{DCF}^{1545} = \frac{-1641}{275} = -5.9673 \text{ ps/nm}^2 \quad (4.5)$$

จากคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของเส้นใยแสง SMF และหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิดสามารถหาค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นค่าอื่น ๆ ด้วยวิธีเดียวกันโดยใช้ความสัมพันธ์สมการเส้นตรง (linear equation)

#### 4.2.2 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.4 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ในการทดลองกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เป็นโครงข่ายวงแหวนตามมาตรฐาน SONET/SDH ประกอบขึ้นด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง (link) 4 โหนด (node) ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงานมีระยะทางรวม 775 km ระเบียบขั้นตอนวิธีการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการวางแผนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันน้อยสุด กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติอธิบายได้ดังนี้

##### 4.2.2.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

ในขั้นตอนนี้เป็นการระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดด้วยระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (shortest-path) โดยเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีที่โครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติตามแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.1

#### 4.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณในตารางที่ 3.1 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตเซตเซยค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทางใด ๆ ทั้งกรณีที่มีและไม่มีโนดคั่นกลาง, เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน, การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มและการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

##### 4.2.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนด

นำข้อมูลในตารางที่ 3.1 มาเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตเซตเซยค่าดีสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่นจากทุกโนดต้นทาง  $Z$  ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง  $XY$  ดังนี้

1) กรณีที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโนด 1;  $Z = 1$

$$1\_2 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac21i}$$

$$1\_2\_3 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) = D_{ac31i}$$

$$1\_4 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14}) = D_{ac41i}$$

2) กรณีที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโนด 2;  $Z = 2$

$$2\_1 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac12i}$$

$$2\_3 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) = D_{ac32i}$$

$$2\_3\_4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac42i}$$

3) กรณีที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโนด 3;  $Z = 3$

$$3\_2\_1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac13i}$$

$$3\_2 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) = D_{ac23i}$$

$$3\_4 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac43i}$$

$$\begin{aligned}
 4) \quad & \text{กรณีที่ถูกสัญญาณความยาวคลื่น } \lambda_i \text{ ถูกส่งมาจากโหนด 4; } Z = 4 \\
 4\text{---}1 \quad & 0 + (D_i \times 250) + (D_{\text{compi}} \times N_{41}) = D_{\text{ac}14i} \\
 4\text{---}3\text{---}2 \quad & 0 + (D_i \times 200) + (D_{\text{compi}} \times N_{43}) + (D_i \times 175) + (D_{\text{compi}} \times N_{32}) = D_{\text{ac}24i} \\
 4\text{---}3 \quad & 0 + (D_i \times 200) + (D_{\text{compi}} \times N_{43}) = D_{\text{ac}34i}
 \end{aligned}$$

ในการจำลองการส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติใช้สัญญาณ 3 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm เราสามารถคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SMF ได้จากรายละเอียดของ SMF ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 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-DCU สามารถคำนวณได้จากรายละเอียดของ NSC-DCU ตามรูปที่ 4.2 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1,550.12 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{\text{comp}1550.12[\text{NSC-DCU}]} = (-82) + 0.25 \times (1550.12 - 1550) = -81.97 \text{ ps/nm/km}$$

นำค่านี้มาคูณกับความยาว NSC-DCU ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.2) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm เราจะได้ค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของ NSC-DCU ดังนี้

$$D_{\text{comp}1550.12[\text{NSC-DCU}]} = \{[(-82) + 0.25 \times (1550.12 - 1550)] \times 20\} = -1639.4 \text{ ps/nm}$$

สุดท้าย การคำนวณค่าชดเชยดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SC-DCU สามารถคำนวณได้จากรายละเอียดของ SC-DCU ตามตารางที่ 4.1 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1550.12 nm คำนวณจากเอกสารรายละเอียดอุปกรณ์ที่ความยาวคลื่น 1545 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1641 ps/nm และความชันดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ -5.9673 ps/nm<sup>2</sup> ดังนั้น

$$D_{\text{comp}1550.12[\text{SC-DCU}]} = (-1521) + (-5.9673) \times (1550.12 - 1545) = 1671.55 \text{ ps/nm}$$

ตารางที่ 4.2 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NSC-DCU และ SC-DCU ที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1  
กรณีโครงข่ายทำงานปกติ

	$\lambda_i$ (nm)	$D_i$ (ps/nm/km)	$D_{comp_i}$ (ps/nm)	
			NSC-DCU	SC-DCU
$i = 1$	1549.32	16.466	-1643.40	-1666.78
$i = 2$	1550.12	16.506	-1639.40	-1671.55
$i = 3$	1550.92	16.546	-1635.40	-1676.33

จากนั้นสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นโดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.2 จากทุกโนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงรูปแบบสมการบนข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.3 สมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่าน  
สัญญาณ 3 ความยาวคลื่นกรณีโครงข่ายที่ 1 ทำงานปกติ

การส่งสัญญาณ	รูปแบบสมการ
1__2	$0 + (D_1 \times 150) + (D_{comp1} \times N_{12}) = D_{ac211}$ $0 + (D_2 \times 150) + (D_{comp2} \times N_{12}) = D_{ac212}$ $0 + (D_3 \times 150) + (D_{comp3} \times N_{12}) = D_{ac213}$
1__2__3	$0 + (D_1 \times 150) + (D_{comp1} \times N_{12}) + (D_1 \times 175) + (D_{comp1} \times N_{23}) = D_{ac311}$ $0 + (D_2 \times 150) + (D_{comp2} \times N_{12}) + (D_2 \times 175) + (D_{comp2} \times N_{23}) = D_{ac312}$ $0 + (D_3 \times 150) + (D_{comp3} \times N_{12}) + (D_3 \times 175) + (D_{comp3} \times N_{23}) = D_{ac313}$
1__4	$0 + (D_1 \times 250) + (D_{comp1} \times N_{14}) = D_{ac411}$ $0 + (D_2 \times 250) + (D_{comp2} \times N_{14}) = D_{ac412}$ $0 + (D_3 \times 250) + (D_{comp3} \times N_{14}) = D_{ac413}$
2__1	$0 + (D_1 \times 150) + (D_{comp1} \times N_{21}) = D_{ac121}$ $0 + (D_2 \times 150) + (D_{comp2} \times N_{21}) = D_{ac122}$ $0 + (D_3 \times 150) + (D_{comp3} \times N_{21}) = D_{ac123}$
2__3	$0 + (D_1 \times 175) + (D_{comp1} \times N_{23}) = D_{ac321}$ $0 + (D_2 \times 175) + (D_{comp2} \times N_{23}) = D_{ac322}$ $0 + (D_3 \times 175) + (D_{comp3} \times N_{23}) = D_{ac323}$

2__3__4	$0 + (D_1 \times 175) + (D_{comp1} \times N_{23}) + (D_1 \times 200) + (D_{comp1} \times N_{34}) = D_{ac421}$ $0 + (D_2 \times 175) + (D_{comp2} \times N_{23}) + (D_2 \times 200) + (D_{comp2} \times N_{34}) = D_{ac422}$ $0 + (D_3 \times 175) + (D_{comp3} \times N_{23}) + (D_3 \times 200) + (D_{comp3} \times N_{34}) = D_{ac423}$
3__2__1	$0 + (D_1 \times 175) + (D_{comp1} \times N_{32}) + (D_1 \times 150) + (D_{comp1} \times N_{21}) = D_{ac131}$ $0 + (D_2 \times 175) + (D_{comp2} \times N_{32}) + (D_2 \times 150) + (D_{comp2} \times N_{21}) = D_{ac132}$ $0 + (D_3 \times 175) + (D_{comp3} \times N_{32}) + (D_3 \times 150) + (D_{comp3} \times N_{21}) = D_{ac133}$
3__2	$0 + (D_1 \times 175) + (D_{comp1} \times N_{32}) = D_{ac231}$ $0 + (D_2 \times 175) + (D_{comp2} \times N_{32}) = D_{ac232}$ $0 + (D_3 \times 175) + (D_{comp3} \times N_{32}) = D_{ac233}$
3__4	$0 + (D_1 \times 200) + (D_{comp1} \times N_{34}) = D_{ac431}$ $0 + (D_2 \times 200) + (D_{comp2} \times N_{34}) = D_{ac432}$ $0 + (D_3 \times 200) + (D_{comp3} \times N_{34}) = D_{ac433}$
4__1	$0 + (D_1 \times 250) + (D_{comp1} \times N_{41}) = D_{ac141}$ $0 + (D_2 \times 250) + (D_{comp2} \times N_{41}) = D_{ac142}$ $0 + (D_3 \times 250) + (D_{comp3} \times N_{41}) = D_{ac143}$
4__3__2	$0 + (D_1 \times 200) + (D_{comp1} \times N_{43}) + (D_1 \times 175) + (D_{comp1} \times N_{32}) = D_{ac241}$ $0 + (D_2 \times 200) + (D_{comp2} \times N_{43}) + (D_2 \times 175) + (D_{comp2} \times N_{32}) = D_{ac242}$ $0 + (D_3 \times 200) + (D_{comp3} \times N_{43}) + (D_3 \times 175) + (D_{comp3} \times N_{32}) = D_{ac243}$
4__3	$0 + (D_1 \times 200) + (D_{comp1} \times N_{43}) = D_{ac341}$ $0 + (D_2 \times 200) + (D_{comp2} \times N_{43}) = D_{ac342}$ $0 + (D_3 \times 200) + (D_{comp3} \times N_{43}) = D_{ac343}$

#### 4.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณ ความยาวคลื่นที่ทุกโนดปลายทาง Y ต้องมีค่าไม่เกิน  $D_{max}$  เนื่องจาก  $D_{max}$  คือ ค่าการกระจายความถี่มากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณผิดเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยความผิดเพี้ยนให้กลับมาสัญญาณเดิมได้ ในการทดลองนี้เลือกค่า  $D_{max} = 1600$  ps/nm [30] โดยชุดรูปแบบบอสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 3 ความยาวคลื่น  
กรณีโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ทำงานปกติ

รูปแบบการส่งสัญญาณ	รูปแบบสมการ
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac211} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac212} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac213} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac311} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac312} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac313} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac411} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac412} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac413} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac121} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac122} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac123} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac321} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac322} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac323} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac421} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac422} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac423} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac131} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac132} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac133} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac231} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac232} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac233} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac431} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac432} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 3 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac433} \leq 1600$

$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac141} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac142} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac143} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac241} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac242} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac243} \leq 1600$
$\lambda_1$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac341} \leq 1600$
$\lambda_2$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac342} \leq 1600$
$\lambda_3$ ส่งจาก โหนด 4 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac343} \leq 1600$

#### 4.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มในแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันที่วางลงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น

#### 4.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่ายในขณะเดียวกันจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

#### 4.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

ปัญหา MILP สำหรับการทำ optimization เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นกลาง 1550.12 nm ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ คือจำนวนหน่วยชุดเซยติสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย และค่าติสเพอร์ชันสะสมที่ทุกโหนดปลายทาง Y แสดงได้ดังตารางที่ 4.5



ตารางที่ 4.5 ผลเฉลยจากการทำ MILP optimization กรณีที่โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ทำงานปกติ

	ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	NSC-DCU	SC-DCU		NSC-DCU	SC-DCU
$D_{ac211}$	-816.9	803.12	$D_{ac131}$	421.25	351.11
$D_{ac212}$	-802.9	804.35	$D_{ac132}$	446.25	349.8
$D_{ac213}$	-788.9	805.57	$D_{ac133}$	471.25	348.46
$D_{ac311}$	421.25	351.11	$D_{ac231}$	1238.15	-452.01
$D_{ac312}$	446.25	349.8	$D_{ac232}$	1249.15	-454.55
$D_{ac313}$	471.25	348.46	$D_{ac233}$	1260.15	-457.11
$D_{ac411}$	829.7	782.94	$D_{ac431}$	6.4	-40.36
$D_{ac412}$	847.7	783.4	$D_{ac432}$	22.4	-41.9
$D_{ac413}$	865.7	783.84	$D_{ac433}$	38.4	-43.46
$D_{ac121}$	-816.9	803.12	$D_{ac141}$	829.7	782.94
$D_{ac122}$	-802.9	804.35	$D_{ac142}$	847.7	783.4
$D_{ac123}$	-788.9	805.57	$D_{ac143}$	865.7	783.84
$D_{ac321}$	1238.15	-452.01	$D_{ac241}$	1244.55	-492.37
$D_{ac322}$	1249.15	-454.55	$D_{ac242}$	1271.55	-496.45
$D_{ac323}$	1260.15	-457.11	$D_{ac243}$	1298.55	-500.57
$D_{ac421}$	1244.55	-492.37	$D_{ac341}$	6.4	-40.36
$D_{ac422}$	1271.55	-496.45	$D_{ac342}$	22.4	-41.9
$D_{ac423}$	1298.55	-500.57	$D_{ac343}$	38.4	-43.46
$N_{12}$	2	1	$N_{43}$	2	2
$N_{21}$	2	1	$N_{34}$	2	2
$N_{32}$	1	2	$N_{14}$	2	2
$N_{23}$	1	2	$N_{41}$	2	2
			$N_{min}$	14	14

ระเบียบขั้นตอนวิธีการหาจำนวนหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU จากผลเฉลยในตารางที่ 4.5 แสดงจำนวนหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่ายโดยมีการใช้จำนวนหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันเท่ากันทั้งสองชนิด นอกจากนี้พบว่าทุกค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทาง  $Y$  ใด ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

#### 4.2.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยขีดเซยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย จะนำผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.2.2.3 มาใช้คำนวณเพื่อระบุตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย เราจะวางอุปกรณ์ขีดเซยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมสูงถึงค่า  $D_{\max}$

##### 4.2.2.4.1 การวางตำแหน่ง NSC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

การกำหนดตำแหน่งของหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันแบบ NSC-DCU บนข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ภายในโครงข่ายที่ 1 จะพิจารณาจำนวนหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงโดยพิจารณาแต่ละข่ายเชื่อมโยงแยกจากกันโดยอิสระว่ามีรูปแบบของการส่งผ่านสัญญาณใดผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นบ้าง จากนั้นพิจารณาผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทางที่ได้รับจากขั้นตอนที่ 4.2.2.3 เพื่อระบุบางค่าของดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทางนี้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงซึ่งมีบางกรณีทีในแต่ละข่ายเชื่อมโยงอาจมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงมากกว่าหนึ่งค่าเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีการส่งผ่านสัญญาณมากกว่าหนึ่งรูปแบบ การกำหนดตำแหน่งของหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันจะถูกกำหนดด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่ามากที่สุด รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณ จำนวนหน่วยขีดเซยดิสเพอร์ชันและค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีโครงข่ายที่ 1 ทำงานปกติ มีดังนี้

ตารางที่ 4.6 รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณ และค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้น  
ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีโครงข่ายที่ 1 ทำงานปกติ

ข่ายเชื่อมโยง	การส่งสัญญาณ	ดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้น (ps/nm) ของข่ายเชื่อมโยง
$L_{12}$	จากโนด 1 ไป 2	0
$L_{21}$	จากโนด 2 ไป 1	0
	จากโนด 3 ไป 1	$D_{ac23i}$
$L_{23}$	จากโนด 1 ไป 3	$D_{ac21i}$
	จากโนด 2 ไป 3	0
$L_{32}$	จากโนด 3 ไป 2	0
	จากโนด 4 ไป 2	$D_{ac34i}$
$L_{34}$	จากโนด 2 ไป 4	$D_{ac32i}$
	จากโนด 3 ไป 4	0
$L_{43}$	จากโนด 4 ไป 3	0
$L_{41}$	จากโนด 4 ไป 1	0
$L_{14}$	จากโนด 1 ไป 4	0

ขั้นตอนต่อไปนำข้อมูลจากตารางที่ 4.6 มาเขียนสมการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU โดยแทนค่าทุกชุดสัญญาณความยาวคลื่นจากทุกโนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

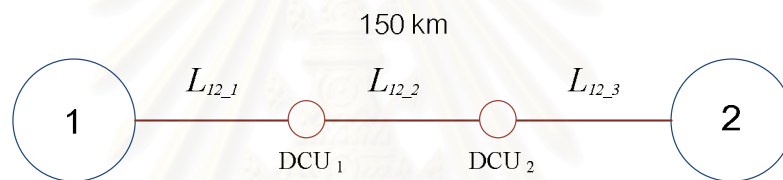
ตารางที่ 4.7 สมการชุดเซยติสเฟอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงด้วย NSC-DCU

ข่ายเชื่อมโยง [จำนวน NSC-DCU]	รูปแบบการส่ง สัญญาณ	รูปแบบสมการ
ข่ายเชื่อมโยง 12 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 1 ไป 2	$0 + D_i \times L_{12\_1} = D_{12\_1i}$ $D_{12\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{12\_2} = D_{12\_2i}$ $D_{12\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{12\_3} = D_{ac2i}$
ข่ายเชื่อมโยง 21 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 2 ไป 1	$0 + D_i \times L_{21\_1} = D_{21\_1i}$ $D_{21\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{21\_2} = D_{21\_2i}$ $D_{21\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{21\_3} = D_{ac12i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 3 ไป 1	$D_{ac23i} + D_i \times L_{21\_1} = D_{21\_1i}$ $D_{21\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{21\_2} = D_{21\_2i}$ $D_{21\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{21\_3} = D_{ac13i}$
ข่ายเชื่อมโยง 23 [1]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด1 ไป 3	$D_{ac21i} + D_i \times L_{23\_1} = D_{23\_1i}$ $D_{23\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{23\_2} = D_{ac31i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 2 ไป 3	$0 + D_i \times L_{23\_1} = D_{23\_1i}$ $D_{23\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{23\_2} = D_{ac32i}$
ข่ายเชื่อมโยง 32 [1]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด3 ไป 2	$0 + D_i \times L_{32\_1} = D_{32\_1i}$ $D_{32\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{32\_2} = D_{ac23i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 4 ไป 2	$D_{ac34i} + D_i \times L_{32\_1} = D_{32\_1i}$ $D_{32\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{32\_2} = D_{ac24i}$
ข่ายเชื่อมโยง 34 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด2 ไป 4	$D_{ac32i} + D_i \times L_{34\_1} = D_{34\_1i}$ $D_{34\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_2} = D_{34\_2i}$ $D_{34\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_3} = D_{ac42i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 3 ไป 4	$0 + D_i \times L_{34\_1} = D_{34\_1i}$ $D_{34\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_2} = D_{34\_2i}$ $D_{34\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_3} = D_{ac43i}$
ข่ายเชื่อมโยง 43 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 4 ไป 3	$0 + D_i \times L_{43\_1} = D_{43\_1i}$ $D_{43\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{43\_2} = D_{43\_2i}$ $D_{43\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{43\_3} = D_{ac34i}$
ข่ายเชื่อมโยง 41 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 4 ไป 1	$0 + D_i \times L_{41\_1} = D_{41\_1i}$ $D_{41\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{41\_2} = D_{41\_2i}$ $D_{41\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{41\_3} = D_{ac14i}$

ข่ายเชื่อมโยง 14 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 1 ไป 4	$0 + D_i \times L_{14\_1} = D_{14\_1i}$ $D_{14\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{14\_2} = D_{14\_2i}$ $D_{14\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{14\_3} = D_{ac4li}$
-------------------------	----------------------------------	--

จากนั้นทำการแทนผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทางจากรายที่ 4.5 ที่เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ลงในสมการชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงด้วย NSC-DCU ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ส่วนการระบุค่าดิสเพอร์ชันของ SMF และ NSC-DCU ของแต่ละความยาวคลื่นจะใช้ข้อมูลจากรายที่ 4.2 สุดท้ายคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงโดยมีขั้นตอนวิธีดังต่อไปนี้

1) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 12



1.1) กรณีสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโนดต้นทางที่ 1 ไปยังโนดปลายทางที่ 2

$$0 + (16.466 \times L_{12\_1}) = D_{12\_11}$$

$$D_{12\_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{12\_2}) = D_{12\_21}$$

$$D_{12\_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{12\_3}) = D_{ac211}$$

$$0 + (16.506 \times L_{12\_1}) = D_{12\_12}$$

$$D_{12\_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{12\_2}) = D_{12\_22}$$

$$D_{12\_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{12\_3}) = D_{ac212}$$

$$0 + (16.546 \times L_{12\_1}) = D_{12\_13}$$

$$D_{12\_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{12\_2}) = D_{12\_23}$$

$$D_{12\_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{12\_3}) = D_{ac213}$$

ชัดเจนว่าค่า  $L_{12\_1}$  ถูกกำหนดด้วย  $D_{12\_13}$  เนื่องจากดิสเพอร์ชันสะสมของช่องสัญญาณความยาวคลื่นสูงสุด (maximum wavelength :  $\lambda_{max}$ ) จะเป็นค่าแรกที่เพิ่มถึง  $D_{max}$  ทำให้เราสามารถหา

$L_{12\_1}, L_{12\_2}$  และ  $L_{12\_3}$  จากชุดสมการของ  $\lambda_{max}$  ได้ดังนี้

$$0 + (16.546 \times L_{12\_1}) = D_{12\_13} = |D_{max}|$$

$$0 + (16.546 \times L_{12\_1}) = 1600$$

$$L_{12\_1} = 96.64 \text{ km}$$

เนื่องจากค่า  $D_{12_{-13}} > D_{12_{-12}} > D_{12_{-11}}$  ในทำนองเดียวกันกับการหาค่า  $L_{12_{-1}}$  เราสามารถหา,  $L_{12_{-2}}$  จากชุดสมการของ  $\lambda_{\max}$  ได้ดังนี้

$$(-35.4) + (16.546 \times L_{12_{-2}}) = D_{12_{-23}} = |D_{\max}|$$

$$L_{12_{-2}} = 98.84 \text{ km}$$

แต่เนื่องจากระยะทางของข่ายเชื่อมโยง  $L_{12} = 150 \text{ km}$  เราสามารถหาค่า  $L_{12_{-2}}$  และ  $L_{12_{-3}}$  ดังนี้

$$L_{12_{-2}} = 150 - 96.64 = 53.36 \text{ km}$$

$$L_{12_{-3}} = 0 \text{ km}$$

แทนค่าที่คำนวณได้กลับลงในชุดสมการชุดเซตดิสเพอร์ชันทั้ง 3 ความยาวคลื่นในข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  จะเห็นว่าค่าที่ได้นั้นรองรับผลเฉลยของทุกช่องสัญญาณความยาวคลื่นตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

$$0 + (16.466 \times 96.64) = 1591.27$$

$$1591.27 + (-1643.4) + (16.466 \times 53.36) = 826.5$$

$$826.5 + (-1643.4) + (16.466 \times 0) = -816.9$$

$$0 + (16.506 \times 96.64) = 1595.14$$

$$1595.14 + (-1639.4) + (16.506 \times 53.36) = 836.5$$

$$836.5 + (-1639.4) + (16.506 \times 0) = -802.9$$

$$0 + (16.546 \times 96.64) = 1600$$

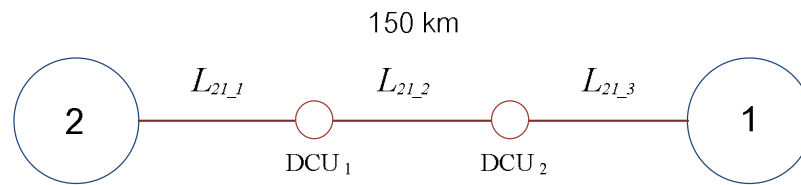
$$1600 + (-1635.4) + (16.546 \times 53.36) = 846.5$$

$$846.5 + (-1635.4) + (16.546 \times 0) = -788.9$$

จากขั้นตอนวิธีการกำหนดตำแหน่งของ NSC-DCU ในข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  พบว่าค่าพารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดสมการของความยาวคลื่นที่มีค่ามากที่สุด ดังนั้นในส่วนของชุดสมการชุดเซตดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 21



2.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 2 ไปยังโหนดปลายทางที่ 1

$$0 + (16.466 \times L_{21_1}) = D_{21_11}$$

$$D_{21_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{21_2}) = D_{21_21}$$

$$D_{21_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{21_3}) = D_{121}$$

$$0 + (16.506 \times L_{21_1}) = D_{21_12}$$

$$D_{21_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{21_2}) = D_{21_22}$$

$$D_{21_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{21_3}) = D_{ac122}$$

$$0 + (16.546 \times L_{21_1}) = D_{21_13}$$

$$D_{21_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{21_2}) = D_{21_23}$$

$$D_{21_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{21_3}) = D_{ac123}$$

2.2) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 3 ไปยังโหนดปลายทางที่ 1

$$D_{ac231} + (16.466 \times L_{21_1}) = D'_{21_11}$$

$$D'_{21_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{21_2}) = D'_{21_21}$$

$$D'_{21_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{21_3}) = D_{ac131}$$

$$D_{ac232} + (16.506 \times L_{21_1}) = D'_{21_12}$$

$$D'_{21_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{21_2}) = D'_{21_22}$$

$$D'_{21_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{21_3}) = D_{ac132}$$

$$D_{ac233} + (16.546 \times L_{21_1}) = D'_{21_13}$$

$$D'_{21_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{21_2}) = D'_{21_23}$$

$$D'_{21_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{21_3}) = D_{ac133}$$

ชัดเจนว่าค่า  $L_{21_1}$  ถูกกำหนดด้วย  $D'_{21_13}$  เนื่องจากค่าดิสเพอร์ชันสะสม  $D_{ac233} = 1260.15$

ps/nm จะเป็นค่าแรกที่เพิ่มถึง  $D_{max}$  ทำให้เราสามารถหา  $L_{21_1}$ ,  $L_{21_2}$  และ  $L_{21_3}$  ได้ดังนี้

$$1260.15 + (16.546 \times L_{21_1}) = D'_{21_13} = |D_{max}|$$

$$1260.15 + (16.546 \times L_{21_1}) = 1600$$

$$L_{21_1} = 20.48 \text{ km}$$

เนื่องจากค่า  $D'_{21_{13}} > D'_{21_{12}} > D'_{21_{11}}$  ทำนองเดียวกันกับการหาค่า  $L_{21_{11}}$  ทำให้เราสามารถหา,  $L_{21_{12}}$  จากชุดสมการของ  $\lambda_{\max}$  ได้ดังนี้

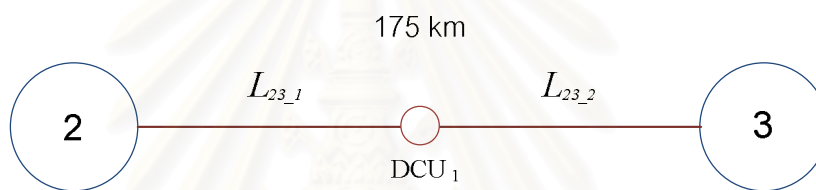
$$(-35.4) + (16.546 \times L_{21_{12}}) = D'_{21_{13}} = |D_{\max}|$$

$$L_{21_{12}} = 98.84 \text{ km}$$

$$L_{21_{13}} = 150 - 20.48 - 98.84 = 30.68 \text{ km}$$

จากระเบียบขั้นตอนวิธีที่อธิบายในกรณีของข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  และ  $L_{21}$  ข้างต้น เราสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันบนข่ายอื่น ๆ ที่เหลือภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธีเดียวกัน

### 3) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 23



3.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 1 ไปยังโหนดปลายทางที่ 3

$$D_{ac211} + (16.466 \times L_{23_{11}}) = D_{23_{11}}$$

$$D_{23_{11}} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{23_{12}}) = D_{ac311}$$

$$D_{ac212} + (16.506 \times L_{23_{11}}) = D_{23_{12}}$$

$$D_{23_{12}} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{23_{12}}) = D_{ac312}$$

$$D_{ac213} + (16.546 \times L_{23_{11}}) = D_{23_{13}}$$

$$D_{23_{13}} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{23_{12}}) = D_{ac313}$$

3.2) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 1 ไปยังโหนดปลายทางที่ 3

$$0 + (16.466 \times L_{23_{11}}) = D'_{23_{11}}$$

$$D'_{23_{11}} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{23_{12}}) = D_{ac321}$$

$$0 + (16.506 \times L_{23_{11}}) = D'_{23_{12}}$$

$$D'_{23_{12}} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{23_{12}}) = D_{ac322}$$

$$0 + (16.546 \times L_{23_{11}}) = D'_{23_{13}}$$

$$D'_{23_{13}} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{23_{12}}) = D_{ac323}$$



$$L_{23\_1} = 96.64 \text{ km}$$

$$L_{23\_2} = 78.36 \text{ km}$$

4) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง



4.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 3 ไปยังโหนดปลายทางที่ 2

$$0 + (16.466 \times L_{32\_1}) = D_{32\_11}$$

$$D_{32\_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{32\_2}) = D_{ac231}$$

$$0 + (16.506 \times L_{32\_1}) = D_{32\_12}$$

$$D_{32\_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{32\_2}) = D_{ac232}$$

$$0 + (16.546 \times L_{32\_1}) = D_{32\_13}$$

$$D_{32\_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{32\_2}) = D_{ac233}$$

4.2) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 4 ไปยังโหนดปลายทางที่ 2

$$D_{ac341} + (16.466 \times L_{32\_1}) = D'_{32\_11}$$

$$D'_{32\_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{32\_2}) = D_{ac241}$$

$$D_{ac342} + (16.506 \times L_{32\_1}) = D'_{32\_12}$$

$$D'_{32\_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{32\_2}) = D_{ac242}$$

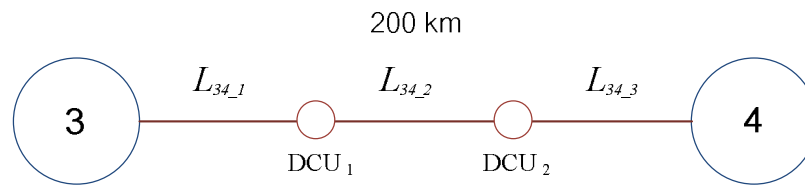
$$D_{ac343} + (16.546 \times L_{32\_1}) = D'_{32\_13}$$

$$D'_{32\_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{32\_2}) = D_{ac243}$$

$$L_{32\_1} = 94.32 \text{ km}$$

$$L_{32\_2} = 80.68 \text{ km}$$

5) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 34



5.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 2 ไปยังโหนดปลายทางที่ 4

$$D_{ac321} + (16.466 \times L_{34\_1}) = D_{34\_11}$$

$$D_{34\_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{34\_2}) = D_{34\_21}$$

$$D_{34\_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{34\_3}) = D_{ac421}$$

$$D_{ac322} + (16.506 \times L_{34\_1}) = D_{34\_12}$$

$$D_{34\_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{34\_2}) = D_{34\_22}$$

$$D_{34\_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{34\_3}) = D_{ac422}$$

$$D_{ac323} + (16.546 \times L_{34\_1}) = D_{34\_13}$$

$$D_{34\_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{34\_2}) = D_{34\_23}$$

$$D_{34\_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{34\_3}) = D_{ac423}$$

5.2) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 3 ไปยังโหนดปลายทางที่ 4

$$0 + (16.466 \times L_{34\_1}) = D'_{34\_11}$$

$$D'_{34\_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{34\_2}) = D'_{34\_21}$$

$$D'_{34\_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{34\_3}) = D_{ac431}$$

$$0 + (16.506 \times L_{34\_1}) = D'_{34\_12}$$

$$D'_{34\_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{34\_2}) = D'_{34\_22}$$

$$D'_{34\_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{34\_3}) = D_{ac432}$$

$$0 + (16.546 \times L_{34\_1}) = D'_{34\_13}$$

$$D'_{34\_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{34\_2}) = D'_{34\_23}$$

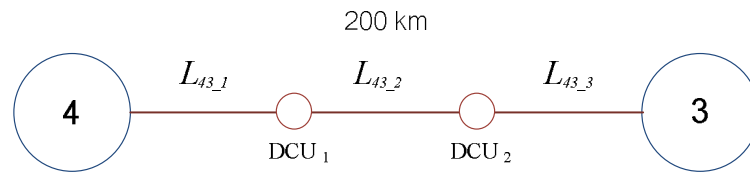
$$D'_{34\_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{34\_3}) = D_{ac433}$$

$$L_{34\_1} = 20.48 \text{ km}$$

$$L_{34\_2} = 98.84 \text{ km}$$

$$L_{34\_3} = 80.68 \text{ km}$$

6) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 43



6.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 4 ไปยังโหนดปลายทางที่ 3

$$0 + (16.466 \times L_{43_1}) = D_{43_11}$$

$$D_{43_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{43_2}) = D_{43_21}$$

$$D_{43_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{43_3}) = D_{ac341}$$

$$0 + (16.506 \times L_{43_1}) = D_{43_12}$$

$$D_{43_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{43_2}) = D_{43_22}$$

$$D_{43_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{43_3}) = D_{ac342}$$

$$0 + (16.546 \times L_{43_1}) = D_{43_13}$$

$$D_{43_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{43_2}) = D_{43_23}$$

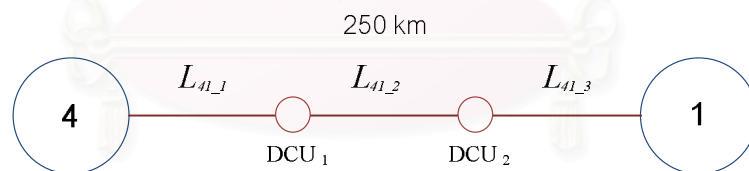
$$D_{43_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{43_3}) = D_{ac343}$$

$$L_{43_1} = 96.64 \text{ km}$$

$$L_{43_2} = 98.84 \text{ km}$$

$$L_{43_3} = 4.52 \text{ km}$$

7) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 41



7.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 4 ไปยังโหนดปลายทางที่ 1

$$0 + (16.466 \times L_{41_1}) = D_{41_11}$$

$$D_{41_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{41_2}) = D_{41_21}$$

$$D_{41_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{41_3}) = D_{ac141}$$

$$0 + (16.506 \times L_{41_1}) = D_{41_12}$$

$$D_{41_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{41_2}) = D_{41_22}$$

$$D_{41_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{41_3}) = D_{ac142}$$

$$0 + (16.546 \times L_{41_1}) = D_{41_13}$$

$$D_{41_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{41_2}) = D_{41_23}$$

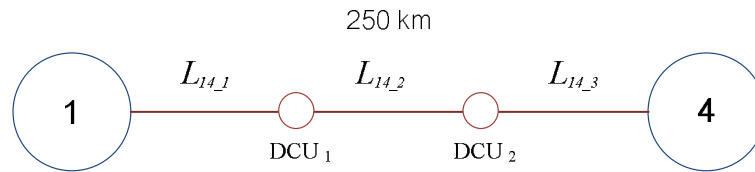
$$D_{41_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{41_3}) = D_{ac143}$$

$$L_{41\_1} = 96.64 \text{ km}$$

$$L_{41\_2} = 98.84 \text{ km}$$

$$L_{41\_3} = 54.52 \text{ km}$$

8) พิจารณาข่ายเชื่อมโยง 14



8.1) กรณีชุดสัญญาณ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ส่งจากโหนดต้นทางที่ 1 ไปยังโหนดปลายทางที่ 4

$$0 + (16.466 \times L_{14\_1}) = D_{14\_11}$$

$$D_{14\_11} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{14\_2}) = D_{14\_21}$$

$$D_{14\_21} + (-1643.4) + (16.466 \times L_{14\_3}) = D_{ac411}$$

$$0 + (16.506 \times L_{14\_1}) = D_{14\_12}$$

$$D_{14\_12} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{14\_2}) = D_{14\_22}$$

$$D_{14\_22} + (-1639.4) + (16.506 \times L_{14\_3}) = D_{ac412}$$

$$0 + (16.546 \times L_{14\_1}) = D_{14\_13}$$

$$D_{14\_13} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{14\_2}) = D_{14\_23}$$

$$D_{14\_23} + (-1635.4) + (16.546 \times L_{14\_3}) = D_{ac413}$$

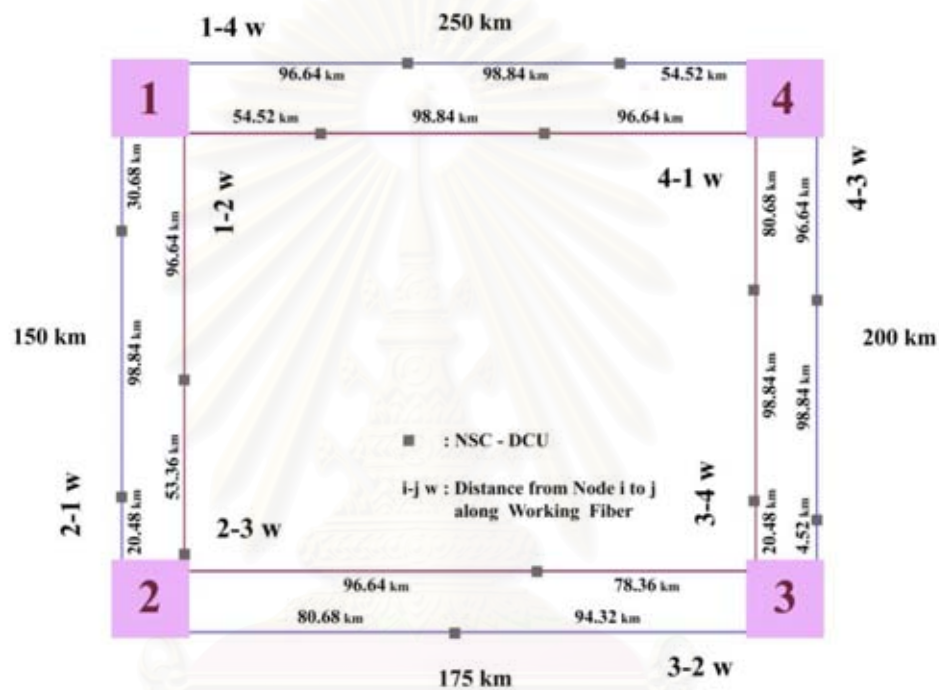
$$L_{14\_1} = 96.64 \text{ km}$$

$$L_{14\_2} = 98.84 \text{ km}$$

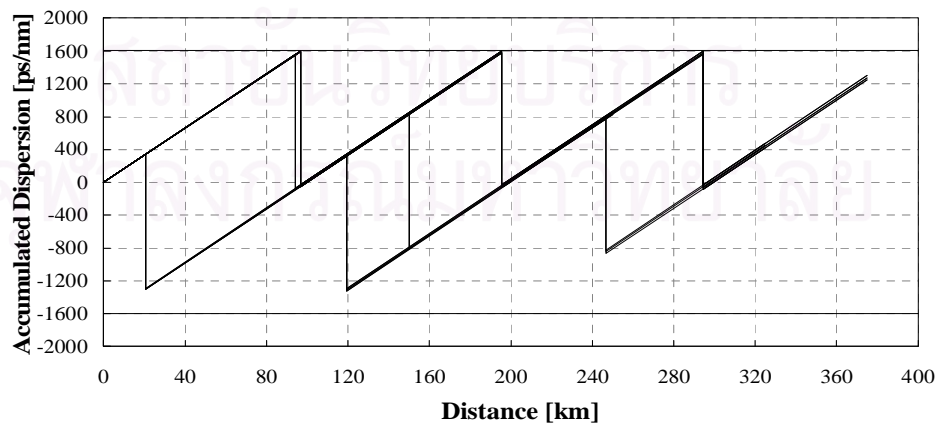
$$L_{14\_3} = 54.52 \text{ km}$$

ขั้นตอนสุดท้ายนำความยาว  $L_{XY\_n}$  ที่คำนวณได้มาใช้ในการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เช่นในข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  คำนวณความยาว  $L_{12\_1} = 96.64 \text{ km}$ ,  $L_{12\_2} = 53.36 \text{ km}$  และ  $L_{12\_3} = 0 \text{ km}$  คือเราจะกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวแรกบนข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  ที่ระยะห่างจากโหนดที่ 1 เท่ากับ 96.64 km,  $L_{12\_2} = 53.36 \text{ km}$  คือเราจะกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวที่สองบนข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  ที่ระยะห่างจากหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวแรกเท่ากับ 53.36 km และ  $L_{12\_3} = 0 \text{ km}$  คือเราจะกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตัวที่สามบนข่ายเชื่อมโยง  $L_{12}$  ติดกับโหนดที่สองเลย เนื่องจากค่าความยาวสองค่าแรกรวมกันเท่ากับกับความยาวของข่ายเชื่อมโยงพอดี สุดท้ายทำการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ ของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธีเดียวกัน เราจะได้ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทั่วทั้งโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 จากนั้นสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นที่ใช้ในการจำลองโครงข่ายส่งผ่านไปโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 บนเส้นใยแสงชนิด SMF ที่กำหนดตำแหน่งของ NSC-

DCU ตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 การชดเชยดิสเพอร์ชันของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจะเกิด ณ ตำแหน่งของ NSC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เขียนกราฟแสดงสมการการชดเชยดิสเพอร์ชันระหว่างค่าดิสเพอร์ชันสะสมและระยะทางที่สัญญาณเดินทางในโครงข่ายตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 พบว่าตำแหน่งของ NSC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับการส่งสัญญาณในทุกทราฟฟิกทั่วทั้งโครงข่ายให้มีค่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณอยู่ในช่วงของเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน คือ ไม่เกินค่า  $D_{max}$  ตลอดเส้นทางของการเดินทางในแต่ละทราฟฟิกได้



รูปที่ 4.5 ตำแหน่ง NSC-DCU ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ



รูปที่ 4.6 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของการเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการวางตำแหน่งของ NSC-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ

#### 4.2.2.4.2 การวางตำแหน่ง SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

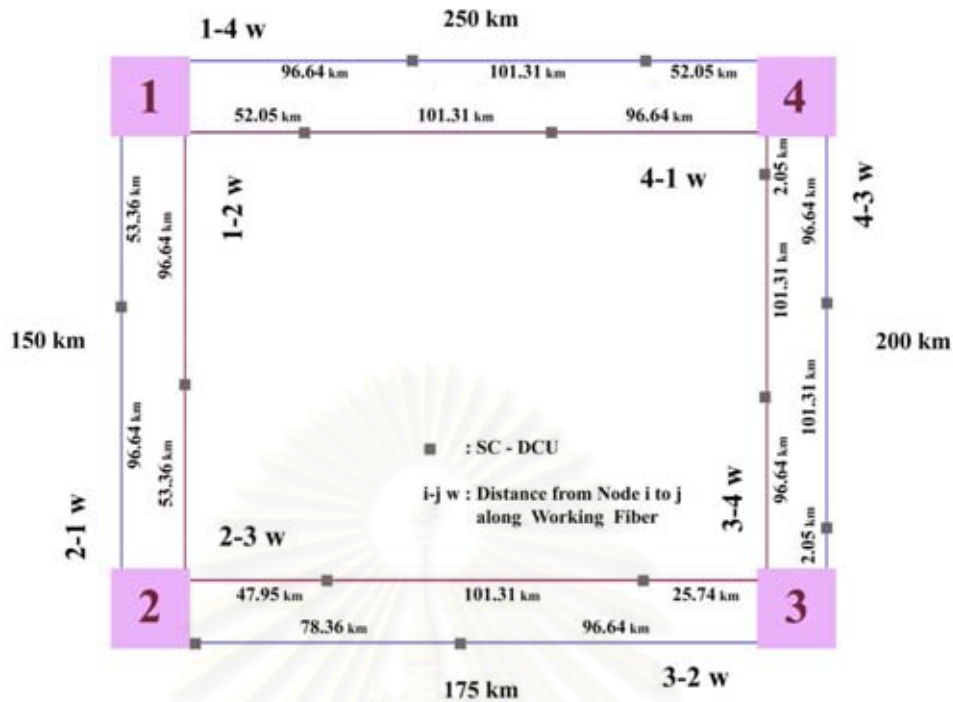
ตำแหน่งของ SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายที่ 1 จะคำนวณด้วยวิธีเดียวกันกับการกำหนดตำแหน่งของ NSC-DCU ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.4.1 นำข้อมูลจากตารางที่ 4.6 มาเขียนสมการชดเชยดีสเพอร์ชันของ SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงดังนี้

ตารางที่ 4.8 สมการชดเชยดีสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงด้วย SC-DCU

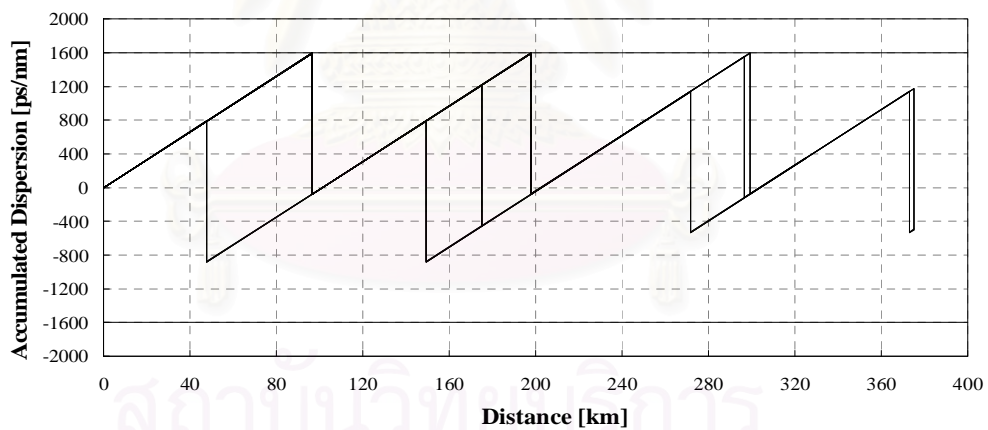
ข่ายเชื่อมโยง [จำนวน SC-DCU]	รูปแบบการส่ง สัญญาณ	รูปแบบสมการ
ข่ายเชื่อมโยง 12 [1]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 1 ไป 2	$0 + D_i \times L_{12\_1} = D_{12\_1i}$ $D_{12\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{12\_2} = D_{ac21i}$
ข่ายเชื่อมโยง 21 [1]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 2 ไป 1	$0 + D_i \times L_{21\_1} = D_{21\_1i}$ $D_{21\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{21\_2} = D_{ac12i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 3 ไป 1	$D_{ac23i} + D_i \times L_{21\_1} = D_{21\_1i}$ $D_{21\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{21\_2} = D_{ac13i}$
ข่ายเชื่อมโยง 23 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 1 ไป 3	$D_{ac21i} + D_i \times L_{23\_1} = D_{23\_1i}$ $D_{23\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{23\_2} = D_{23\_2i}$ $D_{23\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{23\_3} = D_{ac31i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 2 ไป 3	$0 + D_i \times L_{23\_1} = D_{23\_1i}$ $D_{23\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{23\_2} = D_{23\_2i}$ $D_{23\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{23\_3} = D_{ac32i}$
ข่ายเชื่อมโยง 32 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 3 ไป 2	$0 + D_i \times L_{32\_1} = D_{32\_1i}$ $D_{32\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{32\_2} = D_{32\_2i}$ $D_{32\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{32\_3} = D_{ac23i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 4 ไป 2	$D_{ac34i} + D_i \times L_{32\_1} = D_{32\_1i}$ $D_{32\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{32\_2} = D_{32\_2i}$ $D_{32\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{32\_3} = D_{ac24i}$
ข่ายเชื่อมโยง 34 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 2 ไป 4	$D_{ac32i} + D_i \times L_{34\_1} = D_{34\_1i}$ $D_{34\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_2} = D_{34\_2i}$ $D_{34\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_3} = D_{ac42i}$
	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 3 ไป 4	$0 + D_i \times L_{34\_1} = D_{34\_1i}$ $D_{34\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_2} = D_{34\_2i}$ $D_{34\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{34\_3} = D_{ac43i}$

ข่ายเชื่อมโยง 43 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 4 ไป 3	$0 + D_i \times L_{43\_1} = D_{43\_1i}$ $D_{43\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{43\_2} = D_{43\_2i}$ $D_{43\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{43\_3} = D_{ac34i}$
ข่ายเชื่อมโยง 41 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 4 ไป 1	$0 + D_i \times L_{41\_1} = D_{41\_1i}$ $D_{41\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{41\_2} = D_{41\_2i}$ $D_{41\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{41\_3} = D_{ac14i}$
ข่ายเชื่อมโยง 14 [2]	$\lambda_i$ ส่งจาก โนด 1 ไป 4	$0 + D_i \times L_{14\_1} = D_{14\_1i}$ $D_{14\_1i} + D_{compi} + D_i \times L_{14\_2} = D_{14\_2i}$ $D_{14\_2i} + D_{compi} + D_i \times L_{14\_3} = D_{ac41i}$

จากนั้นทำการแทนผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทางจากตารางที่ 4.5 ที่เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ลงในสมการชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงด้วย SC-DCU ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ส่วนการระบุค่าดิสเพอร์ชันของ SMF และ SC-DCU ของแต่ละความยาวคลื่นจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.2 สุดท้ายคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงโดยมีขั้นตอนวิธีดังต่อไปนี้ ดำเนินการตามขั้นตอนที่ได้อธิบายการกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดสมการของความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ได้ผลเฉลยตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ทั้งโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จากนั้นสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นที่ใช้ในการจำลองโครงข่ายส่งผ่านไปโนดโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 บนเส้นใยแสงชนิด SMF ที่กำหนดตำแหน่งของ SC-DCU การชดเชยดิสเพอร์ชันของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจะเกิด ณ ตำแหน่งของ SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เขียนกราฟแสดงสมการการชดเชยดิสเพอร์ชันระหว่างค่าดิสเพอร์ชันสะสมและระยะทางที่สัญญาณเดินทางในโครงข่ายตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 พบว่าตำแหน่งของ SC-DCU ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับการส่งสัญญาณทุกทราฟฟิกที่ทั้งโครงข่ายให้มีค่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณอยู่ในช่วงของเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน คือ ไม่เกินค่า  $D_{max}$  ตลอดเส้นทางของการเดินทางในแต่ละทราฟฟิกได้



รูปที่ 4.7 ตำแหน่ง SC-DCU ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ



รูปที่ 4.8 ค่าdispersionสะสมตลอดเส้นทางการเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการกำหนดตำแหน่งของ SC-DCU ลงในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ

พิจารณารูปที่ 4.6 และ 4.8 จะเห็นความแตกต่างระหว่างการชดเชยdispersionของหน่วยชดเชยdispersionทั้งสองชนิด SC-DCU จะมีค่าdispersionสะสมของแต่ละความยาวคลื่นหลังจากการชดเชยdispersionใกล้เคียงกันมากเป็นไปตามลักษณะการชดเชยdispersionคือความชันในการชดเชยdispersionของ SC-DCU ที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับความชันdispersion



ชั้นของ SMF ต่างจากการชดเชยดิสเพอร์ชันของ NSC-DCU ซึ่งมีเครื่องหมายของความชันในการชดเชยดิสเพอร์ชันทิศทางเดียวกันกับเส้นใยแสง SMF ความแตกต่างของกราฟจากหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิดนี้จะเด่นชัดยิ่งขึ้นเมื่อระยะทางการส่งสัญญาณและระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณห่างกันมากขึ้น NSC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณที่ต่างกันมาก สังเกตได้จากพื้นที่แถบสีด้านบนแถบความชันต่าง ๆ ที่ชัดเจนขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



และค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 จากนั้นแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 3 ความยาวคลื่นส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1-4.2.2.3 ได้ผลเฉลยดังนี้

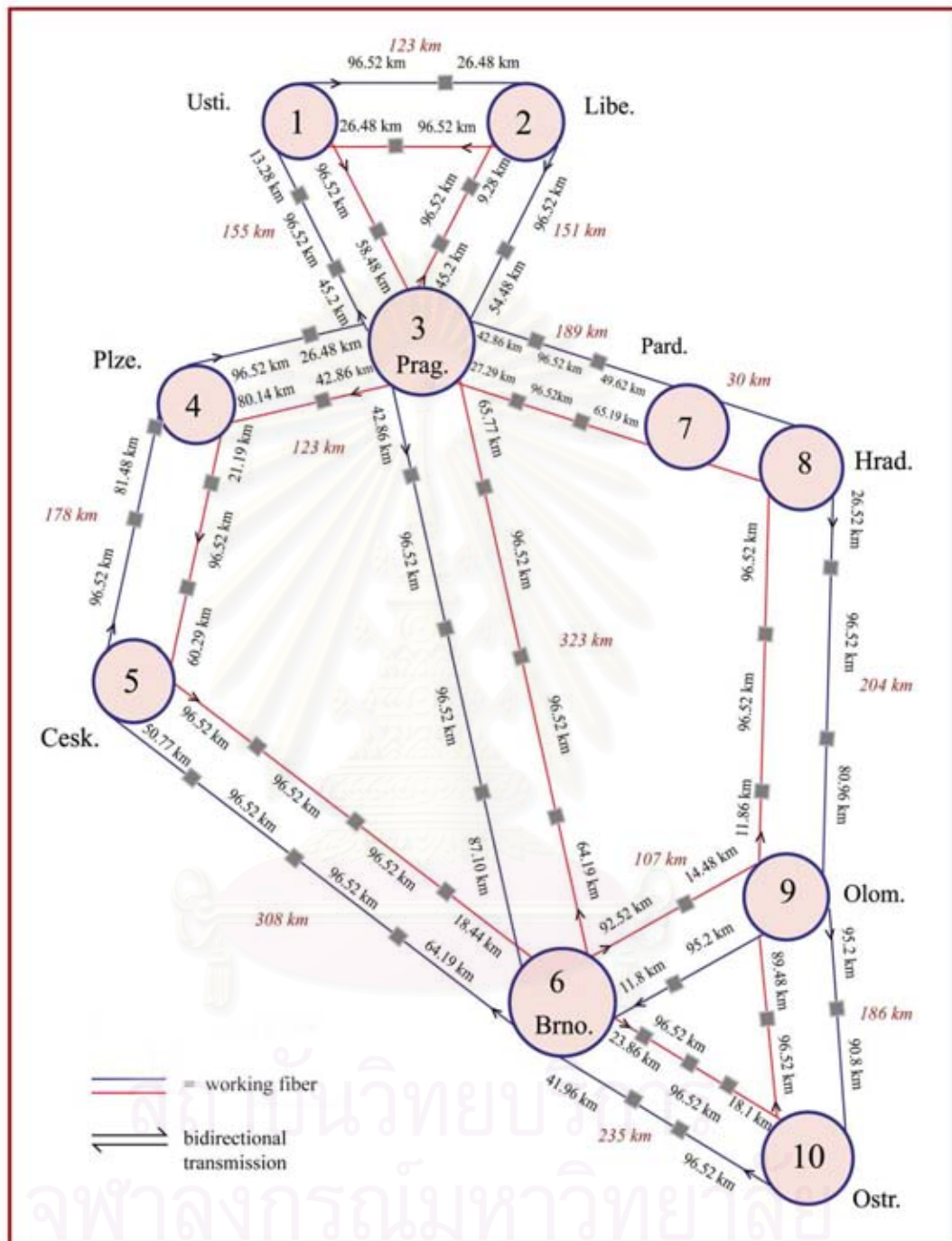
ตารางที่ 4.9 ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ

	จำนวน DCUs			จำนวน DCUs	
	SC-DCU	NSC-DCU		SC-DCU	NSC-DCU
$N_{12}$	1	1	$N_{63}$	3	3
$N_{21}$	1	1	$N_{37}$	2	2
$N_{13}$	1	1	$N_{73}$	2	2
$N_{31}$	1	2	$N_{78}$	0	0
$N_{23}$	1	1	$N_{87}$	0	0
$N_{32}$	1	2	$N_{89}$	2	2
$N_{34}$	1	1	$N_{98}$	2	2
$N_{43}$	1	1	$N_{69}$	1	1
$N_{45}$	2	2	$N_{96}$	1	1
$N_{54}$	2	2	$N_{610}$	2	3
$N_{56}$	3	3	$N_{106}$	2	2
$N_{65}$	3	3	$N_{910}$	1	1
$N_{36}$	4	3	$N_{109}$	2	1
			$N_{\min}$	42	43

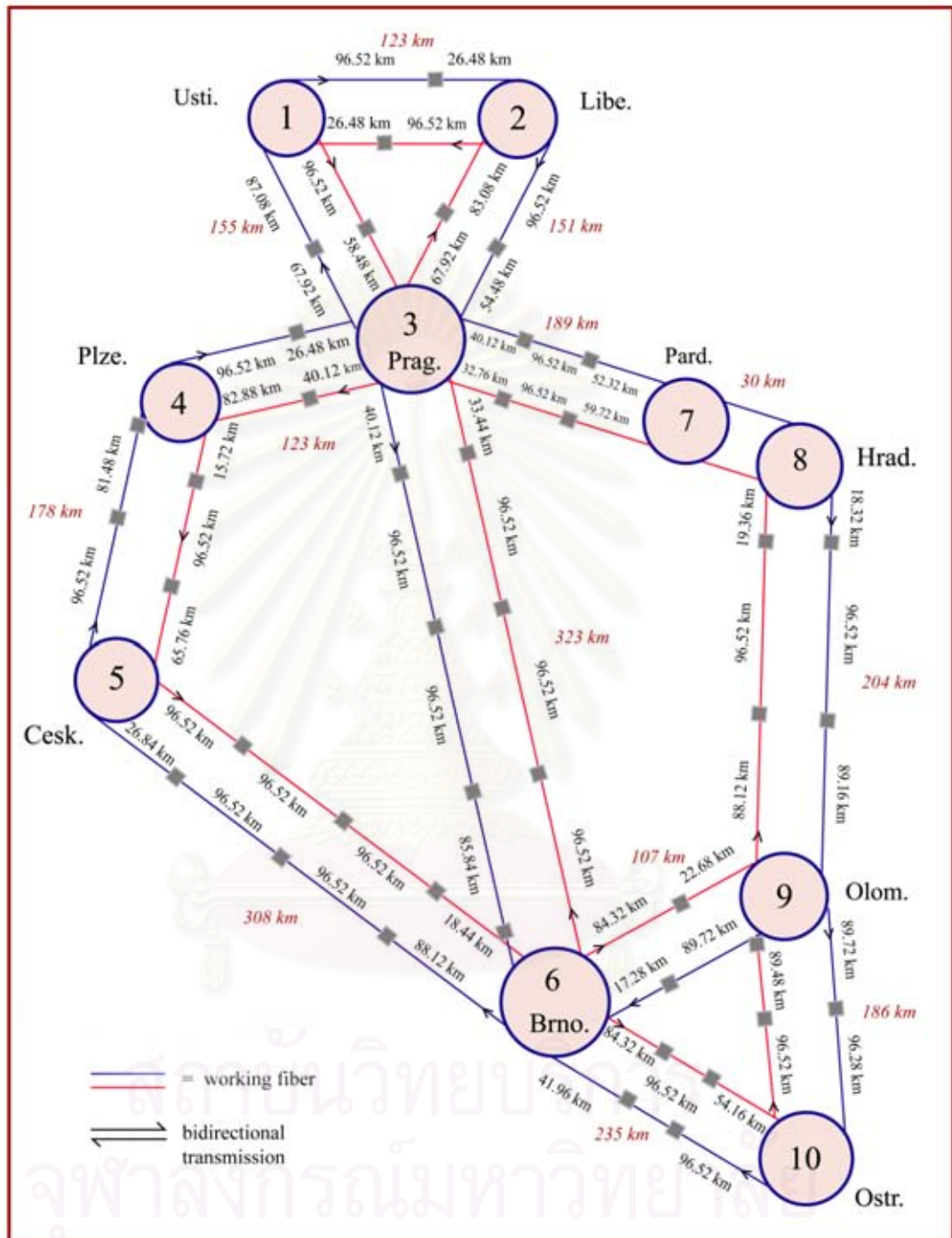
ระเบียบขั้นตอนวิธีการหาจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU จากผลเฉลยในตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชย

ดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่ายโดยมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y อยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

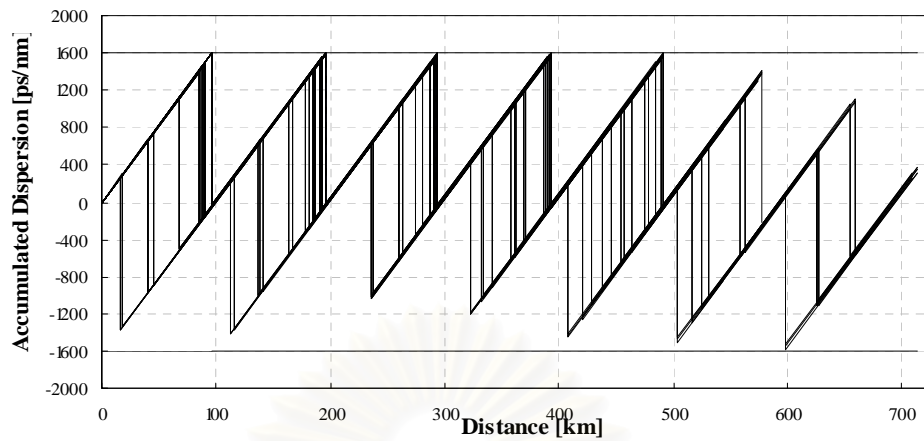
ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยวิธีการคำนวณหาตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดบนข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN เพื่อรองรับการส่งสัญญาณ 3 ความยาวคลื่น จะดำเนินการตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.4 กรณีโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ทำงานปกติ โดยตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 จากนั้นเขียนกราฟแสดงสมการการชดเชยดิสเพอร์ชันระหว่างค่าดิสเพอร์ชันสะสมและระยะทางที่สัญญาณเดินทางในโครงข่ายตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าการชดเชยดิสเพอร์ชันสะสมจากการเดินทางของสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงาน SMF จะถูกชดเชย ณ ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้สามารถรองรับการส่งสัญญาณทั้ง 3 ความยาวคลื่นในทุกทราฟฟิกทั่วทั้งโครงข่ายให้มีค่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณอยู่ในช่วงของเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน คือ ไม่เกินค่า  $D_{max}$  ตลอดเส้นทางของการเดินทางในแต่ละทราฟฟิกได้



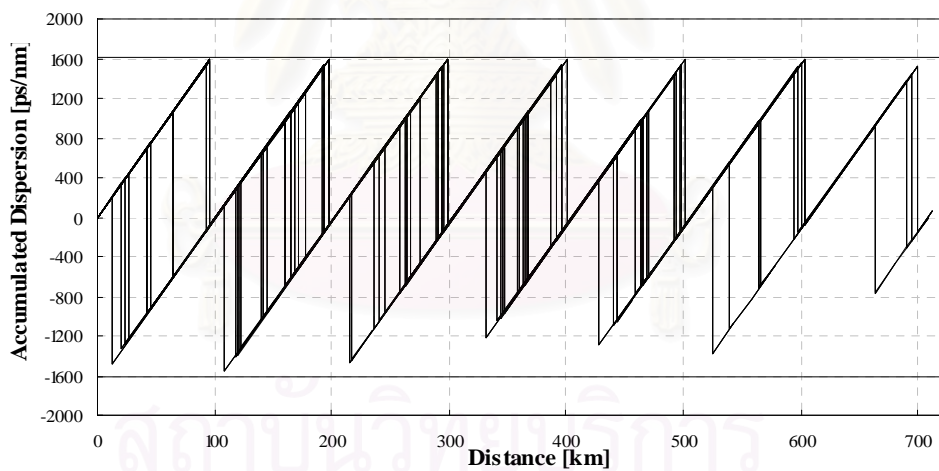
รูปที่ 4.10 ตำแหน่ง NSC-DCU ภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN  
กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ



รูปที่ 4.11 ตำแหน่ง SC-DCU ภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ



รูปที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของการเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการกำหนดตำแหน่งของ NSC-DCU ลงในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ



รูปที่ 4.13 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของการเดินทางของสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นจากการกำหนดตำแหน่งของ SC-DCU ลงในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ

ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นความแตกต่างระหว่างการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิด SC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่นหลังจากการชดเชยดิสเพอร์ชันใกล้เคียงกันมากเป็นไปตามลักษณะการชดเชยดิสเพอร์ชันคือความชันในการชดเชยดิสเพอร์ชันของ SC-DCU ที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับความชันดิสเพอร์ชันของ SMF ต่างจากการชดเชยดิสเพอร์ชันของ NSC-DCU ซึ่งมีเครื่องหมายของความชันในการชดเชยดิสเพอร์ชันทิศทางเดียวกันกับเส้นใยแสง SMF ความแตกต่างของกราฟจากหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิดนี้จะเด่นชัดยิ่งขึ้นเมื่อระยะทางการส่งสัญญาณและระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณห่างกันมากขึ้น NSC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณที่ต่างกันมาก สังเกตได้จากพื้นที่แถบสีดำนแถบความชันที่ชัดเจนขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### ระเบียบขั้นตอนวิธีและผลเฉลยการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน กรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย

ในบทนี้นำเสนอระเบียบขั้นตอนวิธีการจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้เสนอในบทที่ 3 ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 พร้อมทั้งอธิบายการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

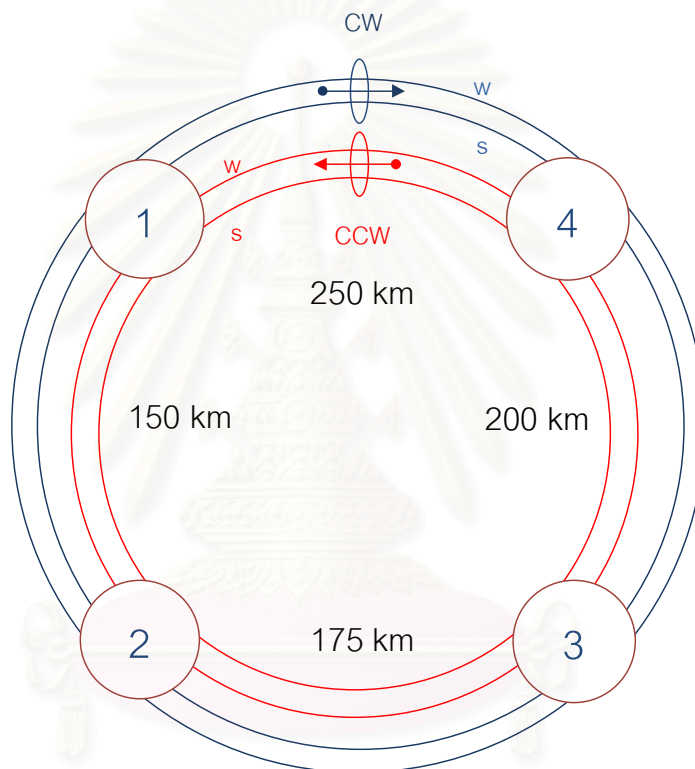
#### 5.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย

- 1) ทำการสร้างอัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเงื่อนไขที่ไม่มีผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
- 2) หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 กิโลเมตร [30]
- 3) กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 และโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN เป็นโครงข่ายลักษณะวงแหวนตามมาตรฐาน SONET/SDH สามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทาง ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงประกอบด้วยเส้นใยแสง 4 เส้นคือ เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองอย่างละสองเส้น
- 4) เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายจะมีการจัดสรรเส้นทางส่งสัญญาณขึ้นใหม่ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณสองลักษณะ ได้แก่ การกู้คืนสัญญาณโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงทำงาน wavelength protection และการกู้คืนสัญญาณโดยใช้เส้นใยแสงสำรองแบบ span protection

- 5) ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายที่พิจารณานำมาใช้ในการจำลองโครงข่าย คือความเสียหายของเส้นใยแสงทั้ง 4 เส้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยง (working & spare fiber failure) โดยจะทำการพิจารณาให้เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง

## 5.2 การจำลองการวางหน่วยชุดเซตติสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง

### 5.2.1 การจำลองการวางหน่วยชุดเซตติสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 โดยการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน



รูปที่ 5.1 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ในการจำลองโครงข่ายกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เป็นโครงข่ายวงแหวนตามมาตรฐาน SONET/SDH ประกอบขึ้นด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง 4 โหนด มีระยะทางรวม 775 km มีการส่งข้อมูลโดยใช้จำนวนความยาวคลื่นมากกว่าจำนวนความยาวน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งผ่านสัญญาณซึ่งคำนวณได้ 4 ความยาวคลื่นจากหัวข้อที่ 2.5.3.1.1 ในบทที่ 2 โดยการส่งผ่านสัญญาณนี้จะมีสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงานเท่านั้น คือระยะทางที่สั้นสุดสำหรับกรณีโครงข่ายทำงานปกติตามเนื้อหาบทที่ 4 และระยะทางที่ยาวสุดสำหรับเส้นทางที่ถูกจัดสรรขึ้นใหม่ตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงานและเนื่องจากการส่งผ่านสัญญาณ

ด้วยจำนวนที่มากกว่าความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณมากเพียงพอเพื่อใช้งานสำหรับการป้องกันโครงข่าย ระเบียบขั้นตอนวิธีการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการวางแผนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุด กรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายอธิบายได้ดังนี้

### 5.2.1.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

ขั้นตอนนี้เป็นการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ขึ้นใหม่จากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย โดยเส้นทางการส่งสัญญาณที่ถูกจัดสรรขึ้นใหม่เกิดขึ้นบนเส้นใยแสงทำงานตามกลไกการกักสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน ในการระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณใหม่จะพิจารณาแยกเป็นกรณีความเสียหายของทุกข่ายเชื่อมโยง ด้วยระยะทางระหว่างโหนดต้นทางและปลายทางใด ๆ ที่มีค่ามากที่สุด (longest - path) โดยเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.2-3.5

### 5.2.1.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณในตารางที่ 3.2-3.5 ประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตเซยดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางใด ๆ ทั้งกรณีที่มีและไม่มีโหนดคั่นกลาง, เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน, การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

#### 5.2.1.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด

นำข้อมูลในตารางที่ 3.2-3.5 มาเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการขดเซยดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณสำหรับทุกชุดสัญญาณความยาวคลื่นจากโหนดต้นทาง  $Z$  ไปยังข่ายเชื่อมโยง  $XY$  ใดแยกเป็นกรณีตามความเสียหายที่เกิดในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เราสามารถเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการขดเซยดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดเมื่อจัดสรรเส้นทางการส่งสัญญาณใหม่ได้ดังต่อไปนี้



$$3\_2\_1\_4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21}) \\ + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14}) = D_{ac43iB}$$

กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 4; Z = 4

$$4\_1 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41}) = D_{ac14iB}$$

$$4\_1\_2 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac24iB}$$

$$4\_1\_2\_3 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) \\ + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) = D_{ac34iB}$$

3) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 14 และ ข่ายเชื่อมโยง 41 (C)

กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 1; Z = 1

$$1\_2 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac21iC}$$

$$1\_2\_3 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) = D_{ac31iC}$$

$$1\_2\_3\_4 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) \\ + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac41iC}$$

กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 2; Z = 2

$$2\_1 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac12iC}$$

$$2\_3 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) = D_{ac32iC}$$

$$2\_3\_4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac42iC}$$

กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 3; Z = 3

$$3\_2\_1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac13iC}$$

$$3\_2 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) = D_{ac23iC}$$

$$3\_4 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac43iC}$$

กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 4; Z = 4

$$4\_3\_2\_1 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) \\ + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac14iC}$$

$$4\_3\_2 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) = D_{ac24iC}$$

$$4\_3 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac34iC}$$

4) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (D)

กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 1; Z = 1

$$1\_4\_3\_2 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) \\ + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) = D_{ac21iD}$$

$$1\_4\_3 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac31iD}$$

$$1\_4 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14}) = D_{ac41iD}$$

กรณีี่ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 2;  $Z = 2$

$$2\_3\_4\_1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) \\ + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41}) = D_{ac12iD}$$

$$2\_3 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) = D_{ac32iD}$$

$$2\_3\_4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac42iD}$$

กรณีี่ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 3;  $Z = 3$

$$3\_4\_1 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41}) = D_{ac13iD}$$

$$3\_2 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) = D_{ac23iD}$$

$$3\_4 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac43iD}$$

กรณีี่ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 4;  $Z = 4$

$$4\_1 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41}) = D_{ac14iD}$$

$$4\_3\_2 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32}) = D_{ac24iD}$$

$$4\_3 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac34iD}$$

ในการทดลองใช้สัญญาณจำนวน 7 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นกลางเท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.4 nm ส่งผ่านเส้นใยแสงทำงาน เขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันจากโหนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ด้วยกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน ด้วยวิธีเดียวกันกับการเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันการส่งสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นกรณีี่โครงข่ายที่ 1 ทำงานปกติซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 หัวข้อที่ 4.2.2.2.1 บทที่ 4

ตารางที่ 5.1 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NSC-DCU และ SC-DCU ที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน

	$\lambda_i$ (nm)	$D_i$ ( ps/km/nm)	$D_{compi}$ ( ps/nm)	
			NSC-DCU	SC-DCU
$i = 1$	1548.92	16.446	-1645.40	-1664.39
$i = 2$	1549.32	16.466	-1643.40	-1666.78
$i = 3$	1549.72	16.486	-1641.40	-1669.16
$i = 4$	1550.12	16.506	-1639.40	-1671.55
$i = 5$	1550.52	16.526	-1637.40	-1673.94
$i = 6$	1550.92	16.546	-1635.40	-1676.33
$i = 7$	1551.32	16.566	-1633.40	-1678.71

### 5.2.1.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจากโหนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ชุดรูปแบบบสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 7 ความยาวคลื่นด้วยกลไกการกักสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงานในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

รูปแบบการส่งสัญญาณ $\lambda_i = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_7\}$		กรณี	รูปแบบสมการ
โหนดต้นทาง	โหนดปลายทาง		
1	2	A	$-1600 \leq D_{ac21iA} \leq 1600$
1	3	A	$-1600 \leq D_{ac31iA} \leq 1600$
1	4	A	$-1600 \leq D_{ac41iA} \leq 1600$
2	1	A	$-1600 \leq D_{ac12iA} \leq 1600$
2	3	A	$-1600 \leq D_{ac32iA} \leq 1600$
2	4	A	$-1600 \leq D_{ac42iA} \leq 1600$
3	1	A	$-1600 \leq D_{ac13iA} \leq 1600$
3	2	A	$-1600 \leq D_{ac23iA} \leq 1600$
3	4	A	$-1600 \leq D_{ac43iA} \leq 1600$
4	1	A	$-1600 \leq D_{ac14iA} \leq 1600$
4	2	A	$-1600 \leq D_{ac24iA} \leq 1600$
4	3	A	$-1600 \leq D_{ac34iA} \leq 1600$
1	2	B	$-1600 \leq D_{ac21iB} \leq 1600$
1	3	B	$-1600 \leq D_{ac31iB} \leq 1600$
1	4	B	$-1600 \leq D_{ac41iB} \leq 1600$
2	1	B	$-1600 \leq D_{ac12iB} \leq 1600$
2	3	B	$-1600 \leq D_{ac32iB} \leq 1600$
2	4	B	$-1600 \leq D_{ac42iB} \leq 1600$
3	1	B	$-1600 \leq D_{ac13iB} \leq 1600$

3	2	B	$-1600 \leq D_{ac23iB} \leq 1600$
3	4	B	$-1600 \leq D_{ac43iB} \leq 1600$
4	1	B	$-1600 \leq D_{ac14iB} \leq 1600$
4	2	B	$-1600 \leq D_{ac24iB} \leq 1600$
4	3	B	$-1600 \leq D_{ac34iB} \leq 1600$
1	2	C	$-1600 \leq D_{ac21iC} \leq 1600$
1	3	C	$-1600 \leq D_{ac31iC} \leq 1600$
1	4	C	$-1600 \leq D_{ac41iC} \leq 1600$
2	1	C	$-1600 \leq D_{ac12iC} \leq 1600$
2	3	C	$-1600 \leq D_{ac32iC} \leq 1600$
2	4	C	$-1600 \leq D_{ac42iC} \leq 1600$
3	1	C	$-1600 \leq D_{ac13iC} \leq 1600$
3	2	C	$-1600 \leq D_{ac23iC} \leq 1600$
3	4	C	$-1600 \leq D_{ac43iC} \leq 1600$
4	1	C	$-1600 \leq D_{ac14iC} \leq 1600$
4	2	C	$-1600 \leq D_{ac24iC} \leq 1600$
4	3	C	$-1600 \leq D_{ac34iC} \leq 1600$
1	2	D	$-1600 \leq D_{ac21iD} \leq 1600$
1	3	D	$-1600 \leq D_{ac31iD} \leq 1600$
1	4	D	$-1600 \leq D_{ac41iD} \leq 1600$
2	1	D	$-1600 \leq D_{ac12iD} \leq 1600$
2	3	D	$-1600 \leq D_{ac32iD} \leq 1600$
2	4	D	$-1600 \leq D_{ac42iD} \leq 1600$
3	1	D	$-1600 \leq D_{ac13iD} \leq 1600$
3	2	D	$-1600 \leq D_{ac23iD} \leq 1600$
3	4	D	$-1600 \leq D_{ac43iD} \leq 1600$
4	1	D	$-1600 \leq D_{ac14iD} \leq 1600$
4	2	D	$-1600 \leq D_{ac24iD} \leq 1600$
4	3	D	$-1600 \leq D_{ac34iD} \leq 1600$



### 5.2.1.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง  $XY$  คือ จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

### 5.2.1.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่าย ในขณะที่เดียวกันจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

### 5.2.1.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

ปัญหา MILP สำหรับการทำ optimization เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 7 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นกลาง 1550.12 nm ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.4 nm ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 บนเส้นใยแสงทำงานด้วยกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน คือ จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกชุดสัญญาณความยาวคลื่นที่ทุกโนดปลายทาง ของทุกรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ผลเฉลยที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณหา จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดบนเส้นใยสำรอง และการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมสุดในกรณีที่โครงข่ายมีกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรองในส่วนต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 ผลเฉลยจำนวน NSC-DCU และ SC-DCU โครงข่ายตัวอย่างที่ 1  
ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน

	จำนวน DCUs			จำนวน DCUs	
	NSC-DCU	SC-DCU		NSC-DCU	SC-DCU
$N_{12}$	2	2	$N_{43}$	2	2
$N_{21}$	2	1	$N_{34}$	2	2
$N_{32}$	2	2	$N_{14}$	2	3
$N_{23}$	2	1	$N_{41}$	2	2
			$N_{\min}$	16	15

### 5.2.2 การจำลองการวางหน่วยชุดเซย์ติสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง

การป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงใด ๆ ภายในโครงข่ายบนเส้นใยแสงสำรองจะนำมาใช้ในกรณีที่มีการส่งผ่านสัญญาณด้วยจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยกว่าหรือเท่ากับกับความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณของโครงข่ายเนื่องจากโครงข่ายมีความยาวคลื่นไม่พอที่จะทำการป้องกันโครงข่ายบนเส้นใยแสงทำงาน โดยการป้องกันโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรองมีหลักการทำงานคือ เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงภายในโครงข่ายสถานีที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเท่านั้นจะรับรู้สัญญาณที่ถูกรบกวนด้วยข่ายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อเลี่ยงเฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหายเท่านั้น คือ สถานีที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะวนสัญญาณกลับไปในทิศทางตรงกันข้ามบนเส้นใยสำรอง (loop back) จนกระทั่งเมื่อสัญญาณส่งมาถึงสถานีที่ติดกันกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายอีกด้าน สัญญาณข้อมูลจะถูกวนกลับอีกครั้งหนึ่งจากเส้นใยสำรองกลับสู่เส้นใยทำงานดั้งเดิม ดังนั้นในวิธีนี้สถานีต้นทางและปลายทางไม่จำเป็นต้องรับรู้และเปลี่ยนเส้นทาง โดยในการส่งผ่านสัญญาณด้วยเส้นทางใหม่นั้นใช้เส้นใยแสงคนละเส้นกับเส้นใยแสงเดิม จึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนช่องความยาวคลื่นในการส่งผ่านสัญญาณเหมือนในวิธีการป้องกันความเสียหายของโครงข่ายโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน ตามที่ได้แสดงกลไกการกู้คืนสัญญาณไว้ในรูปที่ 2.21 บทที่ 2 และอธิบายหลักการทำงานในหัวข้อที่ 2.5.2.2

### 5.2.2.1 ระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

ขั้นตอนนี้เป็นการจัดสรรเส้นทางส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ขึ้นใหม่จากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมหนึ่งในโครงข่าย โดยเส้นทางส่งผ่านสัญญาณที่ถูกจัดสรรขึ้นใหม่เกิดขึ้นบนเส้นใยแสงสำรองตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง ในการระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณใหม่จะพิจารณาแยกเป็นกรณีความเสียหายของทุกข่ายเชื่อมโยง โดยเส้นทางส่งผ่านสัญญาณแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.6-3.9

### 5.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางส่งผ่านสัญญาณในตารางที่ 3.6-3.9 ประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางใด ๆ ทั้งกรณีที่มีและไม่มีโหนดคั่นกลาง, เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน, การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

#### 5.2.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด

สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณสำหรับทุกชุดสัญญาณความยาวคลื่นที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง Z ไปยังข่ายเชื่อมโยง XY ได้แยกเป็นกรณีตามความเสียหายที่เกิดในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เราสามารถเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณเมื่อจัดสรรเส้นทางส่งผ่านสัญญาณใหม่ได้ดังต่อไปนี้

- กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 23 และ ข่ายเชื่อมโยง 32 (A)  
กรณีที่ถูกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 1; Z= 1
- $$1\_2 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac21iAs}$$
- $$1\_2\_1\_4\_3 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s})$$
- $$+ (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s}) = D_{ac31iAs}$$
- $$1\_4 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac41iAs}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 2;  $Z = 2$

$$\begin{aligned}
 2\_1 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac12iAs} \\
 2\_1\_4\_3 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) \\
 & + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s}) = D_{ac32iAs} \\
 2\_1\_4\_3\_4 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) \\
 & + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac42iAs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 3;  $Z = 3$

$$\begin{aligned}
 3\_4\_1\_2\_1 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) \\
 & + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac13iAs} \\
 3\_4\_1\_2 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) \\
 & + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s}) = D_{ac23iAs} \\
 3\_4 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac43iAs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 4;  $Z = 4$

$$\begin{aligned}
 4\_1 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac14iAs} \\
 4\_3\_4\_1\_2 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s}) \\
 & + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s}) = D_{ac24iAs} \\
 4\_3 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac34iAs}
 \end{aligned}$$

2) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ ข่ายเชื่อมโยง 43 (B)

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 1;  $Z = 1$

$$\begin{aligned}
 1\_2 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac21iBs} \\
 1\_2\_3 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac31iBs} \\
 1\_4 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac41iBs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 2;  $Z = 2$

$$\begin{aligned}
 2\_1 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac12iBs} \\
 2\_3 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac32iBs} \\
 2\_3\_2\_1\_4 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s}) \\
 & + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) = D_{ac42iBs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 3;  $Z = 3$

$$\begin{aligned}
 3\_2\_1 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac13iBs} \\
 3\_2 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac23iBs} \\
 3\_2\_1\_4 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s}) \\
 & + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) = D_{ac43iBs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 4;  $Z = 4$

$$\begin{aligned}
 4\_1 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac14iBs} \\
 4\_1\_2\_3\_2 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s}) \\
 & + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac24iBs} \\
 4\_1\_2\_3 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s}) \\
 & + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s}) = D_{ac34iBs}
 \end{aligned}$$

3) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 14 และ ข่ายเชื่อมโยง 41 (C)

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 1;  $Z = 1$

$$\begin{aligned}
 1\_2 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac21iCs} \\
 1\_2\_3 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac31iCs} \\
 1\_2\_3\_4 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s}) \\
 & + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s}) = D_{ac41iCs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 2;  $Z = 2$

$$\begin{aligned}
 2\_1 & 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac12iCs} \\
 2\_3 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac32iCs} \\
 2\_3\_4 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac42iCs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 3;  $Z = 3$

$$\begin{aligned}
 3\_2\_1 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac13iCs} \\
 3\_2 & 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac23iCs} \\
 3\_4 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac43iCs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 4;  $Z = 4$

$$\begin{aligned}
 4\_3\_2\_1 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s}) \\
 & + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s}) = D_{ac14iCs} \\
 4\_3\_2 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac24iCs} \\
 4\_3 & 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac34iCs}
 \end{aligned}$$

4) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (D)

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 1;  $Z = 1$

$$\begin{aligned}
 1\_4\_3\_2 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s}) \\
 & + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s}) = D_{ac21iDs} \\
 1\_4\_3\_2\_3 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s}) \\
 & + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac31iDs} \\
 1\_4 & 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac41iDs}
 \end{aligned}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 2;  $Z = 2$

$$2\_3\_4\_1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s}) \\ + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) = D_{ac12iDs}$$

$$2\_3 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac32iDs}$$

$$2\_3\_4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac42iDs}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 3;  $Z = 3$

$$3\_2\_3\_4\_1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s}) \\ + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s}) = D_{ac13iDs}$$

$$3\_2 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac23iDs}$$

$$3\_4 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac43iDs}$$

กรณีนี้ที่ทุกสัญญาณความยาวคลื่น  $\lambda_i$  ถูกส่งมาจากโหนด 4;  $Z = 4$

$$4\_1 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac14iDs}$$

$$4\_3\_2 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac24iDs}$$

$$4\_3 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times 2) = D_{ac34iDs}$$

ในการทดลองใช้สัญญาณจำนวน 4 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นกลางเท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.4 nm ส่งผ่านเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง เขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันจากโหนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ด้วยกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ span protection ด้วยวิธีเดียวกันกับการเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันการส่งสัญญาณ 3 ความยาวคลื่นกรณีโครงข่ายที่ 1 ทำงานปกติซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1 บทที่ 4

ตารางที่ 5.4 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NSC-DCU และ SC-DCU ที่ใช้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ด้วยกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง

	$\lambda_i$ (nm)	$D_i$ (ps/km/nm)	$D_{compi}$ (ps/nm)	
			NSC-DCU	SC-DCU
$i = 1$	1550.12	16.506	-1639.40	-1671.55
$i = 2$	1550.52	16.526	-1637.40	-1673.94
$i = 3$	1550.92	16.546	-1635.40	-1676.33
$i = 4$	1551.32	16.566	-1633.40	-1678.71

### 5.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจากโนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ชุดรูปแบบบสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 5.13 ดังนี้

ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 4 ความยาวคลื่น ด้วยกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรองในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

รูปแบบการส่งสัญญาณ $\lambda_i = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$		กรณี	รูปแบบสมการ
โนดต้นทาง	โนดปลายทาง		
1	2	A	$-1600 \leq D_{ac21iAs} \leq 1600$
1	3	A	$-1600 \leq D_{ac31iAs} \leq 1600$
1	4	A	$-1600 \leq D_{ac41iAs} \leq 1600$
2	1	A	$-1600 \leq D_{ac12iAs} \leq 1600$
2	3	A	$-1600 \leq D_{ac32iAs} \leq 1600$
2	4	A	$-1600 \leq D_{ac42iAs} \leq 1600$
3	1	A	$-1600 \leq D_{ac13iAs} \leq 1600$
3	2	A	$-1600 \leq D_{ac23iAs} \leq 1600$
3	4	A	$-1600 \leq D_{ac43iAs} \leq 1600$
4	1	A	$-1600 \leq D_{ac14iAs} \leq 1600$
4	2	A	$-1600 \leq D_{ac24iAs} \leq 1600$
4	3	A	$-1600 \leq D_{ac34iAs} \leq 1600$
1	2	B	$-1600 \leq D_{ac21iBs} \leq 1600$
1	3	B	$-1600 \leq D_{ac31iBs} \leq 1600$
1	4	B	$-1600 \leq D_{ac41iBs} \leq 1600$
2	1	B	$-1600 \leq D_{ac12iBs} \leq 1600$
2	3	B	$-1600 \leq D_{ac32iBs} \leq 1600$
2	4	B	$-1600 \leq D_{ac42iBs} \leq 1600$
3	1	B	$-1600 \leq D_{ac13iBs} \leq 1600$

3	2	B	$-1600 \leq D_{ac23iBs} \leq 1600$
3	4	B	$-1600 \leq D_{ac43iBs} \leq 1600$
4	1	B	$-1600 \leq D_{ac14iBs} \leq 1600$
4	2	B	$-1600 \leq D_{ac24iBs} \leq 1600$
4	3	B	$-1600 \leq D_{ac34iBs} \leq 1600$
1	2	C	$-1600 \leq D_{ac21iCs} \leq 1600$
1	3	C	$-1600 \leq D_{ac31iCs} \leq 1600$
1	4	C	$-1600 \leq D_{ac41iCs} \leq 1600$
2	1	C	$-1600 \leq D_{ac12iCs} \leq 1600$
2	3	C	$-1600 \leq D_{ac32iCs} \leq 1600$
2	4	C	$-1600 \leq D_{ac42iCs} \leq 1600$
3	1	C	$-1600 \leq D_{ac13iCs} \leq 1600$
3	2	C	$-1600 \leq D_{ac23iCs} \leq 1600$
3	4	C	$-1600 \leq D_{ac43iCs} \leq 1600$
4	1	C	$-1600 \leq D_{ac14iCs} \leq 1600$
4	2	C	$-1600 \leq D_{ac24iCs} \leq 1600$
4	3	C	$-1600 \leq D_{ac34iCs} \leq 1600$
1	2	D	$-1600 \leq D_{ac21iDs} \leq 1600$
1	3	D	$-1600 \leq D_{ac31iDs} \leq 1600$
1	4	D	$-1600 \leq D_{ac41iDs} \leq 1600$
2	1	D	$-1600 \leq D_{ac12iDs} \leq 1600$
2	3	D	$-1600 \leq D_{ac32iDs} \leq 1600$
2	4	D	$-1600 \leq D_{ac42iDs} \leq 1600$
3	1	D	$-1600 \leq D_{ac13iDs} \leq 1600$
3	2	D	$-1600 \leq D_{ac23iDs} \leq 1600$
3	4	D	$-1600 \leq D_{ac43iDs} \leq 1600$
4	1	D	$-1600 \leq D_{ac14iDs} \leq 1600$
4	2	D	$-1600 \leq D_{ac24iDs} \leq 1600$
4	3	D	$-1600 \leq D_{ac34iDs} \leq 1600$



### 5.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

### 5.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่าย ในขณะที่เดียวกันจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

### 5.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

ปัญหา MILP สำหรับการทำ optimization เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 4 ความยาวคลื่นแรกที่ 1550.12 nm ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.4 nm ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองด้วยกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง คือ จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรองและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกชุดสัญญาณความยาวคลื่นที่ทุกโหนดปลายทาง ของทุกรูปแบบ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย แสดงไว้ในตารางที่ 5.6 ผลเฉลยที่ได้จะนำไปใช้ในการตำแหน่งของหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่โครงข่ายมีกลไกการกักคลื่นสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง ในส่วนต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 ผลเฉลยจำนวน NSC-DCU และ SC-DCU ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1  
ด้วยกลไกการกักสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง

	จำนวน DCUs			จำนวน DCUs	
	NSC-DCU	SC-DCU		NSC-DCU	SC-DCU
$N_{12s}$	1	2	$N_{43s}$	2	2
$N_{21s}$	1	1	$N_{34s}$	2	2
$N_{32s}$	2	2	$N_{14s}$	3	3
$N_{23s}$	2	2	$N_{41s}$	3	2
			$N_{\min(s)}$	16	16

### 5.2.3 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงทำงาน จะพิจารณาแยกอิสระจากการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง โดยการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงทำงานจะใช้ผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนที่ 5.2.1 ส่วนการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงสำรอง จะใช้ผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนที่ 5.2.1 และ 5.2.2 เนื่องจากสัญญาณจะถูกส่งผ่านทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง ดังนั้นการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายบนเส้นใยแสงสำรอง ต้องพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทางเมื่อสัญญาณส่งผ่านเส้นใยแสงทำงานและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนเส้นใยแสงทำงานด้วย โดยการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองเราจะวางอุปกรณ์ชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อมีความยาวคลื่นอย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมสูงถึงค่า  $D_{\max}$  ดังนี้

#### 5.2.3.1 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงทำงาน

ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานจะพิจารณาจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงแสดงไว้ในตารางที่ 5.7 มาคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ตามระเบียบขั้นตอนวิธีในหัวข้อที่ 4.2.2.4 บทที่ 4 โดยพิจารณาแต่ละข่ายเชื่อมโยงแยกจากกันโดยอิสระว่ามีรูปแบบของการส่งผ่านชุดสัญญาณใดผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นบ้าง จากนั้นพิจารณาผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง เพื่อระบุบางค่าของดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทางนี้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสม

เริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงซึ่งมีบางกรณีทีในแต่ละข่ายเชื่อมโยงอาจมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงมากกว่าหนึ่งค่าเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีการส่งผ่านสัญญาณมากกว่าหนึ่งรูปแบบ การกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะถูกกำหนดด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่ามากที่สุด รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณ

ตารางที่ 5.7 รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณ และค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ข่ายเชื่อมโยง	กรณี	สัญญาณ	ดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้น (ps/nm) ของข่ายเชื่อมโยง
$L_{12}$	A	จากโหนด 1 ไป 2	0
		จากโหนด 3 ไป 2	$D_{ac13iA}$
		จากโหนด 4 ไป 2	$D_{ac14iA}$
	B	จากโหนด 1 ไป 2	0
		จากโหนด 4 ไป 2	$D_{ac14iB}$
	C	จากโหนด 1 ไป 2	0
$L_{21}$	A	จากโหนด 2 ไป 1	0
	B	จากโหนด 2 ไป 1	0
		จากโหนด 3 ไป 1	$D_{ac23iB}$
	C	จากโหนด 2 ไป 1	0
		จากโหนด 3 ไป 1	$D_{ac23iC}$
		จากโหนด 4 ไป 1	$D_{ac24iC}$
$L_{23}$	B	จากโหนด 1 ไป 3	$D_{ac21iB}$
		จากโหนด 2 ไป 3	0
		จากโหนด 4 ไป 3	$D_{ac24iB}$
	C	จากโหนด 1 ไป 3	$D_{ac21iC}$
		จากโหนด 2 ไป 3	0
	D	จากโหนด 2 ไป 3	0

$L_{32}$	B	จากโหนด 3 ไป 2	0
	C	จากโหนด 3 ไป 2	0
		จากโหนด 4 ไป 2	$D_{ac34iC}$
	D	จากโหนด 1 ไป 2	$D_{ac31iD}$
		จากโหนด 3 ไป 2	0
		จากโหนด 4 ไป 2	$D_{ac34iD}$
$L_{34}$	A	จากโหนด 3 ไป 4	0
	C	จากโหนด 3 ไป 4	0
		จากโหนด 1 ไป 4	$D_{ac31iC}$
		จากโหนด 2 ไป 4	$D_{ac32iC}$
	D	จากโหนด 2 ไป 4	$D_{ac32iD}$
		จากโหนด 3 ไป 4	0
$L_{43}$	A	จากโหนด 1 ไป 3	$D_{ac41iA}$
		จากโหนด 2 ไป 3	$D_{ac42iA}$
		จากโหนด 4 ไป 3	0
	C	จากโหนด 4 ไป 3	0
	D	จากโหนด 1 ไป 3	$D_{ac41iD}$
		จากโหนด 4 ไป 3	0
$L_{41}$	A	จากโหนด 4 ไป 1	0
		จากโหนด 3 ไป 1	$D_{ac43iA}$
	B	จากโหนด 4 ไป 1	0
	D	จากโหนด 4 ไป 1	0
		จากโหนด 3 ไป 1	$D_{ac43iD}$
		จากโหนด 2 ไป 1	$D_{ac42iD}$
$L_{14}$	A	จากโหนด 1 ไป 4	0
		จากโหนด 2 ไป 4	$D_{ac12iA}$
	B	จากโหนด 1 ไป 4	0

		จากโนด 2 ไป 4	$D_{ac12iB}$
		จากโนด 3 ไป 4	$D_{ac13iB}$
	D	จากโนด 1 ไป 4	0

### 5.2.3.2 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงสำรอง

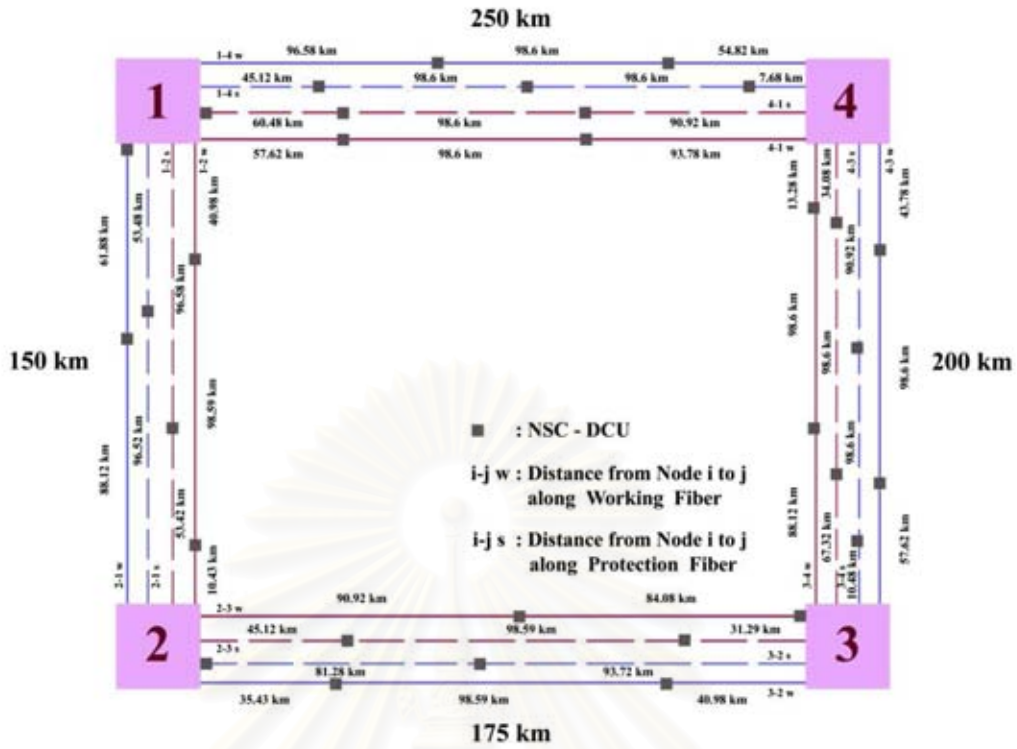
ในการระบุตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงสำรอง เราจะใช้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมในแต่ละโนดปลายทางและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรองด้วย โดยพิจารณาจากรูปแบบของการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นที่โนดต้นทางในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.8 มาคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ตามระเบียบขั้นตอนวิธีในหัวข้อที่ 4.2.2.4 บทที่ 4 โดยพิจารณาแต่ละข่ายเชื่อมโยงแยกจากกันโดยอิสระว่ามีรูปแบบของการส่งผ่านชุดสัญญาณใดผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นบ้าง จากนั้นพิจารณาผลเฉลี่ยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง เพื่อระบุบางค่าของดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทางนี้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงซึ่งมีบางกรณีทีในแต่ละข่ายเชื่อมโยงอาจมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงมากกว่าหนึ่งค่าเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีการส่งผ่านสัญญาณมากกว่าหนึ่งรูปแบบ การกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะถูกกำหนดด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่ามากที่สุด รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณ

ตารางที่ 5.8 รูปแบบการส่งผ่านสัญญาณ และค่าดีสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้น  
บนเส้นใยแสงสำรวจในแต่ละขั้วเชื่อมใยกรณีก่อเกิดความเสียหายกับขั้วเชื่อมใยหนึ่ง  
ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

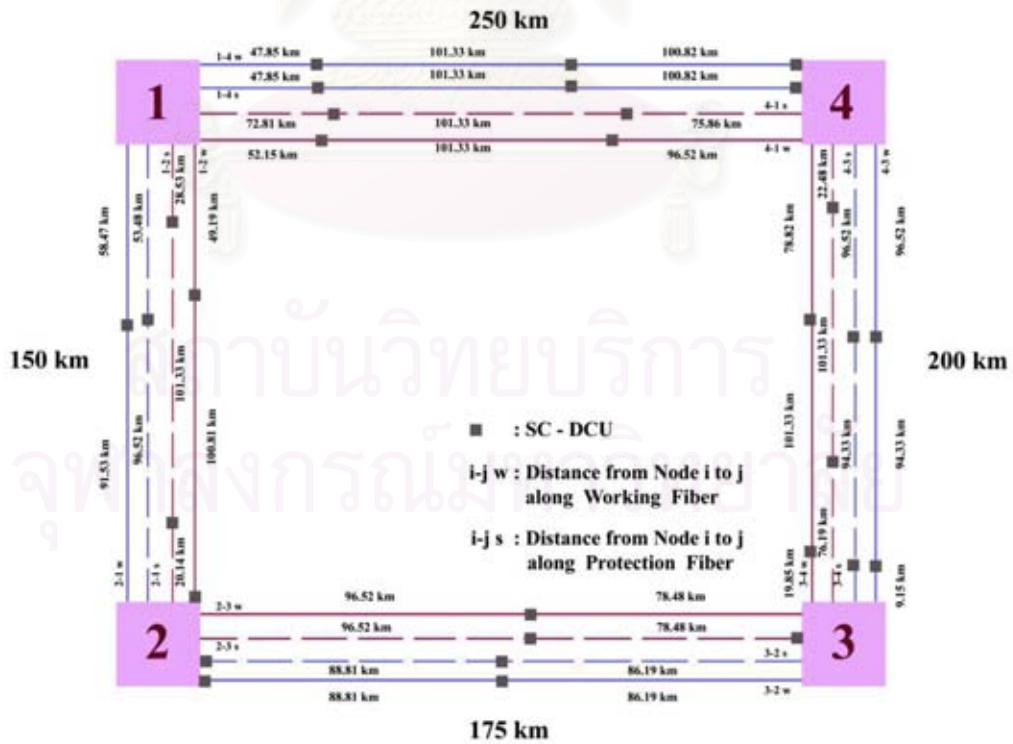
ขั้วเชื่อมใย	กรณี	สัญญาณ	ดีสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้น ( $ps/nm$ ) ของขั้วเชื่อมใย
$L_{12s}$	A	จากโนด 3 ไป 2	$0 + D_i \times (200 + 250) + D_{compi} \times (N_{34s} + N_{41s})$
		จากโนด 4 ไป 2	$D_{ac34iA} + D_i \times (200 + 250) + D_{compi} \times (N_{34s} + N_{41s})$
	B	จากโนด 4 ไป 3	$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{41s})$
	C	จากโนด 1 ไป 4	0
$L_{21s}$	A	จากโนด 2 ไป 3	0
		จากโนด 1 ไป 3	$D_{ac21iA}$
	B	จากโนด 3 ไป 4	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s})$
		จากโนด 2 ไป 4	$D_{ac32iB} + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{32s})$
	C	จากโนด 4 ไป 1	$0 + D_i \times (200 + 175) + D_{compi} \times (N_{43s} + N_{32s})$
$L_{23s}$	B	จากโนด 4 ไป 3	$0 + D_i \times (250 + 150) + D_{compi} \times (N_{41s} + N_{12s})$
	C	จากโนด 1 ไป 4	$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{12s})$
	D	จากโนด 2 ไป 1	0
		จากโนด 3 ไป 1	$D_{ac23iD}$
$L_{32s}$	B	จากโนด 3 ไป 4	0
		จากโนด 2 ไป 4	$D_{ac32iB}$
	C	จากโนด 4 ไป 1	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{43s})$
	D	จากโนด 1 ไป 2	$0 + D_i \times (250 + 200) + D_{compi} \times (N_{14s} + N_{43s})$
$L_{34s}$	A	จากโนด 3 ไป 2	0
		จากโนด 4 ไป 2	$D_{ac34iA}$
	C	จากโนด 1 ไป 4	$0 + D_i \times (150 + 175) + D_{compi} \times (N_{12s} + N_{23s})$
	D	จากโนด 2 ไป 1	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s})$
		จากโนด 3 ไป 1	$D_{ac23iD} + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{23s})$

$L_{43s}$	A	จากโนด 2 ไป 3	$0 + D_i \times (150 + 250) + D_{compi} \times (N_{21s} + N_{14s})$
		จากโนด 1 ไป 3	$D_{ac21iA} + D_i \times (150 + 250) + D_{compi} \times (N_{21s} + N_{14s})$
	C	จากโนด 4 ไป 1	0
	D	จากโนด 1 ไป 2	$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{14s})$
$L_{14s}$	A	จากโนด 2 ไป 3	$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s})$
		จากโนด 1 ไป 3	$D_{ac21iA} + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{21s})$
	B	จากโนด 3 ไป 4	$0 + D_i \times (175 + 150) + D_{compi} \times (N_{32s} + N_{21s})$
		จากโนด 2 ไป 4	$D_{ac32iB} + D_i \times (175 + 150) + D_{compi} \times (N_{32s} + N_{21s})$
	D	จากโนด 1 ไป 2	0
$L_{41s}$	A	จากโนด 3 ไป 2	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s})$
		จากโนด 4 ไป 2	$D_{ac34iA} + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{34s})$
	B	จากโนด 4 ไป 3	0
	D	จากโนด 2 ไป 1	$0 + D_i \times (175 + 200) + D_{compi} \times (N_{23s} + N_{34s})$
		จากโนด 3 ไป 1	$D_{ac23iD} + D_i \times (175 + 200) + D_{compi} \times (N_{23s} + N_{34s})$

ผลเฉลยตำแหน่งของหน่วยชุดเซยติสเฟอร์ชั้นทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 สามารถรองรับการส่งสัญญาณด้วยจำนวนของช่องสัญญาณที่น้อยกว่าหรือเท่ากับกับความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณคือ 4 ความยาวคลื่น และในกรณีที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากกว่าคือ 7 ความยาวคลื่นตามที่ได้แสดงความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.4 ตำแหน่งของหน่วยชุดเซยติสเฟอร์ชั้นทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU บนข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ เพื่อรองรับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทั่วทั้งโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของ NSC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง  
ของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

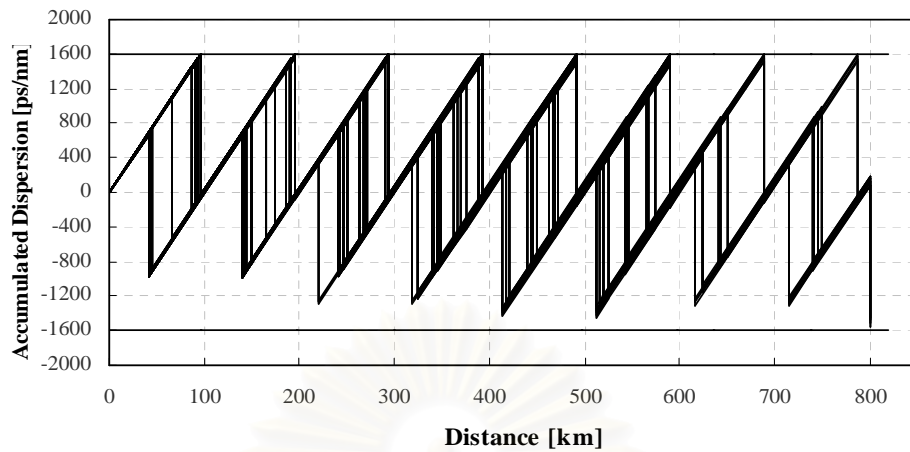


รูปที่ 5.3 ตำแหน่งของ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง  
ของโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

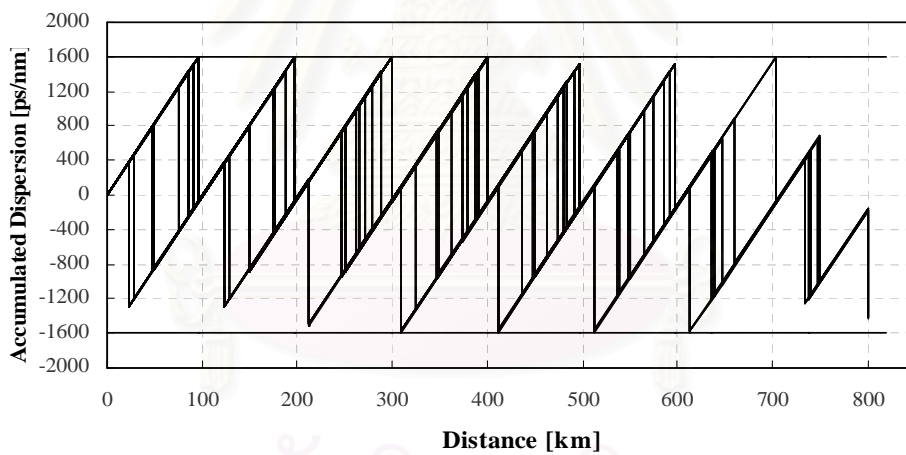


ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปใ้ในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF ซึ่งได้กำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC และ SC-DCU ไว้ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 และ 5.3 การชดเชยดิสเพอร์ชันของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจะเกิด ณ ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เขียนกราฟแสดงสมการการชดเชยดิสเพอร์ชันระหว่างค่าดิสเพอร์ชันสะสมและระยะทางที่สัญญาณเดินทางในโครงข่ายพบว่ากราฟพิกที่ว้ทั้งโครงข่ายมีค่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณอยู่ในช่วงของเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน คือ ไม่เกินค่า  $D_{max}$  ตลอดเส้นทางของการเดินทางในแต่ละทราฟฟิก ในรูปที่ 5.4 และ 5.5 เราจะเห็นความแตกต่างระหว่างการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้ง 2 ชนิดได้คือ SC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกันมาก ต่างจากการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะทางการส่งสัญญาณและระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าสูงมากขึ้น NSC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณต่างกันอย่างมากจะสังเกตเห็นลักษณะความชันของกราฟที่เด่นชัดได้ยิ่งขึ้นสังเกตได้จากพื้นที่แถบสีด้านบนแถบความชันต่าง ๆ ที่ชัดเจนขึ้น

นอกจากนี้ผลจากการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่าย แสดงให้เห็นว่าระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน เนื่องจากระยะทางที่จัดสรรขึ้นใหม่จะยาวกว่าระยะทางการส่งผ่านสัญญาณในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ เห็นได้จากจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะมีมากขึ้นโดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.5, 4.7, 5.2 และ 5.3 นอกจากนี้มีแนวโน้มว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU จะน้อยกว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน NSC-DCU

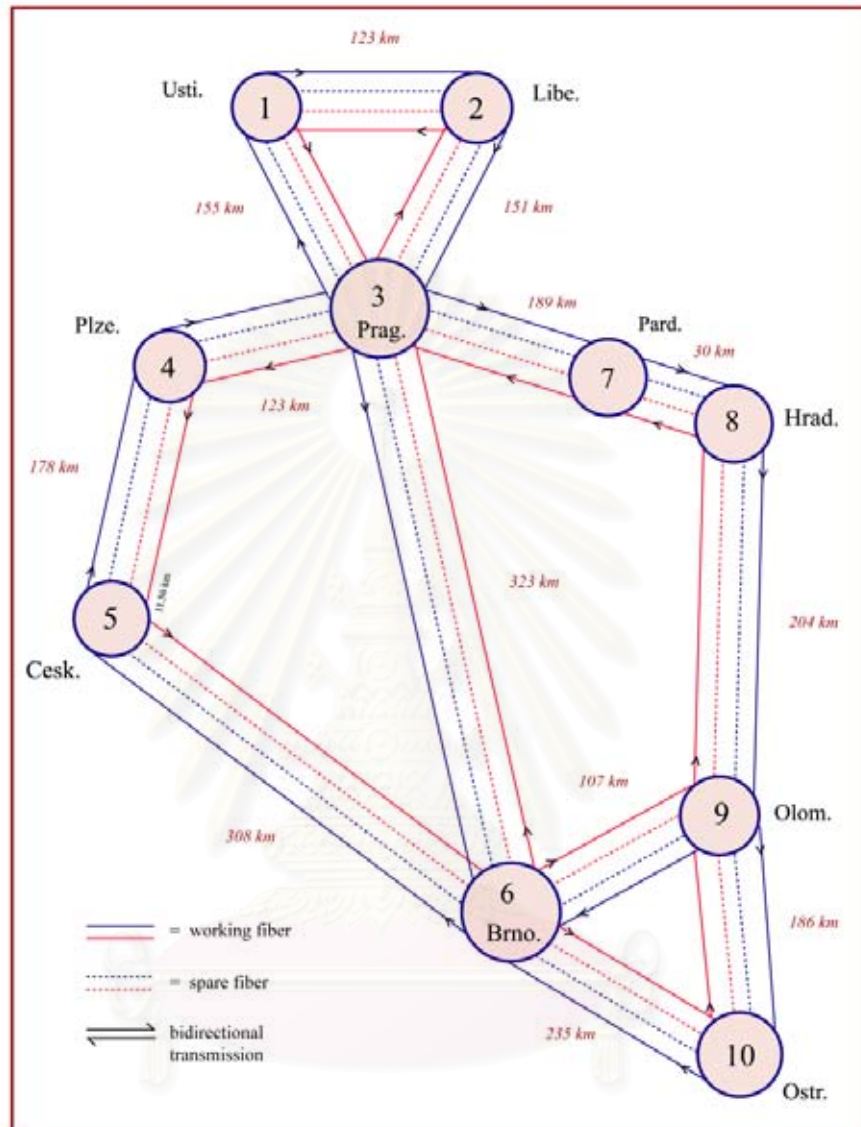


รูปที่ 5.4 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของสัญญาณจากการวางตำแหน่งของ NSC-DCU กรณีเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 5.5 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางของสัญญาณจากการกำหนดตำแหน่งของ SC-DCU กรณีเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

### 5.3 การจำลองการวางหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN



รูปที่ 5.6 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

ในการจำลองโครงข่ายกำหนดให้ส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN เป็นโครงข่ายวงแหวน 4 โครงข่ายเชื่อมต่อกัน (4-ring network-intersected) ตามมาตรฐาน SONET/SDH ประกอบด้วย 13 ข่ายเชื่อมโยง 10 โหนด ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางผ่านไปในเส้นใยแสงทำงานมีระยะทางรวม 1882 km [31] โดยการส่งผ่านสัญญาณระหว่างสองโหนดใด ๆ จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากการส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กล่าวคือ เส้นทางของการส่งผ่านสัญญาณระหว่างสองโหนดใด ๆ จะมีมากกว่าสองเส้นทางเนื่องจากการเชื่อมต่อกันของโครงข่ายลักษณะวงแหวนจำนวน 4 โครงข่ายด้วยการทำงานของอุปกรณ์ OADM ในการเพิ่มและ

ลดช่องสัญญาณและอุปกรณ์ OXC ที่โนดซึ่งเป็นโนดเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายวงแหวนย่อย เช่น โหนดที่ 3 ในรูปที่ 4.9 เป็นต้น ดังนั้นเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่หลังเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะเลือกใช้เฉพาะเส้นทางที่มีระยะทางสั้นสุดเท่านั้น

การหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย จะดำเนินการตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เราสามารถคำนวณจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณตามวิธีที่นำเสนอไปในหัวข้อที่ 2.5.3.1.1 บทที่ 2 โดยจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งสัญญาณ สำหรับโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN คือ 12 ความยาวคลื่น การจำลองโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงาน เราเลือกใช้สัญญาณจำนวน 16 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นแรกเท่ากับ 1548.32 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.2 nm ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN ส่วนการจำลองโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงสำรอง จะเลือกใช้สัญญาณ 4 ความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นแรกเท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.4 nm ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN ทั้งบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 จากนั้นแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.1 และ 5.2.2 เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองแสดงไว้ในตารางที่ 5.9 และ 5.10 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.9 ผลเฉลี่ยจำนวนหน่วยขาดเครดิตสเปอริชันบนเส้นใยแสงทำงาน  
ภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย

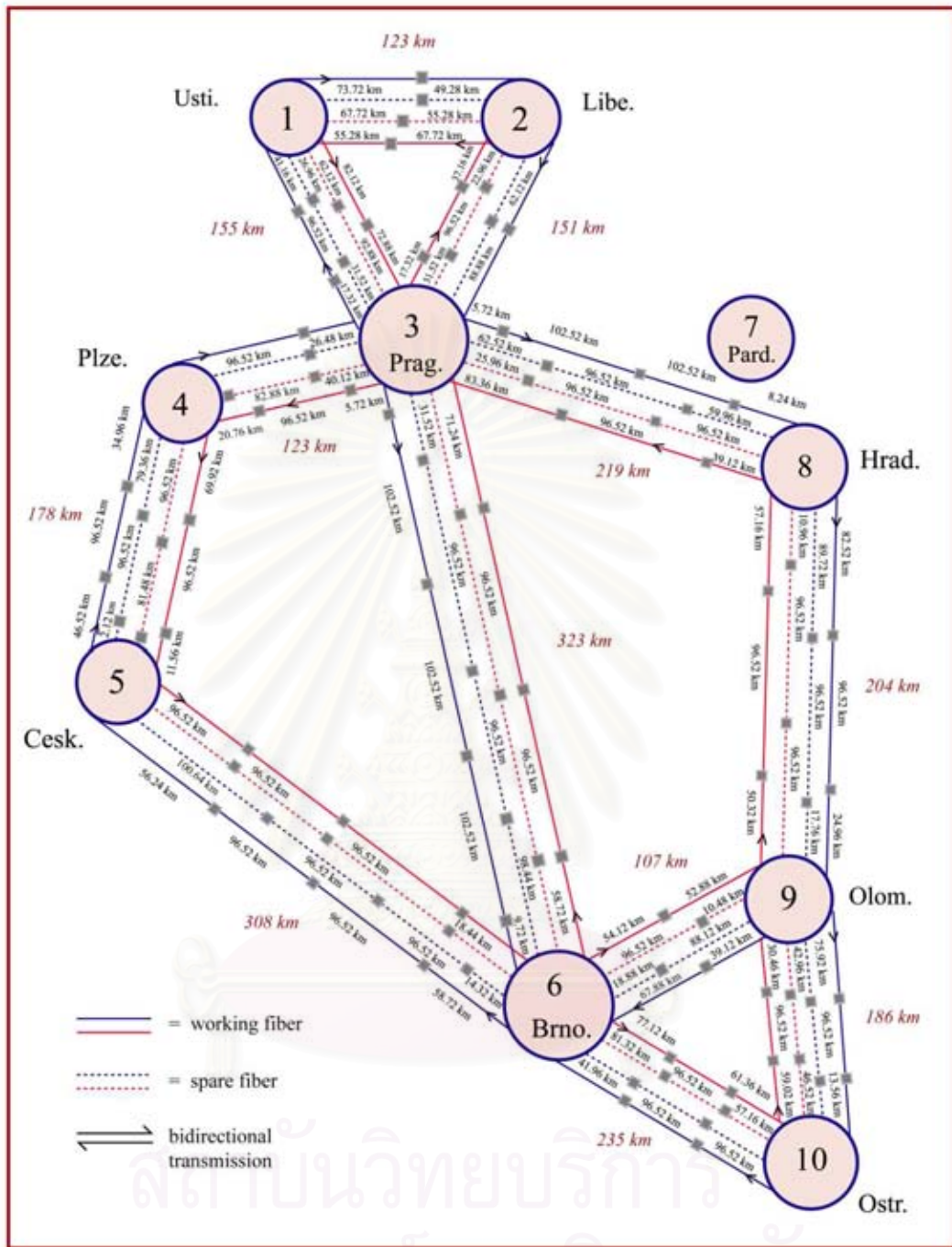
	จำนวน DCUs			จำนวน DCUs	
	NSC-DCU	SC-DCU		NSC-DCU	SC-DCU
$N_{12}$	1	1	$N_{63}$	3	3
$N_{21}$	1	1	$N_{37}$	2	2
$N_{13}$	1	1	$N_{73}$	2	2
$N_{31}$	2	2	$N_{78}$	1	0
$N_{23}$	1	1	$N_{87}$	0	0
$N_{32}$	2	2	$N_{89}$	2	2
$N_{34}$	2	1	$N_{98}$	2	2
$N_{43}$	1	1	$N_{69}$	1	1
$N_{45}$	2	2	$N_{96}$	1	1
$N_{54}$	2	2	$N_{610}$	2	3
$N_{56}$	3	3	$N_{106}$	2	2
$N_{65}$	3	3	$N_{910}$	2	2
$N_{36}$	4	3	$N_{109}$	2	2
			$N_{\min}$	47	45

ตารางที่ 5.10 ผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรวจ  
ภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย

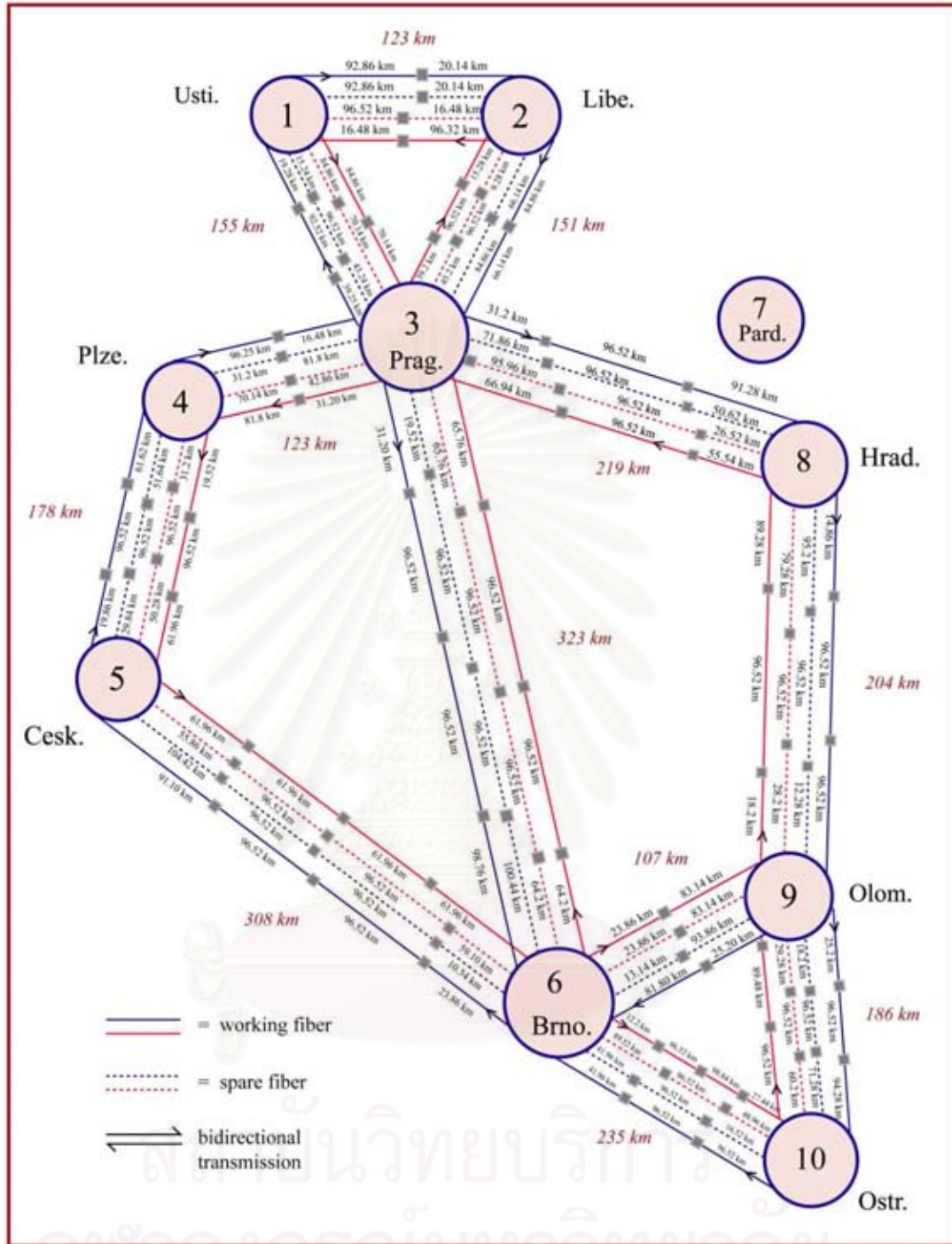
	จำนวน DCUs			จำนวน DCUs	
	NSC-DCU	SC-DCU		NSC-DCU	SC-DCU
$N_{12s}$	1	1	$N_{63s}$	3	3
$N_{21s}$	1	1	$N_{37s}$	2	2
$N_{13s}$	1	1	$N_{73s}$	2	2
$N_{31s}$	2	2	$N_{78s}$	0	0
$N_{23s}$	1	1	$N_{87s}$	0	0
$N_{32s}$	2	2	$N_{89s}$	2	2
$N_{34s}$	2	1	$N_{98s}$	2	2
$N_{43s}$	1	1	$N_{69s}$	1	1
$N_{45s}$	2	2	$N_{96s}$	1	1
$N_{54s}$	2	2	$N_{610s}$	2	2
$N_{56s}$	3	3	$N_{106s}$	2	2
$N_{65s}$	3	3	$N_{910s}$	2	2
$N_{36s}$	3	3	$N_{910s}$	2	2
			$N_{\min(s)}$	45	44

ระเบียบขั้นตอนวิธีการหาจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU จากผลเฉลยในตารางที่ 5.9-5.10 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่ายโดยมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y อยู่ในวงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดบนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรวจในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN โดยวิธีการคำนวณหาตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะดำเนินการตามระเบียบขั้นตอนวิธีที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.4 ได้ผลเฉลยดังนี้



รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของ NSC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง บนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย



รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย

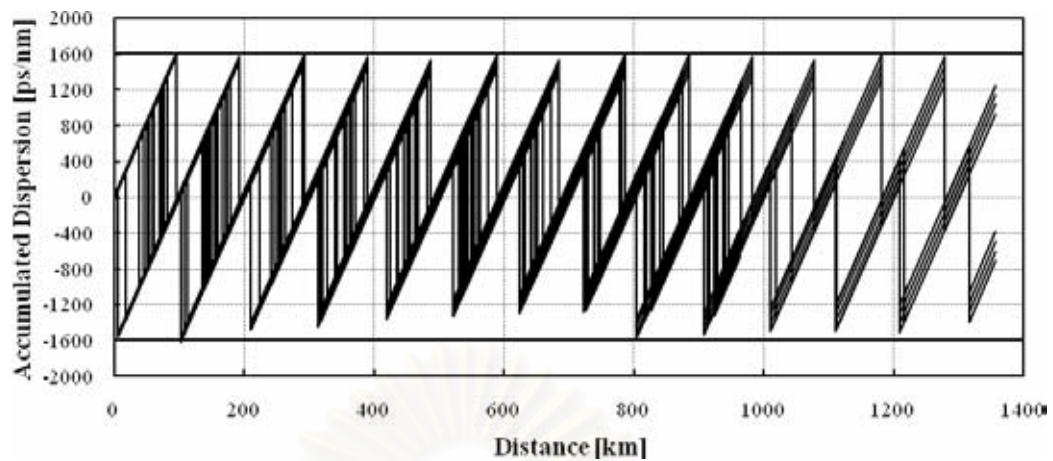
ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF ซึ่งได้กำหนดตำแหน่งหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NSC และ SC-DCU ไว้ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.7 และ 5.8 การชุดเซตดิสเพอร์ชันของทุกสัญญาณ



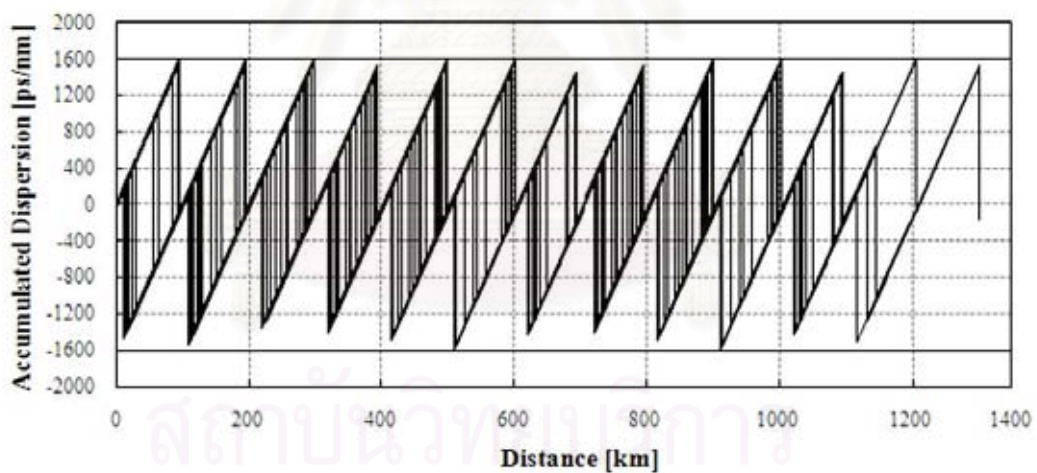
ความยาวคลื่นจะเกิด ณ ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละขั้วเชื่อมโยง เขียนกราฟแสดงสมการชดเชยดิสเพอร์ชันระหว่างค่าดิสเพอร์ชันสะสมและระยะทางที่สัญญาณเดินทางในโครงข่ายพบว่ากราฟฟีกทั่วทั้งโครงข่ายมีค่าค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณอยู่ในช่วงของเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน คือ ไม่เกินค่า  $D_{max}$  ตลอดเส้นทางของการเดินทางในแต่ละทราฟฟีก ในรูปที่ 5.9 และ 5.10 เราจะเห็นความแตกต่างระหว่างการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้ง 2 ชนิดได้คือ SC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกันมาก ต่างจากการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะทางการส่งสัญญาณและระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าสูงมากขึ้น NSC-DCU จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละช่องสัญญาณต่างกันอย่างมากจะสังเกตเห็นลักษณะความชันของกราฟที่เด่นชัดได้ยิ่งขึ้นสังเกตได้จากพื้นที่แถบสีดำในแต่ละแถบความชัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางการเดินทางของจากรางตำแหน่งของ NSC-DCU กรณีเกิดความเสียหายของขั้วเชื่อมต่อโยงหนึ่งภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN



รูปที่ 5.10 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางการเดินทางของจากรางตำแหน่งของ SC-DCU กรณีเกิดความเสียหายของขั้วเชื่อมต่อโยงหนึ่งภายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ความแพร่หลายของมาตรฐาน SONET/SDH และการเข้ามามีบทบาทของเทคโนโลยีการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น DWDM ในโครงข่ายทางแสงทำให้ได้ความจุและมีการใช้ทรัพยากรแบนด์วิดท์สูงสุดตามต้องการ นำมาซึ่งการขยายขนาดของโครงข่าย โดยการอัพเกรดอุปกรณ์ภายในโครงข่ายให้รองรับการเปลี่ยนแปลงจากเทคโนโลยีมัลติเพลกซ์แบบเดิมคือ TDM ไปสู่ เทคโนโลยี DWDM ซึ่งในโครงข่ายวงแหวนสามารถทำได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบโครงข่ายลักษณะอื่น นอกจากนี้โครงข่ายวงแหวนมีลักษณะการป้องกันข้อมูลจากความเสียหายที่เป็นเอกลักษณ์ด้วยการควบคุมและจัดการโครงข่ายแบบอัตโนมัติผ่านสวิทช์ที่มีการทำงานไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณระยะไกลด้วยการมัลติเพลกซ์สัญญาณรวมในเส้นใยแสงเดียวกัน จะเกิดผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันยังผลให้ความหมายของการสื่อสารข้อมูลเกิดความผิดเพี้ยนไปจึงจำเป็นต้องมีการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนออัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนด้วยจำนวนอุปกรณ์น้อยสุดเพื่อลดต้นทุนโครงข่ายในส่วนของหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชัน โดยไม่คิดผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ และกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ได้ทั้งหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU โดยเราจะวางหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชันเมื่ออย่างน้อยหนึ่งความยาวคลื่นมีค่าดิสเพอร์ชันสูงถึงค่าดิสเพอร์ชันที่สามารถยอมรับได้ ผลเฉลยจากอัลกอริทึมที่สร้างคือ จำนวนหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชันน้อยสุดในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

ผลเฉลยการจำลองอัลกอริทึมกับโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ คือ จำนวนหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชันเท่ากันที่ 14 ตัวทั้งชนิด NSC-DCU และ SC-DCU ส่วนผลเฉลยในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN กรณีโครงข่ายทำงานปกติ คือ จำนวนหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชัน NSC-DCU 43 ตัวและจำนวนหน่วยชุดเซยค่าดิสเพอร์ชัน SC-DCU 42 ตัว

ผลเฉลยการจำลองอัลกอริทึมกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใย

แสงทำงานคือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน NSC-DCU 16 ตัว และ 15 ตัวสำหรับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU ส่วนผลเฉลยการจำลองอัลกอริทึมกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง คือจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเท่ากันที่ 16 ตัวทั้งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NSC-DCU และ SC-DCU

ผลเฉลยการจำลองอัลกอริทึมกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection บนเส้นใยแสงทำงานคือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน NSC-DCU 47 ตัว และ 45 ตัวสำหรับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU ส่วนผลเฉลยการจำลองอัลกอริทึมกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายในโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ span protection บนเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน NSC-DCU 45 ตัว และ 44 ตัวสำหรับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU

ผลจากการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่าย แสดงให้เห็นว่าระยะทางในการส่งผ่านสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน เนื่องจากระยะทางที่จัดสรรขึ้นใหม่จะยาวกว่าระยะทางการส่งผ่านสัญญาณในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ นอกจากนี้มีแนวโน้มว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU จะน้อยกว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน NSC-DCU แต่โดยทั่วไปแล้วนั้นราคาของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU จะค่อนข้างมีราคาที่สูงกว่า ดังนั้นเราสามารถนำอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นมาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกชนิดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันให้เหมาะสมที่สุดกับโครงข่ายเพื่อลดต้นทุนโครงข่ายในส่วน of หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันได้

## 6.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

ในการจำลองโครงข่ายมีการตั้งสมมติฐานว่าจำนวนช่องสัญญาณ ความยาวของข่ายเชื่อมโยง และระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่าย เราจึงทดลองโดยทำการปรับแต่ง เพิ่ม / ลดความยาวในข่ายเชื่อมโยงด้วยตัวคูณเชิงเส้น ( $n$ ) จำนวนความยาวคลื่นในการส่งสัญญาณในโครงข่าย และระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในการส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 กรณีโครงข่ายทำงานปกติ กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เป็นวงแหวนตามมาตรฐาน SONET/SDH ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางผ่านไปในเส้นใยแสงทำงาน โครงข่ายประกอบขึ้นด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง 4 โหนด ระยะทางรวม 775 km ในการทดลองได้ปรับแต่งเพิ่ม / ลดระยะทางทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายด้วยตัวคูณ

แบบเชิงเส้น  $n$  ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เมื่อ ตัวคูณเชิงเส้น  $n$  มีค่าเท่ากับ 2 หมายความว่าระยะทางของทุกขั้วเชื่อมโยงจะถูกเพิ่มเป็นสองเท่าจากเดิมคือ 150 km, 175 km, 250 km และ 200 km เป็น 300 km, 250 km, 500 km และ 400 km ตามลำดับ โดยจะพิจารณาควบคู่ไปกับรูปแบบการส่งผ่านสัญญาณที่มีจำนวนความยาวคลื่นและระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่แตกต่างกันออกไปตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ค่าความยาวคลื่น ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ และจำนวนช่องสัญญาณของการส่งสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ภายในโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

กรณีที่	ค่าความยาวคลื่นกลาง (center wavelength [nm])	ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (channel spacing [nm])	จำนวนช่องสัญญาณ (number of channel)
1	1,550.12	0.8	3
2	1,550.12	0.8	5
3	1,550.12	0.8	7
4	1,550.12	1.6	7
5	1,550.12	3.2	7

ในการทดลองจะทำการปรับแต่งค่าที่ละกรณีเพื่อเปรียบเทียบจำนวนหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันระหว่าง NSC-DCU และ SC-DCU ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ 3 คือการส่งผ่านสัญญาณจำนวน 7 ความยาวคลื่นที่มีความยาวคลื่นกลาง 1550.12 nm โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 0.8 nm เป็นต้น ผลจากการปรับค่าโครงข่ายด้วยตัวคูณแบบเชิงเส้นในรูปแบบการส่งสัญญาณทั้ง 5 กรณีเราสามารถระบุจำนวนหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อวางลงในโครงข่ายดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.2. ผลเฉลยจากการปรับค่าโครงข่ายด้วยตัวคูณแบบเชิงเส้น

กรณีที่	$n = 0.5$		$n = 1$		$n = 2$		$n = 4$		$n = 8$	
	NSC	SC	NSC	SC	NSC	SC	NSC	SC	NSC	SC
1	6	6	14	14	30	28	62	56	124	118
2	6	6	14	14	30	28	62	56	124	118
3	6	6	14	14	30	28	62	56	124	118
4	6	6	14	14	30	28	62	56	N-A	118
5	6	6	14	14	30	28	N-A	56	N-A	118

พบว่าโครงข่ายที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากันคือ 0.8 nm การส่งสัญญาณจำนวนความยาวคลื่น 3, 5 และ 7 ช่องสัญญาณ ตัวคูณแบบเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.5 และ 1 ผลการทดลองออกมาในทิศทางเดียวกันนั่นคือ จำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน เมื่อความยาวสายเชื่อมโยงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณเชิงเส้นที่ 2, 4 และ 8 จำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มตามตัวคูณเชิงเส้นที่สูงขึ้นคือ จำนวน NSC-DCU จะมากกว่าจำนวน SC-DCU และในกรณีที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าที่สูงมากที่สุดที่ 1.6 nm การส่งสัญญาณ 7 ความยาวคลื่นได้ผลการทดลองเหมือนกับรูปแบบโครงข่ายที่ 1 – 3 ที่ตัวคูณเชิงเส้นที่ 0.5, 1, 2 และ 4 แต่ในกรณีที่สายเชื่อมโยงของโครงข่ายมีค่าเพิ่มด้วยตัวคูณเชิงเส้นที่ 8 จำนวน NSC-DCU ไม่สามารถกำหนดผลเฉลยได้เนื่องจากผลของ over-under compensation [14] กรณีที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าที่สูงมากที่สุดที่ 3.2 nm การส่งสัญญาณ 7 ความยาวคลื่นได้ผลการทดลองที่เหมือนกันกับรูปแบบโครงข่ายที่ 4 เมื่อระยะทางของสายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณเชิงเส้นที่ 0.5, 1 และ 2 แต่ในกรณีที่สายเชื่อมโยงของโครงข่ายมีค่าเพิ่มด้วยตัวคูณเชิงเส้นที่ 4 และ 8 พบว่า NSC-DCU นั้นไม่สามารถกำหนดผลเฉลยได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน

สรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อจำนวนหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างมาก คือ ความยาวของสายเชื่อมโยงและ ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ส่วนปัจจัยเรื่องจำนวนช่องสัญญาณนั้นเราจำเป็นต้องพิจารณาชุดสัญญาณความยาวคลื่นที่ส่งผ่านสัญญาณไม่ให้ช่วงระหว่างความยาวคลื่นที่น้อยสุดและมากที่สุดนั้นมีค่าแตกต่างกันมากเกินไป เพื่อเลี่ยงผลจาก over-under compensation [14]

### 6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่นำเสนอไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันได้โดยทันทีที่ต้องผ่านการคำนวณหาตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ทุกโนดปลายทางภายในโครงข่ายทำให้ขั้นตอนวิธีมีความล่าช้าโดยเฉพาะในโครงข่ายที่มีโครงสร้างลักษณะวงแหวนที่ซับซ้อนขึ้น ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึมสำหรับวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจึงควรพัฒนาให้สามารถคำนวณตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันพร้อมกับการระบุจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดได้เลยทันที



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Chomycz, B. FIBER OPTIC INSTALLER'S FIELD MANUAL: McGraw Hill, 2000.
- [2] Keiser, G. Optical fiber communications 3<sup>rd</sup> edition, McGraw Hill, 2000.
- [3] Agrawal, GP. Nonlinear Fiber Optics 3<sup>rd</sup> edition, Academic Press, 2001.
- [4] Mukherjee, B. Optical Communication Networks. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.
- [5] Kavehrad, M.; and Tabiani, M. Selective-Broadcast Optical Passive Star Coupler Design for Dense WDM Networks. IEEE Photonics Technology Letter 3 (1991): 487-489.
- [6] Kavehrad, M.; and Tabiani, M. A Selective-Broadcast Passive Star Coupler for Self-Routing Dense Wavelength Division Multiplexed Optical Networks. Journal of Lightwave Technology 9(10) (1991): 1278-1288.
- [7] Khanal, M.; Chae, C.J.; and Tucker, R.S. Selective Broadcasting of Digital Video Signals Over a WDM Passive Optical Network. IEEE Photonics Technology Letter 17(9) (2005): 1992-1994.
- [8] Khanal, M.; Chae, C.J.; and Tucker, R.S. Optimum Operating Conditions of a WDM Passive Optical Network with Selective Video Broadcasting Capability through a Single Modulator," 23(6) (2005): 764-769.
- [9] Rhee, J.K.; Tomkos, I.; and Li, M.J. A Broadcast-and-Select OADM Optical Network With Dedicated Optical-Channel Protection. Journal of Lightwave Technology 21 (1) (2003): 25-31.
- [10] Ramamurthy, B.; Iness, J.; and Mukherjee, B. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Equally Powered-Wavelengths Case. Journal of Lightwave Technology 16 (9) (1998): 1560-1569.



- [11] Ramamurthy, B.; Iness, J.; and Mukherjee, B. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Unequally Powered-Wavelengths Case. Journal of Lightwave Technology 6 (6) (1998): 755-767.
- [12] Ramamurthy, B.; Mukherjee, B. Design of Optical WDM Networks. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 2001.
- [13] Ramamurthy, B.; Iness, J.; and Mukherjee, B. 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.
- [14] Kaewplung, P.; Ketmanee, P.; Lolurlert, T. Dispersion Compensation in Broadcast-and-Selective Optical Network. Lasers and Electro-Optics, CLEO /Pacific Rim 2005. Pacific Rim Conference, 2005.
- [15] Li, C.S.; Tong, F.F.; Georgiou, C.J.; and Cheng, M. Gain equalization in metropolitan and wide area optical networks using optical amplifiers. In Proceedings, IEEE INFOCOM' 94, Toronto, ont., Canada, (1994):130-137.
- [16] Harai, H.; Murata, M.; and Miyahara, H. Performance Analysis of Wavelength Assignment Policies in All-Optical Network with Limited-Range Wavelength Conversion. IEEE Journal of Selective Areas Communication 16(7) (1998): 1051-1060.
- [17] Li, B.; and Chu, X. Routing and Wavelength Assignment VS. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks. IEEE Optical Communication. Aug. 2003.
- [18] Wang, J.; and Chen, B. Dynamic Wavelength Assignment for Multicast in All-Optical WDM Network to Maximize the Network Capacity. IEEE Journal of Selective Areas Communication 21(8) (2003).
- [19] Wang, J.; Qi, X.; and Chen, B. Wavelength Assignment for Multicast in All-Optical WDM Network with Splitting Constraints. IEEE/ACM Transactions on Networking 14 (1) (2006): 169-182.

- [20] Wonfor, A. 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.
- [21] Tachibana, M.; Laming, R.L.; Morkel, P.R.; and Payne, D.N. Erbium-doped fiber amplifier with flattened gain spectrum. IEEE Photonics Technology Letters 3(2) (1991): 118-120.
- [22] Potenza, M. Optical fiber amplifiers for telecommunication system. IEEE Communications Magazine 34(8) (1996): 96-102.
- [23] Brackett, C.A. Dense wavelength division multiplexing network: Principles and applications. IEEE Journal of Selected Areas in Communication 8(6) (1990):948-964.
- [24] Antoniadou, N.; Boskovic, A.; Tomkos, I.; and Yadlowsky, IEEE Journal of Selected Areas Communication 20(1) (2002):149-165.
- [25] Tutorial DWDM prerequisite training: Fujitsu, 2002
- [26] Tutorial SDH application training: NEC, 2005
- [27] รองศาสตราจารย์ ดร. อธิคม ฤกษ์บุตร, เทคโนโลยี DWDM: เส้นทางขนานสำหรับการเพิ่ม Bit Rate [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.cme.mut.ac.th/article/DWDM.pdf>
- [28] พงษ์ศักดิ์ สุ่มพันธ์ไพบูลย์, การวางแผนโครงข่าย SDH [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.cewmedia.com>
- [29] ธีฎพร เขี่ยมวสันต์ “การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [30] Data Sheet of PowerForm™ DCM® Modules for Single-Mode Fiber, C-Band: Avanex, 2005.
- [31] [www.ces.net/doc/2003/research/optnet.html](http://www.ces.net/doc/2003/research/optnet.html)



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

เนื่องจากส่วนของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับดังนั้นจึงขอแนบบทความที่ได้รับการตีพิมพ์มาเสนออีกครั้ง

- I. Mohara and P. Kaewplung, "Optimal placement of dispersion compensating unit for transparent DWDM ring network," in the 12<sup>th</sup> Optoelectronics and Communications Conference / 16<sup>th</sup> International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber (OECC/IOOC 2007), Pacifico Yokohama, Yoghama Kanagawa, Japan, July 9-13, 2007, 13P-8.
- บทความวิชาการในงานประชุม International Conference on Telecommunication, Industry, and Regulatory Development (ICTIR) 2007 จัดขึ้นที่ Plaza Athenee Hotel ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในวันที่ 19-21 สิงหาคม ค.ศ. 2550 ในชื่อบทความเรื่อง *Optimized Dispersion Compensations in Upgrade Optical Metro-Ring Networks*

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# Optimum Placement of Dispersion Compensating Unit for Transparent DWDM Ring Network

Ismaeane Mohara<sup>1</sup> and Pasu Kaewplung<sup>2</sup>

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Tel: +66-2-218-6907, Fax: +66-2-218-6912, E-mail: <sup>1</sup>yamala29@hotmail.com, <sup>2</sup>[Pasu.K@chula.ac.th](mailto:Pasu.K@chula.ac.th)

## Abstract

This paper first time introduces an optimal algorithm for placing the dispersion compensating unit (DCU) in DWDM ring network. Our proposed algorithm can be applied for both non-slope-compensated and slope-compensated DCUs.

## 1. Introduction

SONET/SDH-based optical ring network has a widespread of adoption as metro-area networks (MANs) due to its reliability and outstanding restoration scheme [1]. The exponential growth in data traffic leads to the requirement of upgrading the incumbent SONET/SDH ring to support transparent DWDM technologies, where the multi-wavelength signal remains in optical domain during transmission in the network [1]. For such a network that involves with long links, the fiber attenuation and the fiber dispersion become the serious problems that limit the transmission performance. The optimal amplifier placement method for the long-haul DWDM ring network has been already developed [2], while no any attempt has been made on the dispersion compensation although the dispersion compensation is also a serious issue that has to be taken into account in practical design of the transparent DWDM ring network. In this paper, we propose, for the first time in our knowledge, an algorithm for optimal placement of DCUs in the transparent DWDM ring network. Our algorithm can support both non-slope-compensated (NS) and slope-compensated (SC) DCUs, and can ensure the minimum number of DCUs. We assign a part of the optical pan-European network (OPEN) with the total length of 1,882 km as a 4-ring-intersected sample network, as shown in Fig. 1. By applying our algorithm, we show that for the channel spacing range of 0.2 nm - 1.0 nm, the required total number of DCUs for 9-channel signal is 44 for both NSC-and SC-DCUs.

## 2. Optimum DCU placement algorithm

Our algorithm consists of 4 steps as follows:

*Step1: Communication light paths between any two nodes.*

Let the communication between any two nodes can be bidirectional, in this step, the possible light paths

between any two nodes are generated, and finally only the shortest paths are selected for signal transmission

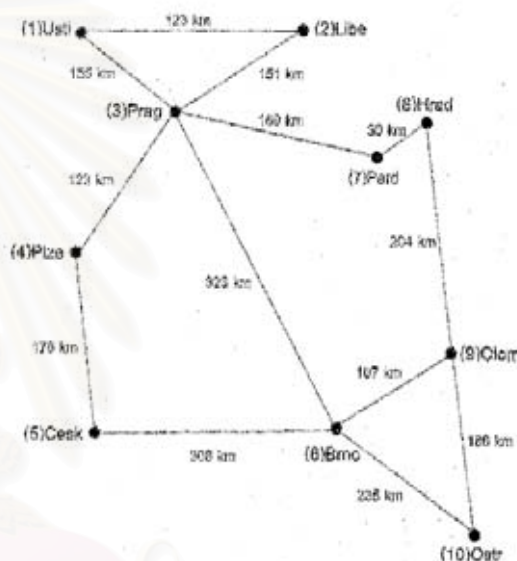


Fig. 1: Part of OPEN [3] that is used as sample network.

*Step 2: Generate the constraints.*

First, we assign a group of wavelengths which will be used in the network. The number of wavelength can be larger, smaller, or equivalent to the number of node. Then, the following constraints are generated.

(A) Path Constraints

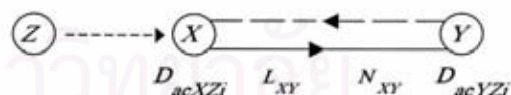


Fig.2: Light path between adjacent nodes

The path constraint for optimum DCU placement is

$$D_{acXZi} + (D_i \times L_{XY}) + (D_{COMPi} \times N_{XY}) = D_{acYZi} \quad (1)$$

According to Eq. (1), for a path started from node X to node Y with the length of  $L_{XY}$  ( $X \neq Y$ ), the accumulated dispersion ( $D_{acXZi}$ ) from node Z of signal at wavelength  $i$  ( $\lambda_i$ ) will increase with the amount of  $D_i \times L_{XY}$ , where  $D_i$  is the dispersion at  $\lambda_i$  of the transmission fiber of

the path. At the same time, the accumulated dispersion will be compensated by the amount of  $D_{COMPi} \times N_{XY}$  where  $D_{COMPi}$  is the dispersion of DCU at  $\lambda_i$  and  $N_{XY}$  is the number of DCU on path  $XY$ . Finally, we obtain the total accumulated dispersion at the output of node  $Y$  equals to  $D_{acYZi}$ .

(B) Maximum dispersion constraints.

For each wavelength, it is required that the accumulated dispersion at any point in the network should not exceed the maximum acceptable accumulated dispersion  $D_{max}$

[4]. Therefore, we have the constraint,

$$-D_{max} \leq D_{acYZi} \leq D_{max} \quad (2)$$

(C) Integrality constraints

For each path  $XY$ ,  $N_{XY}$  must be an integer.

(D) Objective function

$$\text{Minimize}(N) \quad (3)$$

Where  $N$  is total number of DCU in the network

*Step 3: Solve the constraint equations.*

Since our problem is a type of mixed-integer linear programming (MILP), this optimization problem can be solved by the soft wares such as X-Press.MP and C-plex. As a result from solving the problem, the number of DCU in each link and the accumulated dispersion at every node is obtained.

*Step 4: Place the DCUs.*

The DCUs are placed in the network at a position where at least one wavelength exhibits the accumulated dispersion that reaches  $D_{max}$ .

### 3. Optimal DCUs placement in sample network

For demonstrating our algorithm in really existing network, we use part of OPEN as a sample network as shown in Fig. 1. Our sample network is assumed to operate as ring topology and is consisted of 4-intersected rings with 10 nodes, 13 links, and has the total length of 1,882 km. For transmission fiber, the standard single-mode fiber (SMF, G.652), which exhibits the dispersion ( $D$ ) of  $16.5 \text{ ps/nm/km}$  and the dispersion slope ( $D'$ ) of  $0.05 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  at 1,550 nm [5]. We employ 2 types of DCUs: the NS-DCU that has  $D$  of  $(-82) \text{ ps/nm/km}$  with  $D'$  of  $0.25 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  both at 1,550 nm, and the length of the NS-DCU can perfectly compensate for the accumulated dispersion of the 100-km-transmitted length of G.652 fiber, and the SC-DCUs that has same characteristics as the NS-DCU except the reverse sign of the dispersion slope [5]. Next, we assign the group of 9 wavelengths with the center wavelength located at 1,550.12 nm. Following the procedures described in section 2, we obtain the minimum number of DCU and the appropriate location of DCUs in the network. By varying the channel spacing ( $\Delta\lambda$ ) from 0.2 nm to 1.4 nm, we compare the total number of both types of DCUs that requires in the

sample network in Table 1. From Table 1, the total number of DCUs equals to 44 for both types of DCUs although  $\Delta\lambda$  increases from 0.2 nm to 1.0 nm. These results indicate that we can use the NS-DCU to obtain the same network performance as using the SC-DCU. This significantly helps reducing the cost of the network because the NS-DCU is usually less expensive than the SC-DCU. For  $\Delta\lambda = 1.2\text{-}1.4 \text{ nm}$ , the number of NS-DCU necessary for the network becomes greater than that of SC-DCU due to large over- and under-compensation.

### 4. Conclusion

In this paper, an optimal DCU placement algorithm that gives the minimum number of DCU for transparent DWDM ring network was presented. By applying the algorithm to the sample network based on part of OPEN, we obtained equivalent number of DCUs for both SC-DCU and NS-DCU for  $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$  up to 1.0 nm.

### Acknowledgement

This work is supported by the cooperation project between the Department of Electrical Engineering and private sector for research and development.

Table.1: Comparison of number of DCU between NS-DCU and SC-DCU

Type Of DCU	$\Delta\lambda$ 0.2 nm	$\Delta\lambda$ 0.4 nm	$\Delta\lambda$ 0.8 nm	$\Delta\lambda$ 1.0 nm	$\Delta\lambda$ 1.2 nm	$\Delta\lambda$ 1.4 nm
NS-DCU	44	44	44	44	46	46
SC-DCU	44	44	44	44	44	44

### Reference

- [1] N. Antoniadis, I. Roudas, G. Ellinas, J. Amin., "Transport Metropolitan Optical Networking: Evolving Trends in the Architecture Design and Computer Modeling," IEEE Journal of Light wave Technology 22 (Nov 2004): 2653-2670
- [2] Tran AV, Tucker RS, Boland NL., "Amplifier placement methods for metropolitan WDM ring networks," IEEE Journal of Lightwave Technology, 22 (11); 2509-22 (2004)
- [3] www.ces.net/doc/2003/research/optnet.html
- [4] N. Antoniadis, et.Al., "Performance Engineering and Topological Design of Metro WDM Optical Network Using Computer Simulation,"IEEEJ. On selected area in communication.,20(Jan 2002), No.1..
- [5] Data. Sheet of PowerForm™ DCM® Modules for SMFC-BandAvanex,200

# Optimized Dispersion Compensations in Upgrading Optical Metro-Ring Networks

Nuttha Chuenprasertsuk<sup>1</sup>, Ismaeane Mohara<sup>2</sup> and Pasu Kaewplung<sup>3</sup>

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.  
E-mail: <sup>1</sup>JugjunG@Gmail.com, <sup>2</sup>Yamala29@hotmail.com and <sup>3</sup>Pasu.K@chula.ac.th

**Abstract** - The employment of optical phase conjugator (OPC) and dispersion compensating unit (DCU) for upgrading optical metro-ring networks is studied. We propose an algorithm that can ensure the minimum number of OPC and DCU as well as the most suitable position in the network.

## I. Introduction

The SONET/SDH-based ring topology has been widely employed as metro-area networks (MANs) owing to its provision of reliability, superior protection and restoration schemes. However, the exponential increase in transmission capacity nowadays demands for the migration from the legacy time-division multiplexed (TDM)-based technology to the transparent dense-wavelength-division multiplexing (DWDM) scheme over the incumbent SONET/SDH ring networks. When an optical signal remains in optical domain during the transmission in a network that has relatively long links, signal power attenuation, dispersion, and the Kerr effect become main sources of signal distortion. For compensating the fiber attenuation, the optimum amplifier placement for the transparent ring network has been already studied [1]. However, an attractive method for overcoming the dispersion and the Kerr effect in the ring network still has never been reported.

For dispersion compensation, the optical phase conjugation technique is very interesting since the Kerr effect is by-product reduced by performing optical phase conjugation [2], [3]. Nevertheless, up to now, the optical phase conjugation has been focused only on long-haul point-to-point applications, and has never been extended its performance to any scales of optical networks [4], [5]. By applying our propose algorithm to a sample network consisted of 6 nodes with total length of 637 km, 12 OPCs are necessary for all communication traffic to be able to transmit in the network within a dispersion limit.

In order to overcome the dispersion, we propose, for the first time introduces an optimal algorithm for placing the dispersion compensating unit (DCU). Our algorithm can support both non-slope-compensated (NS) and slope-compensated (SC) DCUs, and can ensure the minimum number of DCUs. We assign a part of the optical pan-European network (OPEN) [6] with the total length of 1,882 km as a 4-ring-intersected sample network, as shown in Fig. 1. By applying our algorithm, we show that for the channel spacing range of 0.2 nm - 1.0 nm, the required total number of DCUs for 9-channel signal is 44 for both NSC- and SC-DCUs.

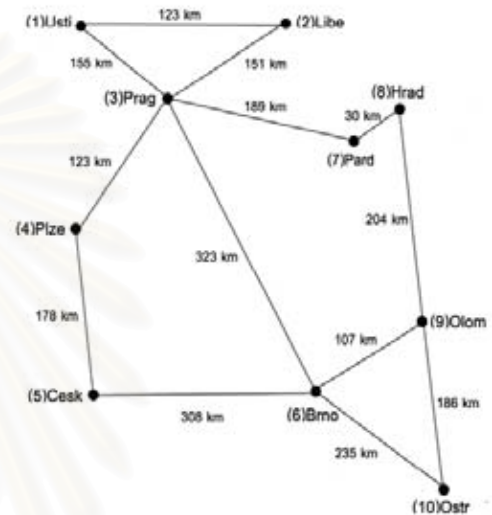


Fig. 1: Part of OPEN [7] that is used as sample network.

## II. Algorithm for OPC Placement

The network sample for demonstrating our algorithm is shown in Fig. 2. The network is consisted of 6 nodes, 5 links, and the communication in the network can be bidirectional. Our algorithm can be explained in 3 main steps.

### A. Find all possible traffics

The total number of traffic, which is the shortest path, between any 2 nodes is  $N \times (N-1)$  where  $N$  is number of nodes in network. From the sample network, we show all possible traffics in term of distances from sources to destinations in Table 1.



Fig. 2: Sample ring network

Table 1: All possible shortest path traffics from sample network

1→2 121 km	2→1 121 km	3→1 234 km
1→3 234 km	2→3 113 km	3→2 113 km
1→4 305 km	2→4 184 km	3→4 71 km
1→5 197 km	2→5 318 km	3→5 206 km
1→6 96 km	2→6 217 km	3→6 307 km
4→1 305 km	5→1 197 km	6→1 96 km
4→2 184 km	5→2 318 km	6→2 217 km
4→3 71 km	5→3 206 km	6→3 307 km
4→5 135 km	5→4 135 km	6→4 236 km
4→6 236 km	5→6 101 km	6→5 101 km

### B. Find placement ranges of OPC

In the dispersion compensation mechanism using the optical phase conjugation, the accumulated dispersion along the length of the fiber before the OPC is cancelled by the amount of the accumulated dispersion along the fiber length after the signal is phase-conjugated by the OPC. Thus, among the different dispersion values resulted from the wavelengths used in the network, we must choose the maximum dispersion value for determining the locations of OPC since the channel wavelength that exhibits the maximum dispersion will always reach the maximum dispersion tolerance  $D_{max}$  at the distance shorter than other channels. Next, for each traffic obtained from step A, we explore the possible range of the location of OPCs with the constraint that both the accumulated dispersion values entering the OPCs and the destinations must be less than  $D_{max}$ , and at the same time the possible location range of OPCs must yield the minimum number of OPC. This

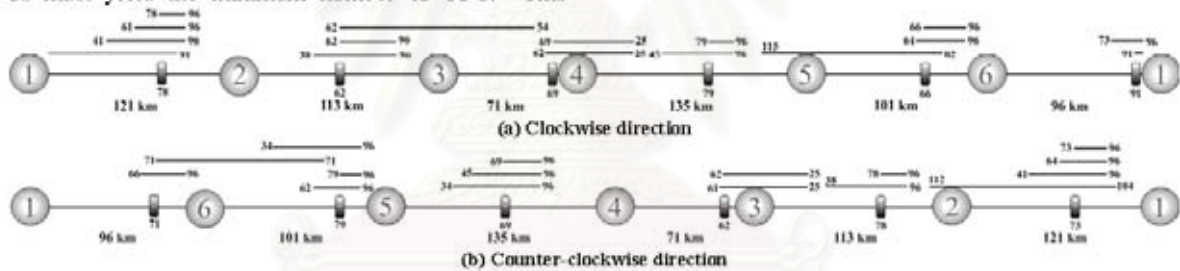


Fig. 3: Maps of the OPC location ranges for all traffics.

procedure will be repeated for obtaining the location ranges of OPCs for all possible traffics in the network.

For our sample network, we assign 5 wavelengths centered at 1550 nm with spacing of 0.8 nm. The standard single-mode fiber (SMF, G.652) with the fiber dispersion ( $D_2$ ) equals to 16.5 ps/km/nm, and the dispersion slope ( $D_3$ ) of 0.05 ps/km/nm<sup>2</sup>, both at 1550 nm, is used for signal transmission. As a result, the maximum channel dispersion can be calculated by using  $D_2$  and  $D_3$ , and is 16.58 ps/km/nm. With  $D_{max} = \pm 1600$  ps/nm, Table 2 shows the possible range of location for installing the OPCs, in term of distance from source to destination, correspondingly to each possible traffic shown in Table 1.

Table 2: All possible ranges for placing OPC in the paths from Table 1

1→2 41-96	2→1 41-96	3→1 78-96
-----------	-----------	-----------

1→3 78-96	2→3 38-96	3→2 38-96
1→4 61-96, 183-288	2→4 62-96	3→4 no need OPC
1→5 66-96	2→5 64-96, 192-288	3→5 69-96
1→6 no need OPC	2→6 73-96	3→6 62-96, 186-288
4→1 61-96, 183-288	5→1 66-96	6→1 no need OPC
4→2 62-96	5→2 64-96, 192-288	6→2 73-96
4→3 no need OPC	5→3 69-96	6→3 62-96, 186-288
4→5 45-96	5→4 45-96	6→4 79-96
4→6 79-96	5→6 34-96	6→5 34-96

Figure 2 shows the map contains all location ranges of OPC for all traffics in (a) clockwise and (b) counter-clockwise directions. Since the installed OPCs have to support all traffics in the network, the placement location of OPCs in a link between two nodes must be within the intersected product of the location ranges given by all traffics existed in that link. For example, on the link between Node #1 and #2 in the clockwise direction (Fig. 2(a)), we have the location range of OPCs equal to 41-96 km from the traffic from Node #1 to #2, the range of 78-96 km from Node #1 to #3, the range of 61-96 km from Node#1 to #4, and the range of 192-288 km from Node#5 to #2 (equivalent to 91 km from Node #6 to #1 added with 91 km from Node #1 to #2). Therefore, the intersection among these ranges results in the range of 78-91 km. This range of distance is the location range suitable for installing the OPC in the link between Node #1 and #2. By performing this procedure, we finally have 12 OPCs for the sample network. (6 OPCs on clockwise and 6 OPCs on counter-clockwise).

### C. Choose the OPC positions, which yields the minimum accumulated dispersion at nodes

In the ring topology, signal may be dropped at arbitrary nodes. Hence, within the possible range for placing the OPC, we should choose the OPC position, which yields the minimum accumulated dispersion at node. The optimum position to achieve the lowest accumulated dispersion at node is always the minimum boarder of the OPC location range. For example, the optimum position is 78 km for the link between Node #1 and #2.

### III. Verification

Figure 3 shows the accumulated dispersion of all traffics in the sample networks when the OPCs are placed following our algorithm. From Fig. 3, we can observe clearly that, for all traffic, the accumulated dispersion at any point in the



network is less than  $D_{max}$ , which is indicated by dashed lines. This mentions that the use of OPCs incorporated with our placement algorithm can help the ring network to be operated transparently under the limit dispersion.

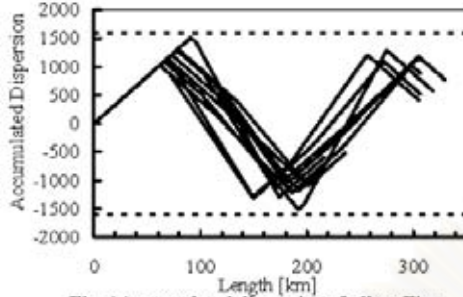


Fig. 4 Accumulated dispersion of all traffics

#### IV. Optimum DCU placement algorithm

Our algorithm consists of 4 steps as follows:

##### Step 1: Communication light paths between any two nodes.

Let the communication between any two nodes can be bidirectional, in this step, the possible light paths between any two nodes are generated, and finally only the shortest paths are selected for signal transmission

##### Step 2: Generate the constraints.

First, we assign a group of wavelengths which will be used in the network. The number of wavelength can be larger, smaller, or equivalent to the number of node. Then, the following constraints are generated.

##### (A) Path Constraints

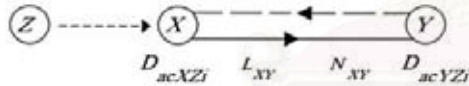


Fig. 5: Light path between adjacent nodes

The path constraint for optimum DCU placement is

$$D_{acYZi} + (D_1 \times L_{XY}) + (D_{DCU} \times N_{XY}) = D_{acXZi} \quad (1)$$

According to Eq. (1), for a path started from node  $X$  to node  $Y$  with the length of  $L_{XY}$  ( $X \neq Y$ ), the accumulated dispersion ( $D_{acYZi}$ ) from node  $Z$  of signal at wavelength  $i$  ( $\lambda_i$ ) will increase with the amount of  $D_1 \times L_{XY}$ , where  $D_1$  is the dispersion at  $\lambda_i$  of the transmission fiber of the path. At the same time, the accumulated dispersion will be compensated by the amount of  $D_{DCU} \times N_{XY}$  where  $D_{DCU}$  is the dispersion of DCU at  $\lambda_i$  and  $N_{XY}$  is the number of DCU on path  $XY$ . Finally, we obtain the total accumulated dispersion at the output of node  $Y$  equals to  $D_{acYZi}$ .

##### (B) Maximum dispersion constraints.

For each wavelength, it is required that the accumulated dispersion at any point in the network should not exceed the maximum acceptable accumulated dispersion  $D_{max}$  [8].

Therefore, we have the constraint,

$$-D_{max} \leq D_{acYZi} \leq D_{max} \quad (2)$$

##### (C) Integrality constraints

For each path  $XY$ ,  $N_{XY}$  must be an integer.

##### (D) Objective function

$$\text{Minimize}(N) \quad (3)$$

Where  $N$  is total number of DCU in the network

##### Step 3: Solve the constraint equations.

Since our problem is a type of mixed-integer linear programming (MILP), this optimization problem can be solved by the soft wares such as X-Press.MP and C-plex. As a result from solving the problem, the number of DCU in each link and the accumulated dispersion at every node is obtained.

##### Step 4: Place the DCUs.

The DCUs are placed in the network at a position where at least one wavelength exhibits the accumulated dispersion that reaches  $D_{max}$ .

#### V. Optimal DCUs placement in sample network

For demonstrating our algorithm in really existing network, we use part of OPEN as a sample network as shown in Fig. 1. Our sample network is assumed to operate as ring topology and is consisted of 4-intersected rings with 10 nodes, 13 links, and has the total length of 1,882 km. For transmission fiber, the standard single-mode fiber (SMF, G.652), which exhibits the dispersion ( $D$ ) of 16.5 ps/nm/km and the dispersion slope ( $D'$ ) of 0.05 ps/nm<sup>2</sup>/km at 1,550 nm [9]. We employ 2 types of DCUs: the NS-DCU that has  $D$  of  $(-82)$ ps/nm/km with  $D'$  of 0.25 ps/nm<sup>2</sup>/km both at 1,550 nm, and the length of the NS-DCU can perfectly compensate for the accumulated dispersion of the 100-km-transmitted length of G.652 fiber, and the SC-DCUs that has same characteristics as the NS-DCU except the reverse sign of the dispersion slope [5]. Next, we assign the group of 9 wavelengths with the center wavelength located at 1,550.12 nm. Following the procedures described in section 2, we obtain the minimum number of DCU and the appropriate location of DCUs in the network. By varying the channel spacing ( $\Delta\lambda$ ) from 0.2 nm to 1.4 nm, we compare the total number of both types of DCUs that requires in the sample network in Table 1. From Table 1, the total number of DCUs equals to 44 for both types of DCUs although  $\Delta\lambda$  increases from 0.2 nm to 1.0 nm. These results indicate that we can use the NS-DCU to obtain the same network performance as using the SC-DCU. This significantly helps reducing the cost of the network

because the NS-DCU is usually less expensive than the SC-DCU. For  $\Delta\lambda = 1.2\text{-}1.4$  nm, the number of NS-DCU necessary for the network becomes greater than that of SC-DCU due to large over- and under-compensation.

## VI. Conclusion

An algorithm for the placement of OPC and DCU for upgrading transparent DWDM optical metro-ring networks was proposed for the first time to our knowledge. Our algorithm can be employed for overcoming the dispersion and the Kerr effect of all wavelengths when the installed ring network is upgraded to support the transparent DWDM signal transmission with the minimum number of OPC and DCU. Our algorithm is also simple and practical without the necessity of solving the optimization problems.

## Acknowledgement

This work is supported by the cooperation project between the Department of Electrical Engineering and private sector for research and development.

## Reference

- [1] Tran AV, Tucker RS, Boland NL, "Amplifier placement methods for metropolitan WDM ring networks", *J. Lightwave Tech.*, vol. 22, no. 11, pp 2509-2522, Nov 2004
- [2] Shigeki Watanabe, "Exact Compensation for both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation", *J. Lightwave Tech.*, vol. 14, no. 3, pp. 243-248, Mar. 1996.
- [3] Chaloeiphon Lorattanasane and Kazuro Kikuchi, *Member, IEEE*, "Design Theory of Long-Distance Optical Transmission System Using Midway Optical Phase Conjugation", *J. Lightwave Tech.*, vol 15, no. 6, pp. 948-955, June 1997
- [4] S. L. Jansen, D. van den Borne, B. Spinnler, S. Calabrò, H. Suche, P. M. Krummrich, W. Sohler, G.-D. Khoe, and H. de Waardt, "Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission", *J. Lightwave Tech.*, vol. 24, no. 1, Jan 2006
- [5] Paolo Minzioni, Francesco Alberti, and Alessandro Schiffrini, "Techniques for Nonlinearity Cancellation Into Embedded Links by Optical Phase Conjugation", vol. 23, no. 8, August 2005
- [6] N. Antoniadis, I. Roudas, G. Ellinas, J. Amin, "Transport Metropolitan Optical Networking: Evolving Trends in the Architecture Design and Computer Modeling," *IEEE Journal of Light wave Technology* 22 (Nov 2004): 2653-2670
- [7] [www.ces.net/doc/2003/research/optnet.html](http://www.ces.net/doc/2003/research/optnet.html)
- [8] N. Antoniadis, et al., "Performance Engineering and Topological Design of Metro WDM Optical Network Using Computer Simulation," *IEEE J. On selected area in communication*, 20 (Jan 2002), No. 1.
- [9] Data. Sheet of PowerForm™ DCM® Modules for SMF, C-Band: Avianex, 2005.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอิสมาอีล โมฮาร่า เกิดวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย