

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขดเคย์ดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย
Wavelength-Routed



นางสาว รวีวรรณ บุญประชม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ALGORITHM FOR EFFICIENT DEPLOYMENT OF DISPERSION-COMPENSATING
UNITS IN WAVELENGTH-ROUTED NETWORK



Miss Ravevun Bunprachom

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed

โดย

นางสาววิวรรณ บุญประชม


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

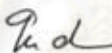
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนิตย์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสธิธิกุลกิจ)


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

รวิวรรณ บุญประชม : อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed (AN ALGORITHM FOR EFFICIENT DEPLOYMENT OF DISPERSION-COMPENSATING UNITS IN WAVELENGTH-ROUTED NETWORK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ผสุ แก้วปลั่ง , 135 หน้า.

ปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวลดทอนคุณภาพสัญญาณคือดิสเพอร์ชันสะสมในสัญญาณแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงแบบ Transparency วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed แบบ Transparency ทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและในกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันชนิด Slope-Compensated DCU (SC-DCU) และ Non-Slope-Compensated DCU (NS-DCU) อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU เพียงชนิดเดียวเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว เรายังนำเสนอการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU ร่วมกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU

จากการทดลองใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันโดยใช้สัญญาณดิจิทัลบีลยูติเอ็ม 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ซึ่งเป็นกรณีที่จำนวนช่องสัญญาณมากกว่าจำนวนความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอสำหรับส่งสัญญาณลงบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network ประกอบไปด้วย 10 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงรวมระยะทางทั้งหมด 1882 km ผลเฉลยที่ได้รับจากอัลกอริทึมคือ จำนวนช่องสัญญาณที่ถูกใช้บนโครงข่ายถูกจำกัดด้วยผลของ Over Compensation สำหรับการใช้นั้น NS-DCU แต่อย่างไรก็ดีสามารถใช้ NS-DCU 46 ตัวด้วยจำนวนช่องสัญญาณส่วนหนึ่งของทั้งหมด และจำเป็นต้องใช้ SC-DCU 44 ตัวบนโครงข่ายที่ทำงานปกติและจำเป็นต้องใช้ SC-DCU 72 ตัวหรือ SC-DCU 36 ตัวและ NS-DCU 7 ตัวบนเส้นใยแสงสำหรับกรณีมีข่ายเชื่อมโยงเสียหายภายในโครงข่าย ทั้งนี้ยังจำลองการสื่อสารเส้นทางที่ยาวที่สุดบน OptiSys 8.0 แสดงให้เห็นว่าด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณที่ปลายทางภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางยังคงคุณภาพเอาไว้ได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติ.....รวิวรรณ บุญประชม.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553.....

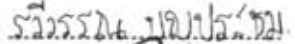

5270687221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL NETWORK / WAVELENGTH-ROUTED NETWORK / NETWORK OPTIMIZATION/ FIBER DISPERSION / DISPERSION-COMPENSATING UNIT/

RAVEVUN BUNPRACHOM : AN ALGORITHM FOR EFFICIENT DEPLOYMENT OF DISPERSION-COMPENSATING UNITS IN WAVELENGTH-ROUTED NETWORK. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KEAWPLUNG, Ph.D., 135 pp.

Signal distortion due to the accumulated dispersion in long light paths in all optical fiber networks is one of a source that limits the network performance. This thesis first time introduces an optimal algorithm for efficient deployment the dispersion compensation unit (DCU) in transparent wavelength-division multiplexed (WDM) wavelength-routed network in order to compensate for the accumulated dispersion. Our algorithm can be applied for both non-slope-compensated (NS-DCU) and slope-compensated DCUs (SC-DCU), in both normally operated network and network where a link failure is protected by the span protection algorithm. We also describe the existence of a limitation when only SC-DCUs are employed. To overcome this limitation, we propose the use of the optimal combination of SC-DCUs and NS-DCUs whose numbers of DCU can be determined by solving a mixed integer linear programming (MILP) problem.

By demonstrating our method, we assign the group of 72 wavelengths in C band using on Optical Pan European Network which consist of 10 nodes, 13 links with total length of 1882 km. For the employment of the NS-DCUs, the number of wavelength that can be used in the network may be restrained by the over (or under) compensation. While, 46 NS-DCUs are necessary with the number of wavelength only a part of C-band. We obtained number of 44 SC-DCUs in normally operated network. Beside, we found that only 72 SC-DCUs or the combination of 36 SC-DCUs and 7 NS-DCUs are necessary in the protection case. We simulate the longest transmission on OptiSys 8.0, it shows that the quality of the signal which arrive at the receiver within the dispersion limit is still excellent.

Department : ..Electrical Engineering..... Student's Signature 
Field of Study : ..Electrical Engineering..... Advisor's Signature 
Academic Year :2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ถูกจัดทำขึ้นและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีทั้งนี้เนื่องมาจากได้รับความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง ซึ่งเป็นบุคคลสำคัญในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ตลอดจนให้ความสนใจอนุเคราะห์สนับสนุนและให้คำแนะนำมาตลอด จึงไม่มีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกรักซาบซึ้งและขอบพระคุณตลอดไป ทั้งนี้ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วย ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ Optisys8.0 ในการจำลองการส่งสัญญาณจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (Telecommunication Research and Industrial Development Institute: TRIDI) และความอนุเคราะห์ด้านทุนการศึกษาจากโครงการ Pilot Plant for Development of Intelligent Control Technology for Green Society (GE12 Project)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	8
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	8
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	11
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	11
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง	12
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ.....	13
2.3.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation Loss)	13
2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber Dispersion).....	15
2.3.2.1 Chromatic Dispersion.....	16
2.3.2.1.1 Material Dispersion.....	17
2.3.2.1.2 Waveguide Dispersion.....	17
2.3.2.2 Inter-Modal Dispersion	18
2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง	19
2.3.3.1 Self-Phase Modulation (SPM).....	19
2.3.3.2 Cross-Phase Modulation (XPM)	21
2.3.3.3 Four Wave Mixing (FWM)	22
2.4 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง	24

2.4.1 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing).....	24
2.4.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Dense Wavelength Division Multiplexing)	25
2.4.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในการทำงานของระบบ DWDM.....	25
2.5 โครงสร้างโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็ม	27
2.5.1 Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network.....	27
2.5.2 Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network.....	28
2.6 โครงข่าย SDH	30
2.6.1 Basic Building Block ของมาตรฐาน SONET	31
2.6.2 Basic Building Block ของมาตรฐาน SDH	32
2.6.3 การป้องกันความเสียหายในโครงข่าย SDH ลักษณะเมท	34
2.6.4 การป้องกันความเสียหายที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์	38
2.7 เทคนิคการแก้ไขชดเชยดิสเพอร์ชัน	41
2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าขีดสุด (Optimization Tools)	43
2.8.1 Branch and Bound Method.....	43
2.8.2 Linear Programming (LP) based Branch and Bound Method.....	46
บทที่ 3 อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	47
3.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง	47
3.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต	51
3.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด.....	51
3.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน.....	52
3.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม.....	53
3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	53
3.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต	53
3.4 การกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน.....	54

3.4.1 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงาน.....	54
3.4.2 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง	55
บทที่ 4 ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ	56
4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย.....	56
4.2 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง	56
4.2.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองโครงข่าย	57
4.2.2 โครงข่ายตัวอย่าง.....	61
4.2.2.1 ระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง	61
4.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต	61
4.2.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด	62
4.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน.....	67
4.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม.....	69
4.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	69
4.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต.....	69
4.2.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน.....	72
4.2.3 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN)	77
4.2.4 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET) .	86
บทที่ 5 ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอ กรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง ภายในโครงข่าย	100
5.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย.....	100
5.2 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง	101
5.2.1 ระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง	101
5.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต	102
5.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด.....	102
5.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน.....	106
5.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม	107

5.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	107
5.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต	108
5.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	109
5.3 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย OPEN.....	112
5.4 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย NARNET	119
บทที่ 6 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	124
6.1 สรุปผลวิจัย	124
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	127
รายการอ้างอิง.....	128
ภาคผนวก.....	133
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	135



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานแบบ SONET และ SDH.....	33
ตารางที่ 3.1 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ	49
ตารางที่ 3.2 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ 21	49
ตารางที่ 3.3 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ 31	49
ตารางที่ 3.4 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ 42	50
ตารางที่ 3.5 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 25 และ 52	50
ตารางที่ 3.6 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43	50
ตารางที่ 3.7 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 54 และ 45	51
ตารางที่ 4.1 ค่าดิสเพอร์ชันสำหรับมอดูลความยาวต่างๆ.....	59
ตารางที่ 4.2 ช่องสัญญาณใน Wave Division Multiplexing (WDM) ITU Grid C-Band	64
ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NS-DCU และ SC-DCU	65
ตารางที่ 4.4 สมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ.....	65
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่น.....	67
ตารางที่ 4.6 ผลเฉลยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP optimization	70
ตารางที่ 4.7 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำ MILP Optimization.....	71
ตารางที่ 4.8 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนและหลังจากชดเชยแล้ว จากการคำนวณแบบ Link-by-Link.....	76

ตารางที่ 4.9 ผลเฉลี่ยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP Optimization.....	81
ตารางที่ 4.10 ผลเฉลี่ยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำ MILP Optimization.....	82
ตารางที่ 4.11 ค่าดิสเพอร์ชันของ SC-DCU ที่มีคูลต่างๆ.....	88
ตารางที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทางต่างๆ.....	90
ตารางที่ 4.13 ผลเฉลี่ยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP Optimization.....	91
ตารางที่ 4.14 ผลเฉลี่ยค่าดิสเพอร์ชันสะสมกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียว	92
ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณด้วย.....	106
ตารางที่ 5.2 ผลเฉลี่ยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่ายตัวอย่าง	108
ตารางที่ 5.3 ผลเฉลี่ยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่าย OPEN	116
ตารางที่ 5.4 ผลเฉลี่ยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่าย NARNET	121

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 จำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้นของ FTTH และ DSL ในประเทศไทยปี.....	3
รูปที่ 1.2 Optical WDM WANs and MANs	4
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง	11
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณในเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น	14
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายของความเร็วกลุ่ม.....	16
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดัชนีหักเห	17
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันจากที่นำคลื่น.....	18
รูปที่ 2.6 พัลส์สัญญาณที่ซ้อนทับกัน	19
รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง	21
รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	22
รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	23
รูปที่ 2.10 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นบนเส้นใยแสง	24
รูปที่ 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารแบบ DWDM	27
รูปที่ 2.12 A Passive-Star-Based Local Optical WDM Network.....	28
รูปที่ 2.13 A Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical WDM Network.....	29
รูปที่ 2.14 Basic SONET Building Block.....	32
รูปที่ 2.15 Basic SDH Building Block	33
รูปที่ 2.16 โครงข่ายลักษณะเมฆประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานแทนด้วยเส้นทึบ.....	34
รูปที่ 2.17 เทคนิคการป้องกันความเสียหาย	36
รูปที่ 2.18 Path Switching และ Line Switching ในโครงข่ายลักษณะเมฆ.....	38
รูปที่ 2.19 กลไกการกู้คืนสัญญาณในโครงข่ายลักษณะเมฆ เส้นใยแสงสำรองแทนด้วยเส้นประ. 40	
รูปที่ 2.20 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ความเสียหายถูกตรวจจับได้จนเกิดกลไกการกู้คืนสัญญาณได้ เป็นเส้นทางใหม่	41
รูปที่ 2.21 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน	42

รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของการแก้ปัญหาการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชัน	44
รูปที่ 2.23 การแตกกิ่งเพื่อหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด.....	45
รูปที่ 3.1 โครงข่ายตัวอย่างใช้ในการอธิบายเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณ.....	48
รูปที่ 3.2 การส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง.....	52
รูปที่ 3.3 โปรแกรม Xpress MP.....	54
รูปที่ 4.1 ดิสเพอร์ชันของ SMF ITU-T G.652.....	57
รูปที่ 4.2 ดิสเพอร์ชันของ NS-DCU.....	58
รูปที่ 4.3 Avanex's SC-DCU	59
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างของความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SC-DCU	60
รูปที่ 4.5 โครงข่ายตัวอย่าง	61
รูปที่ 4.6 ตำแหน่ง SC-DCU บนข่ายเชื่อมโยง	73
รูปที่ 4.7 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณี โครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ.....	74
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาว ที่สุดกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ.....	75
รูปที่ 4.9 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN.....	77
รูปที่ 4.10 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN.....	78
รูปที่ 4.11 ตำแหน่ง NS-DCU บนเส้นทางจากโหนดต้นทาง 1 ไปยังโหนดปลายทาง 10	79
รูปที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโหนด 1 ถึงโหนด 10 เมื่อใช้ NS-DCU โดยกำหนดระยะทางใน การวางเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับระยะทางในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	80
รูปที่ 4.13 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโหนด 1 ถึงโหนด 10 เมื่อใช้ SC-DCU โดยกำหนดระยะทางใน การวางเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับระยะทางในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	81
รูปที่ 4.14 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณี โครงข่าย OPEN ทำงานปกติ.....	85
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาว ที่สุดกรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ.....	85

รูปที่ 4.16 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET 86

รูปที่ 4.17 แนวโน้มการเกิด Under Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำเมื่อใช้ SC-DCU 89

รูปที่ 4.18 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ..... 99

รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ..... 99

รูปที่ 5.1 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายตัวอย่าง 101

รูปที่ 5.2 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่ายตัวอย่างเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย..... 110

รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่ายตัวอย่างเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย..... 111

รูปที่ 5.4 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่าย OPEN 112

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A} 115

รูปที่ 5.6 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย..... 118

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย 118

รูปที่ 5.8 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่าย NARNET 119

รูปที่ 5.9 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่าย NARNETเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย..... 123

รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย..... 123

บทที่ 1

บทนำ

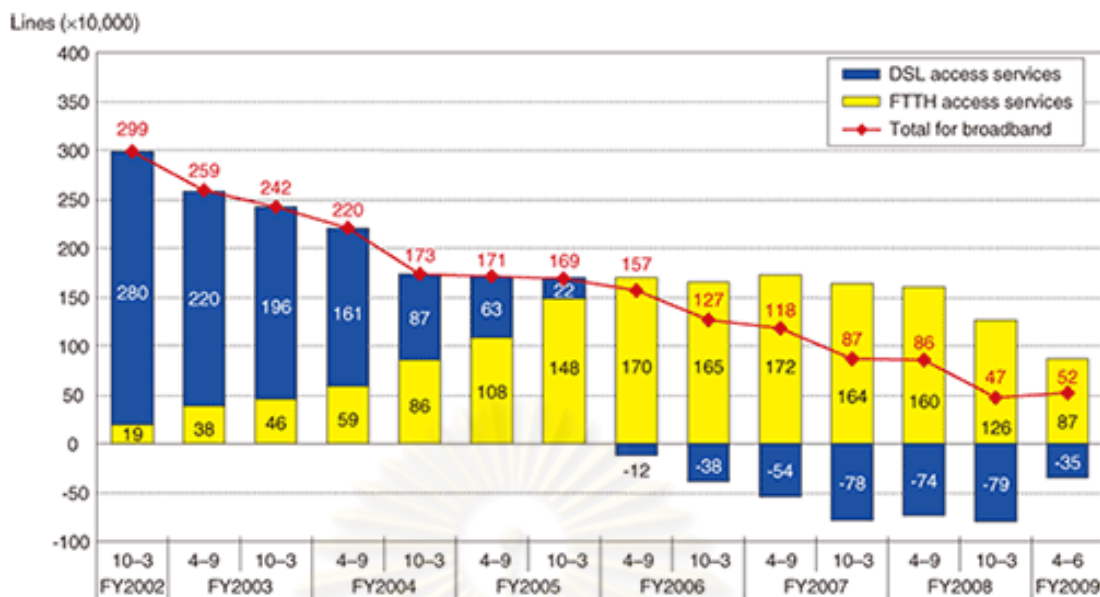
ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลมีความสำคัญอย่างมากในเชิงธุรกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ การสื่อสารทางแสงเข้ามามีบทบาทสำหรับการสื่อสารมากยิ่งขึ้นเนื่องจากมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงและจำนวนช่องสัญญาณมากกว่าการสื่อสารแบบเก่าอีกทั้งไม่ได้รับผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณภายนอก ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ความพยายามที่จะพัฒนาศักยภาพของการสื่อสารทางแสงจึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญมากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนาการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสำหรับการสื่อสารทางแสงให้มีประสิทธิภาพซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาระบบสื่อสารให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นจะเสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ตามลำดับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายโทรคมนาคม (Telecommunication Networks) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 โครงข่ายคือ โครงข่ายหลัก (Core Networks) และโครงข่ายเข้าถึง (Access Networks) โครงข่ายหลักทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของโครงข่ายโทรคมนาคมที่ให้บริการที่หลากหลายกับผู้ใช้ซึ่งผู้ใช้เชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักโดยโครงข่ายเข้าถึง โดยที่โครงข่ายหลักที่เชื่อมต่อในเมืองมีลักษณะการเชื่อมต่อกันแบบวงแหวน (Ring) หรือการเชื่อมต่อโครงข่ายของแต่ละเมืองมีการเชื่อมต่อกันแบบเมช (Mesh) และการเชื่อมต่อโครงข่ายระหว่างประเทศแบบ Long-Haul Point-to-Point เป็นต้น โครงข่ายดังกล่าวต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่มากเพื่อรองรับการส่งข้อมูลจำนวนมากด้วยความเร็วสูงจึงมีการนำเส้นใยแสง (Optical Fiber) มาเป็นตัวกลางในการสื่อสารเนื่องจากเส้นใยแสงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นดังต่อไปนี้

1. เส้นใยแสงมีปริมาณแบนด์วิดท์ที่กว้าง เมื่อเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ 10^6 - 10^9 เฮิรตซ์เพราะความถี่ของคลื่นพาห်แสงจะอยู่ในช่วง 10^{13} - 10^{14} เฮิรตซ์

2. เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียกำลังสัญญาณน้อยกว่าสายตีเกลียวคู่ (Twisted Pair) หรือสายไฟฟ้าวร่วมแกน (Coaxial Cable) ค่าประมาณ 0.2 dB/km ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณและอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น
 3. เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้มากขึ้นจากการใช้พื้นที่เท่าเดิม
 4. เส้นใยแสงเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการแอบลักลอบสัญญาณทางแสงได้
 5. เส้นใยแสงมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้น อีกทั้งเส้นใยแสงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยมาก
 6. เส้นใยแสงมีความปลอดภัยกว่าระบบสายโลหะเมื่อพิจารณาในแง่ของอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสาย หรือระหว่างสายต่อสาย
- เส้นใยแสงถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารของโครงข่ายเข้าถึงซึ่งโครงข่ายนั้นก็คือไฟเบอร์ทูลโคอะไฮม (FTTH) ระบบ FTTH เริ่มเปิดให้บริการทดลองใช้ในประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี ค.ศ. 1977 และในยุโรปและสหรัฐอเมริกาในช่วงต้นปี ค.ศ. 1980 [1] แต่ไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากค่าใช้จ่ายของระบบที่สูงมาก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2002 ระบบ FTTH เริ่มเป็นที่สนใจในประเทศญี่ปุ่นเพราะค่าบริการ FTTH ที่สามารถให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง 100 Mb/s ลดลงเหลือประมาณ \$57 ต่อเดือน ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราค่าบริการ Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) ที่ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง 47 Mb/s ซึ่งมีราคาประมาณ \$48 ต่อเดือน ทำให้อัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการ FTTH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งในช่วงกลางปีค.ศ. 2009 มีจำนวนผู้ใช้บริการ FTTH เป็น 15,890,000 รายหรือมากกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนผู้ใช้บริการบรอดแบนด์ทั้งหมดจำนวน 30,930,000 ราย ดังรูปที่ 1.1 [2]



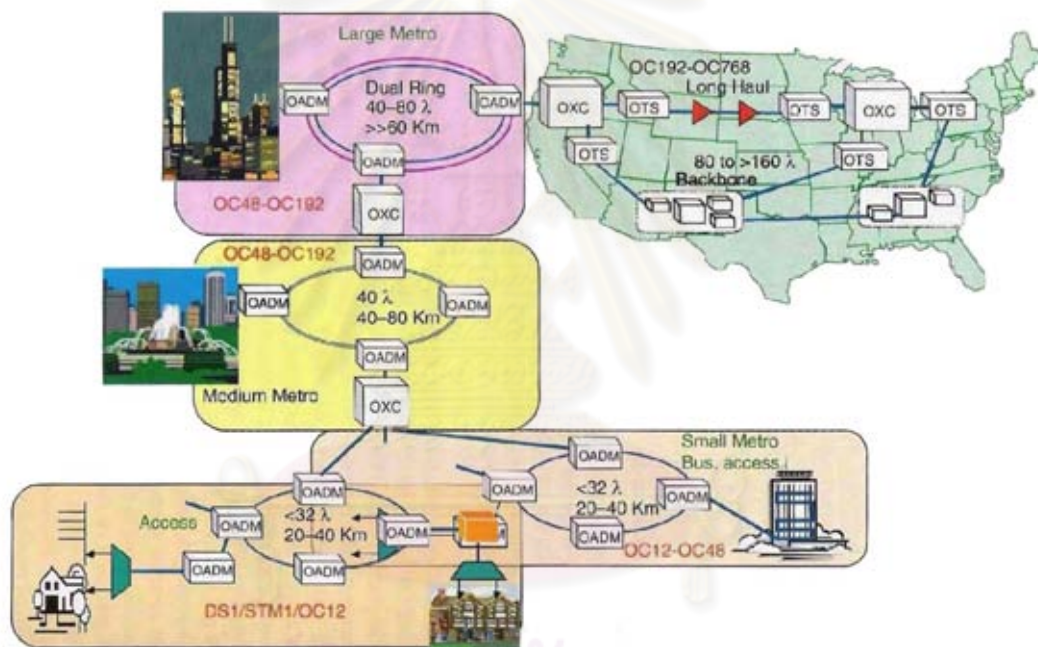
Source: Press release from the Ministry of Internal Affairs and Communications

รูปที่ 1.1 จำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้นของ FTTH และ DSL ในประเทศญี่ปุ่น
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 ถึงปี ค.ศ. 2009

อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วว่าเส้นใยแสงถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารเป็นจำนวนมาก รวมถึง FTTH แต่อย่างไรก็ตาม FTTH ต้องเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักเพื่อการส่งข้อมูลจากผู้ให้บริการไปยังผู้ใช้บริการหรือจากผู้ให้บริการด้วยกันเองทำให้โครงข่ายหลักต้องมีความเร็วในการส่งข้อมูลมากกว่า FTTH หลายเท่าตัว ตัวอย่างเช่น ความเร็ว 40 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาคอขวด (Bottleneck) จำกัดความสามารถในการสื่อสาร การสื่อสารข้อมูลในกรณีที่ผู้ใช้บริการอยู่ในแต่ละโครงข่ายที่อยู่ไกลกันออกไปสามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยการเชื่อมต่อโครงข่ายเข้าหากันเป็นโครงข่ายบริเวณกว้าง (Wide-Area Networks : WANs) หรือถ้าโครงข่ายแต่ละโครงข่ายมีระยะห่างกันไม่มากนักเราสามารถเชื่อมต่อเป็นแบบโครงข่ายระดับเมือง (Metro-Area Networks : MANs) โดยที่การเชื่อมต่อของแต่ละ MANs เป็นลักษณะวงแหวน (Ring) หรือโครงข่ายหลัก (Backbone Network) มีรูปแบบการเชื่อมต่อกันแบบเมช (Mesh)

การส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงทั้งในระดับ WANs และ MANs เพื่อให้ใช้งานแบนด์วิดท์ที่มีอยู่อย่างมหาศาลตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 1,300 nm ถึง 1,700 nm ให้คุ้มค่า โดยที่ตัวอย่างโครงข่าย WDM ทางแสงของ WANs และ MANs แสดงดังรูปที่

1.2 [4] ความเร็วการส่งข้อมูลของแต่ละโครงข่ายมีความเร็วไม่เท่ากันขึ้นกับปริมาณการส่งข้อมูลของแต่ละโครงข่ายเป็นไปตามมาตรฐาน Synchronous Optical Network and Synchronous Digital Hierarchy (SONET / SDH) ตัวอย่างเช่น MAN ขนาดใหญ่มีจำนวนความยาวคลื่น 40 ถึง 80 ความยาวคลื่น ใช้ระบบสายส่ง OC-48 และ OC-192 มีความเร็วที่อัตรา 2.5 Gb/s และ 10 Gb/s ตามลำดับ หรือ MAN ขนาดเล็กมีจำนวนความยาวคลื่นน้อยกว่า 32 ความยาวคลื่น ใช้ระบบสายส่ง OC-12 และ OC-48 มีความเร็วที่อัตรา 0.6 Gb/s และ 2.5 Gb/s ตามลำดับ ซึ่งปัจจุบันมาตรฐาน SONET / SDH กำหนดความเร็วสูงสุดไว้ที่ OC-3072 หรือที่อัตรา 160 Gb/s [3]



รูปที่ 1.2 Optical WDM WANs and MANs

ระบบเส้นใยแสงสำหรับ WANs และ MANs ในตลาดการสื่อสารที่มีในตลาดโทรคมนาคมในปัจจุบัน [5] มีความสามารถในการส่งสัญญาณได้ความเร็วสูงสุด 2 – 3 Tb/s โดยเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) ของ 192 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีความเร็ว 10 Gb/s และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น DWDM ของ 80 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีความเร็ว 40 Gb/s [6] แต่ในความเป็นจริงเส้นใยแสงชนิด Zero-Water-Peak (G.652D) ซึ่งเป็นที่แพร่หลายในปัจจุบันสามารถ

ให้แบนด์วิดท์ที่มีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำกว่าตั้งแต่ 1,300 – 1,700 nm (400 nm) และมีความสามารถที่จะรองรับจำนวนช่องสัญญาณได้มากกว่าจำนวนช่องสัญญาณที่ผลิตภัณฑ์เส้นใยแสงที่มีในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณหรือการเพิ่มความเร็วของช่องสัญญาณมีผลต่อราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง (Ultra-High-Speed Electronic Switching Equipments) กล่าวคือ ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับจำนวนช่องสัญญาณหรือความเร็วของช่องสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้นมีราคาสูงมาก ดังนั้นจึงมีความต้องการลดค่าใช้จ่ายดังกล่าวโดยให้สัญญาณอยู่ในรูปแบบของแสงตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทางเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงดังกล่าวออกจากระบบ

โครงข่ายเส้นใยแสงดับเบิลยูดีเอ็มแบ่งได้ 2 ประเภทคือ โครงข่าย Broadcast-and-Select (B&S) และ โครงข่าย Wavelength-Routed [5] ลักษณะการทำงานของโครงข่าย B&S คือ เมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งสัญญาณไปที่โหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะกระจายสัญญาณ (Broadcast) ไปยังทุกโหนดที่เชื่อมต่อ จากนั้นโหนดที่รับสัญญาณเข้ามาจะอ่านส่วนหัว (Header) ของข้อมูล ถ้าโหนดต้นทางไม่ต้องการสื่อสารกับโหนดนั้น โหนดที่รับสัญญาณเข้ามาจะกระจายสัญญาณต่อไปยังโหนดอื่นๆ ยกเว้นโหนดที่ส่งสัญญาณเข้ามา กระบวนการเช่นนี้จะดำเนินไปจนกว่าสัญญาณจะถูกส่งไปที่โหนดปลายทางที่ต้องการสื่อสาร เมื่อโหนดปลายทางได้รับสัญญาณแล้วจะไม่กระจายสัญญาณต่อ ในส่วนของการทำงานของโครงข่าย Wavelength-Routed จะแตกต่างกับโครงข่าย B&S ตรงที่โหนดต้นทางจะไม่กระจายสัญญาณออกไปทุกโหนดแต่จะส่งสัญญาณออกไปยังโหนดเฉพาะเจาะจง ซึ่งสัญญาณในโครงข่าย wavelength-routed ในปัจจุบันจะถูกตรวจจับ (Detect) ทุกๆ เราท์เตอร์ (Router) แต่ในอนาคตแล้วไม่ควรมีการตรวจจับสัญญาณทุกเราท์เตอร์เนื่องจากต้องการลดจำนวนทางอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เมื่อส่งสัญญาณด้วยความเร็วสูง

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงระยะทางหนึ่งในโครงข่าย Wavelength-Routed โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (O-E-O Conversion) ณ โหนดที่สัญญาณเดินทางผ่าน สัญญาณไม่สามารถถูกแก้ผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันที่แต่ละโหนดได้ ซึ่งปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน คือ การขยายออกของพัลส์สัญญาณ (Pulse Broadening) เกิดส่วนของพัลส์สัญญาณที่ทับซ้อนกัน (Inter Symbol Interference: ISI) ส่งผลให้ที่ตัวรับสัญญาณ ณ โหนดปลายทางตัดสินใจสัญญาณขาเข้าผิดเพี้ยนไป ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัย [7] เส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชัน (Dispersion-Shifted Fiber: DSF) ที่มีค่าดิสเพอร์ชันของ

สัญญาณ 3 ช่องสัญญาณ (1554.4 nm, 1557.2 nm และ 1560.0 nm) เท่ากับ 0.43 ps/km/nm, 0.69 ps/km/nm และ 0.93 ps/km/nm ตามลำดับและความชันค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0.084 ps/km/nm² ใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชดเชยดิสเพอร์ชันของสัญญาณทั้ง 3 ช่องสัญญาณที่ระยะทาง 215 km ให้เหลือค่าดิสเพอร์ชันสะสม 16 ps/nm, -32 ps/nm และ -84 ps/nm ตามลำดับ

นอกจากผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันแล้วการลดทอนของสัญญาณก็เป็นปัญหาหลักที่จำกัดคุณภาพของสัญญาณเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสง หัวข้อทั้งสองได้รับการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยที่ผ่านมามีความพยายามในแก้ไขปัญหที่เกิดจากการลดทอนของสัญญาณโดยการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงด้วยจำนวนอุปกรณ์น้อยสุด [8]-[10] โดยวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงด้วยวิธี Link-by-Link [11] และ Global Method [12]-[13] อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่สร้างระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [14]-[16] งานวิจัยที่การศึกษาและแก้ไขผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน [17] งานวิจัยที่นำเสนอการสร้างระเบียบขั้นตอนวิธีการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมในโครงข่าย Broadcast-and-Select [18], [19] และการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวน [20]

ผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันสามารถแก้ไขได้โดยการชดเชยดิสเพอร์ชัน โดยทั่วไปแล้วการชดเชยดิสเพอร์ชันสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือการชดเชยด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion-Compensating Units : DCUs) ส่วนวิธีที่สองคือการใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงในการจัดการดิสเพอร์ชันโดยวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในตำแหน่งกึ่งกลางของข่ายเชื่อมโยงเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงและหลังออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงไปถึงที่ปลายทางหักล้างกันหมด ภายในหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีเส้นใยแสงที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้หักล้างค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ Single Mode Fiber (SMF) อยู่ด้านใน ซึ่งเส้นใยแสงนั้นคือ Dispersion-Compensating Fiber (DCF) เราสามารถแบ่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. Non-Slope Compensated Dispersion Compensating Unit (NS-DCU) : เครื่องหมายของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU มีค่าบวกเหมือนกับ

เครื่องหมายของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ SMF (G.652) ซึ่งมีค่า 0.25 ps/km/nm^2
ตัวอย่างเช่น 0.25 ps/km/nm^2

2. Slope-Compensated Dispersion Compensating Unit (SC-DCU) : เครื่องหมาย
ของความชันค่าดิสเพอร์ชันของ SC-DCU มีค่าลบซึ่งตรงข้ามเครื่องหมายของความชัน
ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF (G.652) ตัวอย่างเช่น -6 ps/km/nm^2

ในปีค.ศ. 2001 – 2007 ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่บ่งบอกว่าการส่งสัญญาณด้วยการใช้เทคนิค
การมอดูเลชัน (Modulation) บางประเภทร่วมด้วยการชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์
สามารถให้อัตราข้อมูลสูงมาก ตัวอย่างเช่น ให้อัตราสูงสุด 1 Tb/s บนความยาว $1,000 - 2,000$
 km หรือ ให้อัตราสูงสุด 1.6 Tb/s บนความยาว $1,200 \text{ km}$ หรือ ให้อัตราสูงสุด 3.2 Tb/s บนความ
ยาว $2,100 \text{ km}$ และ ให้อัตราสูงสุด 3.8 Tb/s บนความยาว $1,200 \text{ km}$ [21]-[25] และเมื่อต้นปีค.ศ.
2010 ที่ผ่านมายังคงมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงการใช้นิติชดเชยดิสเพอร์ชันในงานวิจัยอย่าง
ต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ให้อัตราสูงสุด 1.4 Tb/s บนความยาว $2,000 \text{ km}$ หรือ 1.6 Tb/s บนความ
ยาว $1,335 \text{ km}$ และ 32 Tb/s บนความยาว 580 km [26]-[28]

ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงข่ายคือการวางเครื่องขยายสัญญาณทาง
แสงและการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน วิธีทั่วไปวิธีหนึ่งสำหรับการวางเครื่องขยายสัญญาณคือ
การใช้เครื่องขยายสัญญาณหนึ่งตัวที่แต่ละโหนด สำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน วิธีทั่วไป
วิธีหนึ่งสำหรับการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ณ ตำแหน่งขา
เข้าของเครื่องขยายสัญญาณ วิธีเหล่านี้ต้องการจำนวนเครื่องขยายสัญญาณและหน่วยชดเชยดิส
เพอร์ชันจำนวนมากซึ่งเครื่องขยายสัญญาณและหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นอุปกรณ์ที่ราคาแพง
และมีผลกระทบที่สำคัญต่อราคากระบบทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความต้องการลดจำนวนเครื่องขยาย
สัญญาณในโครงข่ายโดยการทำ Optimization หาจำนวนเครื่องขยายสัญญาณหรือหน่วยชดเชย
ดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดที่เพียงพอให้สัญญาณที่ปลายทางคงคุณภาพไว้

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้เสนอการวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดใน
โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวน [20] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนั้นมุ่งเน้นในการศึกษาที่
การส่งสัญญาณด้วยความยาวคลื่นน้อยสุดที่เพียงพอในการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่าย แต่ข้อ
สันนิษฐานนี้ไม่ถูกต้องนักเมื่อนำมาใช้ในงานจริงเพราะจำนวนความยาวคลื่นมีจำนวนน้อยกว่า
จำนวนความยาวคลื่นของผลิตภัณฑ์ที่มีขายอยู่ในปัจจุบันและอนาคตอยู่มาก หรืออาจกล่าวได้ว่า
ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยมีความกว้างน้อยกว่าช่วงความยาวคลื่นของผลิตภัณฑ์ที่มีขาย

อยู่ในปัจจุบันและอนาคต นอกจากโครงข่ายลักษณะวงแหวนที่มีใช้งานใน MANs แล้ว โครงข่ายลักษณะเมชแบบ Wavelength-Routed ก็เป็นอีกโครงข่ายหนึ่งที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจาก โหนดที่ต้องการส่งสัญญาณในโครงข่าย Wavelength-Routed สามารถเลือกส่งสัญญาณไปยังเส้นทางที่เฉพาะเจาะจงได้แทนที่จะกระจายสัญญาณไปยังทุกโหนด อีกทั้งแต่ละโหนดสามารถเลือกให้สัญญาณขาเข้าหรือสัญญาณขาออกเข้าหรือออกที่ช่องสัญญาณใดก็ได้และสามารถส่งสัญญาณไปในเส้นทางทับซ้อนกันได้เพียงใช้คนละความยาวคลื่นในส่งสัญญาณ

อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยในการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed จึงจำเป็นต้องอย่างมากที่ต้องมีการสร้างอัลกอริทึมเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงจะศึกษานำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed ที่สามารถใช้ได้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นทั้ง C Band ทั้งกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายโดยใช้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันให้น้อยที่สุด และเสนอแนะวิธีการจัดการผลของปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันเมื่อ SC-DCU เพียงชนิดเดียวไม่สามารถชดเชยค่าดิสเพอร์ชันได้ โดยใช้ NS-DCU และ SC-DCU ชดเชยดิสเพอร์ชันร่วมกัน โดยวิทยานิพนธ์นี้จะช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบโครงข่ายทางแสงให้มีต้นทุนของการสร้างโครงข่ายน้อยลงและสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาต่อเพื่อนำไปใช้ในโครงข่ายทางแสงในยุคหน้าได้อย่างแท้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed บนช่วงความยาวคลื่นทั้ง C Band ในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายโดยไม่คิดผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณ
2. นำเสนอวิธีการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ร่วมกันเพื่อลดผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียวไม่สามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชันได้ทุกเส้นทางการสื่อสาร

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed สามารถประยุกต์ใช้ได้กับกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

2. อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขดเคเบิลดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพที่จะนำเสนออยู่ใต้เงื่อนไขที่ไม่มีผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
3. หน่วยขดเคเบิลดิสเพอร์ชันที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ NS-DCU และ SC-DCU และใช้เส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652 เป็นเส้นใยแสงสื่อสาร
4. พิจารณาช่วงความยาวคลื่น C Band เท่านั้น
5. โครงข่ายที่ใช้ศึกษามีการเชื่อมต่อทางกายภาพแบบเมช
6. เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะมีการจัดสรรเส้นทาง การส่งสัญญาณขึ้นใหม่ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณในตัวกลางเส้นใยแสงโดยเฉพาะผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน
2. ศึกษาโครงข่ายทางแสงที่ส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีดับเบิลยูดีเอ็ม คุณสมบัติโครงข่าย Wavelength-Routed กลไกการกู้คืนสัญญาณของโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็ม ลักษณะเมช การหาจำนวนอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงที่น้อยที่สุดในโครงข่ายวงแหวน การจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและการหาจำนวนหน่วยขดเคเบิลดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดในโครงข่าย Broadcast-and-Select ในบทความวิชาการเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานในวิทยานิพนธ์
3. ศึกษาอัลกอริทึมสำหรับหาจำนวนหน่วยขดเคเบิลดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนถึงข้อดีและจุดบกพร่องของอัลกอริทึม
4. นำอัลกอริทึมสำหรับหาจำนวนหน่วยขดเคเบิลดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสมที่สุดในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะวงแหวนมาปรับปรุงเพื่อใช้กับโครงข่าย Wavelength-Routed
5. ทดลองอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นกับโครงข่ายตัวอย่างที่มีใช้งานอยู่จริงโดยโครงข่ายที่สนใจ ได้แก่ โครงข่ายตัวอย่าง โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และ NARNET ทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย
6. แก้ไขและปรับปรุงอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นให้สามารถใช้ได้กรณีที่โครงข่ายมีเส้นทางสื่อสารที่มากขึ้นหรือโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น

7. จำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดหลังจากวางหน่วยชุดเซย์ดิสเพอร์ชันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 เพื่อดูคุณภาพของสัญญาณที่ปลายทาง
8. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
9. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับพื้นฐานการทำงานและกลไกการคู่กันสัญญาณของโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มลักษณะเมซ
2. อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชุดเซย์ดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย
3. การระบุชนิดของหน่วยชุดเซย์ดิสเพอร์ชันที่เหมาะสมที่สุดในโครงข่ายที่มีใช้งานอยู่จริง
4. การประยุกต์ใช้หน่วยชุดเซย์ดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ร่วมกันเพื่อแก้ไขผลของดิสเพอร์ชัน
5. ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

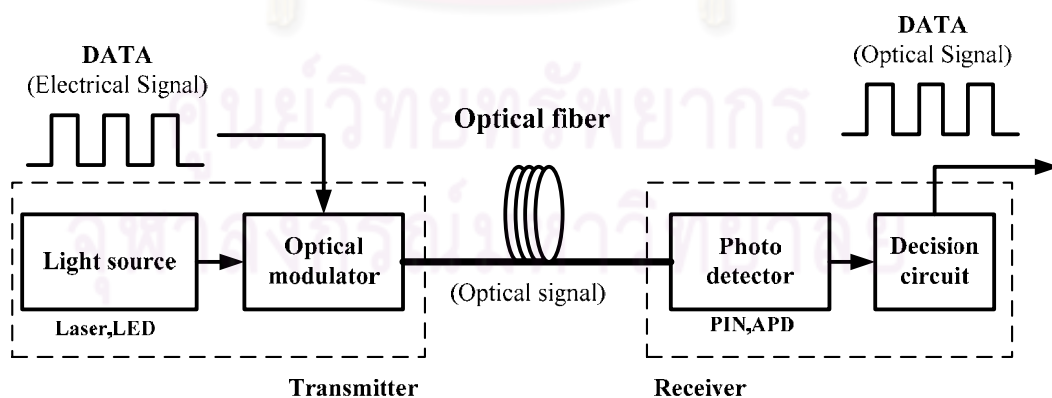
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

เนื้อหาทางทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 8 ส่วน ในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่สองเป็นกล่าวถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่สามเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ เช่น การลดทอนกำลังสัญญาณ ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ส่วนที่สี่เป็นการอธิบายการทำงานระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณทางแสงเชิงความยาวคลื่นและอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นในระบบ ส่วนที่ห้าเป็นการเป็นการแจกแจงโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มออกเป็นสองโครงข่ายคือ Broadcast-and-Select และ Wavelength-Routed ส่วนที่หกกล่าวถึงรายละเอียดการทำงานของโครงข่ายเมชและการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายของโครงข่ายลักษณะเมช ส่วนที่เจ็ดเป็นเทคนิคการแก้ไขชดเชยดิสเพอร์ชัน และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาข้อขัดสุด

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องส่งสัญญาณแสง (Optical Transmitter) เส้นใยแสง (Optical Fiber) และเครื่องรับสัญญาณแสง (Optical Receiver) แสดงดังรูปที่ 2.1 [5]



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

เครื่องส่งสัญญาณแสงมีหน้าที่มอดูเลตข้อมูลก่อนส่งไปยังเส้นใยแสง การมอดูเลตสัญญาณมีสองประเภทหลักคือ การมอดูเลตภายนอก (External Modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (Modulator) แยกออกจากกัน อีกประเภทคือ การมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) นั้นแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกัน

ตัวกลางที่ใช้ในการนำสัญญาณคือเส้นใยแสง เส้นใยแสงมีรูปแบบให้เลือกใช้งานหลากหลาย ตัวอย่างเช่น SMF มีราคาสูงแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (Attenuation Coefficient) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงแบบหลายแผนคลื่น (Multi-Mode Fiber: MMF) ที่มีราคาถูกกว่า ส่วนเส้นใยแสงแบบ DSF มีคุณสมบัติพิเศษคือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำสุดที่ความยาวคลื่น Zero Dispersion (1550 nm) และเส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1550 nm ค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZ-DSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

เครื่องรับสัญญาณแสงประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo Detector) และวงจรตัดสินใจ (Decision Circuit) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น Positive Intrinsic Negative Junctions (PIN) และ Avalanche Photodiode (APD) ส่วนวงจรตัดสินใจทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำหนดภายในวงจรตัดสินใจ

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

แสงที่ใช้ส่งสัญญาณเส้นผ่านเส้นใยแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงจะเป็นไปตามสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) โดยเริ่มพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุดได้เป็นสมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปตามสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเจอร์ (Nonlinear Schrödinger Equation : NLSE) [29], [5]

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

โดยที่ A คือ กรอบคลื่น (Envelope) ของสัญญาณ
 α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Constant)
 β_2 คือ ค่า Group Velocity Dispersion (GVD)
 γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Coefficient)
 z คือ ระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง
 T คือ กรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาจริง t แสดงได้ในสมการที่ (2.2) ดังนี้

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

เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการ (2.1) ถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A พจน์แรกคือการลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางของเส้นใยแสง แต่สามารถชดเชยกำลังสัญญาณได้ด้วยเครื่องขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สองคือ GVD (β_2) เป็นผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และพจน์สุดท้ายคือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงซึ่งทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออก โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (Peak Power) ของสัญญาณ

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ

2.3.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation Loss)

การสูญเสียกำลังสัญญาณเป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ การลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสง เกิดจาก 3 สาเหตุหลัก คือ การดูดซึม (Absorption) ที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุเอง การกระเจิง (Scattering) ที่เกิดจากทั้งคุณสมบัติของวัสดุและความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่น และ การแพร่

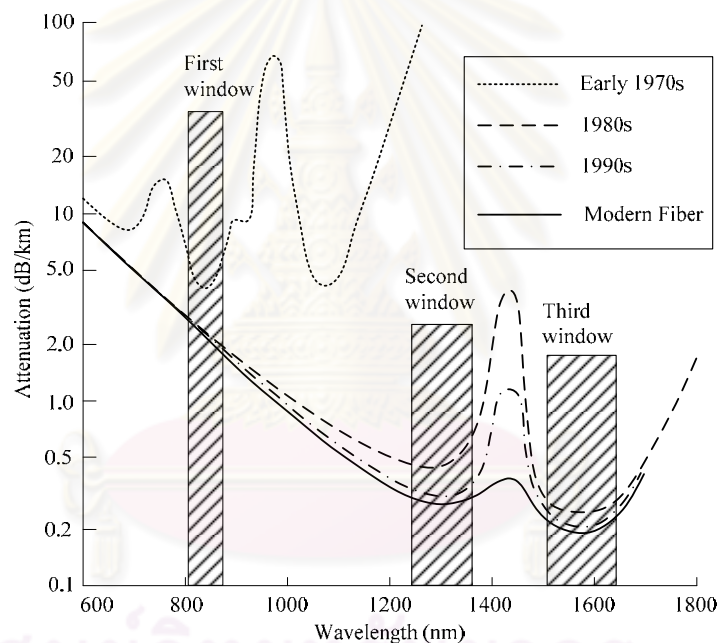
รังสี (Radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณ [30] ดังนี้

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

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

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

α คือ ค่าคงตัวของ การลดทอน [dB/km]



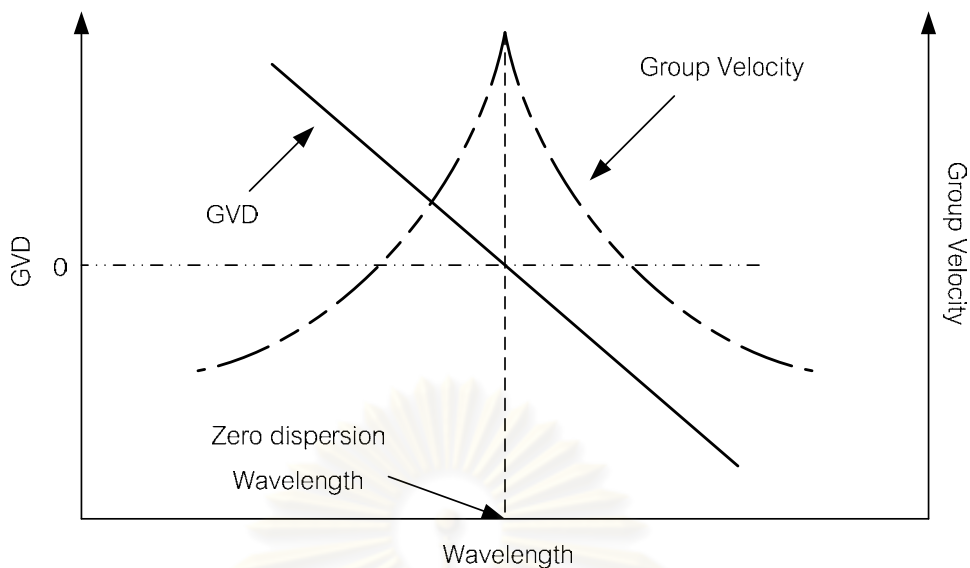
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณในเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น

เส้นโค้งทั้ง 4 เส้นแสดงให้เห็นถึงค่าคงตัวการลดทอน α มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 [30] โดยเส้นที่สองจากบนสุดแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างเส้นที่บ่งชี้ที่สุดซึ่งแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน เส้นใยแสงในยุคแรกทำจากซิลิกาที่มีอัตราการลดทอนสัญญาณสูงซึ่งเกิดจากความขุ่นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering) ทำให้

ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (First Window) ทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm หลังจากนั้นมีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุคที่ 2 (Second Window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km และในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (Third Window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานประเภทส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN นั้นเราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (Forth Window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm [5]

2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber Dispersion)

สัญญาณแสงจะเกิดการบิดเบี้ยวเมื่อเดินทางไปในเส้นใยแสงได้ระยะทางหนึ่ง การบิดเบี้ยวนี้เป็นผลมาจากดิสเพอร์ชันแบบภายในแผนคลื่น (Intramodal Dispersion) และผลการประวิงระหว่างโหมด (Intermodal Delay Effects) โดยการบิดเบี้ยวเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วย การตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (Group Velocities) ของโหมดการเดินทาง (Guided Modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มเหล่านี้คือความเร็วของพลังงานในแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง ตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion : GVD) เทียบกับความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.3 [30] เห็นได้ชัดว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าต่างกันและมีค่าสูงสุดเมื่อค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ ทั้งนี้ GVD เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงหนึ่งๆ ประกอบด้วยหลายความถี่โดยองค์ประกอบแต่ละความถี่นั้นมีความเร็วกลุ่มต่างกัน ส่งผลให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาที่แตกต่างกันในการเดินทางมีผลทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายของความเร็วกลุ่ม ในแต่ละความยาวคลื่น

โดยทั่วไปดิสเพอร์ชันที่เกิดในเส้นใยแสงมีสองประเภทได้แก่ ดิสเพอร์ชันแบบภายในแผ่นคลื่นหรือดิสเพอร์ชันภายในสี่สัญญาณ (Chromatic Dispersion) ในเส้นใยแสงแบบ SMF และ ดิสเพอร์ชันระหว่างแผ่นคลื่นในเส้นใยแสงแบบ MMF

2.3.2.1 Chromatic Dispersion

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

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

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

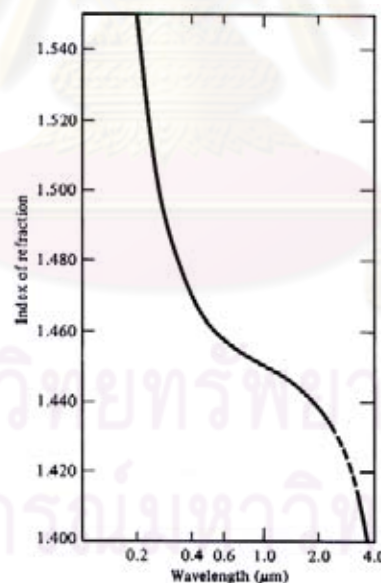
$$D = \left[\frac{(-2\pi c \beta_2)}{\lambda^2} \right] \tag{2.6}$$

โดยที่	V_g	คือ Group Velocity $K = \frac{2\pi}{\lambda}$
	β_2	คือ ค่า GVD [ps^2/km]
	D	คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [$\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$]
	c	คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าประมาณ 2.9974×10^8 m/s
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]

Chromatic Dispersion เป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลักคือ ดิสเพอร์ชันจากวัสดุ (Material Dispersion) และ ดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion) ซึ่งเป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง

2.3.2.1.1 Material Dispersion

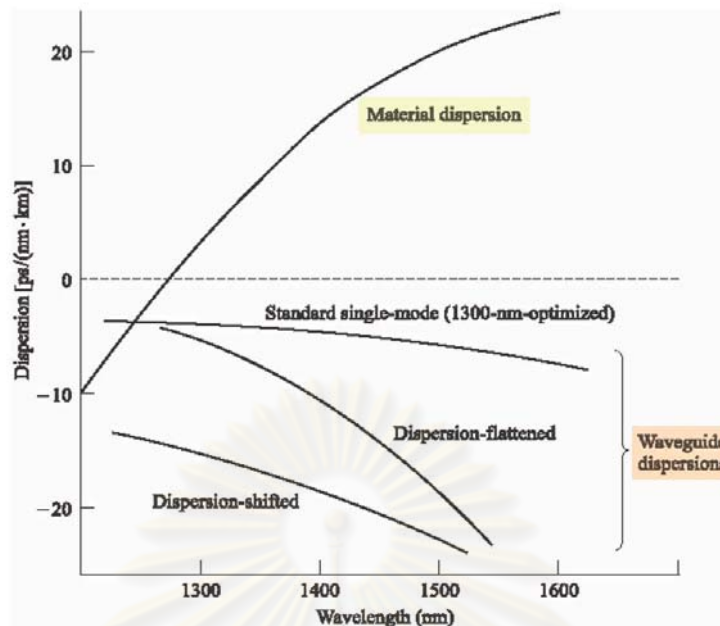
เป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสง โดยที่ค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงแปรไปตามค่าความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.4 [30] ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดัชนีหักเห

2.3.2.1.2 Waveguide Dispersion

เป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง ทั้งนี้ Waveguide Dispersion เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบเส้นใยแสงดังแสดงในรูปที่ 2.5 [30]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น

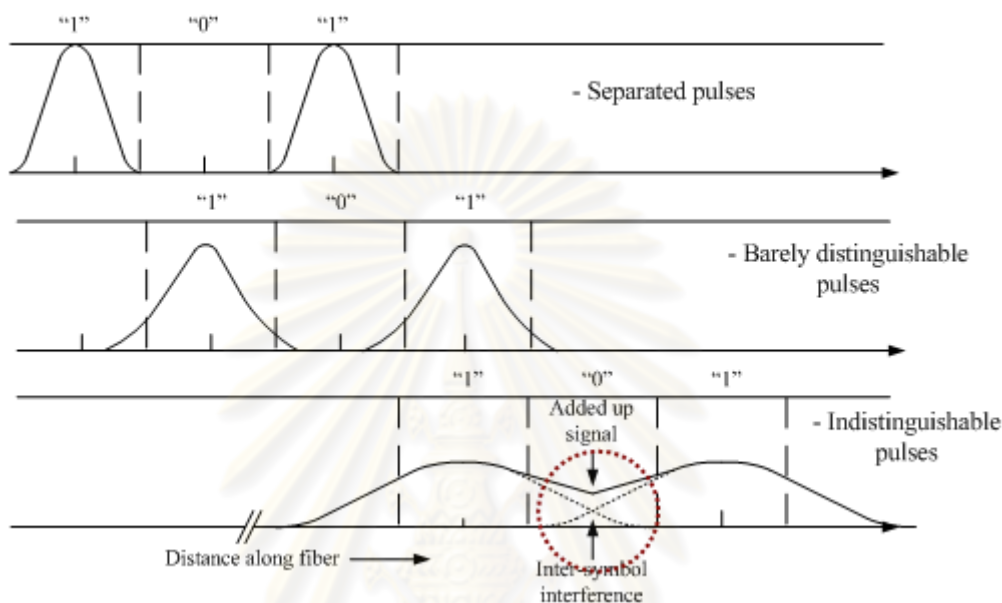
การส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1310 nm สำหรับ SMF: ITU-T G.652 ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (Zero-Dispersion Point) จะหลีกเลี่ยงผลของดิสเพอร์ชันได้ ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการปรับปรุงเพื่อให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดทอนต่ำ เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Dispersion Shifted Fiber (DSF: ITU-T G.653) และเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF: ITU-T G.655)

2.3.2.2 Inter-Modal Dispersion

Inter-Modal Dispersion เกิดในเส้นใยแสงแบบหลายโหมดและเป็นแหล่งเกิดหลักของดิสเพอร์ชัน เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวกันเดินทางในโหมดที่ต่างกัน ซึ่งในการเดินทางในโหมดที่ต่างแต่กันนี้มีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันจึงทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง

อย่างไรก็ตามในระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นซึ่งสัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นรวมอยู่ด้วยกัน แม้จะมีการเลือกความยาวคลื่นหนึ่งให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ความยาวคลื่นอื่นๆ ที่เหลือย่อมได้รับผลจากดิสเพอร์ชันค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณในช่องสัญญาณที่ต่างกัน (Signal Distortion) และรุนแรงไม่

เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าความชันของเส้นโค้งการกระจาย (Dispersion Slope) โดยการบิดเบี้ยวของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์สัญญาณซึ่งถ้าไม่ทำการแก้ไขจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ รูปที่ 2.6 [30] เป็นการแสดงการเกิด Inter-Symbol Interference (ISI) จากผลของดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.6 พัลส์สัญญาณที่ซ้อนทับกัน

2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลือนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทคือ Self-Phase Modulation (SPM) Cross-Phase Modulation (XPM) และ Four-Wave Mixing (FWM)

2.3.3.1 Self-Phase Modulation (SPM)

SPM เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเองทำให้เกิดการเลือนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการที่ (2.7)

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

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

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

โดยที่ค่า $\phi_{NL}(z,T)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

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

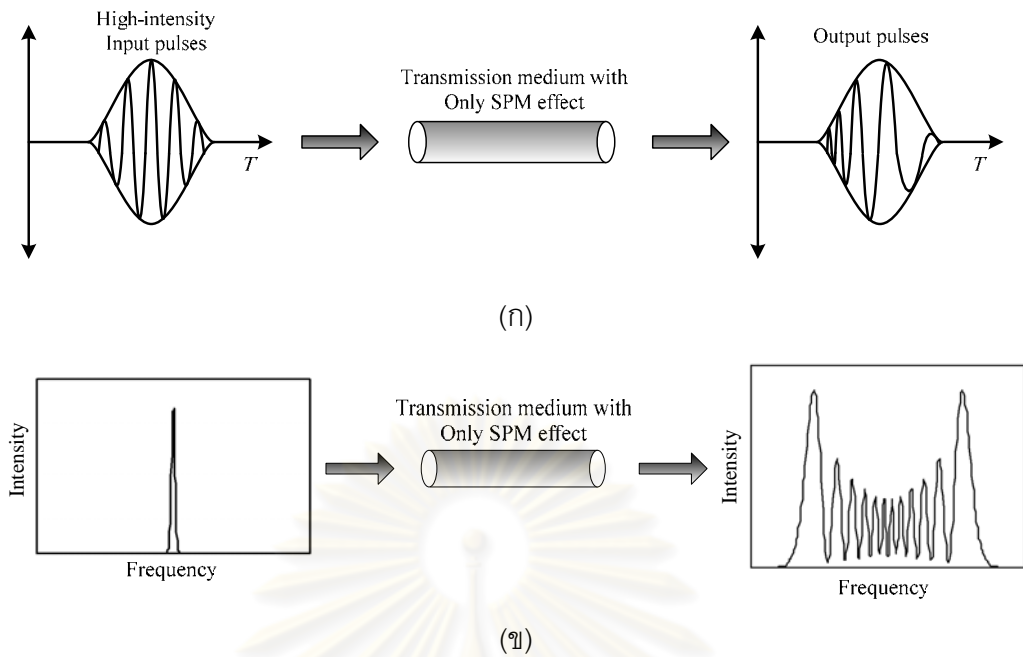
โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Index Coefficient) ซึ่งมีค่าประมาณ $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (Free Space Wave Number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุดแสดงดังรูปที่ 2.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง

(ก) ความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ

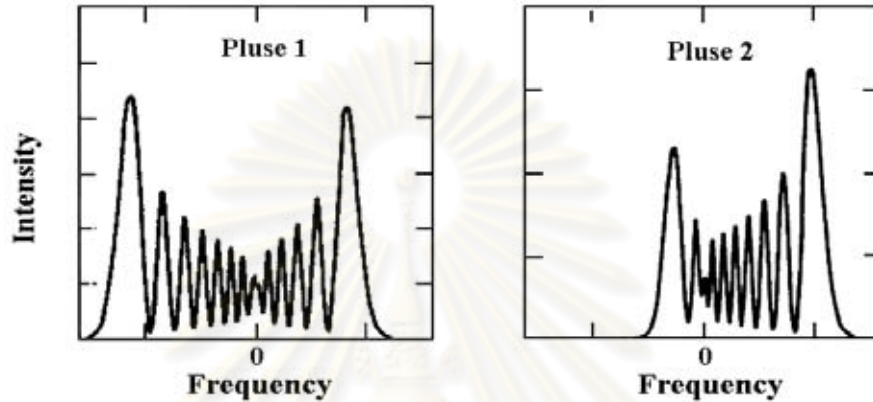
2.3.3.2 Cross-Phase Modulation (XPM)

ปรากฏการณ์ XPM จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไป

โดยทั่วไปเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ผลของ XPM มีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้ [31]

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

โดยที่ $|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1
 $|E_1|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2



รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

รูปที่ 2.8 แสดงถึงผลของ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงที่มีกำลังสัญญาณต่างกันที่เดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่ากำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM แต่จะต่างกันตรงที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจาก XPM จะขยายออกมากกว่าและการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจากกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่าส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่า

2.3.3.3 Four Wave Mixing (FWM)

FWM เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (Frequency Matching) ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมาเกิดจากสัญญาณพัลส์หลาย ๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กันมาผสมผสานกัน โดยสัญญาณที่เกิดใหม่ต้องเป็นไปตาม

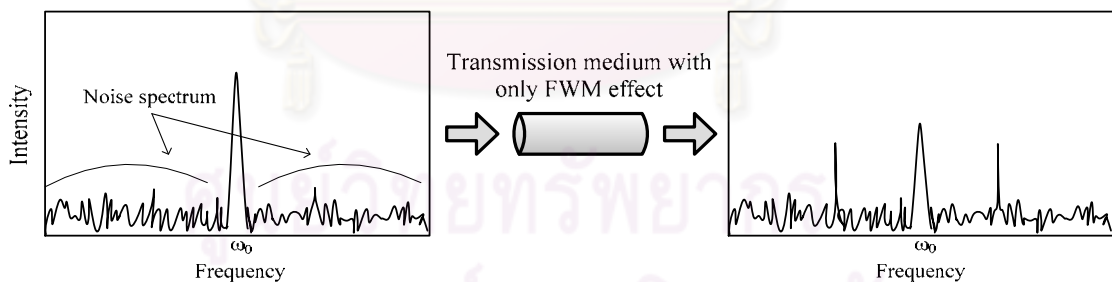
เงื่อนไขของการจับคู่ความถี่ (Frequency Matching Condition) และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase Matching Condition) ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

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

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

โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยว เรียกว่า Intra Channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (Ghost Pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตทางความเข้มแสดงดังรูปที่ 2.9 ถ้าความถี่ของสัญญาณข้อมูลและความถี่ของสัญญาณรบกวนทางอินพุตขวามือเป็นไปตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ตามหลักของการเกิด FWM แล้ว เมื่อสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่เดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังสัญญาณจากสัญญาณข้อมูลไปที่สัญญาณรบกวนทำให้กำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และกำลังของสัญญาณข้อมูลลดลง โดยที่จะมีการถ่ายเทลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ และถ้าระยะเวลาในการสื่อสารมากขึ้น สัญญาณข้อมูลอาจจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนไปได้ในที่สุด



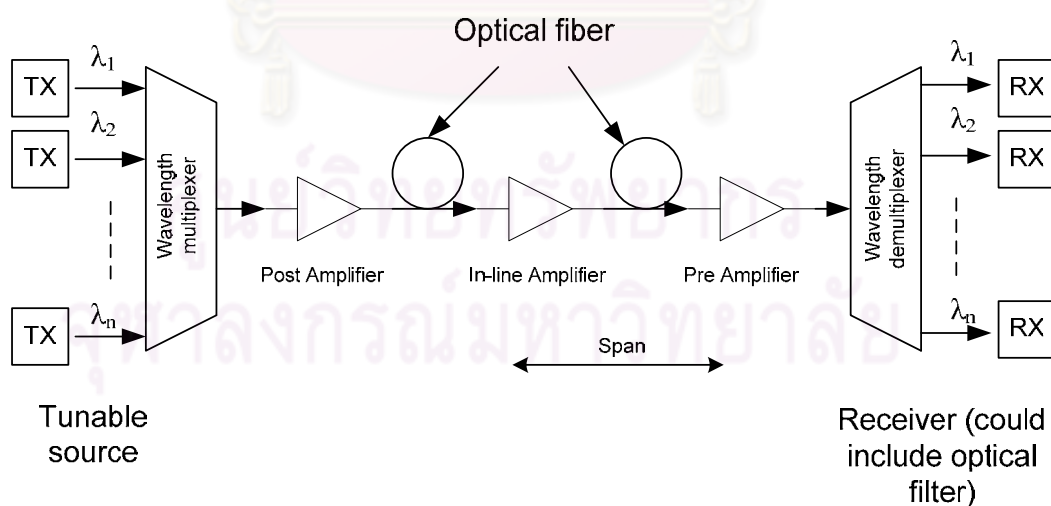
รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

ในกรณีผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณจะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นแต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

2.4 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง

2.4.1 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing)

เส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์ในการใช้งานที่มหาศาลตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 800 nm ถึง 1,600 nm [5] ตามที่ได้กล่าวมาซึ่งเพียงพอกับการใช้งานแบบ Triple Play ซึ่งได้แก่ บริการวิดีโอ ความละเอียดสูงบริการโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต (Voice Over IP : VoIP) และบริการอินเทอร์เน็ตความเร็ว ทำให้มีแนวความคิดให้ข้อมูลแต่ละชุดจะถูกครอบครองโดยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นสำหรับแต่ละช่องสัญญาณไปพร้อมกันบนเส้นใยแสงดังรูปที่ 2.10 [5] ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นมีสัญญาณจำนวน n ความยาวคลื่นถูกมัลติเพล็กซ์และส่งไปตามเส้นใยแสงเส้นเดียว การส่งผ่านสัญญาณในระยะทางไกลสามารถส่งสัญญาณไปได้หลายพันกิโลเมตรโดยจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ส่วนระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Span) ต้องไม่ให้มีระยะทางมากเกินไปจนกำลังสัญญาณที่ถูกลดทอนลงไม่สามารถตรวจจับได้หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางแสง (Optical Signal-to-Noise Ratio: OSNR) มีค่าต่ำแสดงถึงประสิทธิภาพที่ไม่ดีของระบบ [12], [10]



รูปที่ 2.10 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นบนเส้นใยแสง

ช่วงแรกของเทคโนโลยีระบบ WDM จะเป็นการส่งความยาวคลื่นเพียง 2, 4, 8, 12, และ 16 ความยาวคลื่นโดยใช้ส่งสัญญาณในระยะทางสั้นๆ เทคโนโลยีในระยะถัดมาคือ Coarse WDM

(CWDM) มีระยะห่างของความยาวคลื่นอยู่ที่ 20 nm (3,000 GHz) มีจำนวนความยาวคลื่นอยู่ที่ 18 ความยาวคลื่นและถูกจำกัดอยู่ที่พิสัยความยาวคลื่น 1,270 nm ถึง 1,610 nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 และ Dense WDM (DWDM) มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นอาจจะอยู่ที่ 200, 100, 50, หรือ 25 GHz และมีจำนวนช่องสัญญาณ 16-160 ช่องสัญญาณ ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [32]

2.4.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Dense Wavelength Division Multiplexing)

ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นแบบ DWDM พัฒนามาจากระบบสื่อสารทางแสงด้วยเส้นใยแสงที่แต่เดิมใช้เพียงแสงสีเดียวหรือแสงที่มีค่าความยาวคลื่นคงที่เพียงค่าเดียว เช่น 1330 nm หรือ 1550 nm เป็นต้น ระบบสื่อสารข้อมูลหลายช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงที่ผ่านมาช่วงปี ค.ศ. 1900-1999 คือระบบ Time Division Multiplex / Pulse Code Modulation (TDM/PCM) ที่ใช้ระบบสายส่งที่เป็นสายทองแดง และระบบ SDH/SONET ที่ใช้เส้นใยแสงสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วหลายระดับ ตัวอย่างเช่น ความเร็วที่อัตรา 2.5 Gb/s ซึ่งเป็นของระบบ STM-16 ที่ใช้ระบบสายส่ง OC-48 เป็นต้น ถือได้ว่ามีความเร็วสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารแบบดั้งเดิม STM-16 นี้ใช้เส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวและใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียวเป็นคลื่นพาห้สำหรับส่งข้อมูลหลายช่องสัญญาณที่ถูกรวมกันด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) ด้วยวงจรรีเลย์ทอโรนิกส์ แม้ว่าระบบสื่อสารจะส่งข้อมูลได้เร็วถึง 2.5 Gb/s แต่ยังมีคามพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มความเร็วมากขึ้นไปอีก ได้แก่ การเพิ่มอัตราเร็วจากระบบเดิมที่ใช้อยู่ซึ่งสามารถพัฒนาระบบเดิมให้มีขีดการทำงานเพิ่มขึ้นได้อีกถึง 40 Gb/s แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของขีดจำกัดด้านความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกวิธีคือการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในเส้นใยแสงเส้นเดิม เทคนิคนี้สามารถกระทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเส้นใยแสงเดิมในระบบก็ยังสามารถรองรับขีดการทำงานนี้ได้ซึ่งจากแนวคิดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบสื่อสารแบบ WDM ซึ่งพัฒนามาเป็น DWDM ในปัจจุบัน [33]

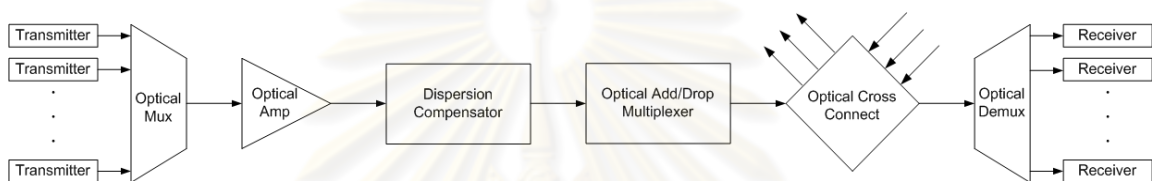
2.4.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในการทำงานของระบบ DWDM

ในระบบ WDM ใช้แสงที่ความยาวคลื่น 1,330 nm และ 1,550 nm แทนช่องสัญญาณอิสระรวมกันทางแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่สามารถเพิ่ม

ช่องสัญญาณที่อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นแสงได้มากนักเพราะแสงในแต่ละช่องสัญญาณมีความยาวคลื่นต่างกันมากจะมีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้มีค่าไม่เท่ากัน ผลลัพธ์คือ ในระบบสื่อสารทางไกลต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (Repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่นเป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นและทำให้ระบบมีความยุ่งยาก การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้เคียงกัน โดยเป็นแสงในช่วงของหน้าต่างความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง เช่น ในระบบปัจจุบัน มักจะเลือกช่องหน้าต่างความยาวคลื่นแสงในช่วง 1550 nm และความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีช่วงห่างกัน (Channel Spacing : CS) ประมาณ 1 nm เช่นในระบบ DWDM ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจประกอบไปด้วยความยาวคลื่นแสง 1550, 1551, 1552, ..., 1557 nm ซึ่งหมายถึงมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ CS เท่ากับ 1 nm การกำหนดให้ CS มีค่าน้อย หมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรตเพิ่มมากขึ้นด้วย

โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบ DWDM ประเภทระบบสื่อสารแบบทางเดียว (Simplex) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 เริ่มจากเครื่องส่งสัญญาณแสงทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสง เครื่องส่งสัญญาณแสงหนึ่งชุดจะส่งแสงออกมา 1 ความยาวคลื่นเรียกว่า 1 ช่องสัญญาณ จากนั้นแสงจากช่องสัญญาณต่างๆ จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการทางแสงด้วย Optical Multiplexer ส่งไปยังปลายทางด้วยเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว ข้อมูลที่เดินทางไปในเส้นใยแสงจะถูกลดทอนสัญญาณทำให้สัญญาณแสงมีความเข้มแสงน้อยลงจึงจำเป็นต้องมีเครื่องขยายสัญญาณทางแสงทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกๆ ช่องสัญญาณให้มีความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปได้ สัญญาณข้อมูลที่ส่งโดยทั่วไปเป็นสัญญาณดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงจะเกิดปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันทำให้สัญญาณพัลส์บานออก ส่งผลให้ปริมาณข้อมูลหรือบิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นการส่งสัญญาณในระบบ DWDM จึงต้องมีอุปกรณ์ Dispersion Compensator ที่ทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์ที่บานออกให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ผลของปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันระบบ DWDM มีผลกระทบทุกช่องสัญญาณหรือทุกความยาวคลื่น โดยที่ระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากผลกระทบของปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันยิ่งมีมากด้วย ในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ตัวอย่างเช่น โครงข่ายแบบ SDH/SONET มีโครงสร้างเป็นวงแหวน (Ring) หรือเมช (Mesh) ในระบบ DWDM มีอุปกรณ์ Add / Drop เพื่อให้ระบบสามารถขยายการ

ติดต่อเข้ากับสถานีอื่นได้โดยนำไปใช้กับระบบเดิมด้วย Optical Add / Drop Multiplexer (OADM) โดยการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้เป็นการจัดการทางแสงและในระบบ DWDM สถานีที่ทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่มีอุปกรณ์ Cross Connect ทำหน้าที่ตัดต่อหรือเลือกเส้นทางของข้อมูลในระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย Optical Cross Connect (OXC) เมื่อสัญญาณเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณที่รวมกันอยู่จะถูกแยกออกเป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Optical Demultiplexer ซึ่งมีหลักการการทำงานตรงข้ามกับ Optical Multiplexer



รูปที่ 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารแบบ DWDM

ระบบ DWDM สามารถใช้กับระบบสื่อสารได้ทั้งขนาดเล็กเช่น การสื่อสารกันแบบ Point-to-Point หรือขนาดใหญ่อย่าง Backbone Network โดยมีอุปกรณ์มากขึ้นกับขนาดของโครงข่ายทั้งที่เป็นอุปกรณ์ประเภทแอ็กทีฟ (Active Component) ที่ต้องมีการป้อนพลังงานจากภายนอกและอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive Component) ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก

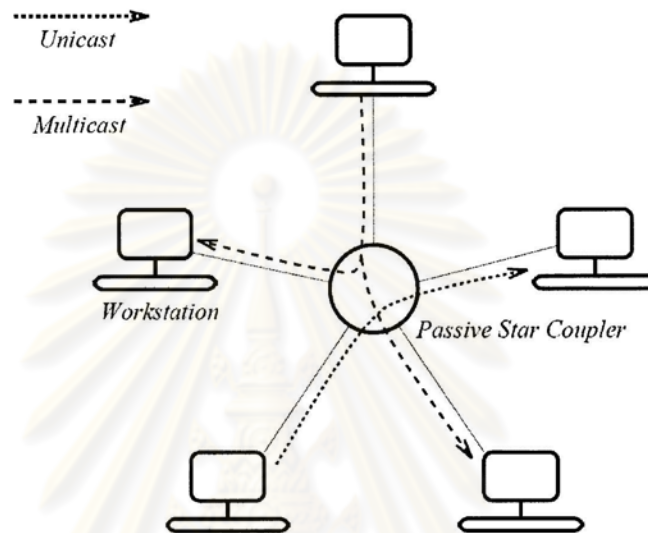
2.5 โครงสร้างโครงข่ายดับเบิลยูติเอ็ม

โครงสร้างโครงข่ายดับเบิลยูติเอ็มแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network และ Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network [5]

2.5.1 Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network

Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network อาจถูกสร้างโดยการเชื่อมต่อโนดด้วยเส้นใยแสงที่สามารถส่งได้สองทิศทางไปยัง Passive Star ดังรูปที่ 2.12 [5] โหนดจะส่งข้อมูลทางแสงไปยัง Star บนความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่ง ข้อมูลจากต้นทางหลายๆ ต้นทางจะถูกรวมกันทางแสงโดย Star จากนั้นข้อมูลจะถูกแพร่สัญญาณไปยังทุกๆ โหนดที่เหลือทั้งหมดด้วยกำลัง

สัญญาณที่เท่ากัน ที่ตัวรับจะใช้ Optical Filter กรองสัญญาณที่ความยาวคลื่นเดียวซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ต้องการติดต่อกับตัวรับนั้น ทั้งนี้เมื่อตัวส่งสัญญาณส่งสัญญาณบนความยาวคลื่น λ_1 ตัวรับหลายตัวสัญญาณสามารถปรับความยาวคลื่นของ Filter เพื่อรับข้อมูล λ_1 นี้ได้ ทำให้ Passive Star สามารถรองรับการให้บริการแบบ Multicast ได้



รูปที่ 2.12 A Passive-Star-Based Local Optical WDM Network.

2.5.2 Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network

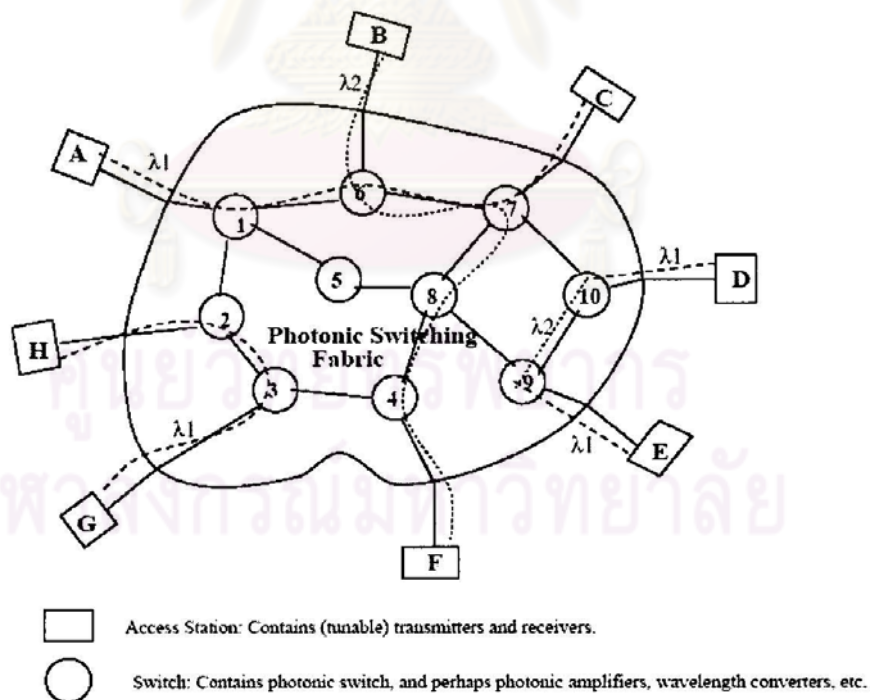
Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network แสดงในรูปที่ 2.13 โครงข่ายประกอบด้วย Optical Switching เชื่อมต่อกับเส้นใยแสงในลักษณะเมชโดยผู้ใช้บริการเชื่อมต่อกับสวิตช์โดยเส้นใยแสง เมื่อรวมผู้ใช้หนึ่งคนเข้ากับสวิตช์เราจะเรียกว่า โหนด แต่ละโหนดมีตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วสวิตช์หนึ่งตัวสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้หลายคน

กลไกพื้นฐานของการสื่อสารในโครงข่าย Wavelength-Routed คือ Lightpath ซึ่ง Lightpath คือ ช่องทางการสื่อสารทางแสงระหว่างคูโหนดใดๆ ในโครงข่ายซึ่งอาจครอบคลุมมากกว่า 1 ข่ายเชื่อมโยง โหนดที่ปลายทางของ Lightpath เข้าถึง Lightpath ได้ด้วยตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณที่ปรับความยาวคลื่นเป็นความยาวคลื่นของ Lightpath นั้น ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.13 Lightpath ถูกสร้างขึ้นระหว่างโหนด A และ โหนด C บนความยาวคลื่น λ_1 หรือ Lightpath ถูกสร้างขึ้นระหว่างโหนด B และ โหนด F บนความยาวคลื่น λ_2 และ Lightpath ถูกสร้างขึ้นระหว่าง

โหนด H และ โหนด G บนความยาวคลื่น λ_1 lightpath ระหว่างโหนด A และโหนด C วิ่งผ่านสวิตช์ 1, 6 และ 7 ตามลำดับ

ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่น Lightpath จะวิ่งบนความยาวคลื่นเดียวตลอดทั้งเส้นทางบนโครงข่ายซึ่งเรียกว่า คุณสมบัติ Wavelength-Continuity ของ Lightpath ความต้องการนี้อาจไม่จำเป็นถ้าเรามีอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่นในระบบ ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.13 [5] Lightpath ระหว่างโหนด D และโหนด E เดินทางบนเส้นใยแสงจากโหนด D ไปยังสวิตช์ 10 บนความยาวคลื่น λ_1 จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นความยาวคลื่น λ_2 ที่ สวิตช์ 10 และเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงระหว่างสวิตช์ 10 และสวิตช์ 9 บนความยาวคลื่น λ_2 และถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นความยาวคลื่น λ_1 อีกครั้งที่สวิตช์ 9 จากนั้นเดินทางต่อไปบนเส้นใยแสงจากสวิตช์ 9 ไปยังโหนด E บนความยาวคลื่น λ_1

ความต้องการพื้นฐานสำคัญในโครงข่าย Wavelength-Routed คือ Lightpath 2 เส้นทางหรือมากกว่าที่เดินทางบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกันต้องมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันจึงจะทำให้ไม่เกิดการรบกวนระหว่างกัน



รูปที่ 2.13 A Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical WDM Network.

ในโครงข่าย Wavelength-Routed ทราฟฟิกถูกส่งสัญญาณบนช่องทางที่เรียกว่า Lightpath ซึ่งถูกส่งผ่านโหนดที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นใยแสง โหนดอาจต้องการ O-E-O Conversion เพื่อสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่หรือเป็นตัวต่อประสาน (Interface) ระหว่างโครงข่ายทางแสงกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ในโครงข่ายแบบ Opaque เป็นการส่งสัญญาณเป็นแบบจุดต่อจุด ดังนั้นสัญญาณจึงถูกสร้างขึ้นใหม่ทุกๆ Intermediate Node ตามเส้นทางของ Lightpath โดย O-E-O Conversion ความต้องการที่จะส่งสัญญาณด้วยความเร็วที่สูงขึ้นสามารถทำได้โดยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายสำหรับระบบจุดต่อจุดอาจมีค่าสูงมากเนื่องด้วยจำนวนอุปกรณ์ Regenerator ที่ทุกๆ โหนด ต้นทุนดังกล่าวสามารถลดลงได้ในโครงข่ายแบบ Translucent ซึ่งเป็นโครงข่ายที่อุปกรณ์ Regenerator ถูกใช้งานที่บางโหนดแทนที่การใช้งานในทุกโหนด แต่เป้าหมายสูงสุดของการลดจำนวนทางอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์นำไปสู่การพัฒนาเป็นโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency [34]

ในโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency ข้อมูลถูกส่งในรูปของแสงตลอดทั้ง Lightpath ดังนั้นโครงข่ายแบบ Transparency สามารถกำจัดอุปกรณ์ O-E-O Conversion ที่มีราคาแพงได้ ยิ่งไปกว่านั้นโครงข่ายแบบ Transparency สามารถให้ความเป็น Transparency ทั้งอัตราข้อมูลรูปแบบของสัญญาณและโปรโตคอล แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของสัญญาณทางแสงลดต่ำลงเมื่อเดินทางผ่านอุปกรณ์ทางแสงหลายตัวตาม Lightpath จากต้นทางไปยังปลายทาง สาเหตุของการลดทอนของคุณภาพเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง เป็นต้น ดังนั้นโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency จึงต้องมีการจัดการการลดทอนของคุณภาพสัญญาณจากผลของดิสเพอร์ชันด้วยการชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน [35]

2.6 โครงข่าย SDH

ความเป็นมาของ SDH เริ่มจากการจัดการโครงข่ายสายโทรศัพท์ เมื่อสัญญาณโทรศัพท์ได้เปลี่ยนเป็นดิจิทัล โดยช่องสัญญาณเสียงหนึ่งช่องใช้สัญญาณแถบกว้าง 64 Kb/s แต่ในอดีตการจัดมาตรฐานลำดับชั้นของเครือข่ายสัญญาณเสียงยังแตกต่างกัน เช่นในสหรัฐอเมริกา มีการจัดกลุ่มสัญญาณเสียง 24 ช่อง เป็น 1.54 Mb/s หรือที่เรารู้จักกันในนาม T1 และระดับต่อไปเป็น 63.1, 447.3 Mb/s แต่ทางกลุ่มยุโรปใช้ 64 Kb/s ต่อหนึ่งสัญญาณเสียง และจัดกลุ่มต่อไปเป็น 32

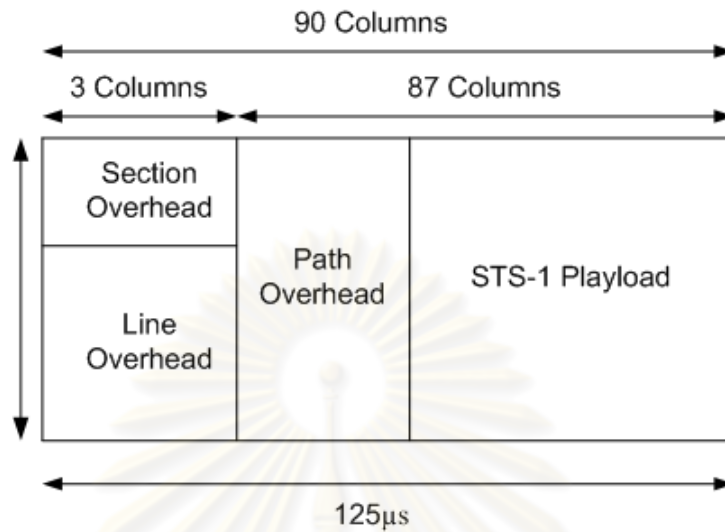
ช่องเสียงคือ 2.048 Mb/s ที่รู้จักกันในนาม E1 และจัดกลุ่มใหญ่ขึ้นเป็น 8.44, 34.36 Mb/s การวางมาตรฐานใหม่สำหรับเครือข่ายความเร็วสูงจะต้องรองรับการใช้งานต่างๆ ทั้งเครือข่ายสัญญาณโทรศัพท์และสัญญาณมัลติมีเดียอื่น ๆ เช่น สัญญาณโทรทัศน์ ข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต และที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอีกได้ คณะกรรมการจัดการมาตรฐาน SDH จึงรวมแนวทางต่าง ๆ ในลักษณะให้ยอมรับกันได้ การเน้น SDH ให้เป็นกลางที่ทำให้เครือข่ายประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ วิ่งลงตัวได้จึงเป็นเรื่องสำคัญ โดยวางแถบกว้างพื้นฐานระดับต่ำสุดไว้ที่ 51.84 Mb/s โดยที่ภายในแถบกว้างนี้จะเป็นเฟรมข้อมูลที่สามารถนำช่องสัญญาณเสียงโทรศัพท์หรือการประยุกต์อื่นใดเข้าไปรวมได้และยังรวมระดับช่องสัญญาณต่ำสุด 51.84 Mb/s นี้ให้สูงขึ้น เช่น ถ้าเพิ่มเป็นสามเท่าของ 51.84 ก็จะได้ 155.52 [36]

SONET/SDH เป็นมาตรฐานสากลของเครือข่ายสื่อสัญญาณความเร็วสูง เป็นเครือข่ายที่มีความทันสมัยมากในการสื่อสัญญาณและการบริหารจัดการเครือข่ายเทคโนโลยีของ SONET/SDH ช่วยให้ Network Operator สามารถตอบสนองความต้องการใช้ความจุของช่องสัญญาณของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว เครือข่าย SONET/SDH สามารถถูกออกแบบสร้างให้มีความสามารถในการฟื้นตัวเองได้อย่างอัตโนมัติในกรณีที่มีปัญหาขัดข้องเกิดขึ้นกับเครือข่าย ทำให้เครือข่ายมีความสามารถในการใช้งานได้ (Availability) ที่สูงขึ้น การจัดโครงสร้างการมัลติเพล็กซ์ของสัญญาณ SONET/SDH ได้ช่วยให้สามารถต่อไขว้ (Cross-Connect) ช่องสัญญาณ Low-Order ที่อยู่ภายในช่องสัญญาณ High-Order ได้โดยไม่จำเป็นต้องติมัลติเพล็กซ์สัญญาณทั้งหมดออกก่อน [37]

2.6.1 Basic Building Block ของมาตรฐาน SONET

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 $N \times 51.84$ Mbps โดยโครงสร้างในส่วนที่เป็น Overhead ส่งผลให้ความจุในการส่งผ่านข้อมูล (Transmission Capacity) ลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Transmission Capacity} = 9 \times (90 - 3) \times \frac{1}{125\mu\text{s}} \times 8 \left(\frac{\text{bits}}{\text{byte}} \right) = 50.112 \text{ Mb/s}$$

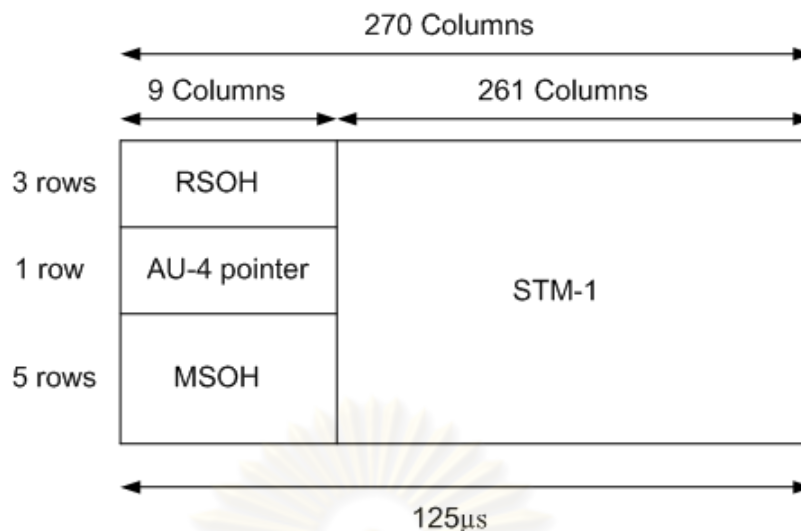


รูปที่ 2.14 Basic SONET Building Block

2.6.2 Basic Building Block ของมาตรฐาน SDH

Basic Building Block ของมาตรฐาน SDH เรียกว่า Synchronous Transport Module Level1 (STM-1) ประกอบขึ้นด้วย 270 Columns x 9 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

$$\text{Transmission Capacity} = 9 \times (270 - 9) \times \frac{1}{125\mu\text{s}} \times 8 \left(\frac{\text{bits}}{\text{byte}} \right) = 150.336 \text{ Mb/s}$$



รูปที่ 2.15 Basic SDH Building Block

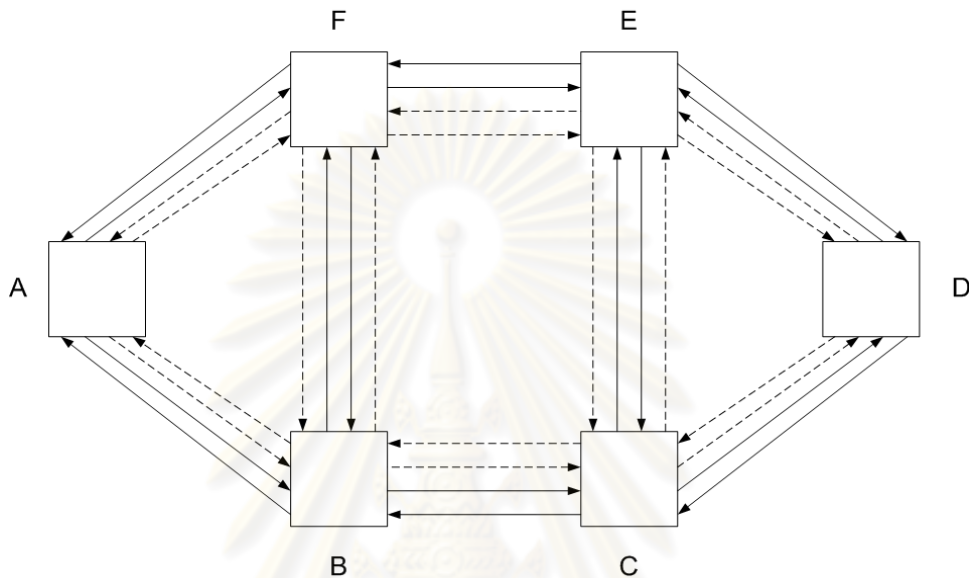
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานแบบ SONET และ SDH

SONET Optical Carrie Level	SONET Frame Format	SDH Level and Frame Format	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
OC-768	STS-768	STM-256	39,813.12	768 x 28 T1s	256 x 63 E1s
OC-3072	STS-3072	STM-1024	159,252.48	3072 x 28 T1s	1024 x 62 E1s

การมัลติเพลกซ์ในมาตรฐาน SDH เริ่มต้นด้วยการ Mapping สัญญาณที่มีอัตราเร็วแตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งานแบนด์วิดท์เข้าสู่ Containers (Cs) ส่วนของ Cs จะรวมกันกับส่วนของ Path Over Head (POH) ได้เป็น Virtual Containers (Cs + POH = VCs) ยกตัวอย่างเช่น C-4 ซึ่งประกอบด้วย 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 จะถูกเพิ่มลงไปในสัญญาณ AU-4 ได้เป็นสัญญาณ STM-1

2.6.3 การป้องกันความเสียหายในโครงข่าย SDH ลักษณะเมฆ

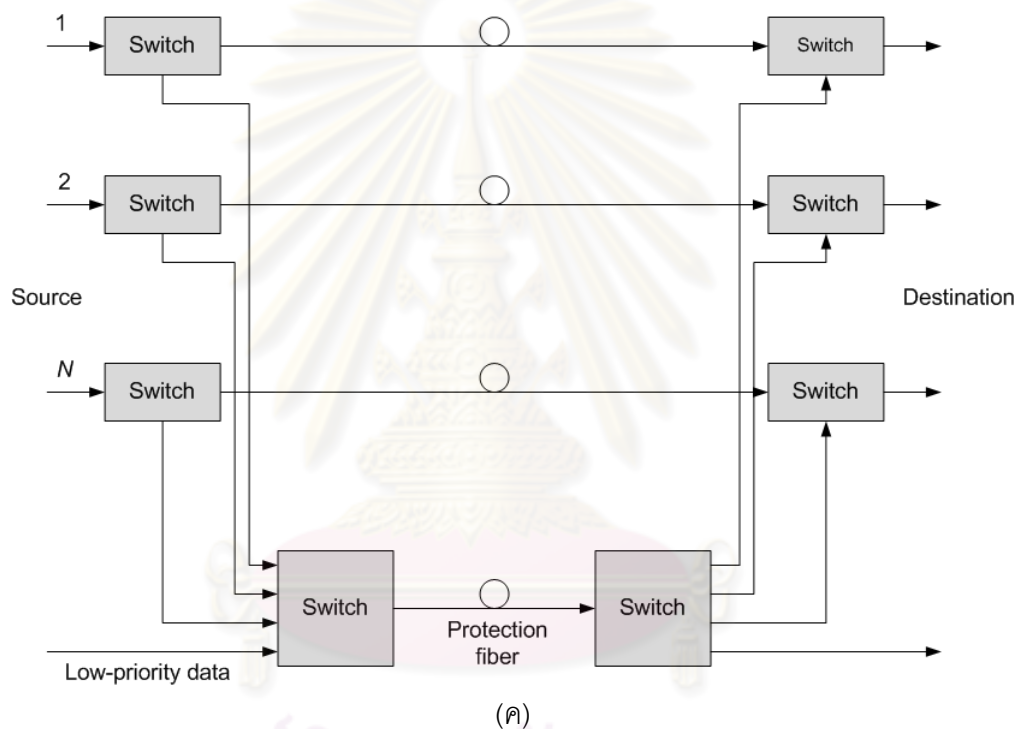
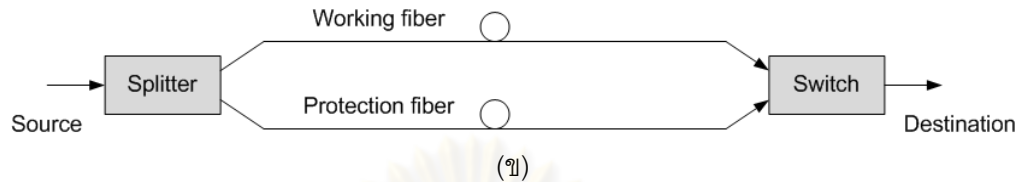
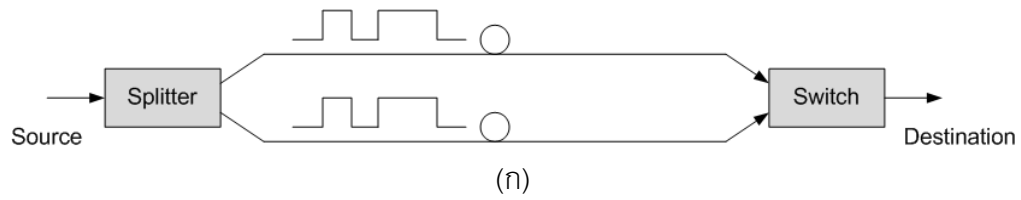


รูปที่ 2.16 โครงข่ายลักษณะเมฆประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานแทนด้วยเส้นทึบ และเส้นใยแสงสำรองแทนด้วยเส้นประ

โครงข่าย SDH ลักษณะเมฆเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างวงรูปปิดหลายรูปดังรูปที่ 2.16 ที่แต่ละสถานีมี ADM หน้าหลักของ ADM คือ การเพิ่มและดึงช่องสัญญาณในสายออกมาใช้งานได้ เครือข่ายแบบเมฆประกอบด้วยเส้นใยแสงทำงาน 2 เส้นและเส้นใยแสงสำรอง 2 เส้น ทราฟฟิกสามารถรับและส่งได้ทั้งสองทิศ สำหรับการส่งผ่านสัญญาณในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติจะเลือกกระยะทางการส่งผ่านสัญญาณที่สั้นกว่า (Short Path) และเลือกกระยะทางการส่งผ่านสัญญาณที่ยาวกว่า (Long Path) สำรองไว้สำหรับการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายที่เกิดขึ้น กลไกการกู้คืนสัญญาณ (Restoration) ของโครงข่ายลักษณะเมฆให้ข้อดีเนื่องจาก OXC มีความสามารถเชื่อมต่อของสัญญาณทางแสงจากสัญญาณขาเข้าใดๆ ไปสัญญาณขาออกใดๆ ส่งผลให้มีความสามารถเลือกเส้นทางใหม่ (Reroute) เส้นทางหนึ่งหรือหลายเส้นทางได้อย่างชาญฉลาดและอัตโนมัติใก้ๆ บริเวณที่เกิดความเสียหายในโครงข่าย อีกทั้งกลไกการกู้คืนสัญญาณสามารถทำได้เร็วถึง 50 ms หรือน้อยกว่า [4]

ความเสียหายสามารถเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง โหนด และ แต่ละช่องสัญญาณของ WDM ความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงเกิดขึ้นโดยแสงขาด ความเสียหายของโหนดอาจเกิดจาก Power Outages หรือ อุปกรณ์เสียหาย (Equipment Failures) ความเสียหายของแต่ละช่องสัญญาณอาจเกิดจากการเสียหายของอุปกรณ์เกี่ยวกับช่องสัญญาณนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ตัวส่งสัญญาณ หรือ ตัวรับสัญญาณ เป็นต้น กลไกการป้องกันความเสียหายในเกือบทุกกรณีถูกออกแบบให้ป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงใดเชื่อมโยงหนึ่ง (A Single Failure) ซึ่งสมมุติได้ว่าโครงข่ายถูกออกแบบดีพอให้เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหลายข่ายเชื่อมโยงพร้อมกันเกิดขึ้นได้น้อยมาก

กลไกการป้องกันที่ใช้กับโครงข่ายเป็นการนำกลไกการป้องกันที่ใช้กับข่ายเชื่อมโยงจุดต่อจุดมาประยุกต์ใช้ 2 วิธีพื้นฐานของกลไกการป้องกันที่ถูกรับใช้กับข่ายเชื่อมโยงจุดต่อจุดคือ การป้องกันแบบ 1 + 1 (1 + 1 Protection) และ การป้องกันแบบ 1 : 1 (1 : 1 Protection) หรือการป้องกันแบบ 1 : N (1 : N Protection) แสดงในรูปที่ 2.17 [38]



รูปที่ 2.17 เทคนิคการป้องกันความเสียหาย

แบบ (ก) 1 + 1 (ข) 1 : 1 (ค) 1 : N

ในการป้องกันแบบ 1 + 1 ทราฟฟิกถูกส่งแบบเส้นใยแสงสองเส้นที่แยกออกจากกันในเวลาเดียวกันจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงเส้นหนึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นใยแสงทำงานและอีกเส้นหนึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นใยแสงสำรอง ปลายทางจะเลือกรับสัญญาณจากเส้นใยแสงเส้นใดเส้นหนึ่ง เมื่อเส้นใยแสงขาดปลายทางจะเปลี่ยนการรับสัญญาณไปยังเส้นใยแสงอีกเส้นได้อย่างต่อเนื่อง การป้องกันรูปแบบนี้ทำได้รวดเร็วและไม่ต้องการโปรโตคอลเพื่อสลับสัญญาณระหว่างโนดปลายทางสองโนด

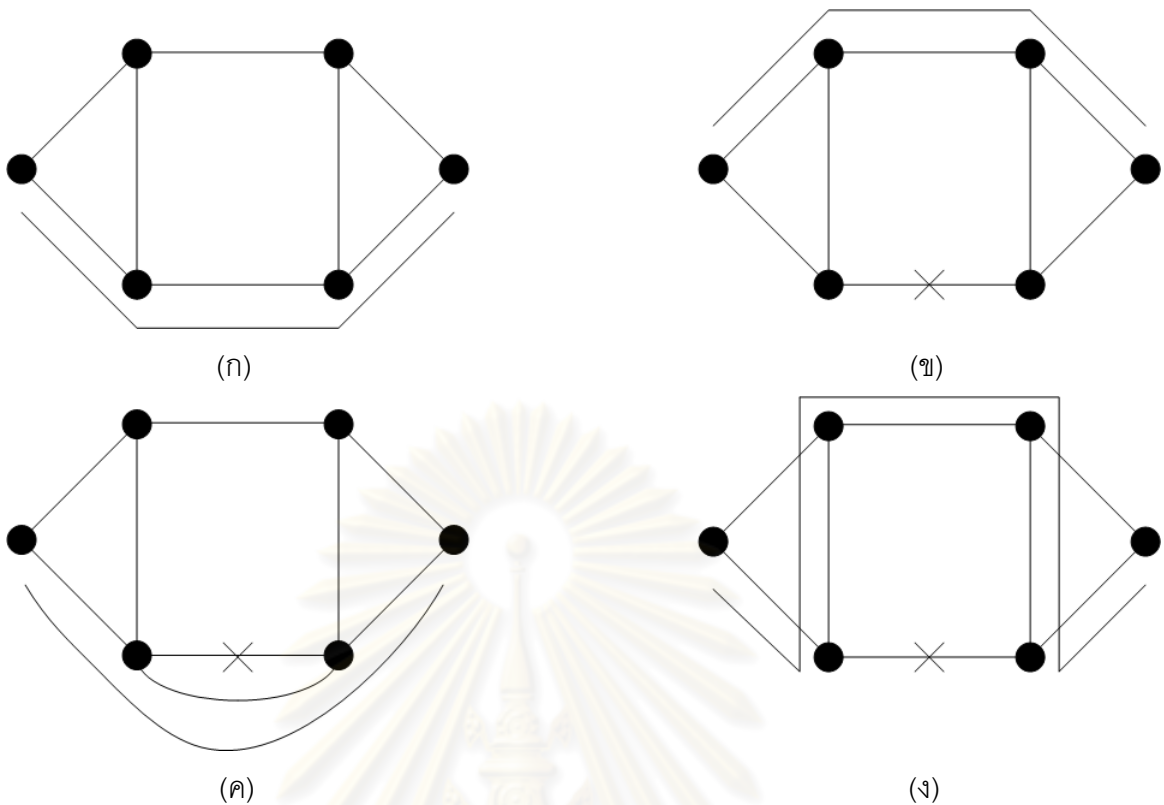
ในการป้องกันแบบ 1 : 1 เส้นใยแสงระหว่างต้นทางและปลายทางยังคงมี 2 เส้น แต่การส่งสัญญาณถูกส่งบนเส้นใยแสงทำงานเพียงเส้นเดียว ถ้าเส้นใยแสงทำงานขาด ทั้งต้นทางและปลายทางจะเปลี่ยนการส่งสัญญาณไปยังเส้นใยแสงสำรอง ในกรณีการป้องกันแบบ 1 : N เส้นใยแสงทำงาน N เส้นใช้เส้นใยแสงสำรองเส้นเดียวร่วมกัน การจัดเรียงลักษณะนี้สามารถรองรับความเสียหายที่เกิดจากเส้นใยแสงทำงานใดๆ

หลังจากการสับเปลี่ยนไปใช้งานเส้นใยแสงสำรองและเส้นใยแสงทำงานที่ขาดถูกซ่อมแล้ว ในการป้องกันแบบ 1 + 1 เส้นใยแสงทำงานเดิมที่ถูกซ่อมกลายเป็นเส้นใยแสงสำรองแทน ในกรณีการป้องกันแบบ 1 : N การส่งสัญญาณต้องสับเปลี่ยนกลับมาทำงานบนเส้นใยแสงทำงานเดิม

ในโครงข่ายแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถเป็นเส้นทางการส่งสัญญาณจากต้นทางที่ต่างกันไปยังปลายทางที่ต่างกัน การป้องกันสำหรับทราฟฟิกลักษณะนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ Path Switching และ Line Switching แสดงดังรูปที่ 2.18 ใน Path Switching หรือ Path Protection กลไกการกู้คืนสัญญาณของทราฟฟิกถูกจัดการโดยต้นทางและปลายทางของแต่ละทราฟฟิก ในกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายทราฟฟิกถูกเลือกเส้นทางใหม่ที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางตลอดเส้นทางระหว่างสองโหนด ใน Line Switching กลไกการกู้คืนสัญญาณของทราฟฟิกถูกจัดการโดยโหนดที่ปลายทางของข่ายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหาย

Line Switching แบ่งออกเป็น Span Protecting และ Line Protection ในกรณี Span protection ถ้าเส้นใยแสงระหว่างโหนดใดๆ ขาด ทราฟฟิกจะถูกสับเปลี่ยนไปยังเส้นใยแสงอีกเส้นบริเวณโหนดเดิมดังรูปที่ 2.18 (ค) ใน Line Protection ทราฟฟิกจะถูกสับเปลี่ยนไปยังอีกเส้นทางหนึ่งระหว่างโหนดเดิมดังรูปที่ 2.18 (ง)

เช่นเดียวกับข่ายเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด Path Protection สามารถทำได้ทั้งแบบ 1 + 1 และ 1 : N 1 + 1 Path Protection ด้อยประสิทธิภาพเพราะมีความต้องการแบนด์วิดท์ 2 เท่าสำหรับแต่ละการเชื่อมโยง 1 : N Path Protection N เส้นทางสามารถใช้หนึ่งเส้นทางสำรองร่วมกันได้ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพมากกว่า



รูปที่ 2.18 Path Switching และ Line Switching ในโครงข่ายลักษณะเมฆ

(ก) โครงข่ายทำงานปกติ (ข) กลไกการกู้คืนแบบ Path Switching หลังจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเกิดความเสียหาย (ค) Span Protection ในรูปแบบของ Line Switching (ง) Line Protection ในรูปแบบของ Line Switching

2.6.4 การป้องกันความเสียหายที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์

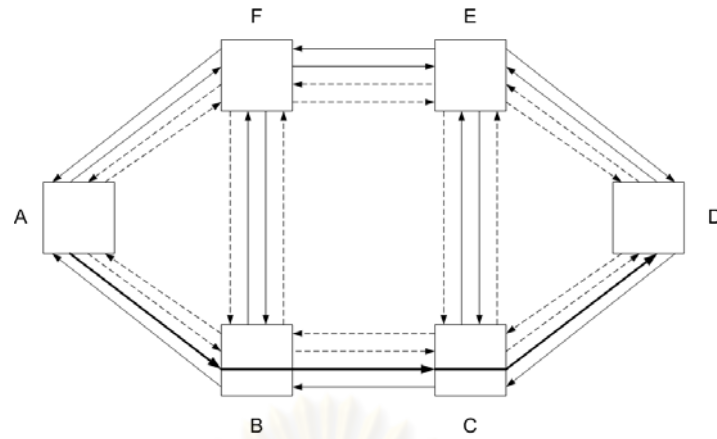
กลไกการกู้คืนสัญญาณในโครงข่ายลักษณะเมฆมีความซับซ้อนมากกว่าข่ายเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดและโครงข่ายแบบวงแหวน เทคนิคการป้องกันง่ายๆ วิธีหนึ่งคือ 1 : 1 Path Protection พิจารณาสองคูโนดบนโครงข่ายลักษณะเมฆที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นใยแสง 4 เส้น ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองทั้งสองทิศทาง เส้นใยแสงทั้งหมดสามารถถูกวางไว้ด้วยกัน ถ้าเส้นใยแสงเส้นใดเส้นหนึ่งถูกตัดเป็นไปได้ว่าเส้นใยแสงที่เหลือเส้นอื่นอาจถูกตัด [4]

กลไกการกู้คืนสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.19 ในรูปที่ 2.16 แสดงโครงข่ายลักษณะเมฆที่ประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง รูปที่ 2.19 (ก) แสดงเส้นทางการสื่อสารจากโนด A ไปโนด D ในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ โดยสื่อสารผ่าน

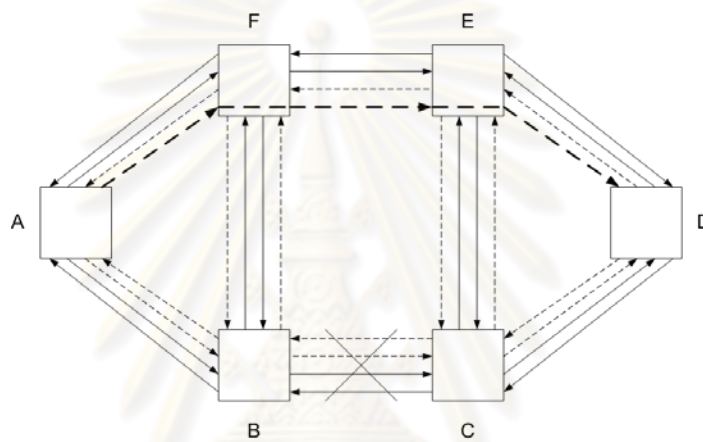
ทางโนด B และ C ตามลำดับ ภายในโนดมี OXC เพื่อสับเปลี่ยนเส้นทางไปยังเส้นใยแสงสำรองได้ ตามต้องการ รูปที่ 2.19 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย กลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection จะสับเปลี่ยนเส้นทางระหว่างโนด A และโนด D ไปยังข่าย เชื่อมโยงสำรอง FE รูปที่ 2.19 (ค) แสดงให้เห็นว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย กลไก การกู้คืนสัญญาณแบบ Line Protection จะทำงานโดยโนด B จะสับเปลี่ยนเส้นทางไปยังข่าย เชื่อมโยงสำรอง BFEC และโนด C จะสับเปลี่ยนเส้นทางจากเส้นใยแสงสำรองกลับมาเส้นใยแสง ทำงาน CE

จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากลไกการป้องกันแบบ Line Protection ใช้ระยะเวลาการส่ง สัญญาณมากกว่าและผ่านอุปกรณ์ OXC ที่แต่ละโนดมากกว่ากลไกการป้องกันแบบ Line Protection ถือว่าเป็นข้อดีของกลไกการป้องกันแบบ Path Protection อีกทั้งเมื่อเกิดความเสียหาย ขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งบนเส้นทางการสื่อสารในโครงข่ายแบบ Transparency โนดต้นทางและโนด ปลายทางจะเป็นโนดที่ตัดสินใจเลือกเส้นทางใหม่ ซึ่งคู่โนดระหว่างข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายนั้นไม่ สามารถตัดสินใจได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้กลไกการป้องกันแบบ Path Protection

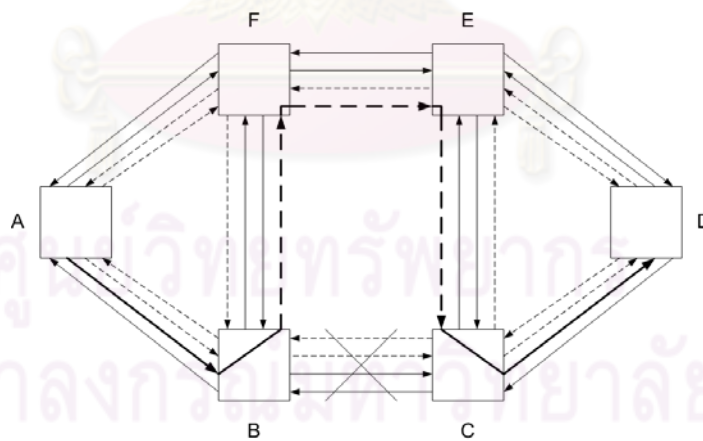
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



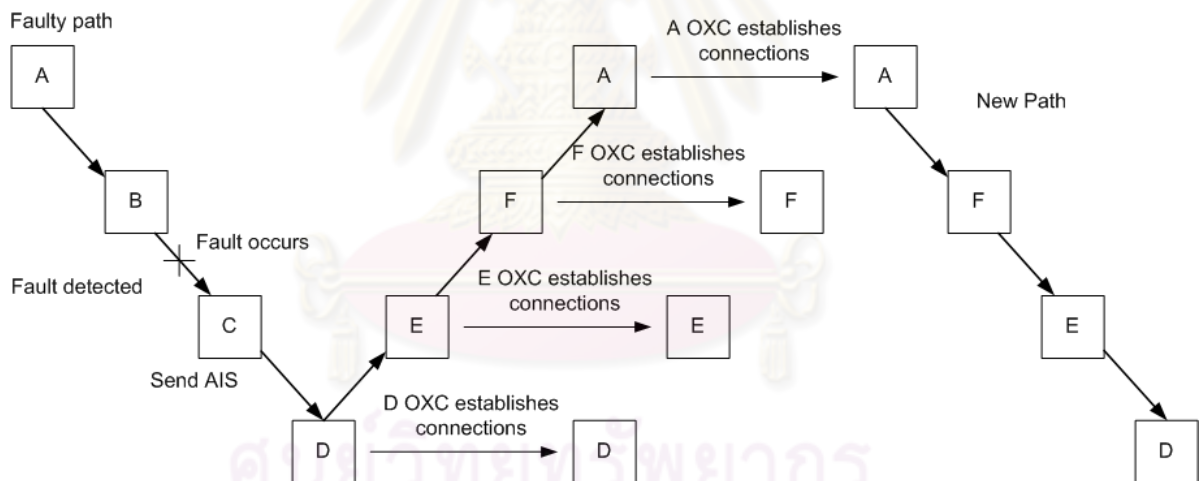
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.19 กลไกการกู้คืนสัญญาณในโครงข่ายลักษณะเมฆ เส้นใยแสงสำรองแทนด้วยเส้นประ
 (ก) เส้นทางการสื่อสารจากโหนด A ไปยังโหนด D ในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ (ข) กลไกการกู้คืน
 สัญญาณแบบ Path Protection ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย (ค) กลไกการกู้คืน
 สัญญาณแบบ Line Protection ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย

พิจารณาเส้นทางการสื่อสารจากโหนด A ไปยังโหนด B ผ่านโหนด B และ โหนด C ตามลำดับ เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด B และโหนด C เกิดความเสียหาย มี 3 เส้นทางอื่นที่สามารถใช้สื่อสารได้คือ เส้นทางที่ 1 : จากโหนด A ไปโหนด F E และ D ตามลำดับ เส้นทางที่ 2 : จากโหนด A ไปโหนด B F E และ D ตามลำดับ และ เส้นทางที่ 3 : จากโหนด A ไปยังโหนด B F E C และ D ตามลำดับ เส้นทางที่ 1 ถูกเลือกให้เป็นเส้นทางการสื่อสารเส้นทางใหม่เนื่องจากเส้นทางที่ 1 มีระยะทางน้อยที่สุด [4] รูปที่ 2.20 อธิบายเหตุการณ์จำเป็นที่เกิดขึ้นตั้งแต่ความเสียหายถูกตรวจจพบไปยังการสับเปลี่ยนเส้นทางเส้นใยแสงสำรองจนถึงมีการสื่อสารบนเส้นทางใหม่ เมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด B และ โหนด C โหนด C จะส่งสัญญาณเตือนไปยังโหนดปลายทาง D ว่าเกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง จากนั้นโหนด D จะเลือกเส้นทางใหม่โดย OXC ที่โหนด D จะสร้างการเชื่อมต่อเส้นทางใหม่ขึ้นไปโหนด E โหนด F และโหนดต้นทาง A ตามลำดับ หลังจากนั้นโหนดต้นทาง A จะสื่อสารกับโหนดปลายทาง D ได้ด้วยเส้นทางใหม่



รูปที่ 2.20 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ความเสียหายถูกตรวจจพบได้จนเกิดกลไกการกู้คืนสัญญาณได้เป็นเส้นทางใหม่

2.7 เทคนิคการแก้ไขชดเชยดิสเพอร์ชัน

วิธีหนึ่งที่จะชดเชยดิสเพอร์ชันคือการใช้อุปกรณ์ประเภทแพสซีฟที่เรียกว่า หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ซึ่งภายในประกอบด้วยเส้นใยแสงที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้หักล้างค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SMF เส้นใยแสงที่อยู่ด้านในนั้นถูกเรียกว่า DCF หรืออาจจะกล่าวสั้นๆ ได้ว่า

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันสามารถทำได้โดยนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.12)

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \quad (2.12)$$

โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ

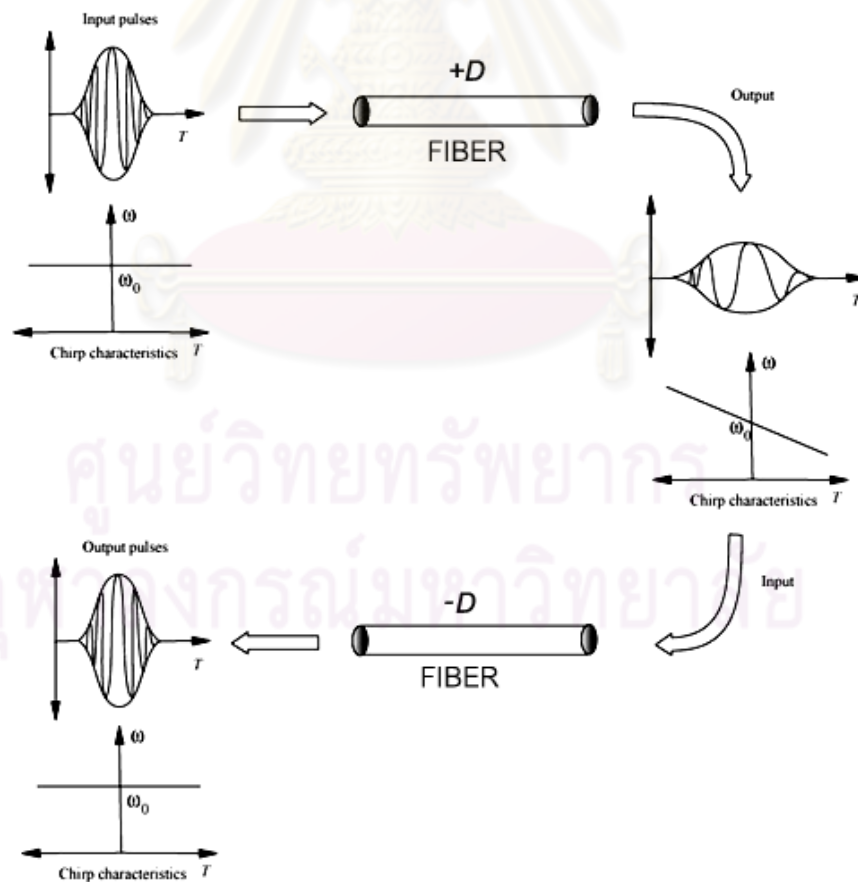
[ps/km/nm]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

[ps/km/nm]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]



รูปที่ 2.21 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

เทคนิคการจัดความเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.21 [5] ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี D ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า D ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการหดเซยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้

การหดเซยดิสเพอร์ชันด้วยวิธีนี้ ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์ที่บางระยะทางแต่ดิสเพอร์ชันมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ทุกจุดตลอดความยาวของเส้นใยแสง

2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าขีดสุด (Optimization Tools)

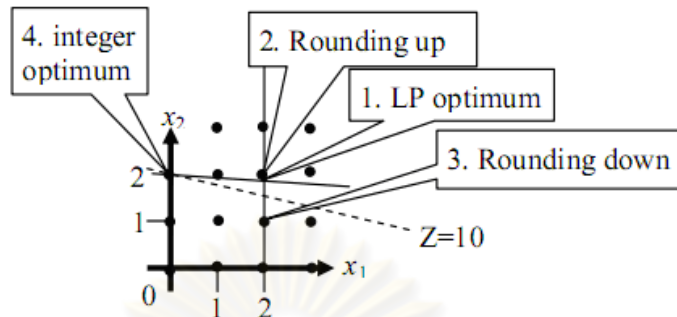
ปัญหาที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นปัญหาที่มีจำนวนจริงและจำนวนเต็มเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันเงื่อนไขมีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นตรงจึงต้องใช้การแก้ปัญหาแบบ Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) เพื่อทำ Optimization หาผลเฉลยจากสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตโดยเลือกใช้โปรแกรม Xpress MP โดยที่โปรแกรม Xpress MP ใช้วิธี Branch and Bound ในการหาผลเฉลย

2.8.1 Branch and Bound Method

โดยทั่วไปในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชันไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของฟังก์ชันแบบเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ตัวแปรของสมการสามารถเป็นค่าใดๆ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็มหรือเลขฐานสอง แต่ในทางปฏิบัติปัญหานั้นปัญหาที่พบโดยส่วนมากมักจะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันแบบจำนวนเต็มหรือฟังก์ชันแบบเลขฐานสอง การแก้ปัญหาโดยวิธีการปกติไม่สามารถใช้กับปัญหาในรูปแบบนี้ได้ดังแสดงในตัวอย่างของรูปที่ 2.22 [39]

ศูนย์วิจัยที่ปรึกษา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{aligned} \text{Maximize } Z &= x_1 + 5x_2 \\ \text{Subject to: } &x_1 + 10x_2 \leq 20 \\ &x_1 \leq 2 \\ &x_1, x_2 \geq 0 \text{ and integer.} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของการแก้ปัญหาการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชัน

แบบเลขฐานสองโดยวิธีการตัดเศษ

จากปัญหาในตัวอย่างของรูปที่ 2.22 การแก้ปัญหาโดยวิธีเชิงเส้นโดยทั่วไปนั้นจะได้คำตอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ $z=11$ ที่จุด $(2, 1.8)$ โดยสัญชาตญาณการตัดเศษจะทำให้ได้คำตอบเป็น $z=12$ ที่จุด $(2, 2)$ แต่จุดดังกล่าวละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขที่ 1 และหากพยายามตัดเศษลงจะได้ $z=7$ ที่จุด $(2, 1)$ ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่เป็นค่าสูงสุด คำตอบที่เป็นค่าสูงสุดของปัญหานี้คือ $z=10$ ที่จุด $(0, 2)$ ซึ่งไม่ได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นโดยวิธีปกติเลย ดังนั้นการแก้ปัญหาโดยการตัดเศษจึงไม่ใช่วิธีการที่ดีนัก

จากปัญหาในตัวอย่างของรูปที่ 2.22 ทำให้ทราบว่าปัญหาการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชันแบบจำนวนเต็มนั้นไม่สามารถทำโดยวิธีการหาค่าต่ำสุดโดยทั่วไปได้ วิธีการที่นิยมใช้ในการหาค่าต่ำสุดของปัญหาในรูปแบบนี้คือวิธี Branch and Bound Method ดังรูปที่ 2.23 [39] ซึ่งใช้หลักการของการกระจายคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกเป็นกิ่งก้านแล้วทำการตัดกิ่งที่ไม่สามารถจะนำไปสู่คำตอบที่มีค่าต่ำสุดและเป็นไปตามฟังก์ชันเงื่อนไขได้ออก



รูปที่ 2.23 การแตกกิ่งเพื่อหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด

ขั้นตอนในการแก้ปัญหาโดยวิธี Branch and Bound Method สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำหนดจุดทำงานเริ่มต้นใดๆที่จุดต้นทางแล้วแทนค่าลงในฟังก์ชันว่ามีการละเมิดเงื่อนไขของฟังก์ชันหรือไม่ ถ้าไม่ละเมิดให้เก็บค่าดังกล่าวไว้เป็นค่าต่ำสุด (การกำหนดจุดทำงานเริ่มต้นที่ดีและไม่ละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขจะช่วยให้การตัดกิ่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็วที่ต้นทาง)
 2. แตกกิ่งออกมาที่ตัวแปรแรกโดยเลือกตัวแปรที่มีโอกาสละเมิดเงื่อนไขและมีค่าไม่เหมาะสมมากที่สุดมาอยู่ข้างหน้า เพื่อเพิ่มโอกาสในการตัดกิ่งตั้งแต่ต้นทาง
 3. เลือกตัดกิ่งที่มีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดที่ถูกเก็บไว้ (ค่าต่ำสุดที่ถูกเก็บไว้ต้องไม่ละเมิดเงื่อนไขของฟังก์ชัน)
 4. เลือกแตกกิ่งที่กิ่งที่มีโอกาสทำให้เกิดค่าต่ำสุดมากที่สุด นำค่าที่ได้จากการแตกกิ่งมาหากิ่งที่สมควรถูกตัดและแตกกิ่งออกไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด
- การแก้ปัญหาโดยวิธี Branch and Bound Method จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นถ้าหากการ

เข้าหาคำตอบตัวแรกที่ไม่ละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการกำหนดจุดทำงานเริ่มต้นที่ดีจะช่วยให้การเข้าหาคำตอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้การแก้ปัญหาด้วยวิธี Branch and Bound Method ยังการันตีการเข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการกระจายถึงคำตอบที่เป็นไปได้ทุกคำตอบ

2.8.2 Linear Programming (LP) based Branch and Bound Method

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการ Branch and bound ร่วมกันโปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชันแบบเลขฐาน หลักการในการแก้ปัญหาโดยวิธีการ Branch and Bound ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้นคือการใช้วิธีการ Branch and Bound โดยมี Bounding Function ในแต่ละจุดของการทำงานเป็นฟังก์ชันในการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น (LP) ซึ่งก็คือการหาค่าต่ำสุดแบบเชิงเส้นโดยปกติที่ละเว้น Integer Constraint เอาไว้ หลังจากนั้นค่อยเพิ่ม Integer Constraint เข้าไปในการแตกกิ่งแต่ละครั้งเพื่อบีบให้คำตอบกลายเป็นจำนวน 0 หรือ 1 การแก้ปัญหาโดยวิธีการนี้จะต่างกับตัวอย่างการตัดเศษของรูปที่ 2.22 เนื่องจากการตัดเศษจะไม่สามารถการันตีได้ว่าจะไม่นำไปสู่คำตอบที่ไม่ละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขอื่นๆ และถึงแม้ว่าบางครั้งการตัดเศษจะไม่นำไปสู่การละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขอื่นๆ แต่คำตอบที่ได้ก็ไม่สามารถการันตีได้ว่าจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเหมือนอย่างที่มีการแก้ปัญหาโดยวิธีการนี้สามารถทำได้ การแก้ปัญหาโดยวิธีการ Branch and Bound ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้นจะใช้เวลาคำนวณสูงกว่าการแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นอยู่หลายเท่าตัวเนื่องจากจำเป็นต้องแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นหลายครั้ง แต่เนื่องจากความสามารถของการแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นที่รวดเร็วทำให้การแก้ปัญหาโดยวิธีการนี้ยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีและถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในรูปแบบนี้กันอย่างแพร่หลาย

บทที่ 3

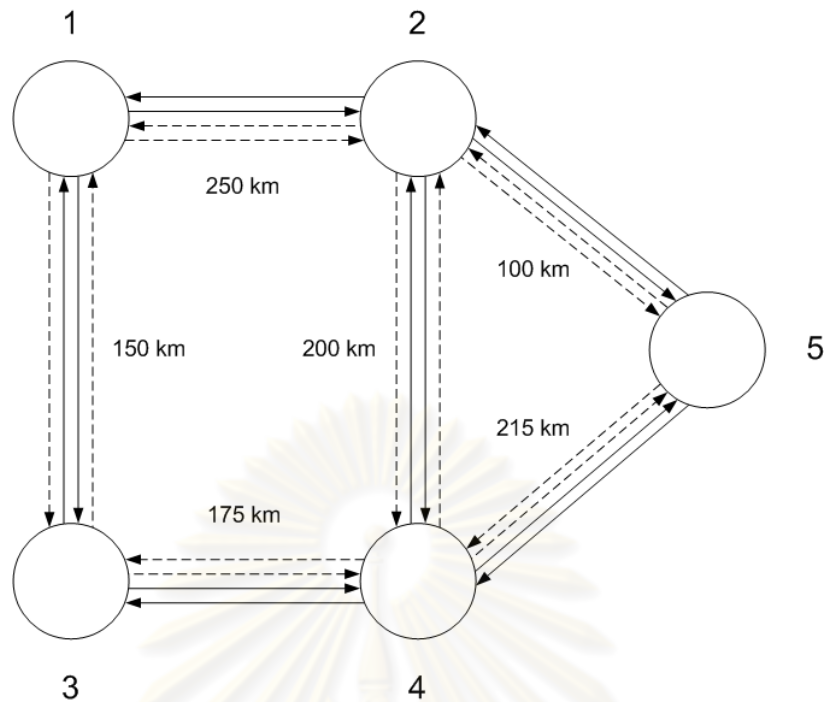
อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

โครงข่ายที่มีการมัลติเพล็กซ์แบบเชิงความยาวคลื่นรวมทั้งการออกแบบโครงข่ายด้วยเทคโนโลยีดัลเบิลยูดีเอ็มนำไปสู่แนวคิดของโครงข่ายแบบ Transparency คือไม่มีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างสัญญาณในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์และรูปแบบแสง การส่งข้อมูลด้วยความถี่ที่สูงขึ้นโดยจึงไม่ได้รับผลของปัญหาคอขวด ซึ่งเป็นขีดจำกัดทางอิเล็กทรอนิกส์ความถี่ 40 GHz ทำให้สามารถขยายขนาดโครงข่ายให้เกิดการใช้งานแบนด์วิดท์สูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงระยะทางหนึ่งจะเกิดผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จึงจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการสร้างอัลกอริทึมเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพลงในโครงข่าย Wavelength-Routed ลักษณะเมชทั้งกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายซึ่งมีขั้นตอนวิธี 4 ขั้นตอนดังนี้

3.1 ระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

การระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติจะพิจารณาระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (Shortest-Path) ส่วนการจัดสรรเส้นทางส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายขึ้นใหม่ในกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 2.6.4 บทที่ 2 คือ กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 โครงข่ายตัวอย่างใช้ในการอธิบายเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณ
กรณีโครงข่ายทำงานปกติและในกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.1 เป็นโครงข่ายลักษณะเมช ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงประกอบด้วยเส้นใยแสง 4 เส้นคือเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองอย่างละสองเส้นที่สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ทั้งสองทิศทาง การจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติและการจัดสรรเส้นทางขึ้นใหม่ในกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายถูกพิจารณาทุกกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 - ตารางที่ 3.7

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
1-2	2-1	3-1	4-3-1	5-2-1
1-3	2-4-3	3-4-2	4-2	5-2
1-3-4	2-4	3-4	4-3	5-4-3
1-2-5	2-5	3-4-5	4-5	5-4

ตารางที่ 3.2 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ 21

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
1--3--4--2	2--4--3--1	-	-	5--4--3--1
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.3 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ 31

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
-	-	3--4--2--1	4--2--1	-
1--2--4--3	-	-	-	-
1--2--4	-	-	-	-
-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.4 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน
สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ 42

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
-	-	-	-	-
-	2 -- 1 -- 3	3 -- 1 -- 2	4 -- 5 -- 2	-
-	2 -- 5 -- 4	-	-	-
-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.5 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน
สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 25 และ 52

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
-	-	-	-	5 -- 4 -- 3 -- 1
-	-	-	-	5 -- 4 -- 2
-	-	-	-	-
1 -- 3 -- 4 -- 5	2 -- 4 -- 5	-	-	-

ตารางที่ 3.6 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน
สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43

สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
-	-	-	4 -- 2 -- 1	-
-	2 -- 1 -- 3	3 -- 1 -- 2	-	-
1 -- 2 -- 4	-	3 -- 1 -- 2 -- 4	4 -- 2 -- 1 -- 3	5 -- 2 -- 1 -- 3
-	-	3 -- 1 -- 2 -- 5	-	-

ตารางที่ 3.7 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 54 และ 45

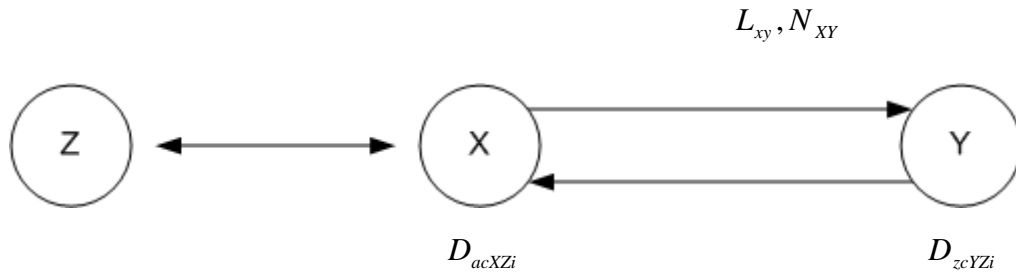
สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4	สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	5 -- 2 -- 4 -- 3
-	-	3 -- 4 -- 2 -- 5	4 -- 2 -- 5	5 -- 2 -- 4

3.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณสำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติในตารางที่ 3.1 และสำหรับเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงสำรองแบบ Path Protection ในตารางที่ 3.2 – 3.7 ประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทาง (Path Constraints) อสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน (Maximum Dispersion Constraints) เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม (Integrality Constraint) และการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) [17]

3.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนด

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทาง Z ไปยังโนดปลายทาง X และ Y เมื่อเชื่อมต่อกันด้วยเส้นใยแสง 2 เส้นและสามารถส่งถึงกันได้ทั้งสองทิศทาง เราสามารถกำหนดสมการขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางใด ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 การส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง

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

โดยที่ D_{acXZi} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทาง X เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ส่งผ่านมาจากโหนดต้นทาง Z

D_{acYZi} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โหนดปลายทาง Y เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ส่งผ่านมาจากโหนดต้นทาง Z

D_i คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น λ_i

D_{compi} คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ λ_i

L_{XY} คือ ความยาวของสายเคเบิลใยแก้ว XY

N_{XY} คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนสายเคเบิลใยแก้ว XY

จากสมการที่ (3.1) ค่าดิสเพอร์ชันสะสม D_{acXZi} ที่โหนดปลายทาง X เมื่อชุดสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งผ่านมาจากโหนดต้นทาง Z จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแก้ว SMF ความยาว L_{XY} ที่มีค่าเท่ากับ $D_i \times L_{XY}$ ในขณะเดียวกันค่าดิสเพอร์ชันสะสมดังกล่าวจะถูกชดเชยด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนสายเคเบิลใยแก้ว XY จำนวน N_{XY} ซึ่งมีค่าเท่ากับ $D_{compi} \times N_{XY}$ สุดท้ายจะได้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมสิ้นสุดที่โหนดปลายทาง Y หรือค่า D_{acYZi}

3.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

เราต้องการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่น ณ โหนดปลายทาง Y จากโหนดต้นทาง Z มีค่าน้อยกว่า D_{max} (Acceptable Accumulated Dispersion) และในทางตรงกันข้าม ต้องมีค่ามากกว่า $-D_{max}$ ดังนี้

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

โดยที่ D_{\max} คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเกิดผิดเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้

3.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น

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

3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่กำหนดจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดในโครงข่ายในขณะเดียวกันจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

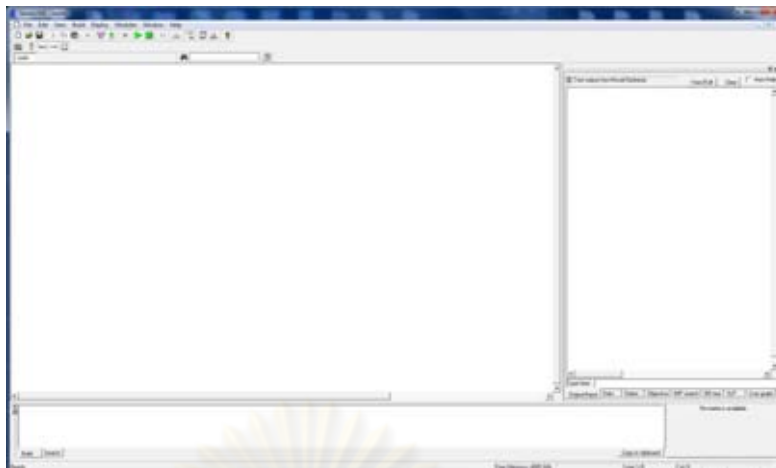
$$\text{Minimize} \left\{ N = \sum_{X,Y=1}^n N_{XY} \right\} \quad (3.4)$$

โดยที่ n คือ จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย

3.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

จากปัญหาข้างต้นเป็นปัญหาที่มีจำนวนจริงและจำนวนเต็มเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงจึงต้องใช้ในการแก้ปัญหาแบบ Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) เพื่อทำ Optimization หาผลเฉลยจากสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตโดยเลือกใช้โปรแกรม Xpress MP [40] ในการประมวลผลเนื่องจากโปรแกรมมีวิธีการใช้งานที่ง่ายและมีการประมวลผลที่รวดเร็วแสดงดังรูปที่ 3.3

ผลเฉลยที่ได้เราจะได้จากอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันคือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่นที่ทุกโนดปลายทางภายในโครงข่าย



รูปที่ 3.3 โปรแกรม Xpress MP

3.4 การกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่ายจะนำผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3 มาระบุตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย ในความเป็นจริงแล้วเมื่อเราพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันเราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางที่ขาเข้าของเครื่องขยายสัญญาณหรือในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น

ในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนมากกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง นอกจากหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะถูกวางที่ขาเข้าของเครื่องขยายสัญญาณแล้ว เรายังวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ณ จุดที่เหมาะสมอื่นๆ ร่วมด้วยและในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณใดๆ ในเส้นทางตั้งแต่ตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ

3.4.1 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงาน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงทำงานจะพิจารณาแยกอิสระจากการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NS-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานจะพิจารณาจากผลเฉลยจำนวนหน่วย

ชุดเซตดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยเราจะวางหน่วยชุดเซตค่าดิสเพอร์ชันเมื่อสัญญาณมีกำลังต่ำสุดหรือขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ

3.4.2 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชุดเซตค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงสำรองทั้งชนิด NS-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงสำรองจะพิจารณาจากผลเฉลยจำนวนหน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากการกู้คืนสัญญาณที่เสียหายตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection จะเกิดบนเส้นใยแสงสำรอง โดยเราจะวางหน่วยชุดเซตค่าดิสเพอร์ชันเมื่อสัญญาณมีกำลังต่ำสุดหรือขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ

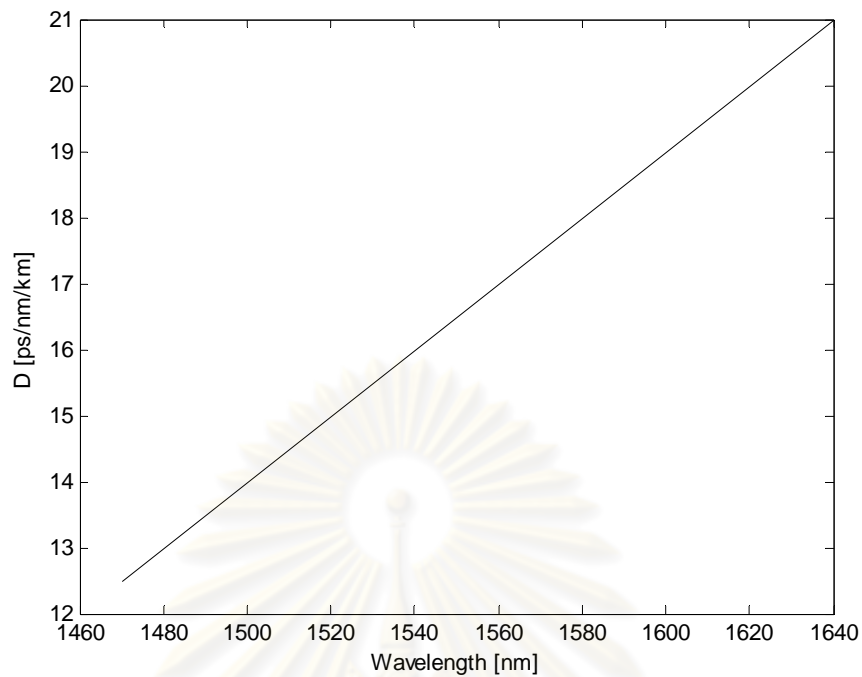
ในบทนี้นำเสนออัลกอริทึมและผลเฉลยของการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติตามอัลกอริทึมที่ได้เสนอในบทที่ 3 ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายตัวอย่าง พร้อมทั้งยกตัวอย่างตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan-European Network (OPEN) และส่วนสุดท้ายเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET)

4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย

- 1) การสร้างอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเงื่อนไขที่ไม่มีผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
- 2) กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่าง โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และโครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET เป็นโครงข่ายลักษณะเมชสามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงาน
- 3) หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km

4.2 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง

ประเภทของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณสำหรับการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ เส้นใยแสงแบบโหมดคลื่นเดียวซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชัน (D) เท่ากับ 16.5 ps/km/nm ที่ความยาวคลื่น 1,550 nm และมีค่าความชันของดิสเพอร์ชัน (D') ที่ 0.05 ps/nm²/km แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณดังรูปที่ 4.1 [41]



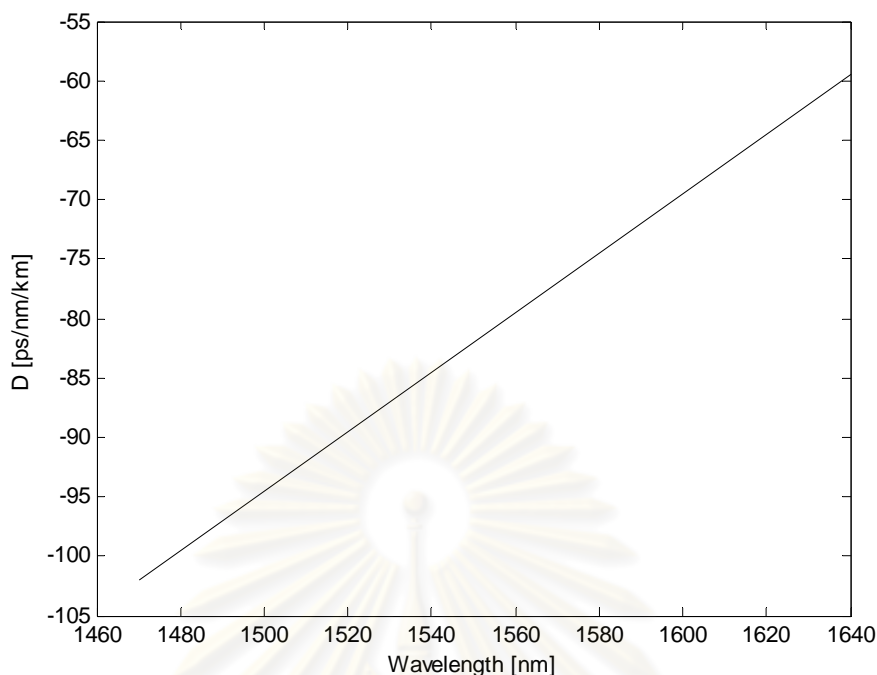
รูปที่ 4.1 ดิสเพอร์ชันของ SMF ITU-T G.652

4.2.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองโครงข่าย

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน 2 ชนิดคือ

1. NS-DCU มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ -82 ps/km/nm ที่ 1550 nm และมีค่าความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ $0.25 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ รูปที่ 4.2 [41] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับดิสเพอร์ชันของ NS-DCU

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ดิสเพอร์ชันของ NS-DCU

การคำนวณหาค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ NS-DCU ในการจำลองโครงข่ายสามารถหาได้จากสมการ (2.12) แต่เนื่องจากลักษณะหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่เป็นอุปกรณ์ลักษณะ Black Block ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยซึ่งบรรจุอยู่ใน NS-DCU จากสมการ (2.12) สามารถจัดรูปเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณหาความยาวได้ดังนี้

$$L_{NS-DCU} = \frac{D_{SMF} \times L_{SMF}}{D_{NS-DCU}} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) ค่า D_{SMF} หาได้จากรูปที่ 4.1 ฉะนั้นค่าดิสเพอร์ชันของ SMF ที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีค่าเท่ากับ 16.5 ps/km/nm L_{SMF} มีค่าเท่ากับ 100 km และค่า D_{NS-DCU} หาได้จากรูปที่ 4.2 ซึ่งค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีค่าเท่ากับ -82 ps/km/nm เมื่อนำค่าไปแทนในสมการที่ (4.1) สามารถหาค่าความยาวของ NS-DCU ได้เท่ากับ 20.122 km หรือประมาณ 20 km

2. SC-DCU มีคุณสมบัติชดเชยความชันของดิสเพอร์ชันได้ 100% เมื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ G.652 ในระยะทาง 100 km ลักษณะหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 4.3 [41] และมีรายละเอียดสำหรับความยาวในตารางที่ 4.1 เพื่อนำมากำหนดค่าดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ SC-DCU

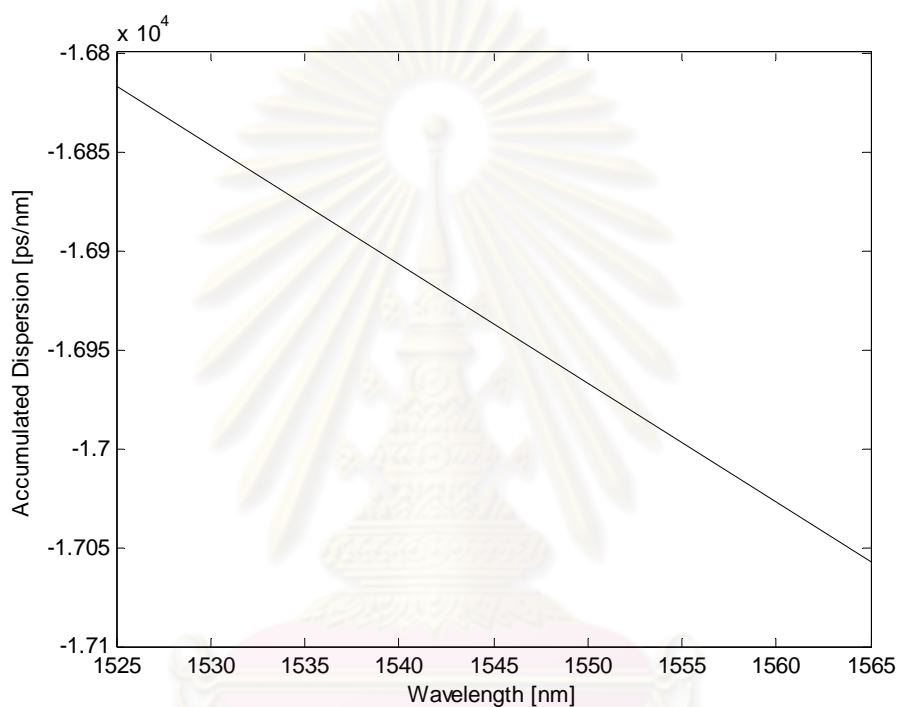


รูปที่ 4.3 Avonex's SC-DCU

ตารางที่ 4.1 ค่าดิสเพอร์ชันสำหรับมอดูลความยาวต่างๆ

Modul Description	Measured Dispersion [ps / nm]					
	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

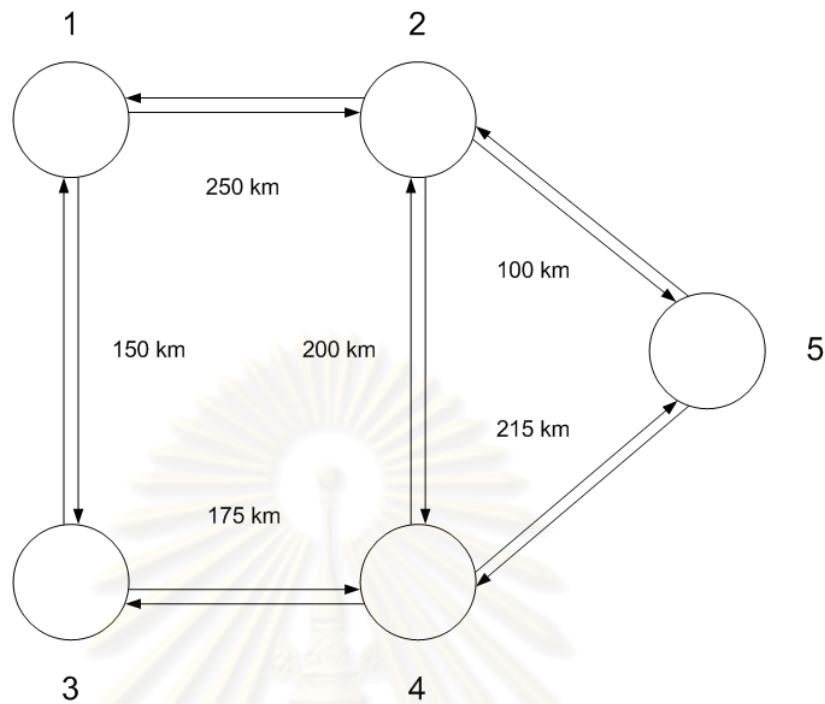
การคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SC-DCU สามารถคำนวณได้จาก รายละเอียดของ SC-DCU ตามตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณา DCM - 60 - SMF - C ที่ความยาวคลื่น 1525 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1521 ps/nm ที่ความยาวคลื่น 1545 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1640.5 ps/nm และที่ความยาวคลื่น 1565 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1761.5 ps/nm เมื่อเรานำค่าทั้งหมดนี้ไปสร้างกราฟเส้นตรงระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างของความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SC-DCU

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 โครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 4.5 โครงข่ายตัวอย่าง

ในการจำลองการใช้หน่วยขดเซยติสเพอร์ชันกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างเป็นโครงข่ายลักษณะเมช ประกอบขึ้นด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง (Link) 4 โหนด (Node) ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงานมีระยะทางรวม 1090 km วิธีการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขดเซยติสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่ายตัวอย่างด้วยจำนวนหน่วยขดเซยติสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติอธิบายได้ดังนี้

4.2.2.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

การระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกกำหนดด้วยระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (Shortest-Path) โดยเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีที่โครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.1

4.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณในตารางที่ 3.1 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติประกอบขึ้นด้วย สมการเงื่อนไขขอบเขตเซย

ค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางใด ๆ เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.2.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด

สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตซดเซยค่าดีสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่นจากทุกโหนดต้นทาง Z ไปยังทุกโหนดปลายทาง Y โดยนำข้อมูลในตารางที่ 3.1 มาสร้างดังนี้

1) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 1; $Z = 1$

$$1 - 2 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac21i}$$

$$1 - 3 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac31i}$$

$$1 - 3 - 4 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac41i}$$

$$1 - 2 - 5 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac51i}$$

2) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 2; $Z = 2$

$$2 - 1 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac12i}$$

$$2 - 4 - 3 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac32i}$$

$$2 - 4 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac42i}$$

$$2 - 5 \quad 0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac52i}$$

3) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 3; $Z = 3$

$$3 - 1 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac13i}$$

$$3 - 4 - 2 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac23i}$$

$$3 - 4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac43i}$$

$$3 - 4 - 5 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac53i}$$

4) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 4; $Z = 4$

$$4 - 3 - 1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac14i}$$

$$4 - 2 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac42i}$$

$$4 - 3 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac34i}$$

$$4 - 5 \quad 0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac54i}$$

$$\begin{aligned}
 & 5) \text{ กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น } \lambda_i \text{ ถูกส่งมาจากโหนด 5; } Z = 5 \\
 5 - 2 - 1 & \quad 0 + (D_i \times 100) + (D_{comp_i} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{comp_i} \times N_{21}) = D_{ac15i} \\
 5 - 2 & \quad 0 + (D_i \times 100) + (D_{comp_i} \times N_{52}) = D_{ac25i} \\
 5 - 4 - 3 & \quad 0 + (D_i \times 215) + (D_{comp_i} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{comp_i} \times N_{43}) = D_{ac35i} \\
 5 - 4 & \quad 0 + (D_i \times 215) + (D_{comp_i} \times N_{54}) = D_{ac45i}
 \end{aligned}$$

ในการจำลองการส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (Center Wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm ดังตาราง ที่ 4.2 [42] แต่เมื่อทุกความยาวคลื่นหรือทุกช่องสัญญาณใน C Band ถูกใช้ในการจำลองการส่งผ่านสัญญาณนี้จะใช้เวลามากจำนวนหาผลเฉลย ดังนั้นเราจึงพิจารณาแค่ความยาวคลื่นที่ส่งผลหลักต่อการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันซึ่งความยาวคลื่นนั้นคือ ความยาวคลื่นขอบทั้งสอง (1520.25 nm และ 1577.03 nm) เนื่องจากความดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นอื่นๆ จะอยู่ในช่วงไม่เกินค่าดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นขอบทั้งสองหรืออาจจะกล่าวได้ว่าเมื่อสัญญาณของความยาวคลื่นขอบทั้งสองถูกใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน เมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงที่ปลายโดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นขอบทั้งสองมีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้สามารถรับรองได้ว่าสัญญาณของความยาวคลื่นที่เหลือมีค่าดิสเพอร์ชันสะสม อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดด้วย

เราสามารถคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SMF ได้จากรายละเอียดของ SMF ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ดิสเพอร์ชันของ SMF ITU-T G.652 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1520.25 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{1520.25} = 16.5 + 0.05 \times (1520.25 - 1550) = 15.0125 \text{ ps/km/nm}$$

ส่วนการคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ NS-DCU สามารถคำนวณได้จากรายละเอียดของ NS-DCU ตามรูปที่ 4.2 ดิสเพอร์ชันของ NS-DCU เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1520.25 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{comp_{1520.25[NS-DCU]}} = (-82) + 0.25 \times (1520.25 - 1550) = -89.4375 \text{ ps/km/nm}$$

นำค่านี้มาคูณกับความยาว NS-DCU ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.1) ที่ความยาวคลื่น 1550.25 nm เราจะได้ค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ดังนี้

$$D_{comp_{1520.25[NS-DCU]}} = [(-82) + 0.25 \times (1520.25 - 1550)] \times 20 = -1788.75 \text{ ps/km/nm}$$

และการคำนวณค่าชดเชยดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SC-DCU สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันของสมการเส้นตรงของรูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างของความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SC-DCU เช่น ค่าเฉลี่ยดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1520.25 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{comp_{1520.25[SC-DCU]}} = (-6.0125) * 1520.25 + 7648.1 = -1489.5 \text{ ps/nm}$$

ตารางที่ 4.2 ช่องสัญญาณใน Wave Division Multiplexing (WDM) ITU Grid C-Band

Channel #	Wavelength (nm)	Channel #	Wavelength (nm)	Channel #	Wavelength (nm)	Channel #	Wavelength (nm)
1	1520.25	19	1534.25	37	1548.52	55	1563.05
2	1521.02	20	1535.04	38	1549.32	56	1563.86
3	1521.79	21	1535.82	39	1550.12	57	1564.68
4	1522.56	22	1536.61	40	1550.92	58	1565.50
5	1523.34	23	1537.40	41	1551.72	59	1566.31
6	1524.11	24	1538.19	42	1552.52	60	1567.13
7	1524.89	25	1538.98	43	1553.33	61	1567.95
8	1525.66	26	1539.77	44	1554.13	62	1568.11
9	1526.44	27	1540.56	45	1554.94	63	1569.59
10	1527.22	28	1541.35	46	1555.75	64	1570.42
11	1527.99	29	1542.14	47	1556.56	65	1571.24
12	1528.77	30	1542.94	48	1557.36	66	1572.06
13	1529.55	31	1543.73	49	1558.17	67	1572.89
14	1530.33	32	1544.53	50	1558.98	68	1573.71

15	1531.12	33	1545.32	51	1559.79	69	1574.54
16	1531.90	34	1546.12	52	1560.61	70	1575.37
17	1532.68	35	1546.92	53	1561.42	71	1576.20
18	1533.47	36	1547.72	54	1562.23	72	1577.03

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NS-DCU และ SC-DCU

λ_i (nm)	D_i (ps/nm/km)	D_{comp_i} (ps/nm)	
		NS-DCU	SC-DCU
1520.25	15.0125	-1788.75	-1491.74
1577.03	17.8515	-1504.85	-1830.10

จากนั้นสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่นโดยใช้ข้อมูลใน

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NS-DCU และ SC-DCU จากทุกโนดต้นทาง Z ไปยังทุกโนดปลายทาง Y ภายในโครงข่ายตัวอย่าง เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ข้อมูลในตารางที่ 4.4 แสดงรูปแบบสมการบนข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.4 สมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ

2 ความยาวคลื่นกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

การส่งสัญญาณ	รูปแบบสมการ
1 – 2	$0 + (D_i \times 250) + (D_{comp_i} \times N_{12}) = D_{ac211}$ $0 + (D_i \times 250) + (D_{comp_i} \times N_{12}) = D_{ac212}$
1 – 3	$0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) = D_{ac311}$ $0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) = D_{ac312}$
1 – 3 – 4	$0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{comp_i} \times N_{34}) = D_{ac411}$ $0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{comp_i} \times N_{34}) = D_{ac412}$

1-2-5	$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac511}$ $0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac512}$
2-1	$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac121}$ $0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac122}$
2-4-3	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac321}$ $0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac322}$
2-4	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac421}$ $0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac422}$
2-5	$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac521}$ $0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac522}$
3-1	$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac131}$ $0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac132}$
3-4-2	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac231}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac232}$
3-4	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac431}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac432}$
3-4-5	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac531}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac532}$
4-3-1	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac141}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac142}$
4-2	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac421}$ $0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac422}$
4-3	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac341}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac342}$
4-5	$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac541}$ $0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac542}$
5-2-1	$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac151}$ $0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac152}$

5 – 2	$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac251}$ $0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac252}$
5 – 4 – 3	$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac351}$ $0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac352}$
5 – 4	$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac451}$ $0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac452}$

4.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณ ความยาวคลื่นที่ทุกโหนดปลายทาง Y ต้องมีค่าไม่เกิน $\pm D_{max}$ เนื่องจาก D_{max} คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณผิดเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยความผิดเพี้ยนให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้ ในวิทยานิพนธ์เลือกค่า $D_{max} = 1600$ ps/nm (ส่งสัญญาณที่ความเร็ว 10Gb/s) [41] โดยชุดรูปแบบของการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่น กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

รูปแบบการส่งสัญญาณ	รูปแบบสมการ
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac211} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac212} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac311} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac312} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac411} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac412} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 5	$-1600 \leq D_{ac511} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 5	$-1600 \leq D_{ac512} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac121} \leq 1600$

λ_2 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac252} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac151} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac152} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac451} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac452} \leq 1600$

4.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น

4.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการกำหนดจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่ายในขณะเดียวกันจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

4.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการทำ Optimization ปัญหาแบบ MILP เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่นขอบในโครงข่ายตัวอย่าง คือจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายและค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ทุกโหนดปลายทาง Y

ในกรณีของการใช้ NS-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างไม่สามารถทำได้เพราะมีข้อจำกัดของดิสเพอร์ชันสะสมของบางเส้นทางเกินค่า $-D_{max}$ ซึ่งเป็นผลมาจาก over - under compensation พิจารณาได้จากการส่งสัญญาณจากโหนด 1 ไปยังโหนด 5 มีระยะทางยาว 350 km เราจะพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นที่เป็นหลักในการพิจารณาคือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm จาก

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm จะเป็นค่าแรกที่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมถึงค่า D_{max} จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) เราต้องการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าไม่เกิน 1600 ps/nm เราสามารถหาจำนวน NS-DCU ที่ต้องการในข่ายเชื่อมโยงได้ดังนี้

(เพื่อความสะดวกในการอธิบาย เราจะพิจารณาเส้นทางจากโนด 1 ไปยังโนด 5 เป็นข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน)

$$(D_2 + L_{15}) + (D_{comp2} \times N_{15}) = D_{ac512} \leq D_{max} \quad (4.2)$$

เนื่องจากค่า D_{compi} มีค่าเป็นลบ เราสามารถจัดสมการเพื่อหาจำนวนหน่วย NS-DCU ได้

$$\frac{(D_2 + L_{15}) - D_{max}}{D_{comp2}} \leq N_{15}$$

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.3

$$\frac{(17.8515 \times 350) - 1600}{1504.85} = 3.0887 \leq N_{15}$$

ฉะนั้นเราต้องการ NS-DCU อย่างน้อยที่สุดจำนวน 4 ตัว เพื่อไม่ให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm มีค่าเกิน 1600 ps/nm แต่ในขณะเดียวกันเมื่อสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm เดินทางไปถึงที่ปลายทางมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ $(15.0125 \times 350) + (-1788.75 \times 4) = -1900.63$ ps/nm ด้วยเหตุนี้ทำให้เราไม่สามารถใช้ NS-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างที่มีการส่งสัญญาณตั้งแต่ 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ได้ และกรณีของ SC-DCU ผลเฉลยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลเฉลยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP optimization

กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	จำนวน
N_{12}	2
N_{13}	1
N_{21}	2
N_{24}	2
N_{25}	1
N_{31}	1
N_{34}	2

N_{42}	2
N_{43}	2
N_{45}	2
N_{52}	1
N_{54}	2
N_{\min}	20

ตารางที่ 4.7 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

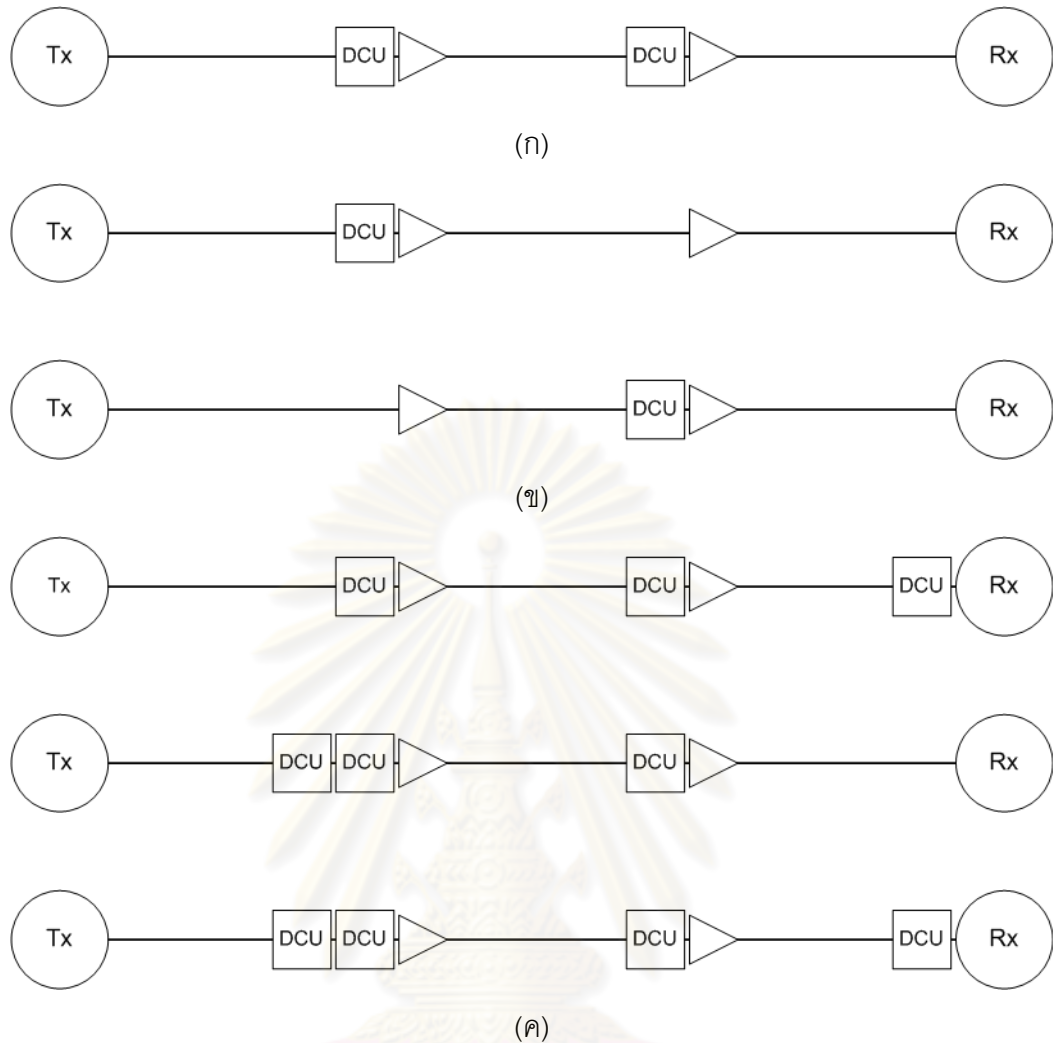
	ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
D_{ac21i}	769.65	769.68	D_{ac43i}	-356.29	-542.19
D_{ac31i}	760.14	844.63	D_{ac53i}	-112.09	-370.32
D_{ac41i}	403.84	302.44	D_{ac14i}	403.84	302.44
D_{ac51i}	779.16	748.73	D_{ac24i}	19.02	-95.90
D_{ac12i}	769.65	796.68	D_{ac34i}	-356.29	-542.19
D_{ac32i}	-337.27	-638.09	D_{ac54i}	244.21	171.87
D_{ac42i}	19.02	-95.90	D_{ac15i}	779.16	748.73
D_{ac52i}	9.51	-47.95	D_{ac25i}	9.51	-47.95
D_{ac13i}	760.14	844.63	D_{ac35i}	-112.09	-370.32
D_{ac23i}	-337.27	-638.09	D_{ac45i}	244.21	171.87

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU และ NS-DCU ที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยลงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณลดน้อยลง จากผลเฉลยในตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

น้อยสุดทั่วทั้งโครงข่าย นอกจากนี้พบว่าทุกค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y ใด ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

4.2.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย จะนำผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.2.2.3 ไปใช้ต่อไป ในความเป็นจริงแล้วเมื่อเราพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ตัวอย่างการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนเท่ากับจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ก) ตัวอย่างการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณใดๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ข) และตัวอย่างการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนมากกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันต่อกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ค)

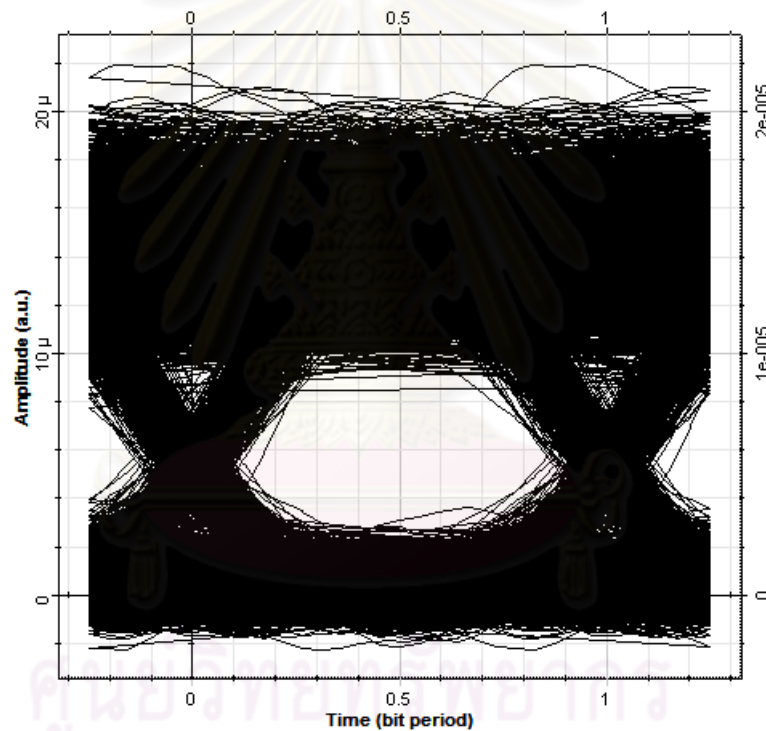


รูปที่ 4.6 ตำแหน่ง SC-DCU บนข่ายเชื่อมโยง

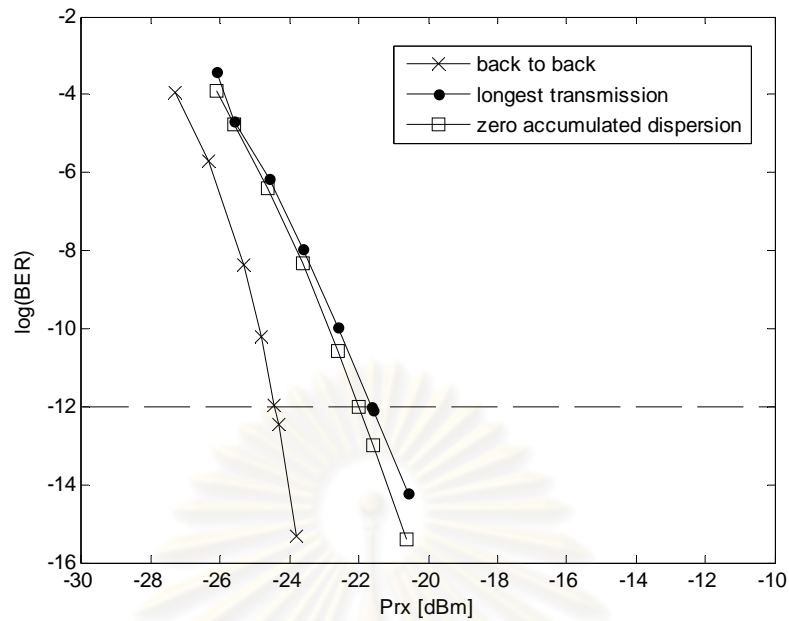
(ก) กรณีจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนเท่ากับจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ (ข) กรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ (ค) กรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนมากกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ

ขั้นตอนต่อไปเป็นนำมาผลเฉลยจากหัวข้อที่ 4.2.2.3 จำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 3 ไปโนด 5 เป็นระยะทาง 390 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 1024 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ -370.315 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.02899 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER)

เท่ากับ 9.45266×10^{-13} แสดงดังรูปที่ 4.7 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 2.788 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.7 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ



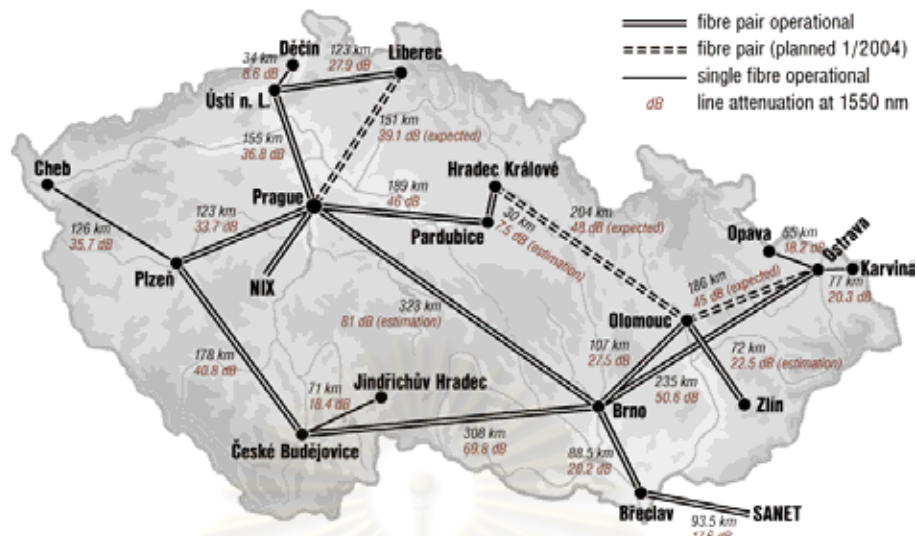
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

วิธีการคำนวณหาจำนวนหน่วยชดเชยอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ คือ การคำนวณจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแต่ละข่ายเชื่อมโยงแยกออกจากกัน (Link-by-Link Calculation) โดยมีแนวคิดคือให้ค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นที่ต้นทางมีค่าเท่ากับศูนย์และต้องจัดการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นกันเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นที่ออกจากโหนดต้นทางใหม่มีค่าเท่ากับศูนย์เช่นเดิม แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงอย่างเดียวชดเชยดิสเพอร์ชันให้เป็นศูนย์พร้อมกันทุกความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 4.8 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากการคำนวณแบบ Link-by-Link และค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนและหลังจากชดเชยแล้ว ดังนั้นสัญญาณจึงต้องถูกสร้างขึ้นใหม่ทุกๆ Intermediate Node ซึ่งกระบวนการแบบนี้เป็นลักษณะโครงข่ายแบบ Opaque มีค่าใช้จ่ายสำหรับระบบจุดต่อจุดอาจสูงมากเนื่องด้วยจำนวนอุปกรณ์ Regenerator ที่ทุกๆ โหนด เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้จากผลเฉลยในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้ต่างกันไม่มาก แต่อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นมาออกแบบให้ใช้กับโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency ซึ่งตัดปัญหาเรื่องอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการส่งสัญญาณที่ความเร็วสูง

ตารางที่ 4.8 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนและหลังจากชดเชยแล้ว
จากการคำนวณแบบ Link-by-Link

ขั้วเชื่อมโยง	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนชดเชย		จำนวน DCU	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมหลังชดเชย	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
L_{12}	3753.13	4462.88	2	769.65	796.68
L_{13}	2251.88	2677.73	1	760.14	844.63
L_{21}	3753.13	4462.88	2	769.65	796.68
L_{24}	3002.50	3570.30	2	19.02	-95.90
L_{25}	1501.25	1785.15	1	9.51	-47.95
L_{31}	2251.88	2677.73	1	760.14	844.63
L_{34}	2627.19	3124.01	1	1135.45	1290.91
L_{42}	3002.50	3570.30	2	19.02	-95.90
L_{43}	2627.19	3124.01	1	1135.45	1290.91
L_{45}	3227.69	3838.07	2	244.21	171.87
L_{52}	1501.25	1785.15	1	9.51	-47.95
L_{54}	3227.69	3838.07	2	244.21	171.87

4.2.3 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN)

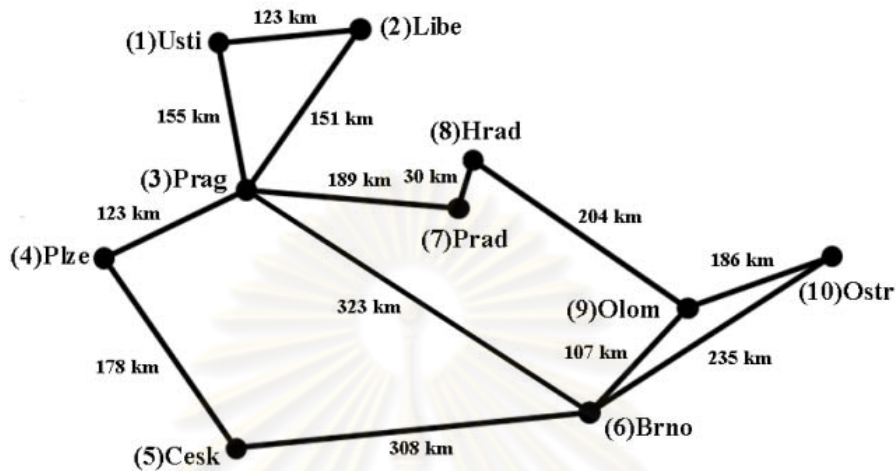


รูปที่ 4.9 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

โครงข่ายที่จะนำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วยหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN) ประกอบด้วย 13 ข่ายเชื่อมโยง 10 โหนด โดยแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีระยะทางตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 [44] รวมระยะทางทั้งหมด 1882 km อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย OPEN ด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดอธิบายจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN ซึ่งแทนด้วยตัวเลขแทนโหนด 1-10 ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 [44] การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 จากนั้นแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 2

ความยาวคลื่นบนโครงข่าย OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 - 4.2.2.3 ได้ผลเฉลยดังนี้



รูปที่ 4.10 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

ในกรณีการใช้ NS-DCU บนโครงข่าย OPEN ไม่สามารถทำได้ เพราะมีข้อจำกัดของดิสเพอร์ชันสะสมบางเส้นทางเกินค่า $-D_{\max}$ พิจารณาได้จากการส่งสัญญาณจากโหนด 1 ไปยังโหนด 10 ซึ่งเป็นกรณีที่มีระยะทางยาวที่สุด 713 km เราจะทำการหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่นที่เป็นหลักในการพิจารณาคือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm จาก

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm จะเป็นค่าแรกที่ทำให้ถึงค่า D_{\max} เราสามารถหาระยะทางในการวาง NS-DCU ตัวแรกได้ ดังนี้

$$L = \frac{1600}{17.8515} = 89.62 \text{ km}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = 1600 - 1504.85 = 95.15 \text{ ps/nm}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = (89.62 \times 15.0125) - 1788.75 = -443.32 \text{ ps/nm}$$

หลังจากที่วาง NS-DCU ไปแล้วสัญญาณที่ถูกส่งจะเดินทางต่อไปด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่มากขึ้น โดยค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm จะเป็นค่าแรกที่ทำให้ถึงค่า D_{\max} เช่นเคย เราสามารถหาระยะทางการวาง DCU ตัวที่สองได้ดังนี้

$$L = \frac{1600 - 95.15}{17.8515} = 84.29 \text{ km}$$

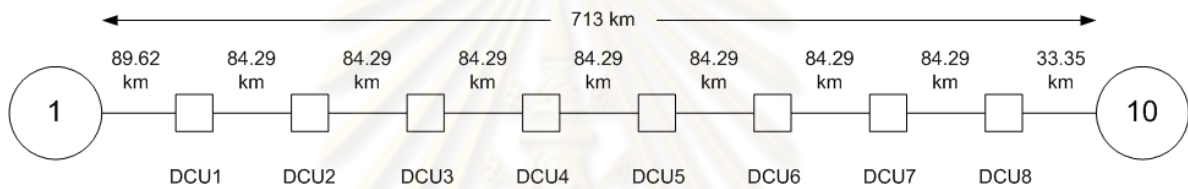
ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่สองมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = (173.91 \times 17.8515) - (2 \times 1504.85) = 94.85 \text{ ps/nm}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่สองมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = (173.91 \times 15.0125) - (2 \times 1788.75) = -966.73 \text{ ps/nm}$$

การวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะเป็นเช่นนี้เรื่อยไป โดยที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากโนด 1 ไปยังโนด 10 มีทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งตำแหน่งในการวางและค่าดิสเพอร์ชันที่ระยะทางต่างๆ แสดงได้ในรูปที่ 4.11



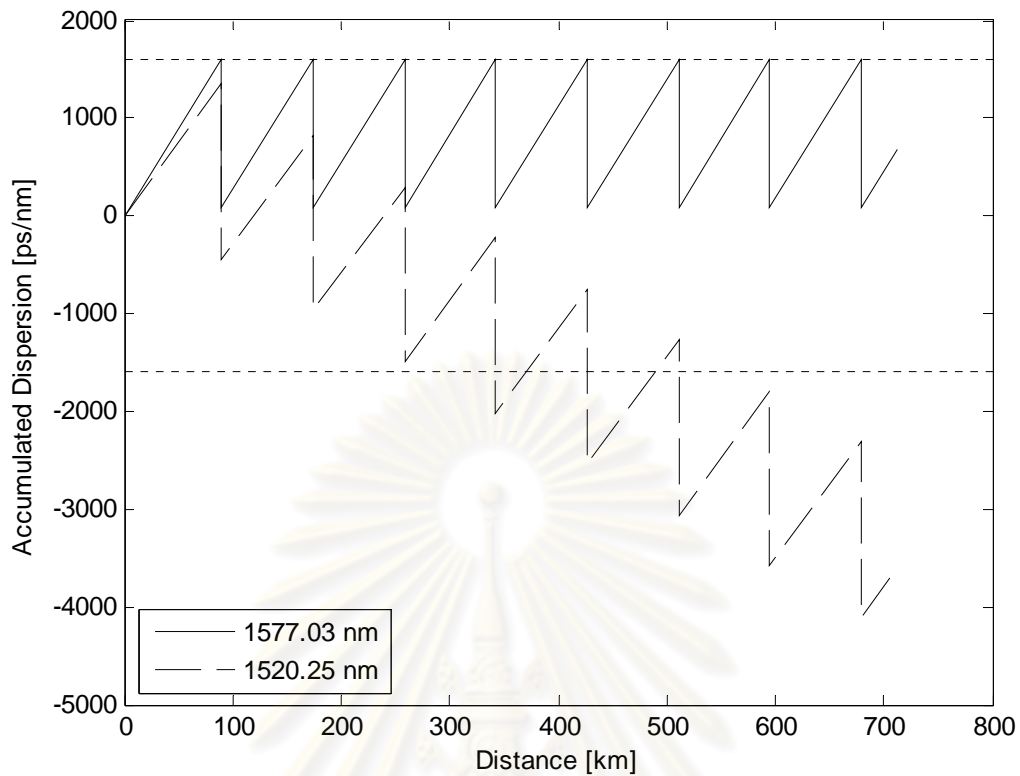
รูปที่ 4.11 ตำแหน่ง NS-DCU บนเส้นทางจากโนดต้นทาง 1 ไปยังโนดปลายทาง 10

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางโนด 10 ที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm มีค่าเท่ากับ

$$D_{ac1012} = (713 \times 17.8515) - (8 \times 1504.85) = 689.3195 \text{ ps/nm}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางโนด 10 ที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm มีค่าเท่ากับ

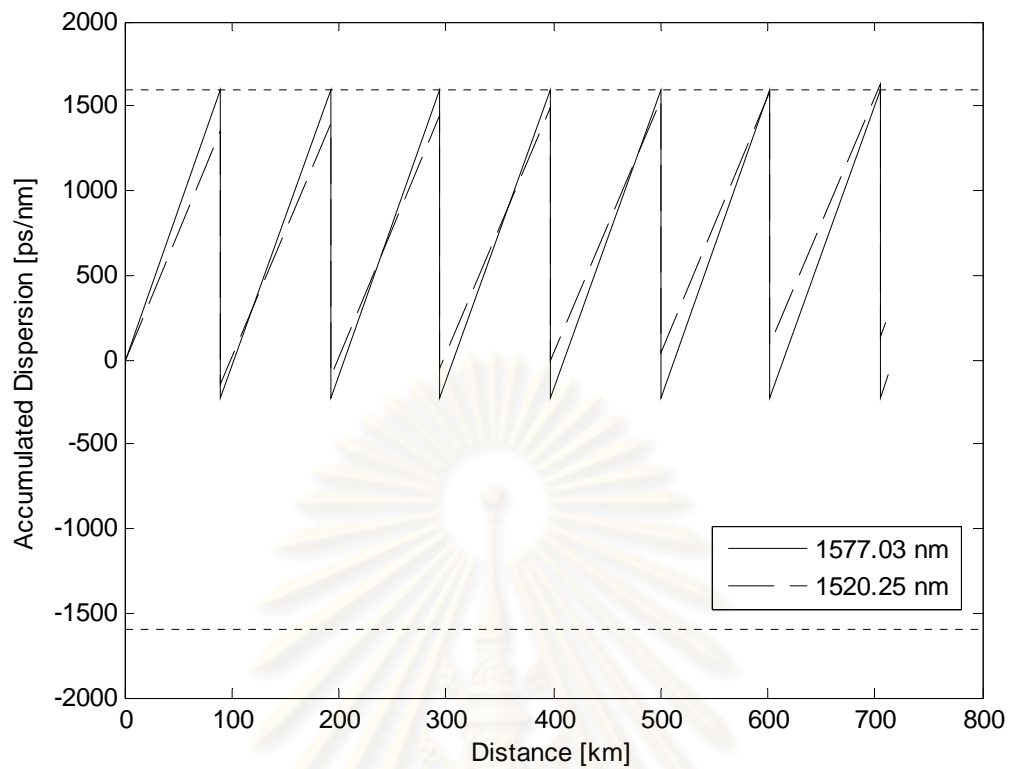
$$D_{ac1011} = (713 \times 15.0125) - (8 \times 1788.75) = -3606.0875 \text{ ps/nm}$$



รูปที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโนด 1 ถึงโนด 10 เมื่อใช้ NS-DCU โดยกำหนดระยะทางในการวางเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับระยะทางในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโนด 1 ถึงโนด 10 เมื่อใช้ NS-DCU แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงปลายทางค่า D_{ac1011} เกินค่า $-D_{max}$ ในขณะที่ค่า D_{ac1012} ยังไม่เกินค่า D_{max} ด้วยเหตุนี้ทำให้เราไม่สามารถใช้ NS-DCU บนโครงข่าย OPEN ที่มีการส่งสัญญาณตั้งแต่ 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ได้ แต่สามารถวาง NS-DCU บนโครงข่าย OPEN ที่มีการส่งสัญญาณประมาณ 1544.53 nm ถึง 1556.56 nm ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณลดน้อยลง และกรณีของ SC-DCU ผลเฉลยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

จากรูปที่ 4.12 ทำให้ทราบว่าไม่สามารถใช้ NS-DCU ชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายที่มีระยะทางมากกว่า 500 km เมื่อใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ซึ่งแตกต่างกับรูปที่ 4.13 กรณีเมื่อวาง SC-DCU ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณที่ความยาวคลื่นทั้งสองอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.13 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโนด 1 ถึงโนด 10 เมื่อใช้ SC-DCU โดยกำหนดระยะทางในการวางเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับระยะทางในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

ตารางที่ 4.9 ผลเฉลยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ

หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	จำนวน	หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	จำนวน	หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	จำนวน
N_{12}	1	N_{43}	1	N_{78}	0
N_{13}	1	N_{45}	1	N_{87}	1
N_{21}	1	N_{54}	2	N_{89}	2
N_{23}	1	N_{56}	3	N_{96}	1
N_{31}	2	N_{63}	3	N_{98}	2
N_{32}	2	N_{65}	3	N_{910}	2
N_{34}	2	N_{69}	1	N_{106}	2
N_{36}	4	N_{610}	2	N_{109}	1

N_{37}	2	N_7	1	N_{\min}	44
----------	---	-------	---	------------	----

ตารางที่ 4.10 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ

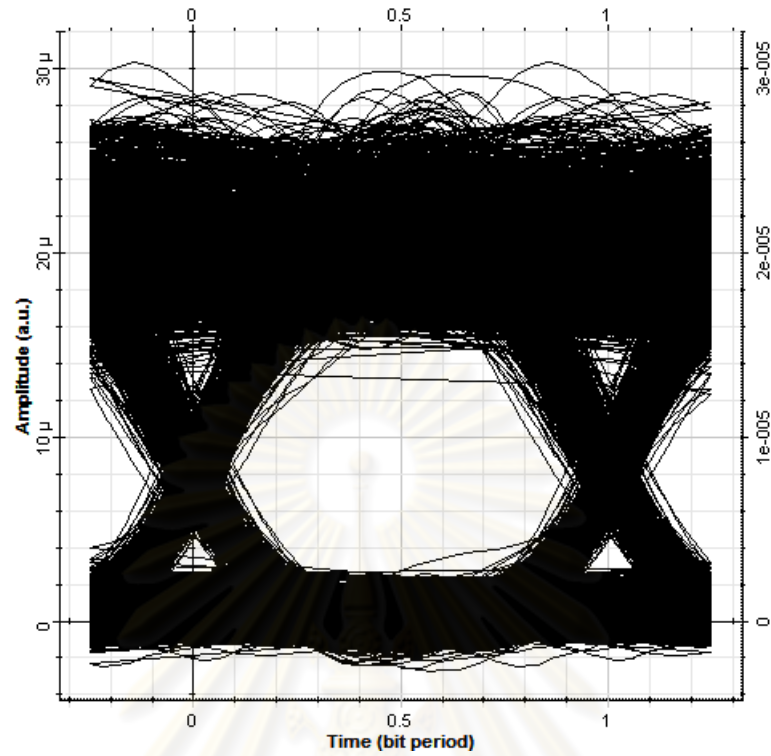
	ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
D_{ac21i}	357.04	365.56	D_{ac12i}	357.04	365.56
D_{ac31i}	837.44	936.80	D_{ac32i}	777.39	865.40
D_{ac41i}	-295.03	-527.82	D_{ac42i}	-355.08	-599.23
D_{ac51i}	887.70	819.56	D_{ac52i}	827.65	748.16
D_{ac61i}	-271.53	-617.87	D_{ac62i}	-331.58	-689.29
D_{ac71i}	695.80	650.38	D_{ac72i}	635.75	578.97
D_{ac81i}	1146.18	1185.92	D_{ac82i}	1086.13	1114.52
D_{ac91i}	1229.73	1167.27	D_{ac92i}	1169.68	1095.86
D_{ac101i}	277.41	-83.14	D_{ac102i}	217.36	-154.55
D_{ac13i}	-652.06	-893.38	D_{ac14i}	-295.03	-527.82
D_{ac23i}	-712.11	-964.78	D_{ac24i}	-355.08	-599.23
D_{ac43i}	-1132.46	-1464.63	D_{ac34i}	357.04	365.56
D_{ac53i}	50.26	-117.24	D_{ac54i}	1182.73	1347.39
D_{ac63i}	-1108.96	-1554.69	D_{ac64i}	-751.93	-1189.13
D_{ac73i}	-141.64	-286.43	D_{ac74i}	215.40	79.13
D_{ac83i}	308.74	249.12	D_{ac84i}	665.78	614.67
D_{ac93i}	392.29	230.47	D_{ac94i}	749.33	596.02
D_{ac103i}	-560.03	-1019.94	D_{ac104i}	-202.99	-654.39
D_{ac15i}	-601.80	-1010.62	D_{ac16i}	-271.53	-617.88

D_{ac25i}	-661.85	-1082.02	D_{ac26i}	-331.58	-689.29
D_{ac35i}	50.26	-117.24	D_{ac36i}	380.54	275.50
D_{ac45i}	-306.78	-482.79	D_{ac46i}	-751.93	-1189.13
D_{ac65i}	155.35	7.72	D_{ac56i}	155.35	7.72
D_{ac75i}	-91.38	-403.67	D_{ac76i}	-838.74	-1233.36
D_{ac85i}	359.00	131.88	D_{ac86i}	200.39	61.28
D_{ac95i}	272.19	87.65	D_{ac96i}	116.84	79.93
D_{ac105i}	704.29	542.47	D_{ac106i}	548.94	534.74
D_{ac17i}	695.80	650.38	D_{ac18i}	-343.33	-644.26
D_{ac27i}	635.75	578.97	D_{ac28i}	-403.38	-715.67
D_{ac37i}	1347.86	1543.75	D_{ac38i}	308.74	249.12
D_{ac47i}	215.40	79.13	D_{ac48i}	-823.73	-1251.41
D_{ac57i}	1398.13	1426.52	D_{ac58i}	359.00	131.88
D_{ac67i}	650.71	596.82	D_{ac68i}	200.39	61.28
D_{ac87i}	450.38	535.55	D_{ac78i}	-1039.12	-1294.63
D_{ac97i}	533.93	516.89	D_{ac98i}	83.55	-18.65
D_{ac107i}	347.25	176.91	D_{ac108i}	-103.13	-358.64
D_{ac19i}	-259.78	-662.91	D_{ac110i}	277.41	-83.14
D_{ac29i}	-319.83	-734.32	D_{ac210i}	217.36	-154.55
D_{ac39i}	392.29	230.47	D_{ac310i}	929.48	810.24
D_{ac49i}	-740.18	-1234.16	D_{ac410i}	-202.99	-654.39
D_{ac59i}	272.19	87.65	D_{ac510i}	704.29	542.47
D_{ac69i}	116.84	79.93	D_{ac610i}	548.94	534.74
D_{ac79i}	-955.58	-1313.29	D_{ac710i}	347.25	176.91
D_{ac89i}	83.55	-18.65	D_{ac810i}	1386.38	1471.55
D_{ac109i}	-186.68	-339.98	D_{ac910i}	1302.83	1490.20

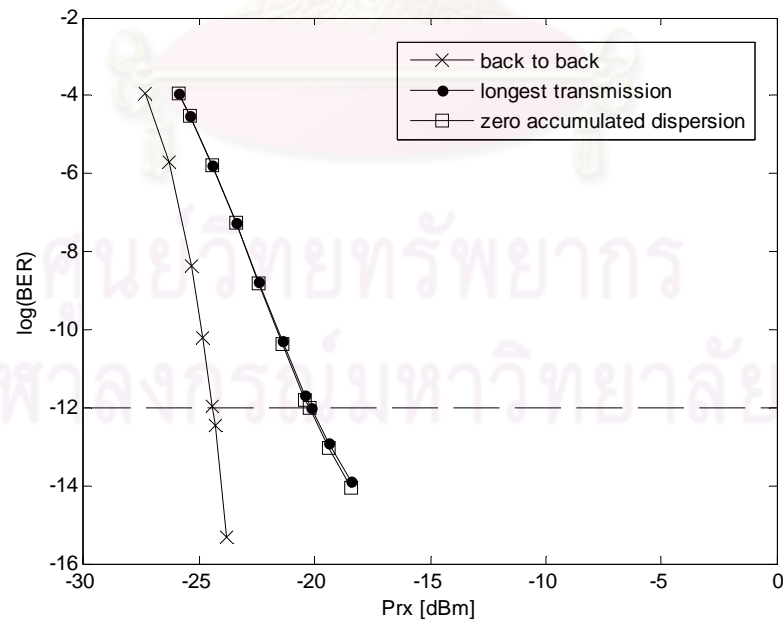
อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU และ NS-DCU ที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยลงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณลดน้อยลง จากผลเฉลี่ยในตารางที่ 4.9 และ

ตารางที่ 4.10 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่าย นอกจากนี้พบว่าทุกค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y ใด ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 10 เป็นระยะทาง 713 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสม -83.1405 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.00949 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.00829×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 4.14 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 4.268 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

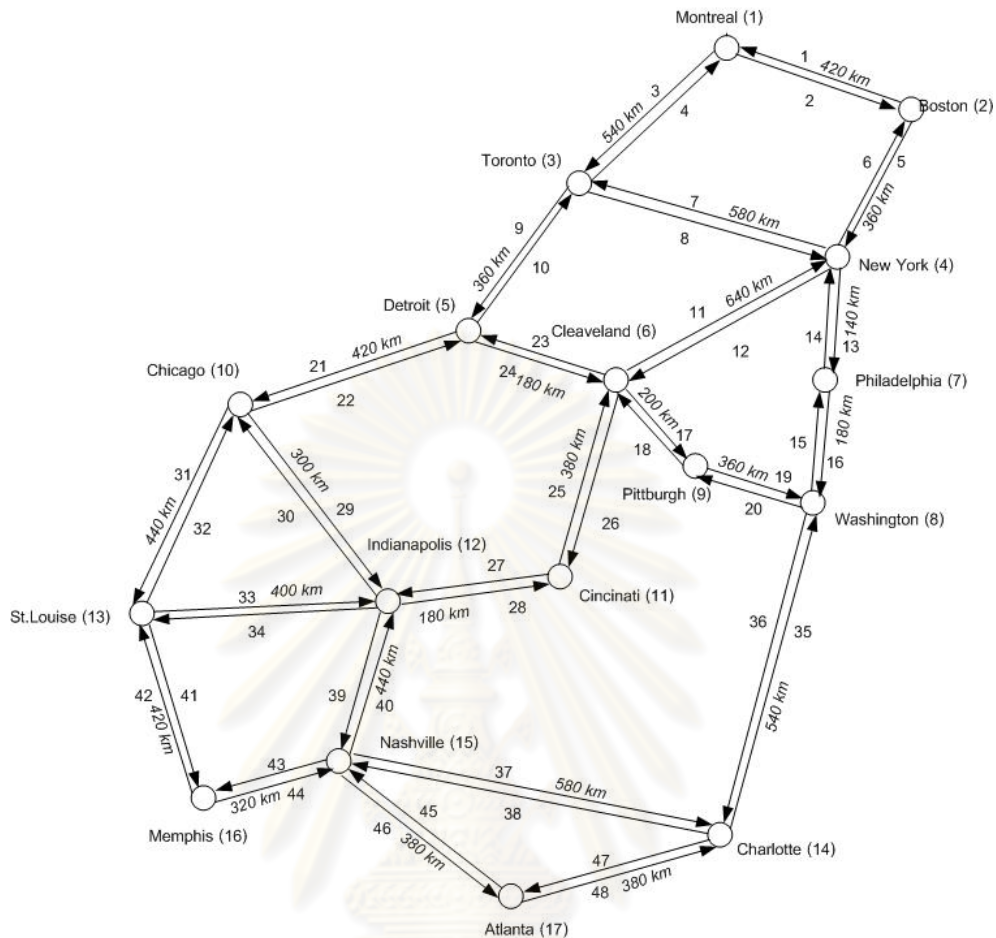


รูปที่ 4.14 Eye Pattern จากการจำลองของผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสาร
ที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ

4.2.4 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET)



รูปที่ 4.16 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET

โครงข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET) ประกอบด้วย 24 ข่ายเชื่อมโยง 17 โหนด โดยแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีระยะทางตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย NARNET ด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดอธิบายจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย NARNET ซึ่งแทนด้วยตัวเลขแทนโหนด 1-17 การกำหนด

ความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 จากนั้นแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 2 ความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNET กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 - 4.2.2.3

ในกรณีการใช้ NS-DCU บนโครงข่าย NARNET ไม่สามารถทำได้ ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อ 4.2.3 เนื่องจากผลของการ Over (Under) – Compensation ส่วนในกรณีเมื่อใช้ SC-DCU ที่มีอคูด DCM - 60 - SMF – C เราไม่สามารถหาคำตอบได้ เนื่องจากปัญหาและข้อจำกัดที่เราพิจารณาคือเป็นปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Problem) ดังนั้นเราจึงต้องปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัวเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยกรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติได้ พิจารณาสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทาง Z ไปยังโหนดปลายทาง X และ Y และเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน

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

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

พารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทั้งหมด 3 ตัวคือ D_{max} , D_i และ D_{compi}

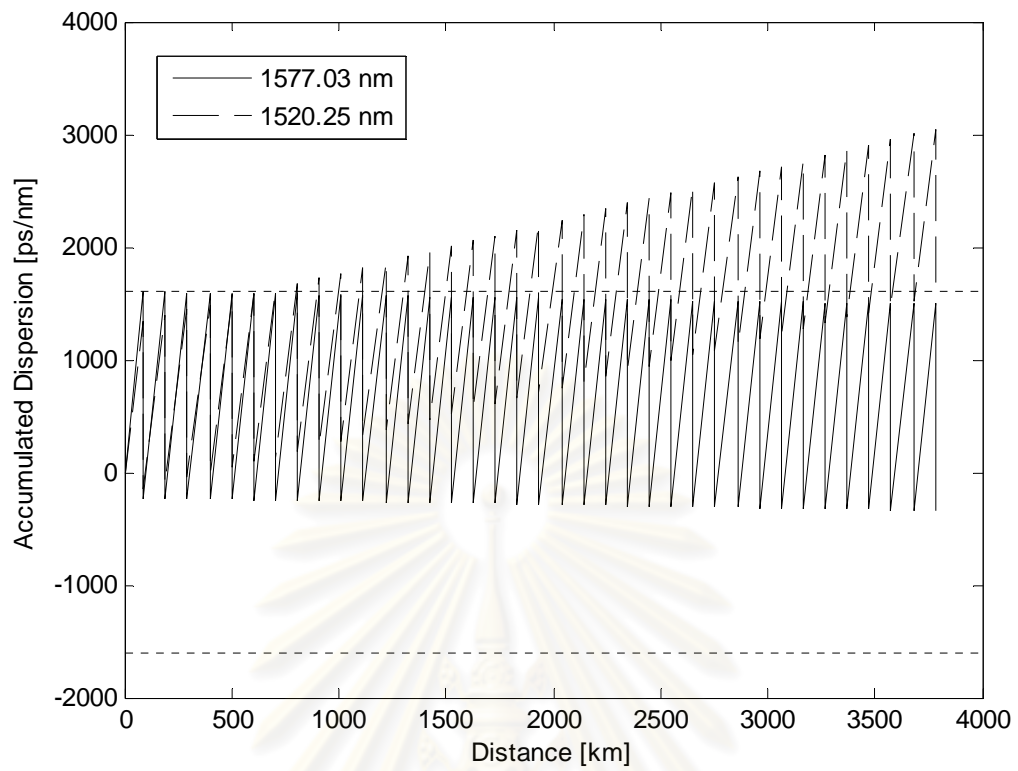
- 1) D_{max} คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เราต้องการให้แต่ละช่องสัญญาณมีความเร็ว 10 Gb/s ดังนั้น D_{max} จึงต้องมีค่าเท่ากับ ± 1600 ps/nm ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้
- 2) D_i คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่มีความยาวคลื่น λ_i ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้เนื่องจากเราต้องการส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm
- 3) D_{compi} คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ λ_i สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความยาวของ DCF ที่อยู่ภายใน SC-DCU ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าดิสเพอร์ชันของ SC-DCU ที่มอดูลต่างๆ

λ_i (nm)	D_{comp_i} (ps/nm)		
	DCM - 60 - SMF - C	DCM - 50 - SMF - C	DCM - 40 - SMF - C
1520.25	-1491.74	-1193.44	-895.14
1577.03	-1830.10	-1466.67	-1100.23

เมื่อเราปรับเปลี่ยนค่า D_{comp_i} ของ SC-DCU แล้ว ส่งผลให้เราสามารถใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย NARNET เมื่อส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm เนื่องจากเส้นทางส่งสัญญาณบน NARNET มีจำนวนมากทั้งเส้นทางระยะทางสั้นและเส้นทางยาว ดังนั้นเมื่อเราต้องการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายเพื่อให้สามารถชดเชยดิสเพอร์ชันในทุกเส้นทางส่งสัญญาณ เราจำเป็นต้องลดค่า D_{comp_i} ให้เป็นค่าลบที่น้อยลง (จาก -1489.5 เป็น -895.14 และ จาก -1830.18 เป็น -1100.23) เพื่อให้สามารถชดเชยดิสเพอร์ชันที่มีค่ามาก (ระยะทางการส่งสัญญาณมาก) โดยใช้จำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวนมากและในขณะเดียวกันสามารถชดเชยดิสเพอร์ชันที่มีค่าน้อย (ระยะทางการส่งสัญญาณน้อย) โดยใช้จำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวนน้อยได้พร้อมกัน ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 5.3 ต่อไป

อีกหนึ่งวิธีสำหรับการปรับเปลี่ยนค่า D_{comp_i} คือ จัดรูปแบบของ D_{comp_i} ให้อยู่ในรูปแบบการผสมของ D_{comp_i} ของ SC-DCU และ D_{comp_i} ของ NS-DCU เนื่องจากเมื่อใช้ NS-DCU ชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นระยะทางไกลจะเกิด Over Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำกว่า (1520.25 nm) ดังรูปที่ 4.12 แต่ในทางกลับกันเมื่อใช้ SC-DCU ชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นระยะทางไกลจะเกิด Under Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำกว่า (1520.25 nm) ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทาง Z ไปยังโนดปลายทาง X และ Y เปลี่ยนไปเป็นสมการที่ (4.3) และค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความยาวของ DCF ที่อยู่ภายใน NS-DCU สามารถคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 แสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.17 แนวโน้มการเกิด Under Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำเมื่อใช้ SC-DCU

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$D_{acXZi} + (D_i + L_{XY}) + (D_{compi,SC-DCU} \times N_{XY,SC-DCU}) + (D_{compi,SC-DCU} \times N_{XY,SC-DCU}) = D_{acYZi} \quad (4.3)$$

โดยที่ D_{acXZi} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง X เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z

D_{acYZi} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z

D_i คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น λ_i

$D_{compi,SC-DCU}$ คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของ SC-DCU ที่ λ_i

$D_{compi,NS-DCU}$ คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่ λ_i

L_{XY} คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยง XY

$N_{XY,SC-DCU}$ คือ จำนวน SC-DCU บนข่ายเชื่อมโยง XY

$N_{XY,NS-DCU}$ คือ จำนวน NS-DCU บนข่ายเชื่อมโยง XY

ตารางที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทางต่างๆ

λ_i (nm)	D_{compi} (ps/nm)				
	SMF 100 km	SMF 90 km	SMF 80 km	SMF70 km	SMF 60 km
1520.25	-1788.75	-1609.875	-1431	-1252.125	-1073.25
1577.03	-1504.85	-1354.365	-1203.88	-1053.395	-902.91

จากนั้นแก้มการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 2 ความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNET กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 - 4.2.2.3 ได้ผลเฉลยทั้งกรณีให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C และในกรณีให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อ

เปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 80 km ดังตารางที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 ผลเฉลยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ

หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination		หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination	
		SC- DCU	NS- DCU			SC- DCU	NS- DCU
N_{1_2}	6	4	0	N_{9_8}	5	3	0
N_{1_3}	9	5	0	N_{10_5}	8	3	1
N_{2_1}	6	4	0	N_{10_12}	5	3	0
N_{2_4}	6	3	0	N_{10_13}	6	4	0
N_{3_1}	9	5	0	N_{11_6}	7	3	1
N_{3_4}	8	5	0	N_{11_12}	4	1	1
N_{3_5}	5	4	0	N_{12_10}	5	3	0
N_{4_2}	6	4	0	N_{12_11}	3	1	1
N_{4_3}	8	6	0	N_{12_13}	6	4	0
N_{4_6}	10	7	0	N_{12_15}	7	4	0
N_{4_7}	3	1	1	N_{13_10}	6	4	0
N_{5_3}	5	4	0	N_{13_12}	6	4	0
N_{5_6}	3	2	0	N_{13_16}	7	4	0
N_{5_10}	8	4	0	N_{14_8}	9	5	0
N_{6_4}	10	6	0	N_{14_15}	9	6	0
N_{6_5}	3	1	1	N_{14_17}	6	4	0
N_{6_9}	3	2	0	N_{15_12}	7	4	0
N_{6_11}	6	3	1	N_{15_14}	9	6	0
N_{7_4}	3	1	0	N_{15_16}	5	3	0

N_{7_8}	3	2	0	N_{15_17}	5	0	5
N_{8_7}	3	2	0	N_{16_13}	7	4	0
N_{8_9}	5	3	0	N_{16_15}	5	3	0
N_{8_14}	9	5	0	N_{17_14}	6	4	0
N_{9_6}	3	2	0	N_{17_15}	5	4	0
				N_{\min}	288	169	12

ตารางที่ 4.14 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสมกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียว

จากการทำ MILP Optimization กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ

	ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
D_{ac2_li}	934.41	896.25	D_{ac1_2i}	934.41	896.25
D_{ac3_li}	50.49	-262.26	D_{ac3_2i}	1579.79	1377.19
D_{ac4_li}	968.97	721.41	D_{ac4_2i}	33.66	-174.84
D_{ac5_li}	979.29	66.3.13	D_{ac5_2i}	707.09	160.40
D_{ac6_li}	996.12	575.71	D_{ac6_2i}	690.26	247.82
D_{ac7_li}	384.40	-80.07	D_{ac7_2i}	-550.01	-976.32
D_{ac8li}	401.23	-167.49	D_{ac8_2i}	-533.18	-1063.74
D_{ac9_li}	1313.20	845.32	D_{ac9_2i}	1007.34	1107.34
D_{ac10_li}	123.42	-641.08	D_{ac10_2i}	-148.78	-1143.81
D_{ac11_li}	1330.03	-757.90	D_{ac11_2i}	1024.17	430.01
D_{ac12_li}	151.47	-786.78	D_{ac12_2i}	145.86	-757.64
D_{ac13_li}	1358.08	612.20	D_{ac13_2i}	780.02	-218.42
D_{ac14_li}	448.21	-434.88	D_{ac14_2i}	-482.69	-1326.00
D_{ac15_li}	490.99	-633.73	D_{ac15_2i}	168.30	-874.20
D_{ac16_li}	1397.35	408.22	D_{ac16_2i}	496.60	-662.87

D_{ac17_1i}	785.63	-247.56	D_{ac17_2i}	-148.78	-1143.81
D_{ac1_3i}	50.49	-262.26	D_{ac1_4i}	968.07	721.41
D_{ac2_3i}	1579.79	1377.19	D_{ac2_4i}	33.66	-174.84
D_{ac4_3i}	1546.13	1552.03	D_{ac3_4i}	1546.13	1552.03
D_{ac5_3i}	928.80	925.39	D_{ac5_4i}	673.43	335.24
D_{ac6_3i}	945.63	837.97	D_{ac6_4i}	656.60	422.66
D_{ac7_3i}	962.46	750.55	D_{ac7_4i}	-583.67	-801.48
D_{ac8_3i}	979.29	663.13	$D_{ac8_4_i}$	-566.84	-888.90
D_{ac9_3i}	1262.71	1107.58	D_{ac9_4i}	973.68	692.27
D_{ac10_3i}	72.93	-378.82	D_{ac10_4i}	-182.44	-968.97
D_{ac11_3i}	1279.54	1020.16	D_{ac11_4i}	990.51	604.85
D_{ac12_3i}	100.98	-524.52	D_{ac12_4i}	112.20	-582.80
D_{ac13_3i}	1307.59	874.46	D_{ac13_4i}	746.36	-43.58
D_{ac14_3i}	1029.78	400.87	D_{ac14_4i}	-516.35	-1151.16
D_{ac15_3i}	440.50	-371.47	D_{ac15_4i}	134.64	-699.36
D_{ac16_3i}	1346.86	670.48	D_{ac16_4i}	462.94	-488.03
D_{ac17_3i}	1363.69	583.06	D_{ac17_4i}	-182.44	-968.97
D_{ac1_5i}	979.29	663.13	D_{ac1_6i}	996.12	575.71
D_{ac2_5i}	707.09	160.40	D_{ac2_6i}	690.26	247.82
D_{ac3_5i}	928.80	925.39	D_{ac3_6i}	945.63	837.97
D_{ac4_5i}	673.43	335.24	D_{ac4_6i}	656.60	422.66
D_{ac6_5i}	16.83	-87.42	D_{ac5_6i}	16.83	-87.42
D_{ac7_5i}	1279.54	1020.16	D_{ac7_6i}	1262.71	1107.58
D_{ac8_5i}	1262.71	1107.58	D_{ac8_6i}	1245.88	1195.00
D_{ac9_5i}	333.91	182.19	D_{ac9_6i}	317.08	269.61
D_{ac10_5i}	-855.87	-1304.21	D_{ac10_6i}	-839.04	-1304.21

D_{ac11_5i}	350.74	94.77	D_{ac11_6i}	-333.91	182.19
D_{ac12_5i}	-827.82	-1449.91	D_{ac12_6i}	-544.40	-1005.46
D_{ac13_5i}	378.79	-50.93	D_{ac13_6i}	89.76	-466.24
D_{ac14_5i}	1313.20	845.32	D_{ac14_6i}	1296.37	923.74
D_{ac15_5i}	-488.30	-1296.86	D_{ac15_6i}	-204.88	-852.41
D_{ac16_5i}	418.06	-254.91	D_{ac16_6i}	123.42	-641.08
D_{ac17_5i}	740.75	-14.44	D_{ac17_6i}	1024.49	430.01
D_{ac1_7i}	384.40	-80.07	D_{ac1_8i}	401.23	-167.49
D_{ac2_7i}	-550.01	-976.32	D_{ac2_8i}	-533.18	-1063.74
D_{ac3_7i}	962.46	750.55	D_{ac3_8i}	979.29	663.13
D_{ac4_7i}	-583.67	-801.48	D_{ac4_8i}	-566.84	-888.90
D_{ac5_7i}	1279.54	1020.16	D_{ac5_8i}	1262.54	1107.58
D_{ac6_7i}	1262.71	1107.58	D_{ac6_8i}	1245.88	1195.00
D_{ac8_7i}	16.83	-87.42	D_{ac7_8i}	16.83	-87.42
D_{ac9_7i}	945.63	837.97	D_{ac9_8i}	928.80	925.39
D_{ac10_7i}	423.67	-284.05	D_{ac10_8i}	406.84	-196.63
D_{ac11_7i}	1596.62	1289.77	D_{ac11_8i}	1579.79	1377.19
D_{ac12_7i}	718.31	102.12	D_{ac12_8i}	701.48	189.54
D_{ac13_7i}	1352.47	641.34	D_{ac13_8i}	1335.64	728.76
D_{ac14_7i}	67.32	-349.68	D_{ac14_8i}	50.49	-262.26
D_{ac15_7i}	718.31	102.12	D_{ac15_8i}	701.48	189.54
D_{ac16_7i}	1046.61	313.45	D_{ac16_8i}	1029.78	400.87
D_{ac17_7i}	401.23	-167.49	D_{ac17_8i}	384.40	-80.07
D_{ac1_9i}	1313.20	845.32	D_{ac1_10i}	123.42	-641.08
D_{ac2_9i}	1007.34	517.43	D_{ac2_10i}	-148.78	-1143.81
D_{ac3_9i}	1262.71	1107.58	D_{ac3_10i}	72.93	-378.82

D_{ac4_9i}	973.68	692.27	D_{ac4_10i}	-182.44	-968.97
D_{ac5_9i}	333.91	182.19	D_{ac5_10i}	-855.87	-1304.21
D_{ac6_9i}	317.08	269.61	D_{ac6_10i}	-839.04	-1391.63
D_{ac7_9i}	945.63	837.97	D_{ac7_10i}	423.67	-284.05
D_{ac8_9i}	928.80	925.39	D_{ac8_10i}	406.84	-196.63
D_{ac10_9i}	-521.96	-1122.02	D_{ac9_10i}	-521.96	-1122.02
D_{ac11_9i}	650.99	451.80	D_{ac11_10i}	44.88	-233.12
D_{ac12_9i}	-227.32	-735.85	D_{ac12_10i}	28.05	-145.70
D_{ac13_9i}	406.84	-196.63	D_{ac13_10i}	1234.28	1253.28
D_{ac14_9i}	979.29	663.13	D_{ac14_10i}	1018.56	459.15
D_{ac15_9i}	112.20	-582.80	D_{ac15_10i}	367.57	7.35
D_{ac16_9i}	440.50	-371.47	D_{ac16_10i}	1273.93	1049.30
D_{ac17_9i}	1313.20	845.32	D_{ac17_10i}	1596.62	1289.77
D_{ac1_11i}	434.89	-342.33	D_{ac1_12i}	151.47	-786.78
D_{ac2_11i}	129.03	-670.22	D_{ac2_12i}	145.86	-757.64
D_{ac3_11i}	384.40	-80.07	D_{ac3_12i}	100.98	-524.52
D_{ac4_11i}	95.37	-495.38	D_{ac4_12i}	112.20	-582.80
D_{ac5_11i}	-544.40	-1005.46	D_{ac5_12i}	-827.82	-1449.91
D_{ac6_11i}	-561.23	-918.04	D_{ac6_12i}	-544.40	-1005.46
D_{ac7_11i}	701.48	189.54	D_{ac7_12i}	718.31	102.12
D_{ac8_11i}	684.65	276.96	D_{ac8_12i}	701.48	189.54
D_{ac9_11i}	-244.15	-648.43	D_{ac9_12i}	-227.32	-735.85
D_{ac10_11i}	-850.26	-1333.35	D_{ac10_12i}	28.05	-145.70
D_{ac12_11i}	-878.31	-1187.65	D_{ac11_12i}	16.83	-87.42
D_{ac13_11i}	-224.15	-648.43	D_{ac13_12i}	634.16	539.22
D_{ac14_11i}	112.20	-582.80	D_{ac14_12i}	990.51	604.85

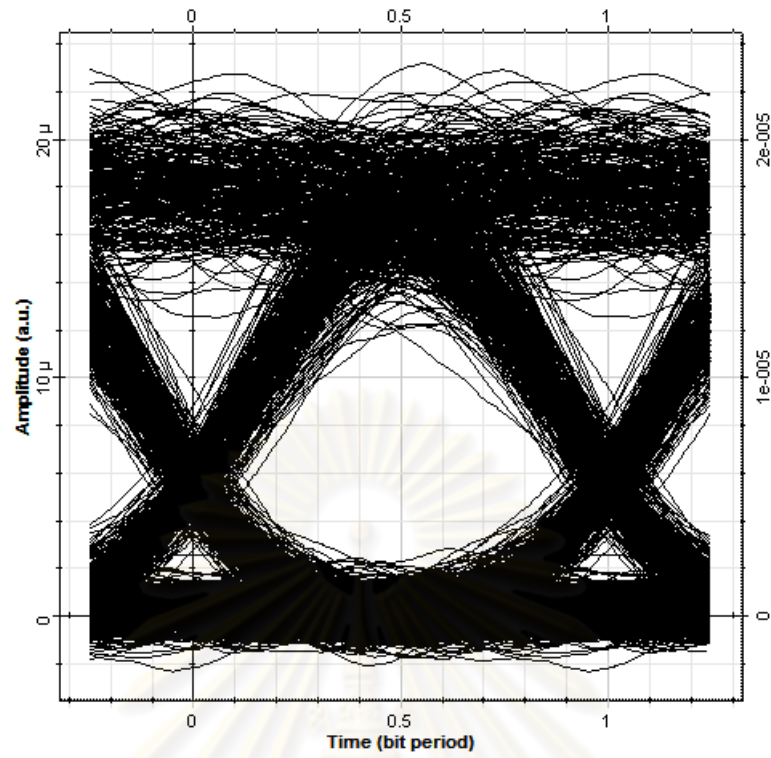
D_{ac15_11i}	-538.79	-1034.60	D_{ac15_12i}	339.52	153.05
D_{ac16_11i}	-210.49	-823.27	D_{ac16_12i}	667.82	364.38
D_{ac17_11i}	690.26	247.82	D_{ac17_12i}	1568.57	1435.47
D_{ac1_13i}	1358.08	612.20	D_{ac1_14i}	451.72	-429.75
D_{ac2_13i}	780.02	-218.42	D_{ac2_14i}	-482.69	-1326.00
D_{ac3_13i}	1307.59	874.46	D_{ac3_14i}	1029.78	400.87
D_{ac4_13i}	746.36	-43.58	D_{ac4_14i}	-516.35	-1151.16
D_{ac5_13i}	378.79	-50.93	D_{ac5_14i}	1313.20	845.32
D_{ac6_13i}	89.76	-466.24	D_{ac6_14i}	1296.37	932.74
D_{ac7_13i}	1352.47	641.34	D_{ac7_14i}	67.32	-349.68
D_{ac8_13i}	1335.64	728.76	D_{ac8_14i}	50.49	-262.26
D_{ac9_13i}	406.84	-196.63	D_{ac9_14i}	979.29	663.13
D_{ac10_13i}	1234.66	1253.28	D_{ac10_14i}	1018.56	459.16
D_{ac11_13i}	650.99	451.80	D_{ac11_14i}	1007.34	517.43
D_{ac12_13i}	634.16	539.22	D_{ac12_14i}	990.51	604.85
D_{ac14_13i}	718.31	102.12	D_{ac13_14i}	1018.56	455.16
D_{ac15_13i}	67.32	-349.68	D_{ac15_14i}	650.99	451.80
D_{ac16_13i}	-260.98	-561.01	D_{ac16_14i}	979.29	663.13
D_{ac17_13i}	1296.37	932.74	D_{ac17_14i}	333.91	182.19
D_{ac1_15i}	490.99	-633.73	D_{ac1_16i}	1397.35	408.22
D_{ac2_15i}	168.30	-874.20	D_{ac2_16i}	496.60	-662.87
D_{ac3_15i}	440.50	-371.47	D_{ac3_16i}	1346.86	670.48
D_{ac4_15i}	134.64	-699.36	D_{ac4_16i}	462.94	-488.03
D_{ac5_15i}	-488.30	-1296.86	D_{ac5_16i}	418.06	-254.91
D_{ac6_15i}	-204.88	-852.41	D_{ac6_16i}	123.42	-641.08
D_{ac7_15i}	718.31	102.12	D_{ac7_16i}	1046.61	313.45

D_{ac8_15i}	701.48	189.54	D_{ac8_16i}	1029.78	400.87
D_{ac9_15i}	112.20	-582.80	D_{ac9_16i}	440.50	-371.47
D_{ac10_15i}	367.57	7.35	D_{ac10_16i}	1273.93	1049.30
D_{ac11_15i}	356.35	65.63	D_{ac11_16i}	684.65	276.96
D_{ac12_15i}	339.52	153.05	D_{ac12_16i}	667.82	364.38
D_{ac13_15i}	367.57	7.35	D_{ac13_16i}	39.27	-203.98
D_{ac14_15i}	650.99	541.80	D_{ac14_16i}	979.29	663.13
D_{ac16_15i}	211.33	211.33	D_{ac15_16i}	328.30	211.33
D_{ac17_15i}	1229.05	1282.42	D_{ac17_16i}	1557.35	1493.75
D_{ac1_17i}	785.63	-247.56	D_{ac9_17i}	1313.20	845.32
D_{ac2_17i}	-148.78	-1143.81	D_{ac10_17i}	1596.62	1289.77
D_{ac3_17i}	1363.69	583.06	D_{ac11_17i}	1585.40	1348.05
D_{ac4_17i}	-182.44	-968.97	D_{ac12_17i}	1568.57	1435.47
D_{ac5_17i}	740.75	-14.44	D_{ac13_17i}	1596.62	1289.77
D_{ac6_17i}	1024.17	430.01	D_{ac14_17i}	333.91	182.19
D_{ac7_17i}	401.23	-167.49	D_{ac15_17i}	1229.05	1282.42
D_{ac8_17i}	384.40	-80.07	D_{ac16_17i}	1557.35	1493.75

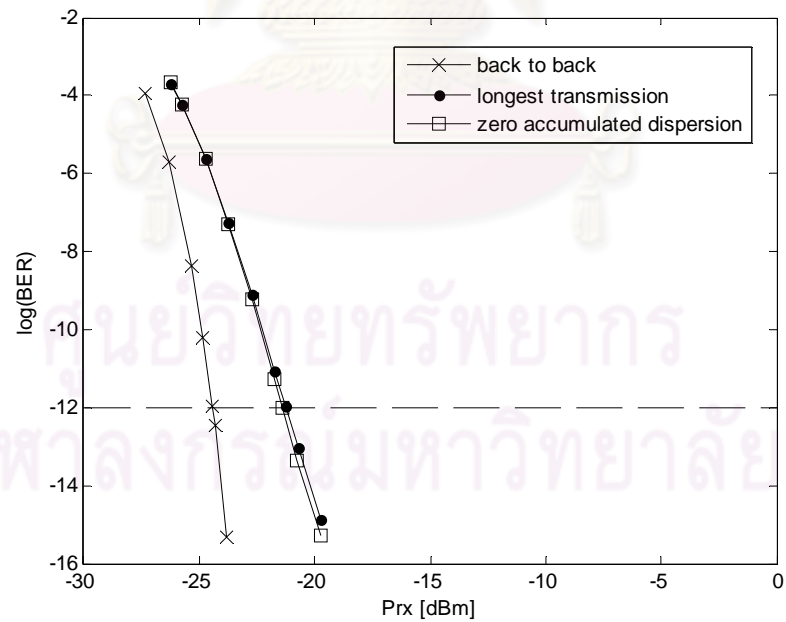
อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงทั้งในกรณีใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU เพียงชนิดเดียวและการใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU ร่วมกับหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU จากผลเฉลี่ยในตารางที่ 4.13 แสดงจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันแต่ละชนิดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่าย จากผลเฉลี่ยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน นอกจากนี้พบว่าทุก

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y ไต ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 16 เป็นระยะทาง 2180 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 1024 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ 408.22 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.000616 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.08722×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 4.18 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 3.141 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.18 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสาร
ที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ

บทที่ 5

ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอ

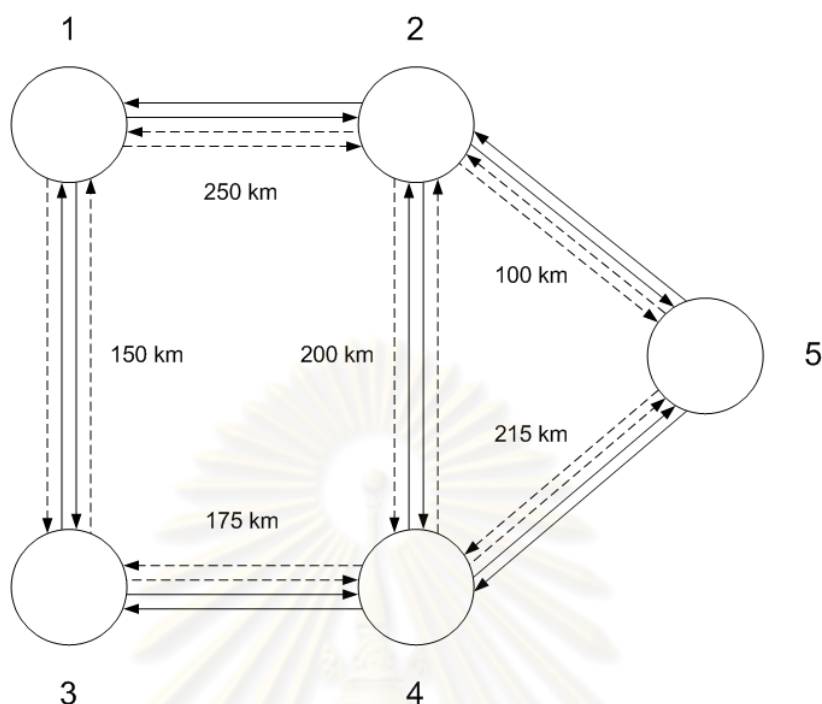
กรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

ในบทนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายตามอัลกอริทึมที่ได้เสนอในบทที่ 3 ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายตัวอย่าง ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และส่วนสุดท้ายเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET

5.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย

- 1) การสร้างอัลกอริทึมสำหรับใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันด้วยเงื่อนไขที่ไม่มีผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
- 2) กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่าง โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และโครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET เป็นโครงข่ายลักษณะเมชสามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงสำรอง
- 3) หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU มีระยะทางการชดเชยดีสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km
- 4) เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะมีการจัดสรรเส้นทางทางการส่งสัญญาณขึ้นใหม่ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณโดยใช้เส้นใยแสงสำรองแบบ Path Protection
- 5) ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายที่พิจารณานำมาใช้ในการจำลองโครงข่ายคือความเสียหายของเส้นใยแสงทั้ง 4 เส้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยง (Working & Spare Fiber Failure) โดยจะทำการพิจารณาให้เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง

5.2 การจำลองการใช้หน่วยขีดเซยติสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 5.1 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายตัวอย่าง

ในการจำลองโครงข่ายกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่าง เป็นโครงข่ายลักษณะเมช ประกอบด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง (Link) 4 โหนด (Node) ระยะทางรวม 1090 km โดยการส่งผ่านสัญญาณนี้จะมีสองทิศทางบนเส้นใยแสงสำรองเท่านั้น คือระยะทางที่สั้นที่สุดสำหรับเส้นทางที่ถูกจัดสรรขึ้นใหม่ ตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขีดเซยติสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างด้วยจำนวนหน่วยขีดเซยติสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายอธิบายได้ดังนี้

5.2.1 ระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

การระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางขึ้นใหม่จากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย เป็นการจัดสรรเส้นทางส่งสัญญาณขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง ในการระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณใหม่จะพิจารณาแยกเป็นกรณีความเสียหายของทุกข่ายเชื่อมโยงด้วยระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (Shortest-Path) โดยเส้นทางส่งผ่านสัญญาณกรณี

ที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.2 - ตารางที่ 3.7

5.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณในตารางที่ 3.2 - ตารางที่ 3.7 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายประกอบขึ้นด้วย สมการเงื่อนไขขอบเขตเซตค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทางใด ๆ เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

5.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนด

สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตเซตค่าดีสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่นเมื่อจัดสรรเส้นทางการส่งสัญญาณใหม่จากทุกโนดต้นทาง Z ไปยังทุกโนดปลายทาง Y โดยแยกเป็นกรณีตามความเสียหายที่เกิดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงดังตารางที่ 3.2 - ตารางที่ 3.7 สร้างดังนี้

- 1) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (A)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 1; $Z = 1$

$$1 - - 3 - - 4 - - 2$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac21iA}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 2; $Z = 2$

$$2 - - 4 - - 3 - - 1$$

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac12iA}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 5; $Z = 5$

$$5 - - 4 - - 3 - - 1$$

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac15iA}$$

- 2) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ ข่ายเชื่อมโยง 31 (B)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 1; $Z = 1$

$$1 - - 2 - - 4 - - 3$$

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac31iB}$$

1 -- 2 -- 4

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac41iB}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 3; $Z = 3$

3 -- 4 -- 2 -- 1

$$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac13iB}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 4; $Z = 4$

4 -- 2 -- 1

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac14iB}$$

3) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ ข่ายเชื่อมโยง 42 (C)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 2; $Z = 2$

2 -- 1 -- 3

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac32iC}$$

2 -- 5 -- 4

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac42iC}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 3; $Z = 3$

3 -- 1 -- 2

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac23iC}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 4; $Z = 4$

4 -- 5 -- 2

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac24iC}$$

4) กรณีเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 25 และ ข่ายเชื่อมโยง 52 (D)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 1; $Z = 1$

1 -- 3 -- 4 -- 5

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac21iD}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 2; $Z = 2$

2 -- 4 -- 5

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac52iD}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 5; $Z = 5$

$$5 - - 4 - - 3 - - 1$$

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac15iD}$$

$$5 - - 4 - - 2$$

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac25iD}$$

5) กรณีเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมต่อโยง 34 และ ข่ายเชื่อมต่อโยง 43 (E)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 1; $Z = 1$

$$1 - - 2 - - 4$$

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac41iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 2; $Z = 2$

$$2 - - 1 - - 3$$

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac32iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 3; $Z = 3$

$$3 - - 1 - - 2$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac23iE}$$

$$3 - - 1 - - 2 - - 4$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac43iE}$$

$$3 - - 1 - - 2 - - 5$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac53iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 4; $Z = 4$

$$4 - - 2 - - 1$$

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac14iE}$$

$$4 - - 2 - - 1 - - 3$$

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac34iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 5; $Z = 5$

$$5 - - 2 - - 1 - - 3$$

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac35iE}$$

6) กรณีเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 45 และ ข่ายเชื่อมโยง 54 (F)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 3; $Z = 3$

3 -- 4 -- 2 -- 5

$$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac53iF}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 4; $Z = 4$

4 -- 2 -- 5

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac54iF}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโนด 5; $Z = 5$

5 -- 2 -- 4 -- 3

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac35iF}$$

5 -- 2 -- 4

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac45iF}$$

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (Center Wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1 เขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันจากโนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ด้วยกลไกการกักสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองด้วยวิธีเดียวกันกับการเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 บทที่ 4 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นมอดูลต่างๆ จะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 ตามลำดับ

5.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตค่าดีสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตค่าดีสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดีสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจากโหนดต้นทาง Z ทุกโหนดปลายทาง Y ชุดรูปแบบอสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณด้วย

กลไกการกีดกันสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองในโครงข่ายตัวอย่าง

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	B	$-1600 \leq D_{ac31iB} \leq 1600$
1	4	B	$-1600 \leq D_{ac41iB} \leq 1600$
1	5	D	$-1600 \leq D_{ac51iD} \leq 1600$
1	4	E	$-1600 \leq D_{ac41iE} \leq 1600$
2	1	A	$-1600 \leq D_{ac12iA} \leq 1600$
2	3	C	$-1600 \leq D_{ac32iC} \leq 1600$
2	4	C	$-1600 \leq D_{ac42iC} \leq 1600$
2	5	D	$-1600 \leq D_{ac52iD} \leq 1600$
2	3	E	$-1600 \leq D_{ac32iE} \leq 1600$
3	1	B	$-1600 \leq D_{ac13iB} \leq 1600$
3	2	C	$-1600 \leq D_{ac23iC} \leq 1600$
3	2	E	$-1600 \leq D_{ac23iE} \leq 1600$
3	4	E	$-1600 \leq D_{ac43iE} \leq 1600$
3	5	E	$-1600 \leq D_{ac53iE} \leq 1600$

3	5	F	$-1600 \leq D_{ac53iF} \leq 1600$
4	1	B	$-1600 \leq D_{ac14iB} \leq 1600$
4	2	C	$-1600 \leq D_{ac24iC} \leq 1600$
4	1	E	$-1600 \leq D_{ac14iE} \leq 1600$
4	3	E	$-1600 \leq D_{ac34iE} \leq 1600$
4	2	F	$-1600 \leq D_{ac24iF} \leq 1600$
5	1	A	$-1600 \leq D_{ac15iA} \leq 1600$
5	1	D	$-1600 \leq D_{ac15iD} \leq 1600$
5	2	D	$-1600 \leq D_{ac25iD} \leq 1600$
5	3	E	$-1600 \leq D_{ac35iE} \leq 1600$
5	3	F	$-1600 \leq D_{ac35iF} \leq 1600$
5	4	F	$-1600 \leq D_{ac45iF} \leq 1600$

5.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

5.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่าย ในขณะที่เดียวกันจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้ ในกรณีการใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดผลรวมจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดเพียงชนิดเดียวเท่านั้น แต่ในกรณีการใช้หน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดผลรวมจำนวนหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดของสองชนิด

5.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการทำ Optimization ปัญหาแบบ MILP เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่นขอบในโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรวจด้วยกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ Path Protection ในกรณีนี้ใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว เราเลือกหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันโดยพิจารณาจากมอดูลที่ยาวที่สุดมอดูล DCM -60 - SMF - C ก่อน ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้จึงปรับเปลี่ยนเป็นมอดูลที่มีความยาวลดหลั่นลงมาตามลำดับ ผลเฉลยที่ได้คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 50 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน เราใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C เป็นหลักในการชดเชยดิสเพอร์ชัน จากนั้นเราเลือกหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU โดยพิจารณาจาก NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km ก่อน ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้จึงปรับเปลี่ยนเป็นมอดูลที่ความยาวลดหลั่นลงมาตามลำดับ ผลเฉลยที่ได้คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km บนเส้นใยแสงสำรวจในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายและค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ทุกโหนดปลายทาง Y ของทุกรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน

ตารางที่ 5.2 ผลเฉลยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่ายตัวอย่างด้วยกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรวจ

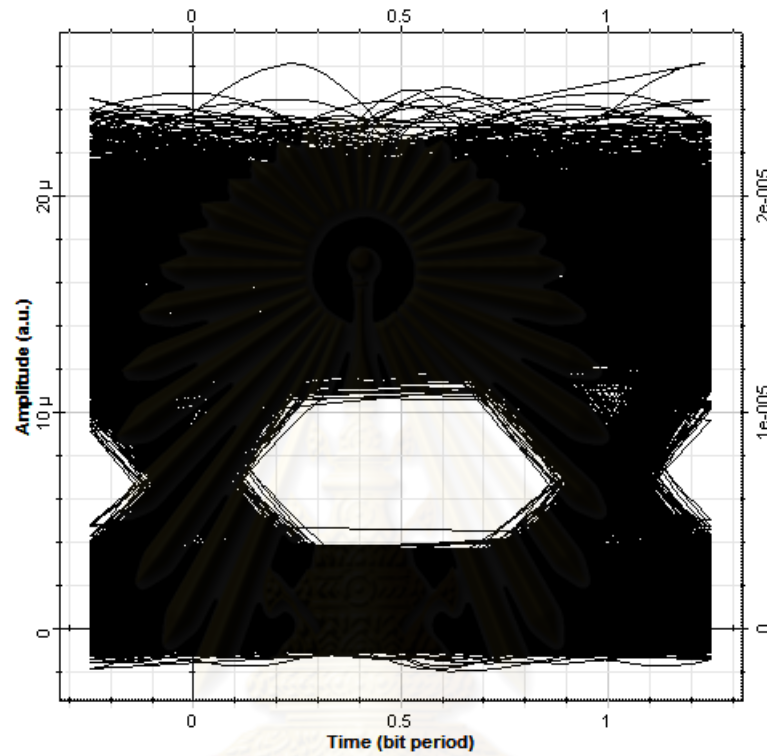
หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	SC-DCU	Combination	
		SC-DCU	NS-DCU
N_{12}	3	2	0
N_{13}	2	2	0
N_{21}	2	2	0
N_{24}	2	1	1
N_{25}	1	1	0
N_{31}	1	2	0

N_{34}	2	1	1
N_{42}	3	2	0
N_{43}	3	2	0
N_{45}	2	2	0
N_{52}	1	1	0
N_{54}	2	2	0
N_{\min}	24	20	2

5.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

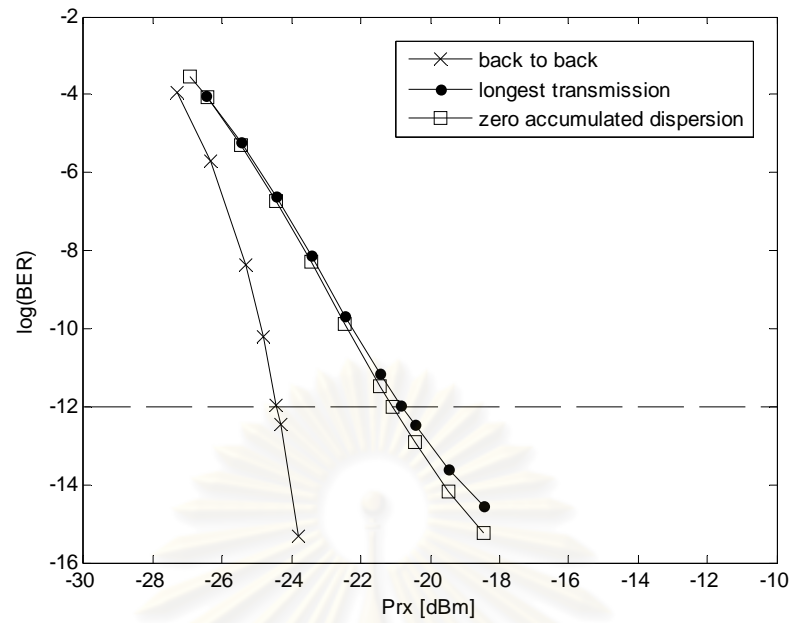
ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปโนโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่ายเราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงสำรอง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 3 กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ ข่ายเชื่อมโยง 31 เป็นระยะทาง 625 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ 486.838 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 6.9999 และค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.08982×10^{-12} แสดงดังแสดงรูปที่ 5.2 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 3.572 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ

$\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



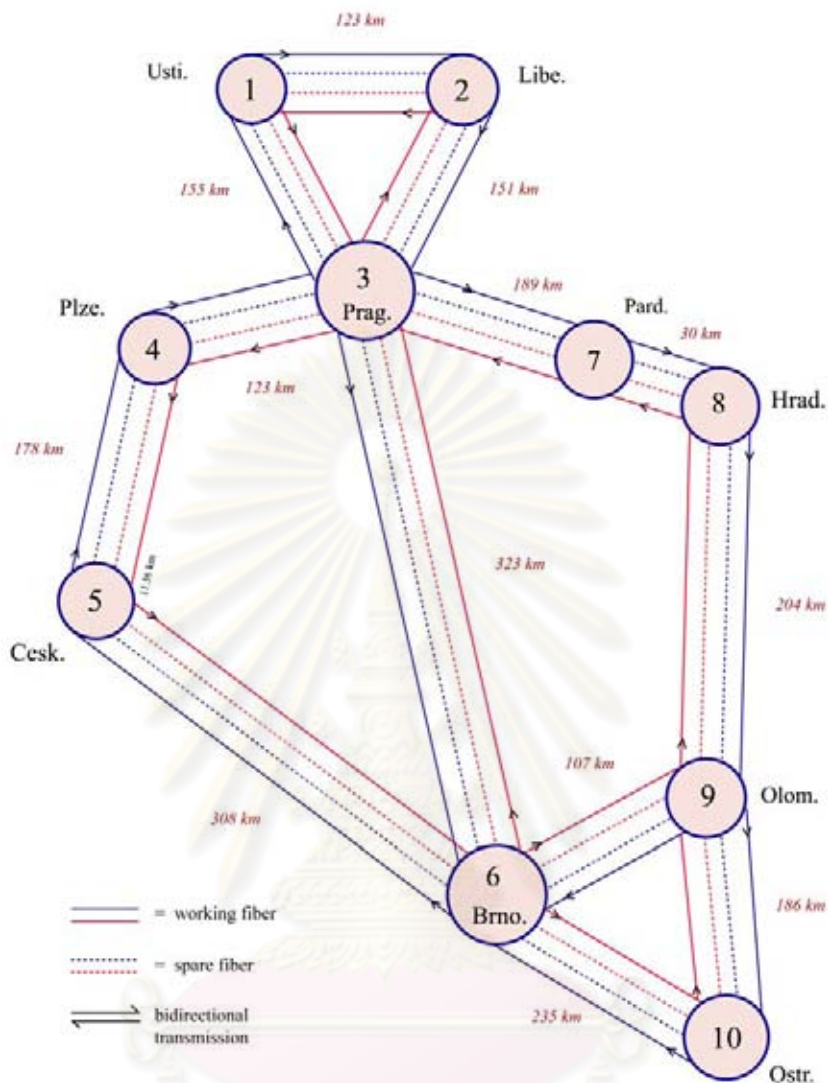
รูปที่ 5.2 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่ายตัวอย่างเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่ายตัวอย่างเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

5.3 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย OPEN



รูปที่ 5.4 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่าย OPEN

โครงข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN) ประกอบด้วย 13 ข่ายเชื่อมโยง 10 โหนด ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางผ่านไปในเส้นใยแสงทำงานมีระยะทางทั้งหมด 1882 km เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่หลังเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายจะเลือกใช้เส้นทางที่มีระยะทางสั้นสุดตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

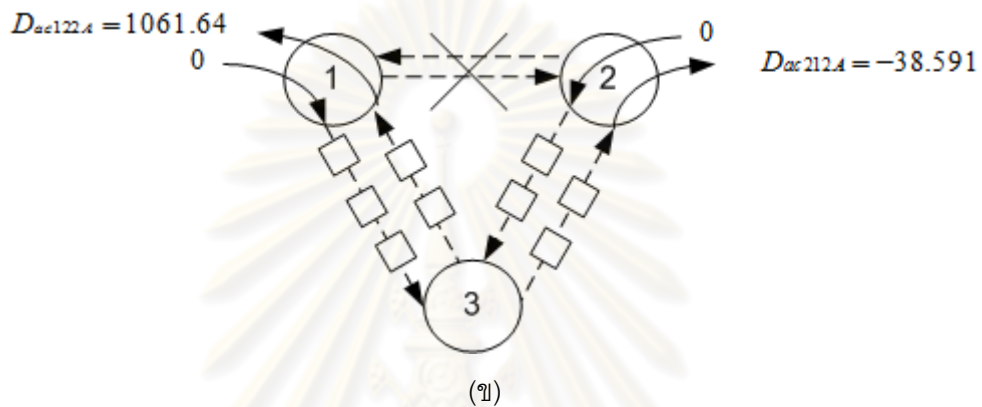
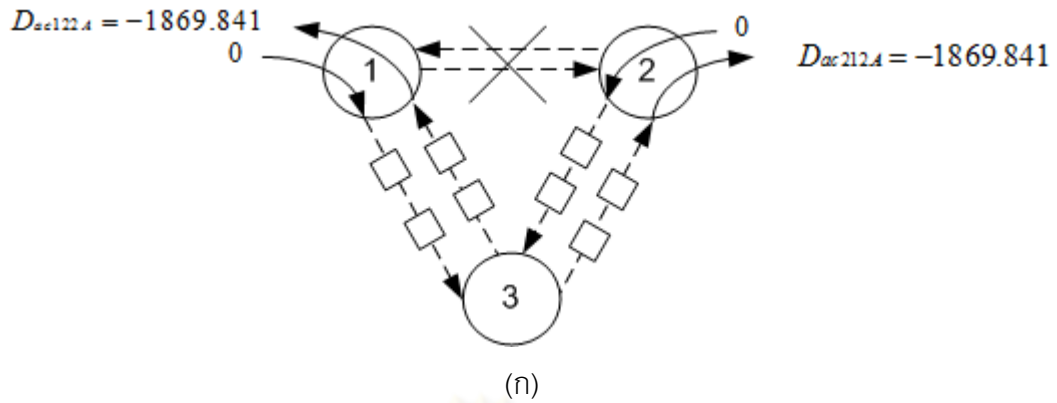
การหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายจะ

ดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายตัวอย่าง การจำลองโครงข่ายด้วยกลไกการกักกันสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองเราเลือกใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1 ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นมอดูลต่างจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 ตามลำดับ จากนั้นแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตตามอัลกอริทึมที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2 เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

ในกรณีเมื่อใช้ SC-DCU ที่มีมอดูล DCM - 60 - SMF - C เราไม่สามารถหาคำตอบได้เนื่องจากปัญหาและข้อจำกัดที่เราพิจารณาอยู่เป็นปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Problem) หรืออาจกล่าวได้ว่า เราไม่สามารถใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C ชดเชยดิสเพอร์ชันได้พร้อมกันทุกเส้นทางทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น ดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 2 ความยาวคลื่น 1577.03 nm กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (D_{ac212A}) และ ดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณจากโนด 2 ไปโนด 1 ความยาวคลื่น 1577.03 nm กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (D_{ac122A}) ไม่สามารถถูกชดเชยให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดโดยที่ดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางทุกเส้นทางทุกกรณีที่เหลือสามารถชดเชยให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ ในทางกลับกันเมื่อเราพยายามทำให้ D_{ac212A} และ D_{ac122A} มีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางของเส้นทางอื่นเกินขอบเขต ดังนั้นเราจึงต้องปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัวเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยกรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหาย

กับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้คือ D_{compi} ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.4

เมื่อเราปรับเปลี่ยนค่า D_{compi} ของ SC-DCU แล้ว ส่งผลให้เราสามารถใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ชุดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเมื่อส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ได้ เนื่องจากเส้นทางส่งสัญญาณบน OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งมีจำนวนมากกว่ากรณีโครงข่ายทำงานปกติทั้งเส้นทางระยะทางสั้นและเส้นทางยาว ดังนั้นเมื่อเราต้องการวางหน่วยชุดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายเพื่อให้สามารถชุดเซยดิสเพอร์ชันในทุกเส้นทางของการส่งสัญญาณ เราจำเป็นต้องลดค่า D_{compi} ให้เป็นค่าลบที่น้อยลง (จาก -1489.5 เป็น -895.14 และ จาก -1830.18 เป็น -1100.23) เพื่อให้สามารถชุดเซยดิสเพอร์ชันที่มีค่ามาก (ระยะทางการส่งสัญญาณมาก) โดยใช้จำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวนมากและในขณะเดียวกันสามารถชุดเซยดิสเพอร์ชันที่มีค่าน้อย (ระยะทางการส่งสัญญาณน้อย) โดยใช้จำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวนน้อย รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A} ระหว่างกรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และ กรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ตามลำดับ ซึ่งจำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C ที่วางลงบนข่ายเชื่อมโยงเป็นผลเฉลยเมื่อค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางทุกเส้นทางทุกกรณีมีค่าอยู่ในขอบเขตยกเว้น D_{ac212A} และ D_{ac122A} ส่วนจำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ที่วางลงบนข่ายเชื่อมโยงเป็นผลเฉลยเมื่อค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางทุกเส้นทางทุกกรณีมีค่าอยู่ในขอบเขต จะเห็นได้ว่าค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A} กรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C อยู่ในขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A}

(ก)กรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และ(ข) มอดูล DCM - 40 - SMF - C

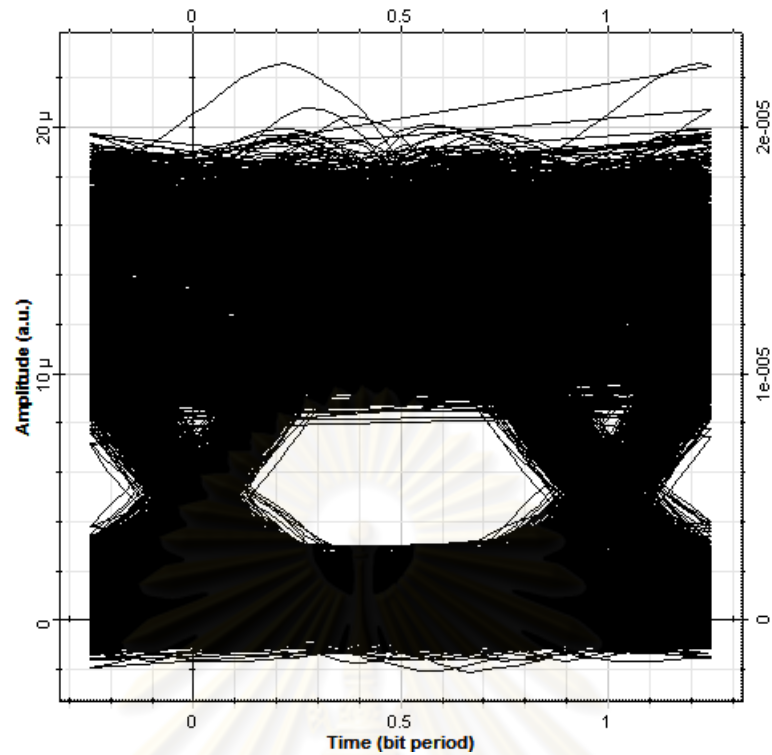
ผลเฉลยในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 70 km บนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน

ตารางที่ 5.3 ผลเฉลยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่าย OPEN
ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

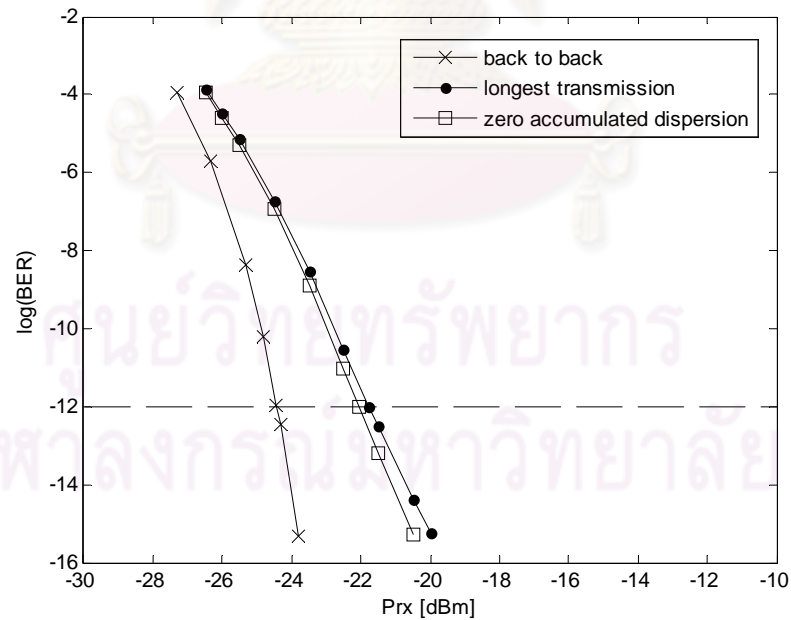
หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination		หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination	
		SC- DCU	NS- DCU			SC- DCU	NS- DCU
N_{12}	2	1	0	N_{65}	5	3	0
N_{13}	3	1	0	N_{69}	2	1	0
N_{21}	2	1	0	N_{610}	4	2	1
N_{23}	2	1	0	N_{73}	3	1	1
N_{31}	2	2	0	N_{78}	0	0	0
N_{32}	2	1	1	N_{87}	1	1	0
N_{34}	1	1	1	N_{89}	3	2	0
N_{36}	5	3	0	N_{96}	2	1	0
N_{37}	3	0	2	N_{98}	3	2	0
N_{43}	2	1	0	N_{910}	3	2	0
N_{45}	3	1	1	N_{106}	3	2	0
N_{54}	3	2	0	N_{109}	3	1	0
N_{56}	4	3	0	N_{min}	72	39	7
N_{63}	6	3	1			46	

ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงสำรอง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากจากโนด 2 ไปโนด 4 กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่าย

เชื่อมโยง 34 และ ข่ายเชื่อมโยง 43 เป็นระยะทาง 960 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน แล้วกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ 641.55 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.02038 และค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.00279×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 5.6 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 2.928 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสี่เหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

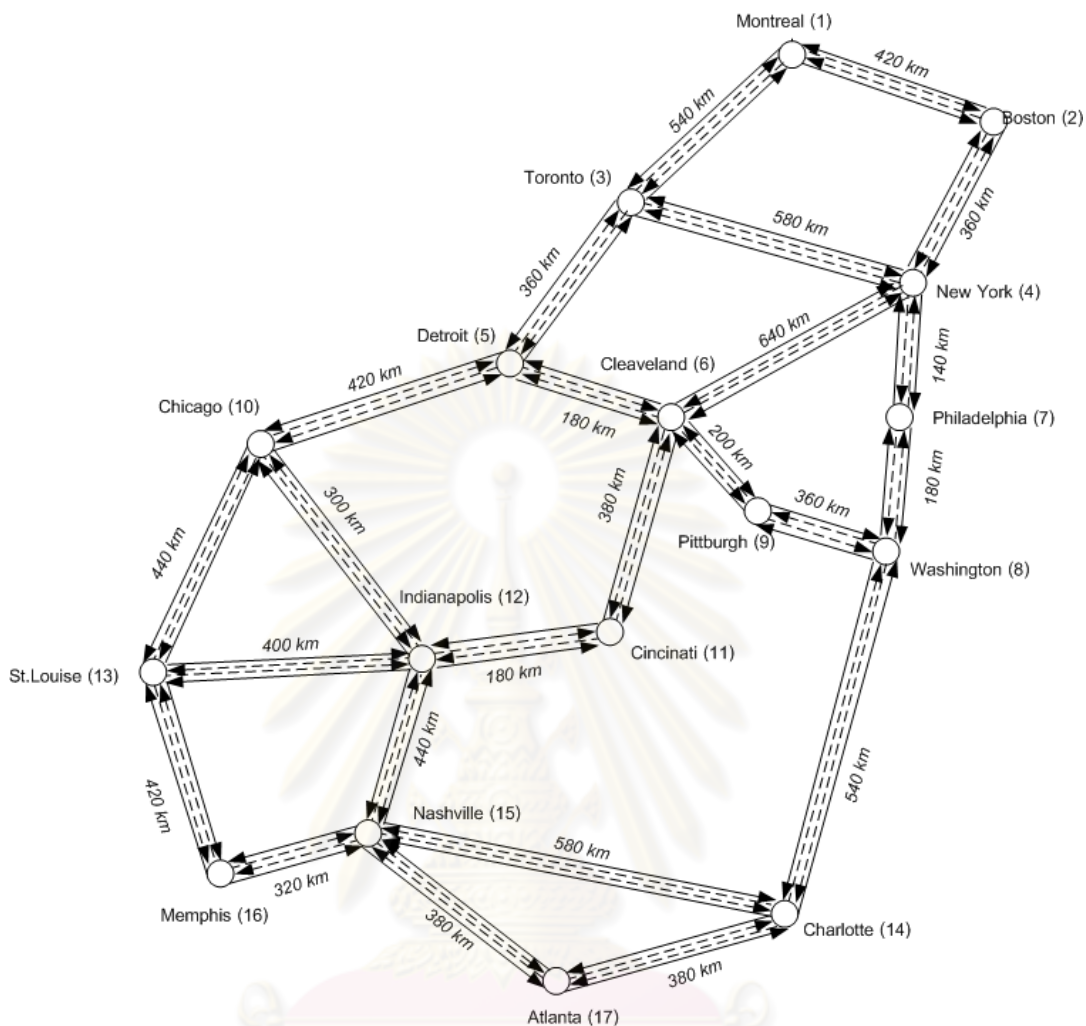


รูปที่ 5.6 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาว
ที่สุดกรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

5.4 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย NARNET



รูปที่ 5.8 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่าย NARNET

โครงข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET) ประกอบด้วย 24 ข่ายเชื่อมโยง 17 โหนด ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางผ่านไปในเส้นใยแสงสำรองมีระยะทางทั้งหมด 1882 km เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่หลังเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายจะเลือกใช้เส้นทางที่มีระยะทางสั้นสุดตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

การหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย จะ

ดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายตัวอย่าง การจำลองโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงเราเลือกใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1 ส่งผ่านไปเป็นส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นมอดูลต่างจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 ตามลำดับ จากนั้นแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตตามอัลกอริทึมที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2 เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ผลเฉลยในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 80 km บนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน

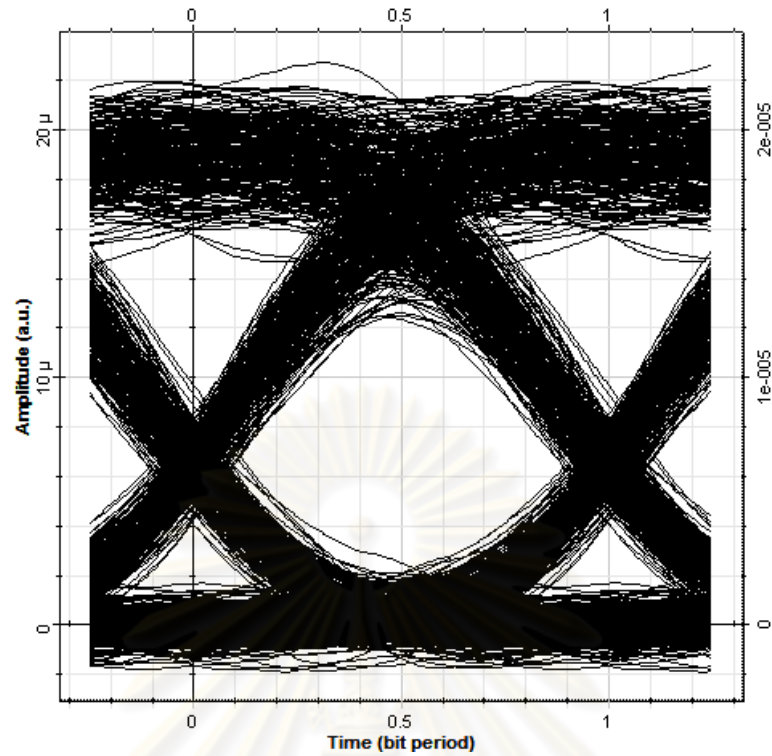
ตารางที่ 5.4 ผลเฉลยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่าย NARNET

ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรวจ

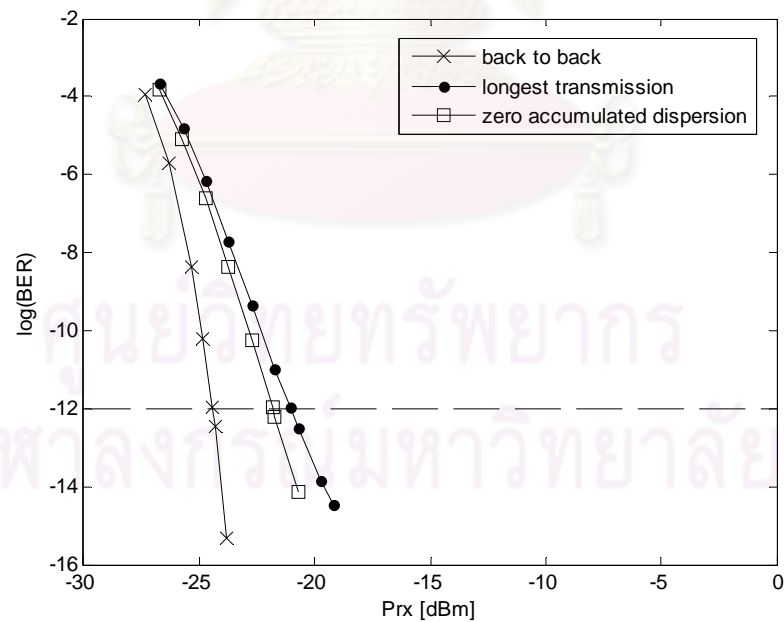
หน่วยขดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination		หน่วยขดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination	
		SC- DCU	NS- DCU			SC- DCU	NS- DCU
N_{1_2}	7	4	0	N_{9_8}	6	4	0
N_{1_3}	9	5	0	N_{10_5}	7	3	1
N_{2_1}	7	4	1	N_{10_12}	5	3	0
N_{2_4}	6	3	1	N_{10_13}	7	4	1
N_{3_1}	9	5	0	N_{11_6}	6	4	0
N_{3_4}	9	6	0	N_{11_12}	3	2	0
N_{3_5}	6	2	2	N_{12_10}	5	3	0
N_{4_2}	6	3	0	N_{12_11}	3	1	1
N_{4_3}	9	5	1	N_{12_13}	6	4	0
N_{4_6}	11	5	1	N_{12_15}	7	4	0
N_{4_7}	2	1	0	N_{13_10}	7	4	1
N_{5_3}	6	3	1	N_{13_12}	6	4	0
N_{5_6}	3	2	0	N_{13_16}	7	4	0
N_{5_10}	7	4	0	N_{14_8}	9	5	1
N_{6_4}	11	6	1	N_{14_15}	10	6	0
N_{6_5}	3	2	0	N_{14_17}	6	3	1
N_{6_9}	3	2	0	N_{15_12}	7	4	0
N_{6_11}	6	3	1	N_{15_14}	10	5	1
N_{7_4}	2	2	0	N_{15_16}	5	3	0
N_{7_8}	3	2	0	N_{15_17}	6	4	0
N_{8_7}	3	1	0	N_{16_13}	7	3	1

N_{8_9}	6	3	0	N_{16_15}	5	3	0
N_{8_14}	9	5	0	N_{17_14}	6	4	0
N_{9_6}	3	2	0	N_{17_15}	6	4	0
				N_{min}	298	168	17

ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปในโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำหรับชนิด SMF การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงสำหรับ เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 2 ไปโนด 17 กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ ข่ายเชื่อมโยง 42 เป็นระยะทาง 2780 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแล้วกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 1024 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ -441.19 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.00926 และค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.03538×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 5.9 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 3.361 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสี่เหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 5.9 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่าย NARNET เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

บทที่ 6

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลวิจัย

การส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงทั้งในโครงข่ายบริเวณกว้างและโครงข่ายระดับเมืองเพื่อให้ใช้งานแบนด์วิดท์ที่มีอยู่อย่างมหาศาล ผลลัพธ์ที่เส้นใยแสงสำหรับโครงข่ายบริเวณกว้างและโครงข่ายระดับเมืองในตลาดการสื่อสารที่มีในตลาดโทรคมนาคมในปัจจุบันมีความสามารถในการส่งสัญญาณได้ความเร็วสูงสุด 2 – 3 Tb/s ในโครงข่ายเส้นใยแสง WDM ประเภท Wavelength-Routed เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงระยะทางหนึ่งโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ณ โหนดที่สัญญาณเดินทางผ่าน สัญญาณไม่สามารถถูกแก้ผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันในแต่ละโหนดได้ ส่งผลให้ที่ตัวรับสัญญาณ ณ โหนดปลายทางตัดสินสัญญาณเข้าผิดเพี้ยนไป ดังนั้นจึงมีความต้องการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย Wavelength-Routed ด้วยจำนวนอุปกรณ์น้อยสุดที่เพียงพอให้สัญญาณที่ปลายทางคงคุณภาพไว้โดยไม่คิดผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณ อัลกอริทึมที่นำเสนอประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง โดยจัดสรรเส้นทางในเส้นทางที่มีระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุดทั้งในกรณีโครงข่ายทำงานปกติและในกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย
2. สร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง อสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์
3. การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต โดยเลือกใช้โปรแกรม Xpress MP ในการประมวลผล ในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว เราเลือกหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันโดยพิจารณาจากมอดูลที่ยาวที่สุดมอดูลก่อน ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้

จึงปรับเปลี่ยนเป็นมอดูลที่มาจากความยาวลดหลั่นลงมาตามลำดับ และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน เราใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C เป็นหลักในการชดเชยดิสเพอร์ชัน จากนั้นเราเลือกหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU โดยพิจารณาจาก NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km ก่อน ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้จึงปรับเปลี่ยนเป็นมอดูลที่มาจากความยาวลดหลั่นลงมาตามลำดับเช่นกัน โดยที่ผลเฉลยจากอัลกอริทึมที่นำเสนอคือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

4. การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน โดยเราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง เช่นเราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าของเครื่องขยายสัญญาณเป็นต้น

ผลเฉลยการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างกรณีโครงข่ายทำงานปกติไม่สามารถใช้ NS-DCU แก้หาผลเฉลยได้ เพราะผลจาก Over-Under Compensation ของความยาวคลื่นที่น้อยสุดและมากที่สุดนั้นมีค่าแตกต่างกันมากเกินไป แต่เราสามารถแก้หาผลเฉลยได้บนโครงข่ายตัวอย่างที่มีจำนวนช่องสัญญาณน้อยลง และเมื่อเราใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C ชดเชยดิสเพอร์ชันสามารถหาผลเฉลยได้เท่ากับ 20 ตัว ส่วนผลเฉลยในโครงข่าย OPEN กรณีโครงข่ายทำงานปกติ คือ จำนวนหน่วย SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C 44 ตัว และผลเฉลยในโครงข่าย NARNET กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวน 288 ตัว กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวน 169 ตัว และ NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 80 km จำนวน 12 ตัว

ผลเฉลยการจำลองอัลกอริทึมกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายในโครงข่ายตัวอย่างด้วยกลไกการกักสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ จำนวนหน่วย SC-DCU มอดูล DCM - 50 - SMF - C 24 ตัว กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ SC-DCU มอดูล DCM -

60 - SMF - C จำนวน 20 ตัว และ NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km จำนวน 2 ตัว ส่วนผลเฉลี่ยในโครงข่าย OPEN กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายด้วยกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ จำนวนหน่วย SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C 72 ตัว กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C จำนวน 39 ตัว และ NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 70 km จำนวน 7 ตัว และผลเฉลี่ยในโครงข่าย NARNET กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายด้วยกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวน 298 ตัว กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C จำนวน 168 ตัว และ NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 80 km จำนวน 17 ตัว

ผลจากการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายที่มีเส้นทางสื่อสารจำนวนมากหรือโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่และการจัดสรรเส้นทางส่งผ่านสัญญาณขึ้นใหม่เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายแสดงให้เห็นว่าระยะทางและจำนวนการส่งผ่านสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อชนิด มอดูล และ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน เนื่องจากระยะทางการสื่อสารของโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่มีทั้งการเส้นทางสื่อสารระยะสั้นและเส้นทางสื่อสารระยะยาว อีกทั้งระยะทางที่จัดสรรขึ้นใหม่จะยาวกว่าระยะทางการส่งผ่านสัญญาณในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ การนำหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดมาใช้ร่วมกันช่วยให้ได้ผลเฉลี่ยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันรวมน้อยกว่า แต่ทั้งนี้ความยาวของ DCF ใน SC-DCU ในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวสั้นกว่า DCF ใน SC-DCU ในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน ปัจจัยนี้อาจส่งผลถึงราคารวมของ DCU ที่ต้องการใช้ในระบบ ดังนั้นเราสามารถนำอัลกอริทึมที่สร้างขึ้นมาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกชนิดและจำนวนของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันให้เหมาะสมที่สุดกับโครงข่าย

6.2 ข้อเสนอแนะ

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันที่นำเสนอ ในขั้นตอนการสร้างเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดของโครงข่ายขนาดใหญ่มีความล่าช้าและยังเกิดผิดพลาดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากผู้ทำต้องเป็นผู้เขียนเงื่อนไขเองทั้งหมด ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชุดเซตดิสเพอร์ชันจึงควรพัฒนาให้สามารถสร้างเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดโดยอัตโนมัติ เช่น นำอัลกอริทึมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดมาใช้ร่วมด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Shumate, P. W. Fiber-to-the-Home: 1977–2007, Journal of Lightwave Technology 26 (9) (2008).
- [2] Masahio, A. Trends in Optical Access Network Technology Supporting FTTH [online] 2009. Available from : <https://www.nttreview.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201005sf5.html> [2010, September 28]
- [3] Synchronous optical networking [online]. 2010. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_optical_networking [2010, September 28]
- [4] Stamatios, V.K. DWDM Network, Devices, and Technology, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.
- [5] Mukherjee, B. Optical Communication Networks. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.
- [6] PRODUCTS & SERVICES [online] Available from : www.huawei.com/transport_network/dwdm_backbone_solution.do?card=1[2010, September 28]
- [7] Itsuro, M.; and Masatoshi, S. Long-Haul Soliton WDM Transmission with Periodic Dispersion Compensation and Dispersion Slope Compensation. Journal of Lightwave Technology 17 (1) (1999): 80-85.
- [8] 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 International Conference on IEEE INFOCOM '94, (1994):130-137.
- [9] 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.
- [10] Potenza, M. Optical fiber amplifiers for telecommunication system. IEEE Communications Magazine 34(8) (1996): 96-102.

- [11] Ramamurthy, B.; Iness, J.; and Mukherjee, B. Minimizing the Number of Optical Amplifiers Needed to Support a Multi-Wavelength Optical LAN/MAN. In Proceedings International Conference on IEEE INFOCOM '97 1 (1997): 261-268.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Li, B.; and Chu, X. Routing and Wavelength Assignment VS. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks. IEEE Optical Communication. Aug. 2003.
- [16] 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).
- [17] Kaewplung, P.; Ketmanee, P.; Lolurlert, T. Dispersion Compensation in Broadcast-and-Selective Optical Network. In Proceedings International Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO /Pacific Rim 2005. Pacific Rim Conference, 2005 (2005).
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] Ismaeane, M.; and Pasu, K. Optimum placement of dispersion compensation unit for transparent DWDM ring network. In Proceedings International Conference on 2007 Opto-Electronics and Communications Conference (July 2007).
- [21] Gregory, R. 1-Tb/s (10×107 Gb/s) Electronically Multiplexed Optical Signal Generation and WDM Transmission. Journal of Lightwave Technology 25 (1) (2007): 233-238.
- [22] Gnauck, A.H. 1-Tb/s (6×170.6 Gb/s) Transmission Over 2000-km NZDF Using OTDM and RZ-DPSK Format. IEEE Photonics Technology Letters 15(11) (2003): 1618-1620.
- [23] Networking Research Laboratories. Transmission of 1.6Tb/s (40×40 Gb/s) over 1,200km and three OADMs using 200-km SMF doubled-span with remotely pumped optical amplification. In Proceedings International Conference on Optical Fiber Communication Conference (February 2004).
- [24] Gupta, G.C.; Wang, L.; and Mizuhara, O. 3.2-Tb/s (40 ch × 80 Gb/s) transmission with spectral efficiency of 0.8 b/s/Hz over 21 × 100 km of dispersion-managed high local dispersion fiber using all-Raman amplified spans. IEEE Photonics Technology Letters 15(7) (2003): 996-998.
- [25] Zhu, B.; and others. 3.08 Tb/s (77 × 42.7 Gb/s) Transmission over 1200 km of Non-zero Dispersion-Shifted Fiber with 100-km Spans using C- and L-Band Distributed Raman Amplification. In Proceedings International Conference on Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (2001)
- [26] Gavioli, G.; and others. NRZ-PM-QPSK 16 × 100 Gb/s Transmission Over Installed Fiber With Different Dispersion Maps. IEEE Photonics Technology Letters 20(6) (2010): 371-373.

- [27] Mousavi, F.M.; Kikuchi, K. Performance Limit of Long-Distance WDM Dispersion-Managed Transmission System Using Higher Order Dispersion Compensation Fibers. IEEE Photonics Technology Letters 11(5) (2010): 608-610.
- [28] Xiang, Z.; and others. Transmission of 32-Tb/s Capacity Over 580 km Using RZ-Shaped PDM-8QAM Modulation Format and Cascaded Multimodulus Blind Equalization Algorithm. Journal of Lightwave Technology 26 (1) (2010): 456-465.
- [29] B. Ramamurthy, and J. P. Jue, Fibers, lasers, receivers and amplifiers. In Sivalingam, K. M. and Subramaniam, S., editors, Optical WDM Networks: Principles and Practice, chapter 2. Boston : Kluwer Academic Publishers, MA, 2000.
- [30] Keiser, G. Optical fiber communications 3rd edition, McGraw Hill, 2000.
- [31] Agrawal, GP. Nonlinear Fiber Optics 3rd edition, Academic Press, 2001.
- [32] ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-T G.691, Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical interfaces [Computer file]. 2003. Available from: <http://www.itu.int/> [2007, March 12]
- [33] Tutorial DWDM prerequisite training: Fujitsu, 2002
- [34] Mukherjee, B. Optical WDM Networks. Springer, New York, NY.
- [35] Ramamurthy, B.; Feng, H.; Datta, D.; Heritage, J.P.; and Mukherjee, B. Transparent vs. Opaque vs. Translucent Wavelength-Routed Optical Networks [online] 1999. Available from : <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1086&context=cseconfwork> [2010, September 30]
- [36] ยืน ภู่วรรณ. เครือข่ายความเร็วสูง. [ออนไลน์]. 2542. แหล่งที่มา: <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet1/network/sdh.htm> [2553, กันยายน 28]

- [37] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบุลย์, การวางแผนโครงข่าย SDH [Online]. แหล่งที่มา:
<http://www.cewmedia.com>
- [38] Rajiv, R., Kumar, N.S. Optical Network A Practical Perspective, Morgan Kaufmann, 1998.
- [39] Chinneck, J. W. Practical Optimization: a Gentle Introduction. Canada: Carleton University, 2004.
- [40] 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.
- [41] Data Sheet of PowerForm™ DCM® Modules for Single-Mode Fiber, C-Band: Avanex, 2005.
- [42] Dense Wave Division Multiplexing (DWDM) ITU Grid C-Band, 100 GHz Spacing. [online]. Available from: www.fiberdyne.com/products/itu-grid.html [2010, September 30]
- [43] International Telecommunication Union. Telecommunication Standardization Sector of ITU. [online]. 2006. Available from: <http://www.catr.cn/radar/itut/201007/P020100707601100980177.pdf> [2011, April 10]
- [44] Ing. J.G. Optical Networks and their Development. [online]. 2004. Available from: <http://www.ces.net/doc/2003/research/optnet.html> [2010, September 30]



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. Ravevun Bunprachom and Pasu Kaewplung, “ An Efficient Algorithm for Placing Dispersion-Compensating Units in Wavelength-Routed Fiber Network”, in Trends and Development in Converging Technology towards 2009 (TENCON 2009), Singapore, page 153, November 2009
2. Ravevun Bunprachom and Pasu Kaewplung, “Optimal Combination of Dispersion-Slope and Non-Dispersion-Slope Compensating Units in Long-Haul Fiber Transmission”, in The 33 rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), Chiang Mai, Thailand, page 1453-1456, December 2010.



ศูนย์วิทยพัทพยาบาล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรวีวรรณ บุญประชม เกิดวันพฤหัสบดีที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย