



246301

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน้ามัลติเพล็กซ์คัลเลอร์ที่ซับซ้อนภายใต้ประสิทธิภาพในโครงข่าย

Wavelength-Routed

นางฉาวยวีวรรณ บุญประชม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

600 250731

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246301

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขดเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีประสิทธิภาพในโครงข่าย

Wavelength-Routed

นางสาว รวีวรรณ บุญประชม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 2 7 0 6 8 7 2 2 1

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

Miss Ravevun Bunprachom

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

นางสาวรวีวรรณ บุญประชม

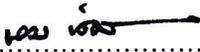
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

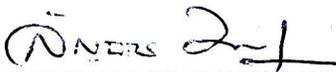
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

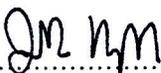

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสิริทิกุลกิจ)


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

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

246301

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 เรายังเสนอการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU ร่วมกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU

จากการทดลองใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันโดยใช้สัญญาณดีดัลเบิ้ลยูดีเอ็ม 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 สำหรับการให้ NS-DCU แต่อย่างไรก็ดีสามารถใช้ NC-DCU 46 ตัวด้วยจำนวนช่องสัญญาณส่วนหนึ่งของทั้งหมด และจำเป็นต้องใช้ SC-DCU 44 ตัวบนโครงข่ายที่ทำงานปกติและจำเป็นต้องใช้ SC-DCU 72 ตัวหรือ SC-DCU 36 ตัวและ NS-DCU 7 ตัวบนเส้นใยแสงสำรองกรณีมีข่ายเชื่อมโยงเสียหายภายในโครงข่าย ทั้งนี้ยังจำลองการสื่อสารเส้นทางที่ยาวที่สุดบน OptiSys 8.0 แสดงให้เห็นว่าด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณที่ปลายทางภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางยังคงคุณภาพเอาไว้ได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553

5270687221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

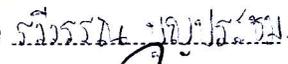
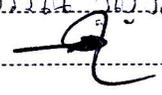
KEYWORDS : OPTICAL NETWORK / WAVELENGTH-ROUTED NETWORK / NETWORK OPTIMIZATION/ FIBER DISPERSION / DISPERSION-COMPENSATING UNIT/

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

246301

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 ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนและให้คำแนะนำมาตลอด จึงไม่มีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งเหล่านั้นได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบพระคุณตลอดไป 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)

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 โครงสร้างโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็ม.....	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 ลักษณะเมช.....	34
2.6.4 การป้องกันความเสียหายที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์.....	38
2.7 เทคนิคการแก้ไขขัดเซตดิสเพอร์ชัน.....	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 อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขัดเซตดิสเพอร์ชัน.....	47
3.1 ระบุเส้นทางส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง.....	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 การกำหนดตำแหน่งของหน่วยขัดเซตดิสเพอร์ชัน.....	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 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง	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 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง	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

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 จากการทำให้ MILP optimization.....	70
ตารางที่ 4.7 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำให้ MILP Optimization.....	71
ตารางที่ 4.8 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนและหลังจากชดเชยแล้ว จากการคำนวณแบบ Link-by-Link	76

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

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 จำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้นของ FTTH และ DSL ในประเทศญี่ปุ่น.....	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 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น.....	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 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นบนเส้นใยแสง.....	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 โครงข่ายลักษณะเมฆประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานแทนด้วยเส้นที่บ.....	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