การศึกษาระดับของการปกป้องการบริการสำหรับทราฟฟิกยูนิคาสต์ในโครงข่าย WDM

นาย กอปเทพ ไชยเสน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-17-5385-3
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF PROTECTION SERVICE GRADES FOR UNICAST TRAFFIC IN WDM NETWORKS

Mr. Kobtep Chaiyasean

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005
ISBN 974-17-5385-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาระดับของการปกป้องการบริการสำหรับทราฟฟิกยูนิคาสต์ในโครงข่าย WDM
โดย	นายกอปเทพ ไชยเสน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กอปเทพ ไชยเสน : การศึกษาระดับของการปกป้องการบริการสำหรับทราฟฟิกยูนิคาสต์ในโครงข่าย WDM (A STUDY OF PROTECTION SERVICE GRADES FOR UNICAST TRAFFIC IN WDM NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, 102 หน้า. ISBN 974-17-5385-3.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาระดับของการปกป้องการบริการสำหรับทราฟฟิกยูนิคาสต์ในโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายได้รับความเสียหาย 3 วิธี คือ วิธีการปกป้องแบบไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Protection Strategy, DJP) วิธีการปกป้องแบบมีพื้นฐานการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว (Single Link Basis Protection Strategy, SLB) และวิธีการปกป้องแบบต้นทุนต่ำที่สุด (Minimal Cost Protection Strategy, MC) โดยแบ่งระดับการปกป้องการบริการซึ่งสามารถนำมาปรับใช้ในสถานการณ์จริงออกได้เป็น 2 กรณี ได้แก่ การปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด และการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คือ Integer Linear Programming (ILP) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมให้มีค่าน้อยสุด โครงข่ายที่ใช้ทดสอบมี 2 โครงข่ายโดยผลการทดสอบแสดงถึงจำนวนของทรัพยากรในโครงข่ายที่ต้องการเพื่อแก้ไขความเสียหายให้สามารถลดลงได้เป็นสัดส่วนกับระดับการปกป้องที่ลดลง นั่นคือมีความเป็นไปได้ที่โครงข่ายจะลดความต้องการต้นทุนในการทดสอบนี้ลงได้ สำหรับวิธีการปกป้องที่แตกต่างกันก็จะมีความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนที่ลดลงและความหลากหลายของระดับการปกป้อง โดยวิธี MC จะมีต้นทุนของการปกป้องที่ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระดับการปกป้อง สำหรับอีก 2 วิธีนั้นมีการปกป้องที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่า (SLB และ DJP) ซึ่งจะไม่สร้างระดับของความสัมพันธ์เชิงเส้นที่เหมือนกับ MC แต่ทั้ง 2 วิธีก็สามารถลดต้นทุนลงได้ในหลายๆกรณี นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้บางกรณีในโครงข่าย ดังนั้นการมีอุปกรณ์แปลงผันอาจจะไม่ได้เป็นตัวตัดสินถึงต้นทุนที่ใช้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....กอปเทพ ไชยเสน.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา...2548.....

4470685921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: WDM / FIBER / WAVELENGTH CONVERTERS / PROTECTION / QoP

KOBTEP CHAIYASEAN: A STUDY OF PROTECTION SERVICE GRADES FOR UNICAST TRAFFIC IN WDM NETWORKS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 102 pp. ISBN 974-17-5385-3.

This thesis presents a study of protection service grades for unicast traffic in wavelength division multiplexed (WDM) mesh networks based on three optical path restoration strategies against all single link failures, namely Disjoint Path Protection Strategy (DJP), Single Link Basis Protection Strategy (SLB) and Minimal Cost Protection Strategy (MC). Two types of protection service grades applicable to realistic environment are introduced and extensively investigated, namely the protection of some nodes in the network and the protection of some part in the network. The mathematical models based on integer linear programming (ILP) are applied to achieve optimal routing and wavelength allocation so that the total number of fibers required is minimal. Based on two tested networks, numerical results show that the amount of network resources required to handle failures can be proportionally reduced with lower grades of protection requirements, signifying the possibility of achieving network cost-savings for practical requirement. For different protection strategies used, the relation between cost reduction and protection grades varies. With the MC strategy cost of protection appears to decrease linearly with protection requirements. The other two less effective protection schemes, i.e. SLB and DJP, do not deliver the same level of linearlity relation as the MC, but they do offer cost reduction in most cases. Finally, wavelength conversion is found useful only in certain network scenarios. Therefore the existence of conversion may not be justified with respect to cost.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical..Engineering....Student's Signature.....

Field of Study....Electrical..Engineering...Advisor's Signature.....

Academic Year...2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รศ. ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดีเสมอมา รวมทั้งการกระตุ้นเอาใจใส่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณภัทรินทร์ ลีลารัศมี คุณอนุชิต จตุรงคปัญญา คุณกนกภรณ์ วีสเพ็ญ และคุณอนุชิต มั่นจิรังกูร สำหรับคำปรึกษา กำลังใจ และความช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม ทุกท่าน โดยเฉพาะเพื่อน ๆ ในกลุ่มงานวิจัยเดียวกันที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อคิดที่ดีมาโดยตลอด ทำให้การศึกษาปริญญามหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเต็มไปด้วยคุณค่าและความหมายดี ๆ สำหรับผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกๆ ท่านในครอบครัว ของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการเงินและกำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 3

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

2 การปกป้องโครงข่าย WDM แบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนที่นำเสนอ..... 6

2.1 โครงข่าย WDM..... 6

2.2 คุณภาพของการให้บริการในการปกป้องโครงข่าย..... 8

2.3 การปกป้องโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายตามคุณภาพของการให้บริการ..... 9

2.3.1 วิธีการปกป้องแบบไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Protection Strategy, DJP)..... 10

2.3.2 วิธีการปกป้องแบบมีพื้นฐานการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว (Single Link Basis Protection Strategy, SLB)..... 12

2.3.3 วิธีการปกป้องแบบต้นทุนต่ำที่สุด (Minimal Cost Protection Strategy, MC)..... 16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่			หน้า
3	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน		19
	3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network Model).....		19
	3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ.....		20
		3.2.1 การจำลองปัญหาด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment.....	21
		3.2.1.1 ระบบ VWP.....	22
		3.2.1.2 ระบบ WP.....	23
		3.2.2 การจำลองปัญหาด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	25
		3.2.2.1 ระบบ VWP	25
		3.2.2.2 ระบบ WP	26
4	การทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....		29
	4.1 ข้อกำหนดการทดสอบ.....		29
	4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....		30
		4.2.1 การเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ.....	30
		4.2.2 การเปรียบเทียบในเชิงเวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลอง	64
		4.2.3 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ.....	78
		4.2.4 การเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนของโครงข่าย.....	83
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....		89
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....		89
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....		92
รายการอ้างอิง.....			93
ภาคผนวก.....			96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....			102

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 30

ตารางที่ 4.2 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 31

ตารางที่ 4.3 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 32

ตารางที่ 4.4 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 33

ตารางที่ 4.5 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 35

ตารางที่ 4.6 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 36

ตารางที่ 4.7 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 37

ตารางที่ 4.8 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 38

ตารางที่ 4.9 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 40

หน้า

ตารางที่ 4.10 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 41
ตารางที่ 4.11 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 42
ตารางที่ 4.12 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 43
ตารางที่ 4.13 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 45
ตารางที่ 4.14 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 46
ตารางที่ 4.15 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 47
ตารางที่ 4.16 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 48
ตารางที่ 4.17 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 50
ตารางที่ 4.18 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 51
ตารางที่ 4.19 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 52

หน้า

ตารางที่ 4.20 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 53
ตารางที่ 4.21 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 55
ตารางที่ 4.22 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 56
ตารางที่ 4.23 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 57
ตารางที่ 4.24 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP..... 58
ตารางที่ 4.25 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 65
ตารางที่ 4.26 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 67
ตารางที่ 4.27 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 69
ตารางที่ 4.28 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 72
ตารางที่ 4.29 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 74

หน้า

ตารางที่ 4.30 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP 76

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	7
รูปที่ 2.2	ประเภทของโครงข่าย WDM.....	8
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ DJP.....	11
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ DJP แบบบางคู่โนด.....	11
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ DJP แบบบางส่วน.....	12
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ SLB.....	13
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ SLB แบบบางคู่โนด.....	14
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ SLB แบบบางส่วน.....	15
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ MC.....	16
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ MC แบบบางคู่โนด.....	17
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ MC แบบบางส่วน.....	17
รูปที่ 4.1	โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 5N_7L (ข) โครงข่าย 7N_13L....	28
รูปที่ 4.2	จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC.....	60
รูปที่ 4.3	จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC.....	61
รูปที่ 4.4	จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC.....	62
รูปที่ 4.5	จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC.....	63
รูปที่ 4.6	จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ VWP (WP/VWP fiber ratio) (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4.....	79

หน้า

รูปที่ 4.7 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ VWP (WP/VWP fiber ratio) (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4..... 81

รูปที่ 4.8 ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4..... 83

รูปที่ 4.9 ต้นทุนของโครงข่าย 7N_13L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4..... 85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านการสื่อสารในช่วงหลายปีที่ผ่านมานั้น การสื่อสารทางอินเทอร์เน็ตได้กลายเป็นเทคโนโลยีสารสนเทศที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการสื่อสารแบบไร้พรมแดนในปัจจุบัน และเพื่อตอบสนองความต้องการในการบริโภคข่าวสารข้อมูลของผู้ใช้จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตรูปแบบต่าง ๆ ขึ้น ตัวอย่างการให้บริการที่มีในปัจจุบัน ได้แก่ การให้บริการ e-commerce การประชุมทางไกล (teleconference) การศึกษาผ่านอินเทอร์เน็ต (e-learning) การส่งข้อมูลวิดีโอไปยังผู้รับที่ร้องขอ (video-on-demand) การถ่ายทอดสดทางอินเทอร์เน็ต และเกมส์ออนไลน์ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบการให้บริการดังกล่าวนี้ ได้เริ่มมีบทบาทที่สำคัญมากขึ้นเพราะสะดวกรวดเร็วทั้งในเชิงธุรกิจข่าวสารการศึกษา และการใช้ชีวิตประจำวันในปัจจุบัน และคาดว่าจะมีการตอบสนองจากผู้ใช้บริการเป็นจำนวนมากในอนาคต การรองรับบริการดังกล่าวโครงข่ายที่ใช้จะต้องมีช่องทางการสื่อสาร (channel) หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่กว้างมากพอเพื่อที่จะสามารถรองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณและความเร็วในการส่งที่สูงขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยีมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing, TDM) และเทคโนโลยีมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing, FDM) ทั้งสองแบบนี้มักจะใช้สายทองแดง (Copper cable) เป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลเพื่อเชื่อมต่อการส่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องของแบนด์วิดท์ในการใช้ช่องสัญญาณจึงเกิดการสูญหายของข้อมูลได้ เช่น การเชื่อมต่อโครงข่ายอินเทอร์เน็ตโดยใช้โมเด็มจะใช้สายโทรศัพท์ในการเชื่อมต่อ จึงถูกจำกัดด้วยแบนด์วิดท์ทำให้สามารถเชื่อมต่อได้ด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 8 Mbps เมื่อใช้โมเด็มแบบ ADSL กรณีที่มีผู้ใช้จำนวนมากเชื่อมต่อโมเด็มพร้อม ๆ กัน อาจส่งผลให้เกิดปัญหาคอขวด (Bottleneck) ได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยีมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่นแสง (wavelength division multiplexing, WDM) [1-5] เข้ามาใช้ในการติดต่อสื่อสารแทน โดยมีตัวกลางในการส่งข้อมูลคือ เส้นใยนำแสง (optical fiber) โดยระบบมัลติเพลกซ์มีจุดเด่นตรงที่สามารถเข้าใช้ประโยชน์ของแบนด์วิดท์ของเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถรองรับการส่งข้อมูลหลายประเภทพร้อม ๆ กันได้ เช่น ข้อมูลภาพหรือเสียง และยังสามารถรองรับการส่งข้อมูลที่ต้องการความเร็วสูงผ่านโครงข่ายความเร็วสูง

(hi-speed network) ถึงระดับ Tb/s ซึ่งไม่เหมาะกับเทคโนโลยี TDM และ FDM ที่ใช้สายทองแดงเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล จึงอาจทำให้เกิดการสูญหาย (loss) ของข้อมูลอันเกิดจากตัวกลางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลทำให้ปลายทางรับข้อมูลได้รับข้อมูลผิดพลาดหรือไม่สมบูรณ์ แต่เทคโนโลยี WDM จะใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวกลาง ซึ่งมีลักษณะการส่งข้อมูลต้นทางกับปลายทางโดยใช้สัญญาณแสง (optical signal) จึงทำให้การรับส่งข้อมูลนั้นเกิดความผิดพลาดน้อยมาก รวมทั้งการส่งผ่านเส้นใยนำแสงก็ยังสามารถป้องกันการลักลอบขโมยข้อมูล (Tapping) ได้อย่างดี เพราะการส่งข้อมูลนั้นใช้แสงเป็นตัวส่งข้อมูล [6-8]

เนื่องจาก โครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายความเร็วสูง ดังนั้น ปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นกับโครงข่าย WDM คือ การที่บางส่วนของโครงข่ายเกิดความเสียหาย เช่น การเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย (link failure) หรือเกิดความเสียหายที่โนดของโครงข่าย (node failure) จากความเสียหายที่ได้กล่าวมานั้นจึงเป็นสาเหตุให้ ข้อมูลที่ส่งผ่านโครงข่ายเกิดการสูญหาย (loss) และส่งผลกับผู้ใช้บริการโครงข่ายเป็นจำนวนมากรวมทั้งอาจจะหมายถึงรายได้อันมหาศาล จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการที่บางส่วนของโครงข่ายได้รับความเสียหาย โดยวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น จากการจัดสรรเส้นทางสำรองแทนเส้นทางปกติซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงกว่าโครงข่ายที่ไม่มีการจัดสรรเส้นทางสำรองค่อนข้างมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีแนวคิดที่ว่าควรจะมีการแบ่งระดับการปกป้องโครงข่ายเพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่า ซึ่งจะศึกษาเฉพาะวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (single link failure) เท่านั้น เพราะปัญหานี้มักจะเกิดขึ้นบ่อยที่สุด โดยวิธีการที่ได้นำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย คือ การจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับโครงข่าย (path restoration technique) กล่าวคือ เมื่อข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ เส้นทางของโครงข่ายซึ่งวิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะต้องมีการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเรื่องการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย [9-12] นั้น พบว่าส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาเพื่อหาเฉพาะจำนวนความยาวคลื่นต่ำที่สุดที่โครงข่ายต้องการ โดยมีข้อกำหนดว่าในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะมีเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวเท่านั้น นอกจากนั้นในบางงานวิจัยก็ได้มีการแก้ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยการซ่อมแซมความเสียหายจากชั้นไอพี (IP layer) ลงบนชั้น WDM (WDM layer) [13-15] ซึ่งวิธีแบบนี้จะทำให้สามารถจัดการบริหารระบบโครงข่ายได้ง่ายขึ้น ส่วนงานวิจัยอื่นๆที่น่าสนใจ พบว่าหลายงานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพการให้บริการ [16-20] ซึ่งส่วนใหญ่จะคำนึงถึงค่าหน่วงเวลาเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ในบางงานวิจัยก็ศึกษาคุณภาพการให้บริการแบบใครมาก่อนก็ได้การบริการไปโดยเป็นการจัดสรรเส้นทางโดยไม่ได้คำนึงถึงการปกป้องโครงข่าย [18] จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษา

มานั้นเมื่อนำมาพิจารณาก็พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่อาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากข้อกำหนดที่ว่าจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วมีจำนวนเท่าใดก็ได้ไม่จำกัดซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติเพราะในความเป็นจริงแล้วจำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยนำแสงก็ยังมีอยู่อย่างจำกัด และการปกป้องนั้นก็จะมีการใช้งานเพียงชั่วคราวเมื่อแก้ไขข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายแล้วก็จะไม่มีการใช้งานอีก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดในการปกป้องโครงข่ายแบบมีระดับเพื่อใช้งานชั่วคราว ซึ่งระดับการปกป้องนั้นจะถูกเรียกว่า คุณภาพของการปกป้อง (Quality of Protection, QoP) [16] วิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาถึงวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายแบบมีระดับการปกป้อง 2 กรณี คือ กรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดซึ่งเหมาะสำหรับโครงข่ายที่มีการคิดค่าบริการใช้โครงข่ายเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น เช่น ผู้ที่จ่ายค่าใช้บริการพิเศษโครงข่ายย่อมได้รับการปกป้องข้อมูลที่ส่งผ่านในโครงข่ายเมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหาย ส่วนอีกกรณีคือการปกป้องแบบบางส่วน ซึ่งเหมาะสำหรับการส่งข้อมูลที่มีคุณภาพของสัญญาณที่แตกต่างกัน เช่น ในเวลาปกติการรับชมโทรทัศน์ผ่านทางอินเทอร์เน็ตจะให้ความเร็ว 256 Kb/s แต่เมื่อเกิดความเสียหายจะเปลี่ยนไปใช้ความเร็วเพียง 56 Kb/s จึงทำให้ต้นทุนหรือจำนวนเส้นใยนำแสงในการวางระบบลดลง

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM ที่คำนึงถึงระดับของการปกป้องการบริการโดยพิจารณาในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายแล้วด้วยวิธีบนพื้นฐานการจัดสรรเส้นทางใหม่ คือ วิธีการปกป้องแบบไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Protection Strategy) วิธีการปกป้องแบบมีพื้นฐานการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว (Single Link Basis Protection Strategy) และวิธีการปกป้องแบบต้นทุนต่ำที่สุด (Minimal Cost Protection Strategy) โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน ซึ่งจะเปรียบเทียบถึงจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดลงไปในแต่ละวิธีโดยพิจารณาทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematics model) ที่ใช้ Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาว

คลื่น ด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบต่าง ๆ โดยในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดนั้น สามารถประกันคุณภาพการให้บริการกับสมาชิกที่ได้จ่ายค่าบริการเพิ่มเติม คือ เมื่อเกิดปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายแล้วสมาชิกนั้นก็จะได้รับการแก้ไขความเสียหาย และในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นก็ยังคงให้บริการแก่สมาชิกทั้งหมดเมื่อเกิดความเสียหายแต่คุณภาพอาจลดลงไปบ้าง

2. ศึกษาข้อดีและข้อเสียในแง่ของต้นทุนและทรัพยากรที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย จากกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย ทำการศึกษาและเปรียบเทียบในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น รวมทั้งพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดลงไปด้วย

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
   1.1) ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี WDM
   1.2) ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
   1.3) ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของการให้บริการและคุณภาพของการปกป้อง
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM กรณีที่โครงข่ายมีการปกป้องโครงข่ายจากกรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายตามคุณภาพของการให้บริการทั้งการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน
   2.1) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายแบบมีระดับการปกป้องจากความเสียหายกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
   2.2) ทดสอบหาผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่ได้เสนอไว้ในข้อ 2.1 ว่าให้ผลเฉลยที่ถูกต้องหรือไม่ เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สามารถหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้อย่างถูกต้อง
   2.3) ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายและทราฟฟิกหลาย ๆ รูปแบบ และทำการวิเคราะห์ผล

3. เปรียบเทียบระหว่างต้นทุนของโครงข่ายที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างมีคุณภาพของการให้บริการ แบบปกป้องได้ทั้งหมด และแบบที่ไม่มีการปกป้อง
4. รวบรวมและสรุปผลการวิจัย เพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematics model) ที่ใช้ Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองในการจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบต่าง ๆ โดยในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดนั้นสามารถประกันคุณภาพการให้บริการกับสมาชิกที่ได้จ่ายค่าบริการเพิ่มเติม คือ เมื่อเกิดปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายแล้วสมาชิกนั้นก็จะได้รับการแก้ไขความเสียหาย และในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นก็ยังคงให้บริการแก่สมาชิกทั้งหมดเมื่อเกิดความเสียหายแต่คุณภาพอาจลดลงไปบ้าง ทำให้ทราบถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบวิธีการปกป้องโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายได้ตามคุณภาพของการให้บริการ
2. ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

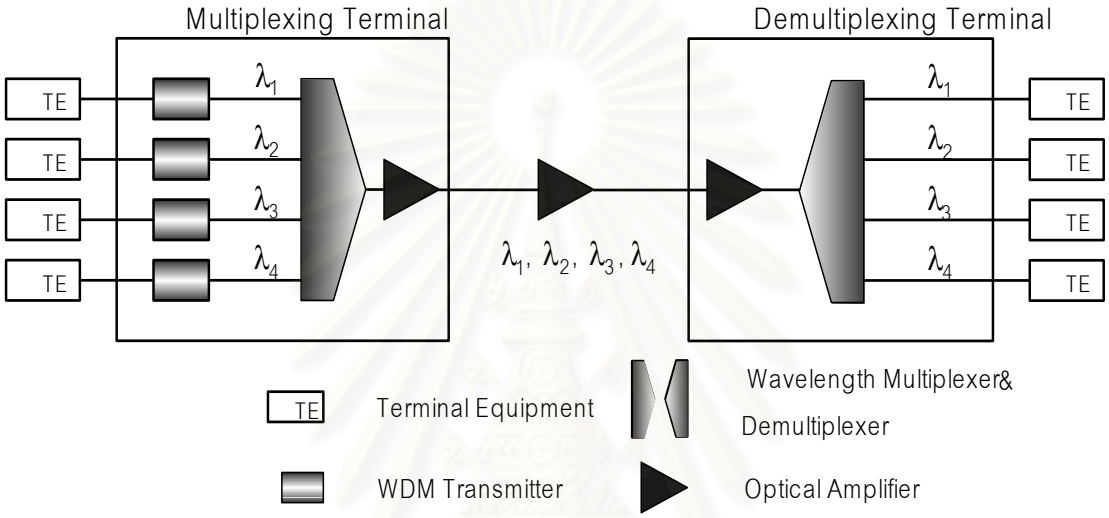
การปกป้องโครงข่าย WDM แบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนที่นำเสนอ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM การพิจารณาค่าต้นทุนของโครงข่ายจากจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่าย และการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายที่เกิดขึ้นในกรณีแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน โดยจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานโดยทั่วไปที่เป็นความรู้เบื้องต้นในการออกแบบโครงข่ายอันประกอบไปด้วยลักษณะและโครงสร้างของโครงข่าย WDM รายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ และการจัดสรรเส้นทางการรับส่งข้อมูลให้กับทราฟฟิกภายในโครงข่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายเชิงแสงดังนั้นแต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรภายในโครงข่ายจะต้องได้รับการจัดสรรค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ แต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรจะต้องสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายโดยคำนึงถึงระดับการปกป้องด้วย

2.1 โครงข่าย WDM

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM ประกอบด้วย โนด (node) และข่ายเชื่อมโยง (link) โดยข่ายเชื่อมโยงจะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างโนดของโครงข่าย และเป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลภายในโครงข่าย อุปกรณ์ภายในโนดของโครงข่ายจะประกอบไปด้วย Wavelength Multiplexer (WM), Wavelength Demultiplexer (WD) และ Optical Switch ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำหนดเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโนดของโครงข่ายจะเรียกรวมกันว่า Optical Cross Connect (OXCs) [10] นอกจากนี้ ในบางโครงข่าย OXCs อาจจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter, WC) เพื่อทำหน้าที่แปลงผันค่าความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณสื่อสารที่วิ่งผ่านโนดของโครงข่าย ระบบของการส่งข้อมูลโดยอาศัยการมัลติเพลกซ์สัญญาณแบบ WDM จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ในภาคส่งของระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงและเครื่องส่งสัญญาณ (WDM Transmitter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ให้เป็นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่น จากนั้นสัญญาณแสงจะถูกมัลติเพลกซ์ให้เป็นลำแสงเดียวกันโดยอาศัยตัวมัลติเพลกซ์ (Wavelength Multiplexer) สัญญาณที่ถูกมัลติเพลกซ์นี้จะถูกส่งไปใน

เส้นใยนำแสง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการลดทอนของสัญญาณในการส่งข้อมูลระยะทางไกล สัญญาณที่ถูกส่งไปอาจจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ในระหว่างที่ทำการส่งสัญญาณ ส่วนที่ภาครับของระบบจะประกอบด้วยตัวดีมัลติเพลกซ์ (Wavelength Demultiplexer) ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงเป็นสัญญาณแต่ละความยาวคลื่น ก่อนที่จะแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ดังเดิม นอกจากนี้เพื่อเป็นการป้องกันการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณที่ถูกมัลติเพลกซ์รวมกันเพื่อส่งผ่านไปในสายส่งเส้นเดียวกัน แต่ละช่องสัญญาณจะต้องมีค่าความยาวคลื่นของสัญญาณแสงแตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น [10]

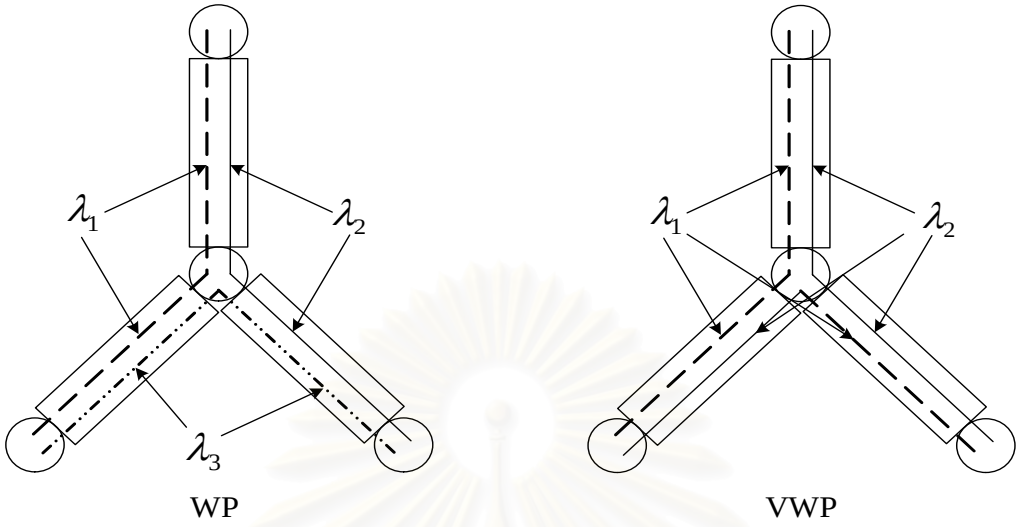
จากที่ได้กล่าวมา ในการติดต่อสื่อสารภายในโครงข่าย WDM โครงข่ายนั้นจะต้องมีการกำหนดเส้นทางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทางของโครงข่ายที่ต้องการติดต่อสื่อสาร รวมทั้งจะต้องกำหนดให้ค่าความยาวคลื่นแก่เส้นทางที่ใช้เชื่อมต่อนั้นด้วย ซึ่งในโครงข่าย WDM จะเรียกเส้นทางที่โครงข่ายกำหนดนี้ว่า lightpath เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ติดต่อสื่อสารกันในโครงข่ายนั้นจะเป็นสัญญาณแสง

นอกจากนี้ในการออกแบบวิธีปกป้องโครงข่าย WDM ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายด้วย โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้แก่โครงข่าย แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

1. Wavelength Path (WP) หมายถึง ตลอดเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างโนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่ายจะกำหนดค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังนั้น โครงข่ายประเภทนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs

2. Virtual Wavelength Path (VWP) หมายถึง เส้นทางที่เชื่อมต่อโนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่ายสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้เมื่อเส้นทางวิ่งผ่านโนดในโครงข่ายดังนั้น

โครงข่ายประเภทนี้จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs เพื่อใช้เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางในโครงข่าย



รูปที่ 2.2 ประเภทของโครงข่าย WDM

2.2 คุณภาพของการให้บริการในการปกป้องโครงข่าย

โดยทั่วไปในการออกแบบการปกป้องโครงข่ายนั้น ส่วนมากมักจะคำนึงถึงการปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมด ซึ่งการปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมดนั้นจะมีต้นทุนในการปกป้องที่สูงดังนั้นการปกป้องในปัจจุบันนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะมีการปกป้องโครงข่ายโดยคำนึงถึงคุณภาพของการให้บริการในการปกป้องโครงข่ายเพื่อลดต้นทุนในการวางโครงข่ายและเป็นการใช้ทรัพยากรในโครงข่ายอย่างคุ้มค่ามากที่สุด โดยประเภทของการปกป้องที่ได้พิจารณาทั้งในโครงข่าย ATM และในโครงข่ายนำแสง ซึ่งก็มีรูปแบบของคุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service, QoS) หรืออาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความน่าเชื่อถือของการให้บริการ (Reliability of Service, RoS) [20] แบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. Guaranteed protection จะแก้ไขความเสียหายที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมต่อให้มากที่สุด (ประมาณ 99.999 %)

2. Best effort protection จะแก้ไขความเสียหายที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมต่อตามคุณภาพของการให้บริการ

3. Unprotected traffic จะไม่แก้ไขความเสียหายที่เกิดขึ้น

4. Preemptable traffic จะทำการปกป้องความเสียหายโดยจองช่องสัญญาณไว้ก่อนบางส่วนพร้อมกับช่องสัญญาณปกติ ซึ่งจะเรียกได้อีกชื่อหนึ่งในโครงข่าย SONET ว่า extra traffic

จากรูปแบบคุณภาพของการให้บริการนั้นแบบ best effort protection นั้นจะให้บริการหรือไม่นั้นขึ้นรูปแบบของการใช้งานที่แตกต่างกันไปในชั้นนำแสง (optical layer) ซึ่งก็จะคู่กันกับการปกป้องที่แตกต่างกัน [17] แตกต่างจากแบบ preemptable traffic ที่ถูกกำหนดเส้นทางแล้วอย่างมีระบบ

เมื่อนำรูปแบบของประเภทของการให้บริการข้างต้นมาจัดเป็นระดับของการปกป้องแล้วจะได้ว่าระดับของการปกป้องนั้นจะถูกเรียกเป็นคุณภาพของการปกป้อง (Quality of Protection, QoP) ในแต่ละการเชื่อมต่อเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นแล้วความน่าจะเป็นของการเชื่อมต่อเพื่อที่จะหาทางแก้ไขได้ถูกกำหนดเป็น QoP [16]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำการพิจารณาเพียง 3 รูปแบบไปใช้กับวิธีการปกป้องที่เหมาะสมเท่านั้น โดยรูปแบบ Guaranteed protection ใช้กับกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการปกป้องโครงข่ายแบบไม่ทั้งหมด สำหรับรูปแบบ Best effort protection ใช้กับกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบไม่ทั้งหมดซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่การปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน ซึ่งรายละเอียดของแต่ละกรณีจะกล่าวไว้ในส่วนต่อไป ส่วนรูปแบบ Unprotected traffic จะใช้กับกรณีที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายเพื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของต้นทุนโครงข่าย

2.3 การปกป้องโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายตามคุณภาพของการให้บริการ

ในการศึกษาเพื่อออกแบบวิธีปกป้องโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายที่ได้รับการออกแบบมีความน่าเชื่อถือ โครงข่ายที่ถูกออกแบบปกป้องจะต้องมีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์บางส่วนของโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ตามคุณภาพการให้บริการ มาตรการหนึ่งที่ใช้ปกป้องความเสียหายของโครงข่าย (Protection) คือ การเผื่อความจุสำรอง (Spare Capacity) เพื่อใช้ในการรองรับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจากความเสียหาย ความเสียหายที่พบได้บ่อยและมีความซับซ้อนในการปกป้องความเสียหายไม่สูงมาก คือ ความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Single-link Failure) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกเส้นทางที่ถูกจัดสรรขึ้นมาใหม่เพื่อปกป้องความเสียหายว่าเส้นทางสำรอง (restoration path) จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวิธีปกป้องโครงข่าย WDM ที่มีการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความเสียหายในโครงข่ายที่เป็นการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับยูนิคาสต์ทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจากความเสียหายที่เกิดในโครงข่าย เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่จะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ [11] ตามลักษณะการเลือกเส้นทางที่เป็นเส้นทางสำรอง (restoration path) ให้กับเส้นทางที่ถูกรบกวนจากข่ายเชื่อมโยงที่ขาด

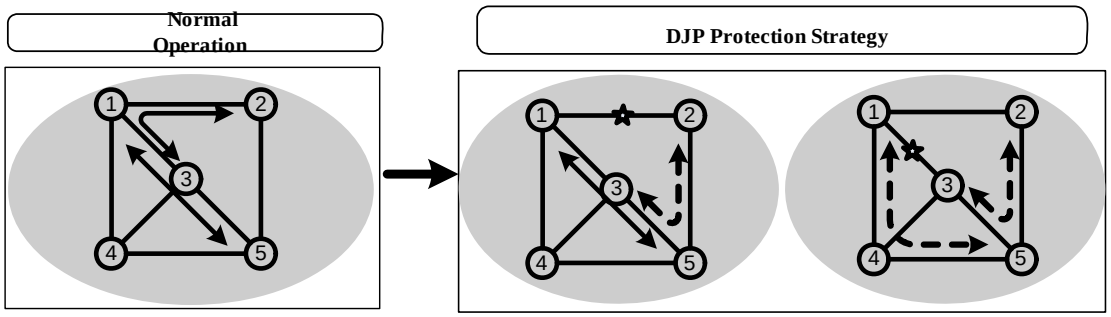
ได้แก่ Path restoration approach (PR) และ Link restoration approach (LR) การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วย PR เทคนิคนั้นเส้นทางที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะมีการจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างโนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่าย ส่วนการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วย LR เทคนิคนั้นเส้นทางที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะมีการจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างโนดทั้ง 2 ด้านของข่ายเชื่อมโยงที่ขาด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาระดับของการปกป้องการบริการด้วยวิธีการปกป้องเพื่อจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแบบต่างๆ ซึ่งวิธีปกป้องตามคุณภาพของการให้บริการที่เลือกมานั้นมีพื้นฐานมาจากวิธีการปกป้องทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ที่ปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมด โดยวิธีที่เลือกมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ PR เทคนิคแบบใช้ทรัพยากรในการปกป้องร่วมกันได้ (Shared Backup) เนื่องจากหลายวิธีที่ใช้เทคนิคนี้จากงานวิจัยต่างๆนั้นระบุว่าสามารถลดต้นทุนได้มากที่สุด ดังนั้นจึงได้นำมาประยุกต์ใช้งานทั้งหมด 3 วิธี ดังนี้

2.3.1 วิธีการปกป้องแบบไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Protection Strategy, DJP)

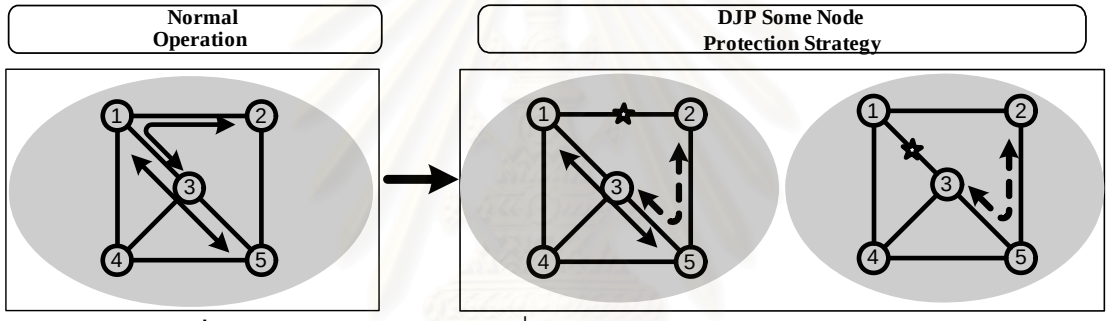
หลักเกณฑ์ของวิธี DJP [22] คือ ต้องการจัดเรียงเส้นทางใหม่เฉพาะเส้นทางที่ถูกขัดจังหวะจากความเสียหาย โดยวิธี DJP นั้นจะมีเส้นทางปกติและเส้นทางที่แก้ไขความเสียหายต้องถูกเลือกให้ไม่ซ้ำกัน ซึ่งหมายความว่าโครงข่ายต้องเลือกเส้นทางแก้ไขความเสียหายที่ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงเส้นใยนำแสงที่สัมพันธ์กับเส้นทางที่ใช้งานปกติ จากข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ไม่ทับกันนั้นแสดงว่าวิธี DJP มีเพียง 1 เส้นทางเท่านั้นที่ใช้แก้ไขข่ายเชื่อมโยงสำหรับแต่ละเส้นทางที่ใช้งานปกติ โดยยอมให้ปกป้องเส้นทางจากความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายได้ทุกกรณีไม่ว่าข่ายเชื่อมโยงจะขาดที่ตำแหน่งใดของเส้นทางปกติทั้งหมด ดังนั้นการปกป้องแบบ DJP เป็นระบบของเส้นทางที่ใช้งานปกติต่อเส้นทางของการปกป้องความเสียหายหนึ่งเส้นทาง หรือ ระบบ 1:1

ในลักษณะเดียวกันนี้ วิธี DJP สามารถที่จะเลือกใช้การต่อต้านความเสียหายของโนดได้ โดยโครงข่ายนั้นจะเลือกเส้นทางที่ใช้งานปกติและเส้นทางสำรองที่ใช้แก้ไขความเสียหายที่ไม่ใช่โนดเดียวกัน รูปที่ 2.3 นั้นแสดงถึงโครงข่ายที่มีการใช้วิธี DJP เป็นตัวอย่างให้ดูที่คู่โนด 2-3 เป็นหลักซึ่งแสดงถึงเส้นทางของโครงข่ายที่มีเส้นทางการแก้ไขความเสียหายของคู่โนด 2-3 เพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น คือเส้นทาง 2-5-3 ซึ่งไม่ซ้อนทับกับเส้นทาง 2-1-3



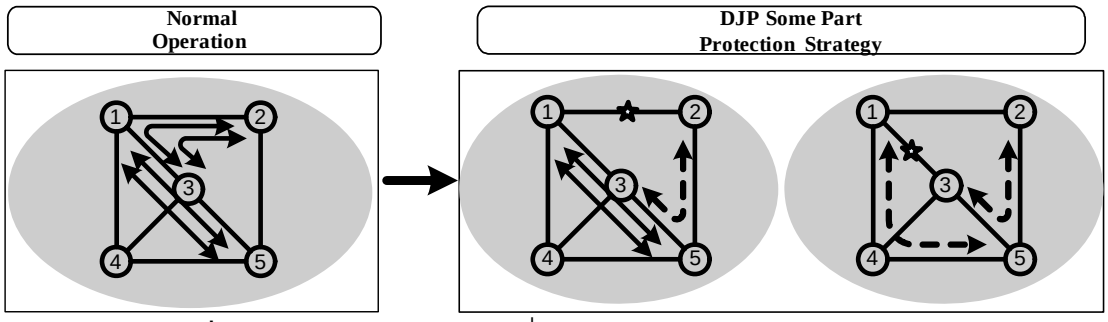
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ DJP

จากการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี DJP ที่ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.3 เป็นการปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมดทุกคู่โนด ซึ่งจะต้องใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการปกป้องสูงมาก ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาเพื่อลดต้นทุนของโครงข่ายออกเป็น 2 กรณีดังนี้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ DJP แบบบางคู่โนด

กรณีการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี DJP แบบบางคู่โนดนั้นจะต้องมีการเลือกคู่โนดที่จะปกป้องตามการจ่ายค่าบริการเพิ่มเติม แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.4 คู่โนดที่จะปกป้องคือคู่โนด 2-3 ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นไม่ว่าข่ายเชื่อมโยงใดเชื่อมโยงหนึ่งที่กระทบกับคู่โนด 2-3 ก็จะได้รับการปกป้องเสมอดังรูป โดยมีเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้นที่ใช้ในการปกป้องคู่โนดไม่ว่าจะเกิดความเสียหายใดที่กระทบกับคู่โนด 2-3 แต่คู่โนดอื่นๆที่ไม่ได้จ่ายค่าบริการเพิ่มเติมเพื่อปกป้องนั้น ถ้าไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็ยังสามารถใช้โครงข่ายได้อยู่ แต่ถ้าได้รับผลกระทบก็จะไม่สามารถใช้บริการได้จนกว่าโครงข่ายจะซ่อมแซมข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเสร็จ



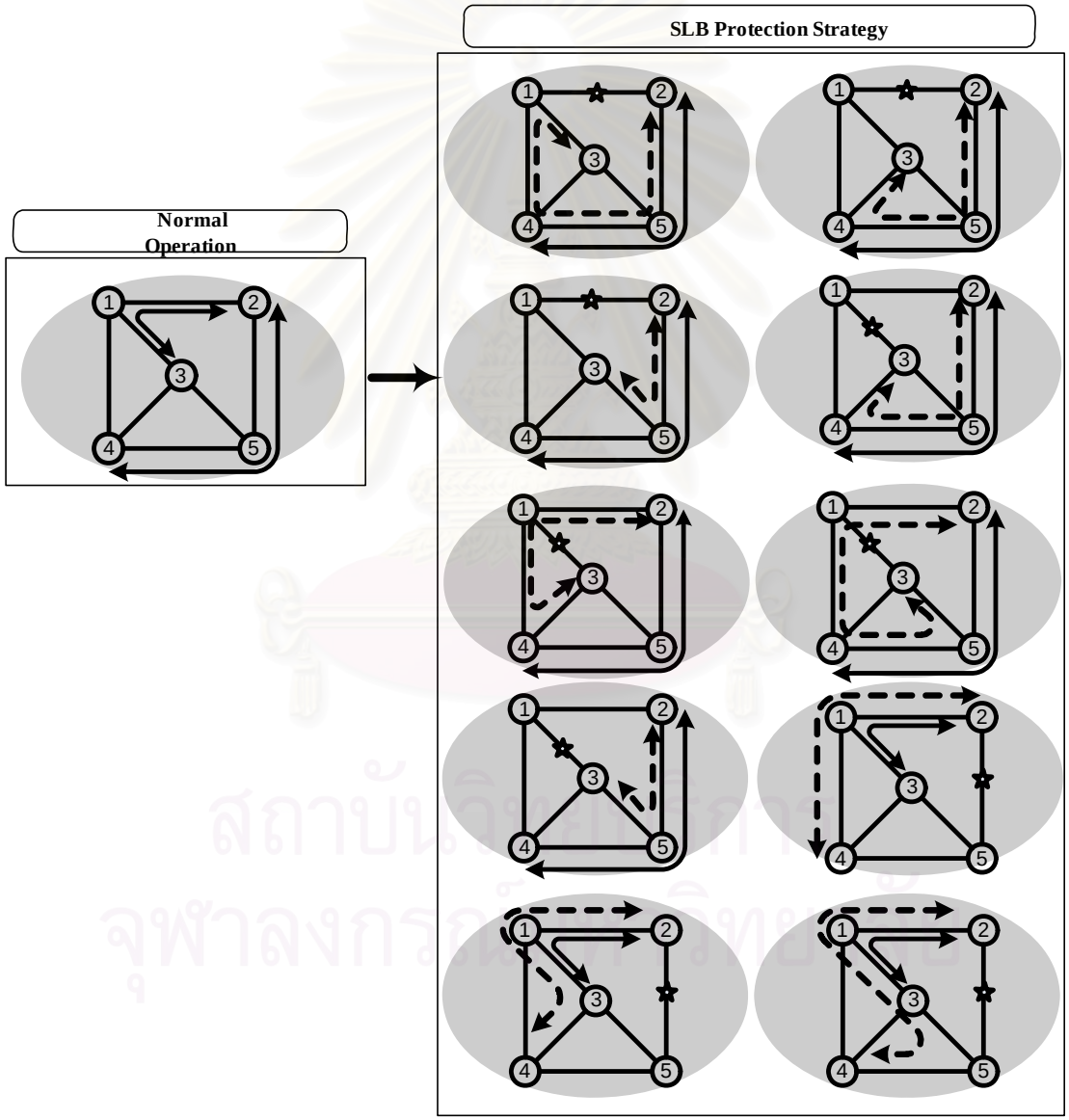
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ DJP แบบบางส่วน

กรณีการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี DJP แบบบางส่วนนั้นจะต้องมีการกำหนดระดับการให้บริการแก่โครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นซึ่งทุกคู่โนดก็จะได้รับบริการที่เท่าเทียมกันเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นโดยมีเพียงแค่เส้นทางเดียวเท่านั้นที่ใช้ในการปกป้องความเสียหายที่เกิดขึ้นของเส้นทางทำงานปกติในแต่ละคู่โนด แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.5 ในสภาพการใช้งานปกตินั้นทุกคู่โนดจะมีการใช้ทราฟฟิกอย่างละ 2 ช่องสัญญาณ แต่เมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นระดับการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนก็จะถูกนำมาใช้งานซึ่งในตัวอย่างนี้จะกำหนดให้มีการปกป้องโครงข่ายแบบ 50 % ดังนั้นทุกคู่โนดที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็จะได้รับการให้บริการความเร็วเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของการให้บริการในสภาพการใช้งานปกติ คือ 1 ช่องสัญญาณแต่ถ้าไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็ยังสามารถใช้เส้นทางทำงานปกตินั้นได้ตามเดิมดังรูป และถ้าช่องสัญญาณที่เชื่อมต่อคู่โนดมีจำนวนมากเช่นมีจำนวน 4 ช่องสัญญาณเมื่อทำการปกป้องโครงข่ายแบบ 50 % เมื่อเกิดความเสียหายต่อคู่โนดใดก็จะต้องทำการเลือกเส้นทางที่จะปกป้องด้วยซึ่งเส้นทางที่จะทำการปกป้องนั้นต้องเลือกจากเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นต้นไปในสภาพการใช้งานปกติจำนวน 2 ช่องสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับเพราะเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นแต่ไม่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางที่ใช้งานปกติในเส้นทางที่สั้นก็จะสามารถใช้เส้นทางนั้นได้ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับมีคุณภาพที่ดีเพราะไม่ต้องส่งข้อมูลในระยะทางที่ไกล แต่ถ้าเกิดความเสียหายแก่เส้นทางที่ใช้งานปกติก็จะทำการหาเส้นทางของคู่โนดนั้นใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของสัญญาณอีกระดับหนึ่ง วิทยานิพนธ์นี้ก็ได้กำหนดให้เส้นทางที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่ายจะมีความยาวไม่เกินครึ่งหนึ่งของข่ายเชื่อมโยงที่มีในโครงข่าย

2.3.2 **วิธีการปกป้องแบบมีพื้นฐานการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว** (Single Link Basis Protection Strategy, SLB)

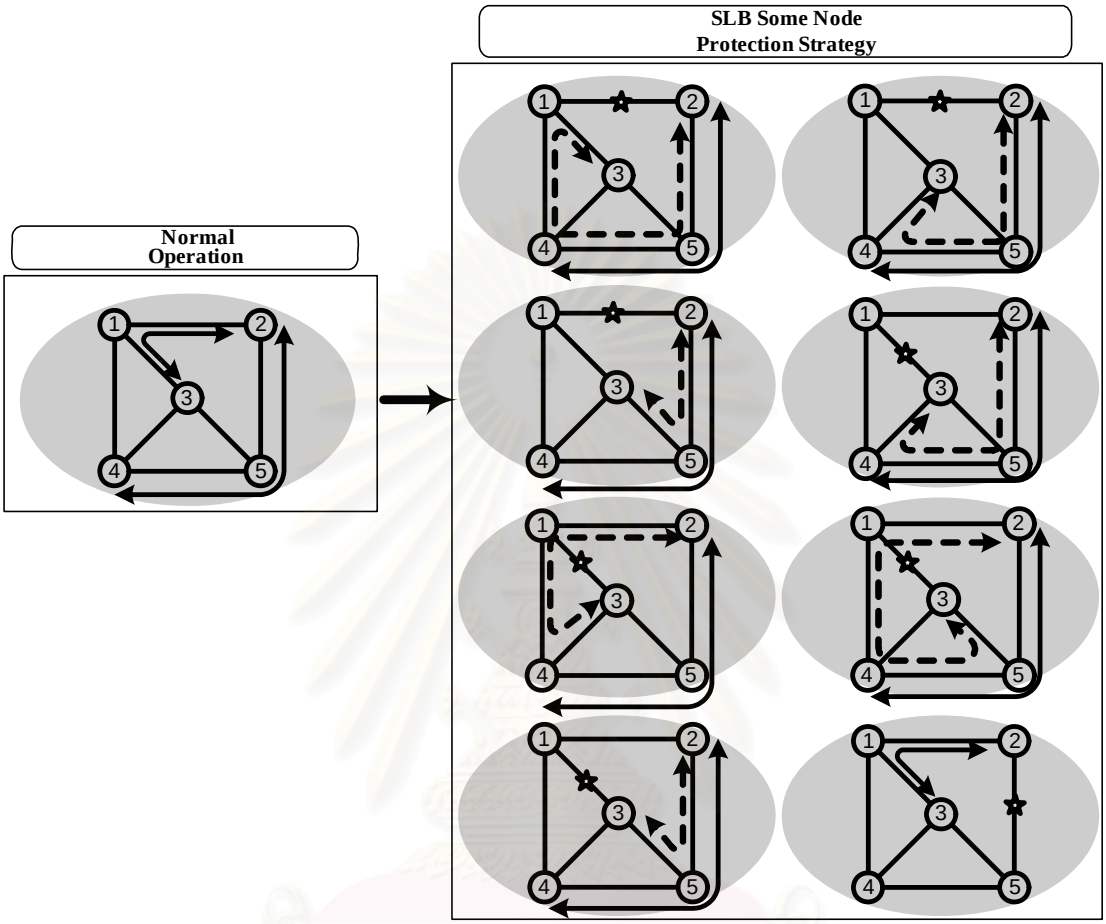
วิธี SLB นี้มีความคล้ายคลึงกับวิธี DJP [22] คือ เมื่อเกิดมีความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงขึ้นแล้ว โครงข่ายที่ใช้วิธี SLB จะหาเส้นทางใหม่เพียงแค่เส้นทางที่ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย

เท่านั้น แต่เส้นทางใหม่นั้นไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับเส้นทางเดิมซึ่งแตกต่างจากวิธี DJP ขณะที่เส้นทางอื่นๆ ที่ไม่ถูกรบกวนก็จะไม่ถูกจัดเส้นทางใหม่ นอกจากนี้วิธี SLB นั้นมีคุณสมบัติว่าแต่ละเส้นทางสามารถมีเส้นทางแก้ไขความเสียหายที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ข่ายเชื่อมโยงนั้นเสียหาย รูปที่ 2.6 แสดงถึงวิธีปกป้องแบบ SLB ของคู่โนด 2-3 ในทุกข่ายเชื่อมโยงที่ 2-3 ได้ใช้งาน วิธีนี้เมื่อเทียบกับวิธี DJP จะเห็นว่าต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับวิธี SLB น้อยกว่าวิธี DJP อันเนื่องมาจากวิธี SLB มีความยืดหยุ่นในการจัดสรรเส้นทางสูงกว่าวิธี DJP นอกจากนี้ก็ยังได้พิจารณาเมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 2-5 ขาดด้วยเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับการปกป้องกับกรณีที่ปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนว่าจะมีผลกระทบที่แตกต่างกันอย่างไร



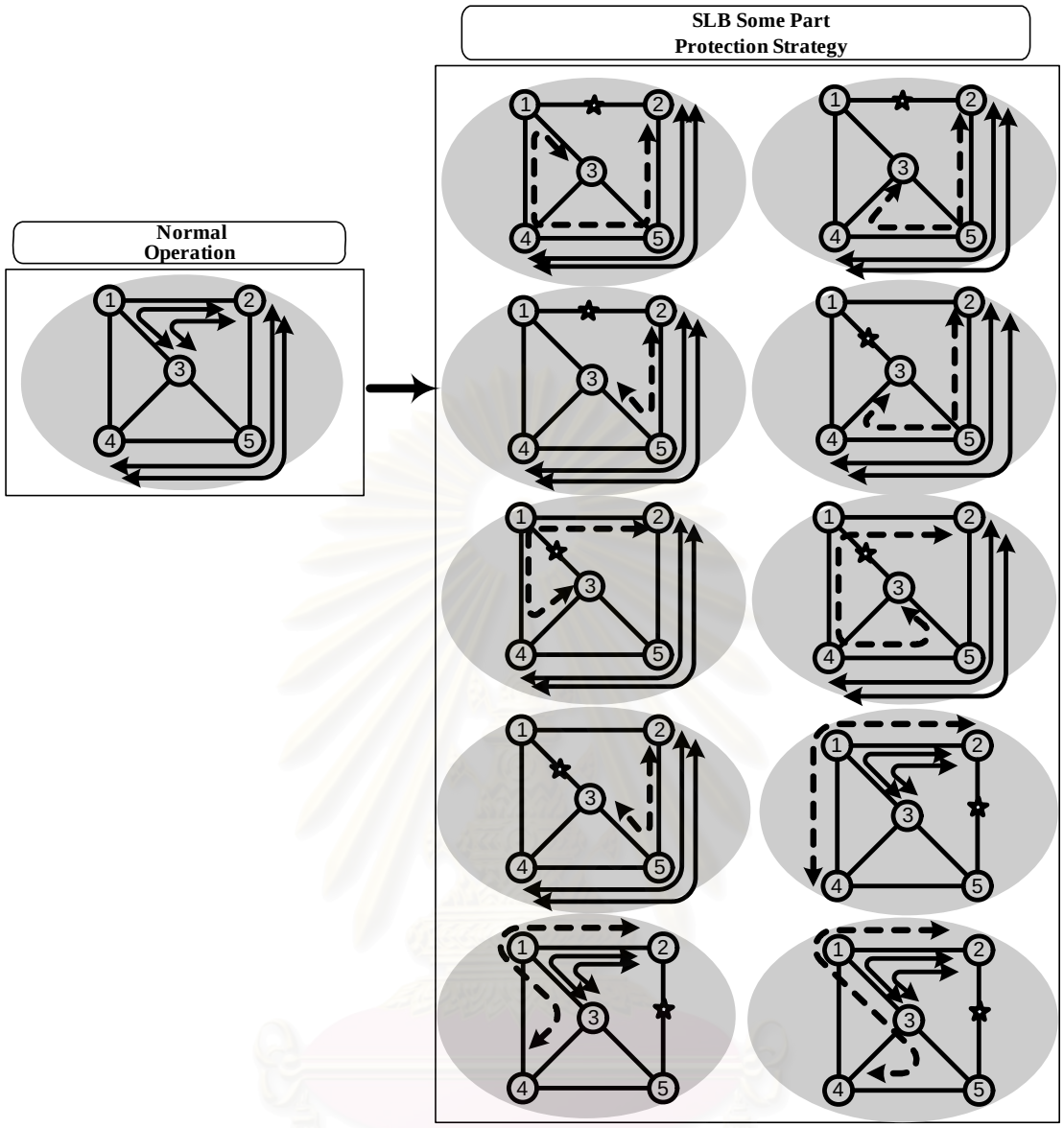
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ SLB

จากการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี SLB ที่ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.6 เป็นการปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมดทุกคู่โนด ซึ่งจะต้องใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการปกป้องสูงมาก ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาเพื่อลดต้นทุนของโครงข่ายออกเป็น 2 กรณีดังนี้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ SLB แบบบางคู่โนด

กรณีการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี SLB แบบบางคู่โนดก็มีหลักการคล้ายกับวิธี DJP แบบบางคู่โนด คือจะต้องมีการเลือกคู่โนดที่จะปกป้องตามการจ่ายค่าบริการเพิ่มเติม แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.7 คู่โนดที่จะปกป้องคือคู่โนด 2-3 ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นไม่ว่าข่ายเชื่อมโยงใดเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายแล้วคู่โนด 2-3 ก็จะได้รับการปกป้องเสมอดังรูป โดยมีเส้นทางที่สามารถเลือกได้หลายเส้นทางซึ่งต่างจากวิธีการปกป้องแบบ DJP ส่วนคู่โนดอื่นๆที่ไม่ได้จ่ายค่าบริการเพิ่มเติมเพื่อปกป้องนั้น ถ้าไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็ยังสามารถใช้โครงข่ายได้อยู่ แต่ถ้าได้รับผลกระทบก็จะไม่สามารถใช้บริการได้จนกว่าโครงข่ายจะซ่อมแซมข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเสร็จ ดังรูปก็จะเห็นว่าข่ายเชื่อมโยงที่ 2-5 ขาดแล้วคู่โนด 2-4 ก็จะไม่สามารถใช้งานได้



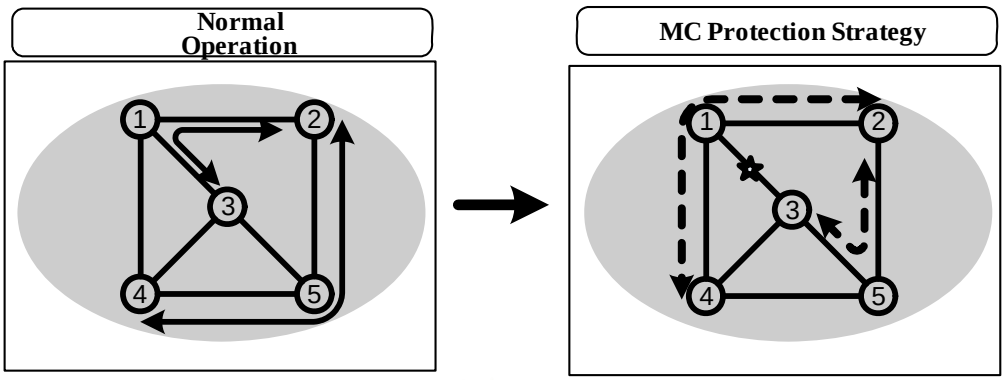
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ SLB แบบบางส่วน

กรณีการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี SLB แบบบางส่วนก็มีหลักการคล้ายกับวิธี DJP แบบบางส่วน คือจะต้องมีการกำหนดระดับการให้บริการแก่โครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นซึ่งทุกคู่โนดก็จะได้รับบริการที่เท่าเทียมกันเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นโดยมีเส้นทางที่สามารถเลือกใช้สำหรับการปกป้องได้หลายเส้นทางซึ่งแตกต่างจากวิธี DJP ที่สามารถเลือกเส้นทางปกป้องได้เพียงเส้นทางเดียวตลอดการปกป้องเส้นทางทำงานปกติในแต่ละคู่โนด แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.8 ในสภาพการใช้งานปกตินั้นทุกคู่โนดจะมีการใช้ทราฟฟิกอย่างละ 2 ช่องสัญญาณ แต่เมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นระดับการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนก็จะถูกนำมาใช้งานซึ่งในตัวอย่างนี้จะกำหนดให้มีการปกป้องโครงข่ายแบบ 50 % ดังนั้นทุกคู่โนดที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็จะได้รับการให้บริการด้วยความเร็วเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของการให้บริการในสภาพ

การใช้งานปกติ คือ 1 ช่องสัญญาณแต่ถ้าไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็ยังสามารถใช้เส้นทางทำงานปกตินั้นได้ตามเดิมดังรูป และถ้าช่องสัญญาณที่เชื่อมต่อคู่โนดมีจำนวนมากเช่นมีจำนวน 4 ช่องสัญญาณ เมื่อทำการปกป้องโครงข่ายแบบ 50 % เมื่อเกิดความเสียหายต่อคู่โนดใดก็จะต้องทำการเลือกเส้นทางที่จะปกป้องด้วยซึ่งเส้นทางที่จะทำการปกป้องนั้นต้องเลือกจากเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นต้นไปในสภาพการใช้งานปกติจำนวน 2 ช่องสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับเพราะเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นแต่ไม่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางที่ใช้งานปกติในเส้นทางที่สั้นก็จะสามารถใช้เส้นทางนั้นได้ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับมีคุณภาพที่ดีเพราะไม่ต้องส่งข้อมูลในระยะทางที่ไกล แต่ถ้าเกิดความเสียหายแก่เส้นทางที่ใช้งานปกติก็จะทำการหาเส้นทางของคู่โนดนั้นใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของสัญญาณอีกระดับหนึ่ง วิทยานิพนธ์นี้ก็ได้กำหนดให้เส้นทางที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่ายจะมีความยาวไม่เกินครึ่งหนึ่งของข่ายเชื่อมโยงที่มีในโครงข่าย

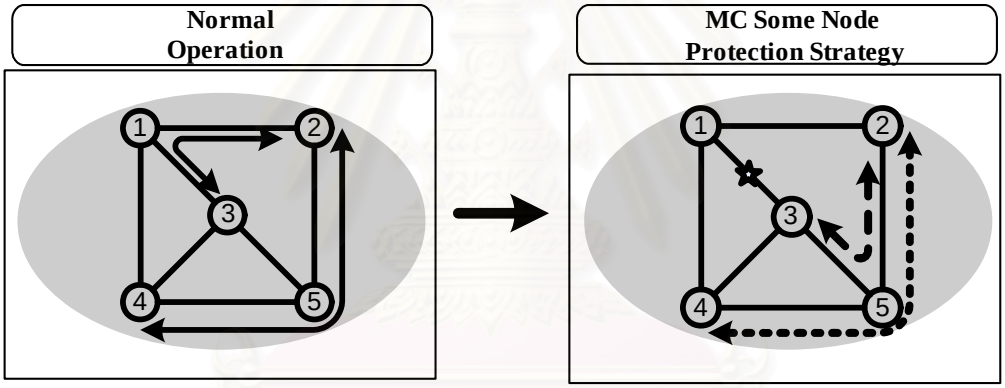
2.3.3 **วิธีการปกป้องแบบต้นทุนต่ำที่สุด** (Minimal Cost Protection Strategy, MC)

วิธี MC นี้ [23] จะแตกต่างจาก 2 วิธีแรก คือ โครงข่ายจะปรับเส้นทางทั้งเส้นทางของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายและจะมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางของช่องทราฟฟิกอื่น ๆ ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายด้วย โดยโครงข่ายที่ใช้วิธีการปกป้องแบบนี้จะไม่มีการพิจารณาว่าเส้นทางนั้นจะเป็นเส้นทางที่ถูกรบกวนจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายหรือไม่ จากแนวคิดนี้จึงมีผลให้วิธีการนี้น่าจะต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าแบบอื่นๆมาก จากรูปที่ 2.9 เป็นตัวอย่าง ในการทำงานปกติโครงข่ายจะใช้เส้นทาง 2-1-3 และ 2-5-4 ในการเชื่อมต่อระหว่างโนดที่ 2 และ 3, 2 และ 4 ตามลำดับ เมื่อเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อระหว่างโนด 1 และ 3 ขาด ในวิธีแบบ DJP และ SLB นั้นแก้ไขเฉพาะเส้นทาง 2-1-3 เท่านั้น เพราะเป็นเส้นทางที่ถูกรบกวนจากข่ายเชื่อมโยงที่ขาด จากรูปจึงเปลี่ยนมาใช้เส้นทาง 2-5-3 แทน แต่วิธี MC นั้น อนุญาตให้ทั้งสองเส้นทางของโครงข่ายสามารถไปใช้เส้นทางใหม่ได้ จากรูปจะเปลี่ยนไปใช้เส้นทาง 2-5-3 และ 2-1-4 แทน ซึ่งเมื่อพิจารณาจะเห็นว่า วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเส้นใยนำแสงให้แก่โครงข่ายอีกเพราะเส้นทาง 2-5-4 ได้เปลี่ยนไปใช้เส้นทาง 2-1-4 จึงไม่ต้องเพิ่มเส้นใยนำแสงแก่ข่ายเชื่อมโยง 2-5 อีก ทำให้วิธีนี้มีต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธี DJP และ SLB เสมอ แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียคือขนาดของฐานข้อมูลเพื่อใช้หาเส้นทางเมื่อมีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขาดมีขนาดใหญ่จึงทำให้ วิธีนี้จึงมีความซับซ้อนในการนำข้อมูลมาใช้มากกว่าวิธีการปกป้องแบบอื่นๆ



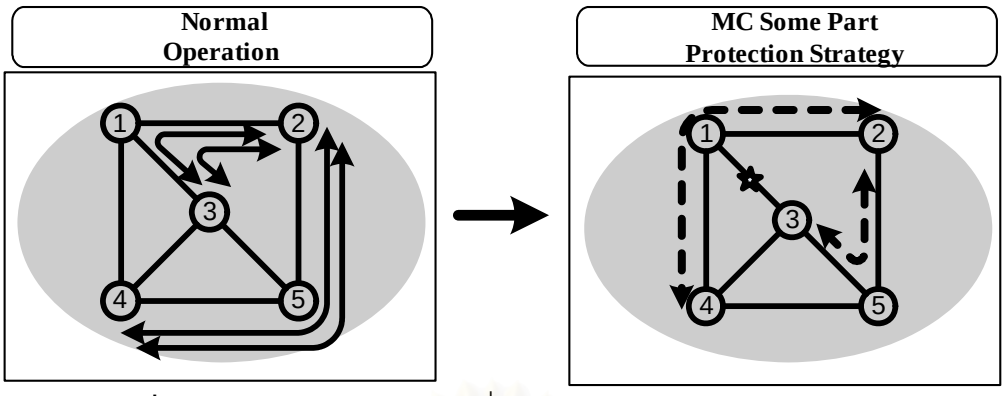
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ MC

จากการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี MC ที่ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.9 นั้นเป็นการปกป้องโครงข่ายแบบทั้งหมดทุกคู่โนด ก็ต้องใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการปกป้องที่สูงมาก ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาเพื่อลดต้นทุนของโครงข่ายออกเป็น 2 กรณีดังนี้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ MC แบบบางคู่โนด

กรณีการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี MC แบบบางคู่โนดนั้นจะต้องมีการเลือกคู่โนดที่จะปกป้องตามการจ่ายค่าบริการเพิ่มเติม แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.10 คู่โนดที่จะปกป้องคือคู่โนด 2-3 ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นไม่ว่าข่ายเชื่อมโยงใดเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายแล้วคู่โนด 2-3 ก็จะได้รับการปกป้องเสมอดังรูป แต่สำหรับคู่โนดอื่นๆที่ไม่ได้จ่ายค่าบริการเพิ่มเติมเพื่อปกป้องนั้น ถ้าไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็ยังอาจสามารถใช้โครงข่ายได้อยู่เมื่อมีช่องสัญญาณในเส้นทางเดิมเหลือให้ใช้งาน แต่ถ้าได้รับผลกระทบก็จะไม่สามารถใช้บริการได้จนกว่าโครงข่ายจะซ่อมแซมข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเสร็จ



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้วิธีปกป้องแบบ MC แบบบางส่วน

กรณีการปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี MC แบบบางส่วนจะต้องมีการกำหนดระดับการให้บริการแก่โครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นซึ่งทุกคู่โนดก็จะได้รับบริการที่เท่าเทียมกันเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นโดยเส้นทางที่ใช้ปกป้องนั้นจะเป็นเส้นทางที่ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมลดลงมากที่สุด แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.11 ในสภาพการใช้งานปกตินั้นทุกคู่โนดจะมีการใช้ทราฟฟิกอย่างละ 2 ช่องสัญญาณ แต่เมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นระดับการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนก็จะถูกนำมาใช้งานซึ่งในตัวอย่างนี้จะกำหนดให้มีการปกป้องโครงข่ายแบบ 50 % ดังนั้นทุกคู่โนดที่เชื่อมต่อจะได้รับการให้บริการความเร็วเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของการให้บริการในสภาพการใช้งานปกติ คือ 1 ช่องสัญญาณดังรูปซึ่งวิธี MC ก็จะมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางของทุกคู่โนดในโครงข่ายเพื่อทำให้โครงข่ายมีต้นทุนที่ต่ำที่สุด วิธี MC แบบบางส่วนนี้จะแตกต่างจากวิธี DJP และ SLB แบบบางส่วนคือจะไม่ต้องมีการเลือกเส้นทางที่จะทำการปกป้องเพราะวิธีแบบ MC จะทำการหาเส้นทางที่จะทำการปกป้องไปพร้อมๆกันกับเส้นทางในสภาพการใช้งานปกติจึงทำให้ไม่ต้องมีการกำหนดเส้นทางที่จะปกป้องเพียงแต่จะต้องกำหนดจำนวนทราฟฟิกที่จะปกป้องเท่านั้น

จากทุกวิธีที่ได้กล่าวมานี้ในการปกป้องโครงข่ายทั้งแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายทั้งแบบบางส่วนนี้ก็จะพิจารณาทั้งกรณีโครงข่าย WDM ประเภท VWP และ WP โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาต้นทุนโครงข่ายซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถปกป้องความเสียหายจากการที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายขาดตามคุณภาพของการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน โดยอาศัย Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลอง สมการทางคณิตศาสตร์และคำจำกัดความที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง รวมทั้งวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network Model)

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงแบบจำลองของโครงข่ายที่ใช้ในการออกแบบ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง (Undirected Graph) $G(V,E)$ ซึ่งประกอบไปด้วยเซตของ OXC โนด (V) จำนวน N โนด, $|V| = N$ และเซตของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical Links) (E) แบบไม่แสดงทิศทาง (Undirected Links) จำนวน L ข่ายเชื่อมโยง, $|E| = L$ โดยในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโนดต้นทางกับปลายทาง รวมทั้งทำการกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นมีจำนวนจำกัดเท่ากับ M นอกจากนี้ยังทำการกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละการเชื่อมต่อในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Static Traffic) ซึ่งสอดคล้องกับหลักความเป็นจริงที่ว่า โครงข่ายที่ใช้งานทั่วไปนั้นเป็นโครงข่ายที่มีพื้นที่ครอบคลุมกว้างขวางรวมทั้งมีการเชื่อมโยงในระดับประเทศหรือทวีป ดังนั้น เมื่อทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายจะพบว่าระดับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทราฟฟิกจะมีน้อยมาก นาน ๆ ครั้งจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงทำการกำหนดให้ปริมาณของทราฟฟิกในโครงข่ายที่พิจารณาเป็นปริมาณทราฟฟิกแบบคงที่

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการจัดสรรเส้นใยนำแสงให้กับโครงข่าย ในการจัดสรรเส้นใยนำแสงให้กับโครงข่ายนั้น เส้นใยนำแสงจะถูกจัดสรรไปตามลักษณะการใช้งานภายในโครงข่าย ดังนี้

- เส้นใยนำแสงทำงาน (Working Fiber) เป็นเส้นใยนำแสงที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นเส้นทางทำงานปกติ (Active Path) ซึ่งเป็นเส้นทางใช้งานทั่วไปเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ หรือสภาวะที่ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่ายนั่นเอง
- เส้นใยนำแสงสำรอง (Spare Fiber) เป็นเส้นใยนำแสงที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นเส้นทางสำรอง (Protection Path) ซึ่งเป็นเส้นทางที่จะถูกเปลี่ยนไปใช้งานจากเส้นทางปกติเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย

ดังนั้น ในการจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท [20] ดังนี้

1. Optimized Spare Fiber Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ในกรณีนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของเส้นทางทำงานปกติมาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนเส้นใยนำแสงทำงานมาให้ด้วยเพื่อจะได้นำมาพิจารณาร่วมกับจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ได้จากแบบจำลองเป็นจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ
2. Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมอันประกอบไปด้วยเส้นใยนำแสงทำงานและเส้นใยนำแสงสำรองพร้อมกัน โดยไม่ต้องทำการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และจำนวนของเส้นใยนำแสงทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นทั้ง 2 ประเภท โดยทำการพิจารณาถึงระดับการปกป้องโครงข่ายเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากข่ายเชื่อมโยงเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงซึ่งแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีการปกป้องโครงข่ายแบบ

บางคู่โนดและกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน โดยกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

f_j	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับข่ายเชื่อมโยงที่ j
w_j	จำนวน เส้นใยนำแสงปกติของข่ายเชื่อมโยงที่ j
s_j	จำนวน เส้นใยนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่ j
$a_{sd,i}$	เส้นทางที่ i ของคู่โนดที่ sd (ใช้ในกรณี VWP)
$a_{sd,i,\lambda}$	เส้นทางที่ i ของคู่โนดที่ sd และที่ความยาวคลื่น λ (ใช้ในกรณี WP)
$\delta_{sd,i,j}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ i ของคู่โนด sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง j ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
p_{sd}	จำนวนเส้นทางของคู่โนดที่ sd
$\gamma_{sd,n}^{j'}$	เส้นทางสำรองที่ n ของคู่โนดที่ sd เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาด (ใช้ในกรณี VWP)
$\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}$	เส้นทางสำรองที่ n ของคู่โนดที่ sd และที่ความยาวคลื่น λ เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาด (ใช้ในกรณี WP)
r_{sd}	จำนวนเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ sd เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาด
$\beta_{sd,n,j}^{j'}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ i ของคู่โนด sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง j ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 โดยที่ข่ายเชื่อมโยง j' ขาด
$\mu_{sd,i}, \mu_{sd,i,\lambda}$	มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ใช้ในการกำหนดเส้นทางที่จะเลือกเพื่อให้เท่ากับทราฟฟิกที่ต้องการในกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน
Q	คุณภาพของการปกป้องสำหรับการใช้หาปริมาณทราฟฟิกในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนเป็นหลัก
d_{sd}	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ sd
d_f	ปริมาณทราฟฟิกตามระดับการปกป้องของคู่โนดที่ sd
m	จำนวนคู่โนดทั้งหมดในโครงข่ายที่ปริมาณทราฟฟิกไม่เป็น 0
t,k	คู่โนดในโครงข่ายที่ถูกเลือกที่จะปกป้องในกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้

$w_j, s_j, a_{sd,i}, a_{sd,i,\lambda}, \gamma_{sd,n}^{j'}$ และ $\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลองส่วน $d_{sd}, d_f, \delta_{sd,i,j}, \beta_{sd,n,j}^{j'}$, $p_{sd}, r_{sd}, t, k, m, Q, \mu_{sd,i}, \mu_{sd,i,\lambda}$ และ M เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้หรือหาไว้ก่อนสร้างแบบจำลอง

3.2.1 **การจำลองปัญหาด้วยวิธี** Optimized Spare Fiber Assignment

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงเฉพาะที่เป็นส่วนสำรองเท่านั้น และจะศึกษาเฉพาะวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ

DJP และ SLB จากที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และเส้นใยนำแสงที่ใช้ในสภาพปกติมาให้ด้วย ซึ่งหมายความว่าต้องกำหนดค่า $w_j, a_{sd,i}$ สำหรับกรณี VWP หรือ $w_j, a_{sd,i,\lambda}$ สำหรับกรณี WP โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ของแบบจำลองคือ

$$\min\left(\sum_{j=1}^{L} s_j\right) \tag{3.1}$$

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยง j' ขาดไม่สามารถใช้งานได้

3.2.1.1 **ระบบ** VWP

1) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น ที่คู่โนด sd ใดๆที่จะทำการปกป้องจำนวนของเส้นทางสำรองใช้งานในสภาวะที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง j' ของคู่โนดนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นทางในสภาพปกติ

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} = \sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i,j'} \qquad \exists sd = t,\ldots,k \tag{3.2}$$

ส่วนกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นที่คู่โนด sd ใดๆ จำนวนของเส้นทางสำรองใช้งานในสภาวะที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง j' ของคู่โนดนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นทางบางเส้นทางตามคุณภาพของการปกป้องในสภาพปกติ

$$d_f \geq Q \times d \qquad d_f \in I^+ \tag{3.3}$$

$$\sum_{i=1}^{p_{sd}} \mu_{sd,i} a_{sd,i} = d_f \quad 0 \leq \mu_{sd,i} \leq 1 \text{;เลือก short path ที่ } a_{sd,i} > 0 \tag{3.4}$$

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} = \sum_{i=1}^{p_{sd}} ((\mu_{sd,i} a_{sd,i})\delta_{sd,i,j'}) \quad \forall sd = 1,2,\ldots,m \tag{3.5}$$

2) จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยง j จะต้องเพียงพอรองรับเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j

- กรณี DJP ที่ปกป้องเฉพาะบางคู่โนด

$$M \times s_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} \beta_{sd,n,j}^{j'} + (M \times w_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i,j}) \geq 0 \tag{3.6}$$
$$\forall j = 1,2,\ldots,L;\ j \neq j'$$

- กรณี SLB ที่ปกป้องเฉพาะบางคู่โนด

$$M \times s_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} \beta_{sd,n,j}^{j'} + (M \times w_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i,j}) + \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} (a_{sd,i}\delta_{sd,i,j})\delta_{sd,i,j'} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L;\ j \neq j' \tag{3.7}$$

ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนทั้งแบบกรณี DJP และ SLB นั้นจะเปลี่ยนรูปแบบสมการเฉพาะส่วนเส้นทางสำรองของคู่โนด t ถึง k เป็นคู่โนดทั้งหมดคือ 1 ถึง m

3) เนื่องจากวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP แต่ละเส้นทางที่เป็นเส้นทางในสภาพปกติสามารถมีเส้นทางสำรองได้เพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นเส้นทางที่เป็นเส้นทางสำรองจะต้องสามารถแก้ไขได้ทุกเหตุการณ์ที่เส้นทางปกติถูกรบกวนจากเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงขาด ซึ่งเหตุการณ์ที่เส้นทางปกติถูกรบกวนจากข่ายเชื่อมโยงขาดเป็นไปได้ทั้งหมด l เหตุการณ์ เมื่อ l คือความยาวของเส้นทางปกติที่นับจากข่ายเชื่อมโยงที่เส้นทางปกติวิ่งผ่าน และโดยกำหนดให้ F_a เป็นเซตของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เส้นทางปกติจะถูกรบกวนจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย $(|F_a|=l)$

$$\gamma_{sd,n}^{j'} = \gamma_{sd,n}^{j''} \qquad j', j'' \in F_a$$
$$\forall n = 1,2,...,r_{sd};\ \forall sd = 1,2,...,m \tag{3.8}$$

4) ทั้งสองกรณีนั้น s_j และ $\gamma_{sd,n}^{j'}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ (nonnegative integer)

$$s_j, \gamma_{sd,n}^{j'} \in I^+$$
$$\forall j = 1,2,...,L;\ \forall n = 1,2,...,r_{sd};\ \forall sd = 1,2,...,m \tag{3.9}$$

3.2.1.2 ระบบ WP

ในกรณีนี้แต่ละเส้นทางที่จัดสรรให้กับโครงข่ายจะต้องมีการกำหนดค่าความยาวคลื่นที่คงที่ตลอดเส้นทาง ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องมีการเพิ่มมิติ (dimension) ในการกำหนดความยาวคลื่นให้กับเส้นทางด้วย ซึ่งนำไปใช้ทั้งในกรณีปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน ดังนี้

1) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น ที่คู่โนด sd ใดๆที่จะทำการปกป้องจำนวนของเส้นทางสำรองใช้งานในสภาวะที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง j' ของคู่โนดนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นทางในสภาพปกติ

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}}\sum_{\lambda=1}^{M}\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'} = \sum_{i=1}^{p_{sd}}\sum_{\lambda=1}^{M}(a_{sd,i,\lambda}\delta_{sd.i,j'}) \qquad \exists sd = t,...,k \qquad (3.10)$$

ส่วนกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นที่คู่โนด sd ใดๆ จำนวนของเส้นทางสำรองใช้งานในสภาวะที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง j' ของคู่โนดนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นทางบางเส้นทางตามคุณภาพของการปกป้องในสภาพปกติ

$$d_f \geq Q \times d \qquad d_f \in I^+ \qquad (3.11)$$

$$\sum_{i=1}^{p_{sd}}\sum_{\lambda=1}^{M}\mu_{sd,i,\lambda} \times a_{sd,i,\lambda} = d_f \quad 0 \leq \mu_{sd,i} \leq 1 \text{ ;เลือก short path ที่ } a_{sd,i} > 0 \qquad (3.12)$$

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}}\sum_{\lambda=1}^{M}\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'} = \sum_{i=1}^{p_{sd}}\sum_{\lambda=1}^{M}((\mu_{sd,i,\lambda}a_{sd,i,\lambda})\delta_{sd,i,j'}) \qquad \forall sd = 1,2,...,m \qquad (3.13)$$

2) จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยง j จะต้องเพียงพอรองรับเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j

- กรณี DJP ที่ปกป้องเฉพาะบางคู่โนด

$$s_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}}\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}\beta_{sd,n.j}^{j'} + (w_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}}a_{sd,i,\lambda}\delta_{sd,i,j}) \geq 0$$
$$\forall \lambda = 1,2,...,M; \forall j = 1,2,...,L;\ j \neq j' \qquad (3.14)$$

- กรณี SLB ที่ปกป้องเฉพาะบางคู่โนด

$$s_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}}\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}\beta_{sd,n.j}^{j'} + (w_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}}a_{sd,i,\lambda}\delta_{sd,i,j})$$
$$+ \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}}(a_{sd,i,\lambda}\delta_{sd,i,j})\delta_{sd,i,j'} \geq 0$$
$$\forall \lambda = 1,2,...,M; \forall j = 1,2,...,L;\ j \neq j' \qquad (3.15)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนทั้งแบบกรณี DJP และ SLB นั้นจะเปลี่ยนรูปแบบสมการเฉพาะส่วนเส้นทางสำรองของคู่โนด t ถึง k เป็นคู่โนดทั้งหมดคือ 1 ถึง m

3) ในกรณีวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP แต่ละเส้นทางที่เป็นเส้นทางในสภาพปกติ สามารถมีเส้นทางสำรองได้เพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น

$$\sum_{\lambda=1}^{M} \gamma_{sd,n,\lambda}^{j'} = \sum_{\lambda=1}^{M} \gamma_{sd,n,\lambda}^{j''} \qquad j', j'' \in F_a$$
$$\forall n = 1,2,...,r_{sd}; \forall sd = 1,2,...,m \tag{3.16}$$

4) ทั้งสองกรณีนั้น s_j และ $\gamma_{sd,n}^{j'}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ (nonnegative integer)

$$s_j, \gamma_{sd,n,\lambda}^{j'} \in I^+$$
$$\forall j = 1,2,...,L; \forall n = 1,2,...,r_{sd}; \forall \lambda = 1,2,...,M; \forall sd = 1,2,...,m \tag{3.17}$$

3.2.2 **การจำลองปัญหาแบบ** Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต่ำที่สุดในวิธีแบบ MC โดยจะพิจารณาจัดสรรเส้นใยนำแสงที่ใช้งานปกติ และส่วนสำรองพร้อมกัน โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ของแบบจำลองคือ

$$\min\left(\sum_{j=1}^{L} f_j\right) \tag{3.18}$$

3.2.2.1 **ระบบ** VWP

1) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น ที่คู่โนด sd ใด ๆ สำหรับเส้นทางที่ใช้งานปกติ และบางคู่โนด sd ที่ทำการปกป้องสำหรับเส้นทางสำรองที่ใช้เมื่อข่ายเชื่อมโยง j' เท่ากับปริมาณทราฟฟิกระบบ

$$\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i} = d_{sd} \qquad \forall sd = 1,2,...,m \tag{3.19}$$

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} = d_{sd} \qquad \exists sd = t,...,k \tag{3.20}$$

ส่วนกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้น คู่โนด sd ใด ๆ เส้นทางปกติจะเท่ากับปริมาณทราฟฟิกระบบ ส่วนเส้นทางสำรองจะเท่ากับปริมาณ ทราฟฟิกที่จะปกป้องตามคุณภาพของการปกป้อง ดังนั้นจากสมการที่ (3.20) จึงต้องคูณ Q เข้าไปกับ d_{sd} และ ก็ต้องเป็น $\forall sd$ แทน $\exists sd$ ด้วย

2) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น จำนวนเส้นใยนำแสงที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j ต้องเพียงพอสำหรับรองรับเส้นทางที่ใช้งานปกติ และเส้นทางสำรองที่ใช้ปกป้องบางคู่โนด sd ที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j

$$M \times f_j - \sum_{sd=1}^{m} \sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i} \delta_{sd,i.j} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L \tag{3.21}$$

$$M \times f_j - \sum_{sd=t}^{k} \sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} \beta_{sd,n.j}^{j'} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L; j \neq j' \tag{3.22}$$

ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นจะเปลี่ยนรูปแบบสมการที่ (3.20) เฉพาะส่วนเส้นทางสำรองของคู่โนด t ถึง k เป็นคู่โนดทั้งหมดคือ 1 ถึง m

3) $f_j, a_{sd,i}$ และ $\gamma_{sd,n}^{j'}$ ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ (nonnegative integer)

$$\begin{gathered} f_j, a_{sd,i}, \gamma_{sd,n}^{j'} \in I^+ \\ \forall j = 1,2,...,L; \forall sd = 1,2,...,m; \\ \forall i = 1,2,...., p_{sd}; \forall n = 1,2,....r_{sd} \end{gathered} \tag{3.23}$$

3.2.2.2 ระบบ WP

คล้ายกับวิธี DJP และ SLB คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องมีการเพิ่มมิติ (dimension) ในการกำหนดความยาวคลื่นให้กับเส้นทางด้วย ซึ่งนำไปใช้ทั้งในกรณีปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน ดังนี้

1) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น ที่คู่โนด sd ใด ๆ สำหรับเส้นทางที่ใช้งานปกติ และบางคู่โนด sd ที่ทำการปกป้องสำหรับเส้นทางสำรองที่ใช้เมื่อข่ายเชื่อมโยง j' เท่ากับปริมาณทราฟฟิกระบบ

$$\sum_{i=1}^{p_{sd}} \sum_{\lambda=1}^{M} a_{sd,i,\lambda} = d_{sd} \qquad \forall sd = 1,2,...,m \tag{3.24}$$

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \sum_{\lambda=1}^{M} \gamma_{sd,n,\lambda}^{j'} = d_{sd} \qquad \exists sd = t,...,k \tag{3.25}$$

ส่วนกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้น คู่โนด sd ใด ๆ เส้นทางปกติจะเท่ากับปริมาณทราฟฟิกระบบ ส่วนเส้นทางสำรองจะเท่ากับปริมาณ ทราฟฟิกที่จะปกป้องตามคุณภาพของการปกป้อง ดังนั้นจากสมการที่ (3.25) จึงต้องคูณ Q เข้าไปกับ d_{sd} และ ก็ต้องเป็น $\forall sd$ แทน $\exists sd$ ด้วย

2) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น จำนวนเส้นใยนำแสงที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j ต้องเพียงพอสำหรับรองรับเส้นทางที่ใช้งานปกติ และเส้นทางสำรองที่ใช้ปกป้องบางคู่โนด sd ที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j

$$f_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i,\lambda}\delta_{sd,i.j} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L; \forall \lambda = 1,2,....,M \tag{3.26}$$

$$f_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}\beta_{sd,n.j}^{j'} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L; \forall \lambda = 1,2,....,M;\ j \neq j' \tag{3.27}$$

ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นจะเปลี่ยนรูปแบบสมการที่ (3.25) เฉพาะส่วนเส้นทางสำรองของคู่โนด t ถึง k เป็นคู่โนดทั้งหมดคือ 1 ถึง m

3) $f_j, a_{sd,i}$ และ $\gamma_{sd,n}^{j'}$ ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ (nonnegative integer)

$$\begin{aligned} & f_j, a_{sd,i,\lambda}, \gamma_{sd,n,\lambda}^{j'} \in I^+ \\ & \forall j = 1,2,...,L; \forall sd = 1,2,...,m; \forall i = 1,2,....,p_{sd}; \\ & \forall n = 1,2,....r_{sd}; \forall \lambda = 1,2,...,M \end{aligned} \tag{3.28}$$

ในกรณีที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธี MC ไม่ได้คำนึงถึงเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาดจะสามารถใช้แบบจำลองนี้ในการหาต้นทุนโครงข่ายที่ไม่สมารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายได้ (without restoration case) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ สามารถใช้แบบจำลองนี้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่เป็นเส้นใยนำแสงที่ทำงานในสภาพปกติซึ่งโครงข่ายต้องการได้ โดยในกรณี VWP คือการรวมสมการที่ 3.19, 3.21 และ 3.23 ส่วนในกรณี WP คือการรวมสมการที่ 3.24, 3.26 และ 3.28 ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้คำนึงถึงเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงขาด ในการหาค่าเริ่มต้น $(w_j, a_{sd,i}, a_{sd,i,\lambda})$ ให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธี Optimized Spare Fiber Assignment ในการสร้างแบบจำลอง

บทที่ 4

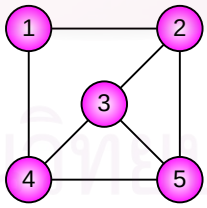
การทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาระดับการปกป้องทราฟฟิกประเภทยูนิคาสต์ในโครงข่าย WDM โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

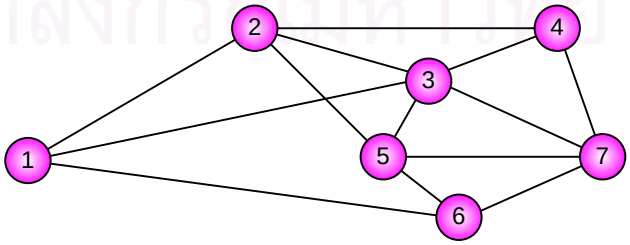
4.1 ข้อกำหนดการทดสอบ

ในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงรายละเอียดและข้อกำหนดของการทดสอบโดยรวมของตัวอย่างที่ใช้ในการออกแบบและจัดสรรทรัพยากรในระบบเพื่อนำไปใช้กับการวิเคราะห์ผล การทดสอบได้เลือกใช้โครงข่ายขนาดเล็ก 2 โครงข่ายที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยโครงข่ายแต่ละโครงข่ายจะมีลักษณะทางกายภาพดังนี้

1. โครงข่ายในรูป 4.1 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนด (Node) ทั้งหมด 5 โนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยง (Link) ทั้งหมด 7 ข่ายเชื่อมโยง ดีกรีของโนดในโครงข่ายมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.8 เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 5N_7L
2. โครงข่ายในรูป 4.1 (ข) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 7 โนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมด 13 ข่ายเชื่อมโยง ดีกรีของโนดในโครงข่ายมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.71 และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 7N_13L



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 5N_7L (ข) โครงข่าย 7N_13L

ในการทดสอบได้กำหนดให้ทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดมีค่าเท่ากันหมด หากแต่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณของทราฟฟิกรวม 4 ระดับ คือ มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ เพื่อให้สามารถศึกษาถึงคุณลักษณะของการจัดสรรทรัพยากรโครงข่ายที่อาจเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณทราฟฟิก

ในการศึกษาถึงคุณลักษณะของระดับการปกป้องโครงข่ายแต่ละประเภทได้มีการปรับระดับความต้องการการปกป้องที่แตกต่างกันไว้ 3 ระดับโดยพิจารณาเป็นค่าเปอร์เซนต์ของการปกป้อง (%) โดยในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดจะกำหนดให้เป็น 30%, 50%, และ 70% ทั้งนี้เพื่อความลงตัวของจำนวนคู่โนดที่จะทำการปกป้อง คือเมื่อโครงข่ายมีขนาด 5 โนดจะมีคู่โนดได้ทั้งหมด 10 คู่โนด ดังนั้นเมื่อกำหนดค่าเปอร์เซนต์ของการปกป้องไว้ 3 ระดับดังกล่าวจึงได้คู่โนดเป็น 3, 5, และ 7 คู่โนดตามลำดับ ส่วนโครงข่ายขนาด 7 โนดจะมีคู่โนดได้ทั้งหมด 21 คู่โนด ดังนั้นเมื่อกำหนด % การปกป้องไว้ 3 ระดับจึงได้คู่โนดเป็น 7, 11, และ 15 คู่โนดตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าทั้ง 2 โครงข่ายมีช่วงของคู่โนดที่ห่างเท่ากันทั้งนี้เพื่อให้เห็นจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดลงอย่างชัดเจนขึ้น สำหรับในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นจะกำหนดให้เป็น 25%, 50%, และ 75% เพื่อทำให้การจำกัดจำนวน ทราฟฟิกสูงสุดที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายมีค่าลงตัว ในที่นี้ทราฟฟิกที่ใช้สูงสุดมีค่าเป็น 4 ดังนั้นเมื่อมีการปกป้อง 3 ระดับก็จะได้ว่าจำนวนทราฟฟิกที่ทำการปกป้องจะเป็น 1, 2, และ 3 ตามลำดับ

การทดสอบเริ่มต้นด้วยการให้กำเนิดชุดอสมการคณิตศาสตร์ตามแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นให้สอดคล้องตรงตามรูปลักษณ์ของโครงข่ายและปริมาณทราฟฟิกที่แตกต่างกันไป จากนั้นจึงนำชุดอสมการคณิตศาสตร์เหล่านี้ไปป้อนให้กับโปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 [24] เพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Pentium 4 ความเร็ว 2.8 GHz และมีขนาดหน่วยความจำ 512 MHz โดยทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการวินโดว์ XP

เพื่อให้การใช้ตารางและกราฟเป็นไปอย่างสมบูรณ์ วิทยานิพนธ์นี้จึงขอเสนอหลักการใช้ตารางและกราฟในดังนี้ โดยกำหนดให้ชุดข้อมูลของแต่ละวิธีปกป้องโครงข่ายที่ลงท้ายด้วย S จะหมายถึง วิธีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและวิธีปกป้องโครงข่ายที่ลงท้ายด้วย P จะหมายถึงวิธีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน แต่ถ้าไม่มีก็แสดงถึงการปกป้องแบบปกติ ส่วน % ที่ได้เสนอไว้จะหมายถึงจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่จะต้องปกป้องโครงข่าย โดยวิธีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการทดสอบเป็น 2 ลักษณะ โดยยกตัวอย่างการจัดลำดับคู่โนดในโครงข่าย 5 โนด จะที่มีคู่โนดทั้งหมด 10 คู่โนดจะได้ 1-2,1-3,1-4,1-5, 2-3, 2-4, 2-5, 3-4, 3-5, 4-5 ดังนั้นในแบบที่ I จะเป็นการปกป้องคู่โนดที่เริ่มตั้งแต่คู่โนดแรกจนครบจำนวนคู่โนดที่ต้องปกป้อง ตั้งแต่คู่โนด 1-2 ต่อไปก็ 1-3 จนครบคู่โนดที่จะปกป้อง ส่วนแบบที่ II เป็นการปกป้องคู่โนดที่เริ่มตั้งแต่คู่โนดสุดท้ายแล้วกลับลงมาจนครบจำนวนคู่โนดที่ต้องปกป้อง เช่นตั้งแต่คู่โนด 4-5 แล้ว

ก็ถอยกลับไปเป็น 3-5 จนครบคู่โนดที่จะปกป้อง ที่กำหนดเช่นนี้ก็เพื่อความง่ายในการจัดการข้อมูลเพื่อทดสอบ ในส่วนกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบจะวาดเฉพาะกราฟในกรณีของ WP เนื่องจากการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าเกือบทั้งหมดของทุกวิธีจำนวนเส้นใยนำแสงไม่ค่อยจะแตกต่างกัน และในการปกป้องแบบบางคู่โนดนั้นก็ได้นำเสนอเพียงการทดสอบแบบที่ I เท่านั้น เนื่องจากผลของการวางเส้นใยนำแสงทั้งแบบที่ I และ II มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน

4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2.1 การเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

ตารางที่ 4.1 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 1)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	13	23	19	21	23	16	17	19	23	23	23
2	7	12	12	12	12	10	11	12	12	12	12
3	5	10	9	10	10	8	8	10	10	10	10
4	5	9	7	9	9	6	7	7	9	9	9
5	5	7	5	5	7	5	6	6	7	7	7
6	4	8	7	7	7	6	7	7	8	8	8
7	4	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6
8	4	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 1)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	13	23	19	21	23	16	17	19	23	23	23
2	7	14	11	13	14	10	11	12	14	14	14
3	5	10	9	10	10	8	9	10	10	10	10
4	5	9	7	8	8	7	8	8	9	9	9
5	5	8	6	7	7	7	7	7	8	8	8
6	4	9	7	8	8	6	7	7	9	9	9
7	4	8	6	7	8	6	6	6	8	8	8
8	4	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6

(ข)

ตารางที่ 4.2 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 2)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	26	46	38	42	46	32	33	37	36	36	46
2	13	23	19	21	23	16	17	19	19	19	23
3	7	15	11	15	15	10	11	12	12	12	15
4	7	14	11	13	14	10	11	12	12	12	14
5	6	11	10	11	11	9	10	10	10	10	11
6	5	10	9	10	10	8	9	10	10	10	10
7	5	10	9	10	10	8	8	10	10	10	10
8	5	10	9	10	10	8	9	10	10	10	10

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 2)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	26	46	38	42	46	32	33	37	36	36	46
2	13	23	19	21	23	16	17	19	20	20	23
3	9	17	13	17	17	12	13	14	14	14	17
4	7	14	11	12	12	10	11	12	12	12	12
5	6	11	10	11	11	9	10	11	11	11	11
6	5	10	9	10	10	8	9	10	10	10	10
7	5	10	9	10	10	7	8	10	9	9	10
8	5	10	8	9	9	8	9	9	9	9	9

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 3)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	39	69	57	63	69	48	50	56	49	59	69
2	20	35	30	33	35	26	27	29	27	32	35
3	13	23	19	21	23	16	17	19	18	22	23
4	11	20	17	19	20	14	15	16	16	16	20
5	9	17	13	16	17	12	13	14	14	15	17
6	7	14	11	13	14	10	11	12	12	12	14
7	7	13	10	12	12	10	10	11	11	11	12
8	6	11	10	11	11	9	10	11	11	11	11

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 3)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	39	69	57	63	69	48	50	56	49	59	69
2	20	37	30	34	37	26	27	29	27	30	37
3	13	23	19	21	22	16	18	19	18	22	22
4	11	20	17	19	20	14	15	17	16	17	20
5	9	17	13	15	16	12	13	14	14	15	16
6	7	14	11	12	12	10	12	12	12	12	12
7	7	13	10	12	12	10	11	12	11	12	12
8	6	11	10	11	11	8	10	10	10	11	11

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	52	112	96	104	112	84	86	94	82	92	102
2	26	46	38	42	46	32	33	37	32	36	42
3	18	31	27	30	31	23	25	27	23	26	28
4	13	24	21	23	24	16	18	20	18	19	23
5	11	20	17	19	20	14	15	16	16	16	18
6	9	18	15	16	16	12	13	14	14	14	16
7	9	18	15	16	16	12	13	14	12	14	15
8	7	12	11	11	12	9	11	12	12	12	14

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	52	112	96	104	112	84	86	94	82	92	102
2	26	46	38	42	46	32	33	37	33	36	43
3	18	31	27	30	31	23	25	27	23	25	29
4	13	24	21	23	24	16	18	20	18	20	22
5	11	20	17	19	20	14	15	16	16	16	20
6	9	18	15	16	16	12	13	14	14	15	16
7	9	18	15	16	16	12	13	14	13	14	14
8	7	12	11	11	12	9	11	12	11	11	12

(ข)

จากตารางที่ 4.1 ถึง 4.4 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5N_7L ต้องการที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกป้องแบบ DJP ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดและแบบที่โครงข่ายไม่มีการปกป้อง พบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่าความยาวคลื่นสูงสุดมีค่ามากพอ สาเหตุที่เป็นอย่างนี้เนื่องจากการที่ค่า M เพิ่มขึ้นนั้นจำนวนช่องสัญญาณในแต่ละเส้นใยนำแสงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การที่จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยนำแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นนี้จะทำให้จำนวนของเส้นใยนำแสงที่

ต้องทำการติดตั้งมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วพบว่าจำนวนเส้นใยนำแสงจะไม่สามารถลดลงได้อีก และเมื่อแบ่งการพิจารณาออกเป็นแต่ละกรณี จะได้ว่า กรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดนั้น จากตารางที่ 4.1 จะได้ว่าเมื่อมีการปกป้องโครงข่ายจำนวน 70 % แบบที่ I ทั้งประเภท VWP และ WP ในทุกๆความยาวคลื่นส่วนใหญ่จะไม่สามารถลดเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการได้เมื่อทำการปกป้องคู่โนดจำนวน 7 คู่โนด อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการปกป้องโครงข่ายจำนวน 70 % แบบที่ II จะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมลงได้ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกลุ่มโนดที่ได้ทำการปกป้องในแบบที่ II นั้นมีเส้นทางเลือกที่จะใช้ทำการปกป้องเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าในกลุ่มคู่โนดในแบบที่ I บางเส้นทาง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่กลุ่มคู่โนดจะเลือกเส้นทางที่สั้นเพื่อที่จะทำการปกป้อง จึงทำให้บางเส้นทางที่เลือกสามารถใช้ช่องสัญญาณที่มีอยู่แล้วในโครงข่ายก็เพียงพอที่จะทำการปกป้องได้โดยไม่ต้องมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสง และเมื่อพิจารณาการปกป้องโครงข่ายจำนวน 30 % และ 50 % ทั้งแบบที่ I และแบบที่ II ก็จะมีการวางเส้นใยนำแสงลดลงเนื่องจากจำนวนคู่โนดที่ปกป้องนั้นมีจำนวนลดลงเป็น 3 และ 5 คู่โนดตามลำดับ แต่เมื่อความยาวคลื่นมากขึ้นจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมก็จะไม่สามารถลดลงได้อีก เพราะโครงข่ายนั้นมีจำนวนช่องสัญญาณเหลือมากเพียงพอที่จะใช้ในการปกป้องทุกคู่โนดในโครงข่ายได้ทั้งหมด ส่วนในตารางที่ 4.2, 4.3, และ 4.4 นั้นก็จะมีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับตารางที่ 4.1 เพียงแต่ละตารางได้เพิ่มจำนวนทราฟฟิกให้มากขึ้นเป็น 2, 3, และ 4 จึงต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ในกรณีการปกป้องแบบบางส่วน จากตารางที่ 4.1 จะได้ว่า การปกป้องโครงข่ายทุก % การปกป้องนั้นจะไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้เลยเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการปกป้องแบบทั้งหมดนั้นทุกคู่โนดมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นทุก % ที่ปกป้องจึงต้องปกป้องอย่างน้อยตาม % ที่ได้กำหนด คือ 25 %, 50 %, และ 75 % ของทราฟฟิกเท่ากับ 1 ก็คือมีค่าเท่ากับ 1 นั่นเอง ส่วนตารางที่ 4.2 ก็จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่จะต้องปกป้องลดลงคือจากทราฟฟิกเท่ากับ 2 เมื่อปกป้องแบบ 25 % และ 50 % ก็จะเหลือการปกป้องเพียงแค่ทราฟฟิกละ 1 เท่านั้น ส่วนตารางที่ 4.3 จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % นั้นมีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงตามลำดับ เนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่ปกป้องมีจำนวนลดลงคือจากจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดเท่ากับ 3 จะเหลือการปกป้องเพียงทราฟฟิกละ 1 และ 2 ตามลำดับนั่นเอง และสำหรับตารางที่ 4.4 นั้นจะเห็นได้ว่าการปกป้องโครงข่ายจะเริ่มลดลงตั้งแต่ 75 % ลงไป เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดเป็น 4 จึงทำให้การปกป้องทราฟฟิกมีปริมาณลดลง คือปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3, 2, และ 1 ตามลำดับการปกป้องนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีช่องสัญญาณเหลือมากขึ้นเหมือนกันจึงทำให้การลดจำนวนทราฟฟิกก็เริ่มไม่ค่อยมีผลมากนัก

ตารางที่ 4.5 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 1)										
	No	DJP 100%	DJPS – I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	29	42	37	40	40	36	38	39	42	42	42
2	15	22	22	22	22	20	21	21	22	22	22
3	11	18	17	17	18	16	17	17	18	18	18
4	9	16	16	16	16	14	14	15	16	16	16
5	8	14	12	13	13	12	13	13	13	13	13
6	7	13	13	13	13	11	12	12	13	13	13
7	7	14	11	13	13	12	13	13	14	14	14
8	7	11	10	11	11	10	10	10	11	11	11

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 1)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	29	42	37	40	40	36	38	39	42	42	42
2	15	22	22	22	22	21	21	21	22	22	22
3	11	18	18	18	18	16	16	17	18	18	18
4	9	16	16	16	16	13	15	15	16	16	16
5	8	14	12	12	13	11	11	12	14	14	14
6	7	14	13	13	13	12	13	13	14	14	14
7	7	14	13	13	14	11	12	12	14	14	14
8	7	11	11	11	11	10	10	11	11	11	11

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 2)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	58	82	74	78	79	72	76	77	71	71	82
2	29	41	37	39	40	36	38	38	37	37	41
3	20	29	28	28	28	25	27	28	27	27	29
4	15	23	22	22	22	20	21	21	22	22	23
5	13	20	20	20	20	18	19	19	19	19	20
6	11	18	18	18	18	16	17	17	18	18	18
7	10	17	16	16	16	15	16	16	17	17	17
8	9	16	15	15	15	14	15	15	16	16	16

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 2)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	58	82	74	78	79	72	76	77	71	71	82
2	29	41	37	40	40	36	37	37	37	37	41
3	20	30	28	28	28	27	27	28	27	27	30
4	15	23	22	22	22	20	21	21	22	22	22
5	13	20	19	19	19	18	19	19	19	19	20
6	11	18	18	18	18	16	17	17	18	18	18
7	10	17	17	17	17	15	16	16	17	17	17
8	9	16	16	16	16	14	15	15	16	16	16

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 3)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	87	133	120	127	129	118	124	125	110	121	133
2	44	62	56	60	60	55	59	59	52	57	62
3	29	41	37	39	40	36	38	38	36	39	41
4	22	32	30	32	32	29	30	30	29	31	32
5	18	26	25	25	25	24	25	25	25	25	26
6	15	22	22	22	22	21	22	22	22	22	22
7	14	21	20	20	21	19	20	20	19	21	21
8	12	19	19	19	19	17	18	18	19	19	19

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 3)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	87	133	120	127	129	118	124	125	110	121	133
2	44	62	56	60	60	56	59	59	51	56	62
3	29	41	38	41	41	36	37	38	34	40	41
4	22	32	30	31	31	29	30	30	29	31	32
5	18	28	25	25	25	25	26	26	25	25	28
6	15	23	22	23	23	20	21	21	22	22	23
7	14	21	21	21	21	19	20	20	20	21	21
8	12	19	18	18	19	17	18	18	18	18	19

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	116	214	197	205	208	194	202	203	179	190	202
2	58	82	73	78	79	72	76	76	66	70	78
3	39	55	51	54	55	50	51	52	46	49	52
4	29	41	37	39	40	36	38	38	36	37	41
5	24	35	32	33	34	31	32	33	31	31	34
6	20	29	28	29	29	27	28	28	27	27	29
7	17	27	25	25	26	24	24	24	24	24	25
8	15	23	22	23	23	20	21	21	22	22	23

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	116	214	197	205	208	194	202	203	179	190	202
2	58	82	73	78	79	72	74	74	66	70	78
3	39	55	52	54	54	50	51	52	46	48	52
4	29	41	39	40	40	36	37	37	36	37	39
5	24	35	32	33	33	31	33	34	31	31	33
6	20	30	28	28	29	28	28	28	27	27	28
7	17	27	24	24	24	24	24	25	24	24	25
8	15	23	22	22	22	20	22	22	22	22	22

(ข)

จากตารางที่ 4.5 ถึง 4.8 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 7N_13L ต้องการที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกป้องแบบ DJP ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดและแบบที่โครงข่ายไม่มีการปกป้อง พบว่าก็มีลักษณะของผลการปกป้องโดยรวมมีทิศทางที่คล้ายกันกับการปกป้องด้วยวิธี DJP ที่โครงข่าย 5N_7L ดังนั้นจึงขอนำเสนอเฉพาะประเด็นหลักคือการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนเพื่อเปรียบเทียบกับโครงข่าย 5N_7L

กรณีการปกป้องแบบบางคู่โนด จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าการปกป้องโครงข่ายจำนวน 30 %, 50%, และ 70% ในแบบที่ I และ II ของทั้งประเภท VWP และ WP เริ่มลดลงตั้งแต่การปกป้องแบบ 70 % เนื่องจากมีจำนวนเส้นทางเลือกเพื่อที่จะปกป้องของกลุ่มคู่โนดมีจำนวนมากขึ้น

ซึ่งทำให้มีโอกาสที่จะเลือกเส้นทางที่สั้นเพื่อใช้ในการปกป้องได้ และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือ ถ้านับเฉพาะทางจำนวนคู่โนดจะเห็นว่า จำนวนคู่โนดที่จะปกป้องแบบ 70 % ของโครงข่าย 7N_13L มีจำนวนคู่โนดที่จะปกป้อง 15 คู่โนดซึ่งลดลงถึง 6 คู่โนด ในขณะที่โครงข่าย 5N_7L มีจำนวนคู่โนดที่จะปกป้อง 7 คู่โนดซึ่งลดเพียง 3 คู่โนดนั่นเอง

ส่วนกรณีการปกป้องแบบบางส่วนของโครงข่าย 7N_13L จะมีผลการทดสอบซึ่งคล้ายกับโครงข่าย 5N_7L แต่จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมเพิ่มขึ้นเพราะโครงข่ายมีจำนวนคู่โนดมากขึ้นจึงมีผลทำให้จำนวนทราฟฟิกในโครงข่ายมากขึ้นนั่นเอง คือ จากตารางที่ 4.5 จะได้ว่า การปกป้องโครงข่ายทุก % การปกป้องนั้นจะไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้เลยเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการปกป้องแบบทั้งหมดนั้นทุกคู่โนดมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นทุก % ที่ปกป้องจึงต้องปกป้องอย่างน้อยตาม % ที่ได้กำหนด คือ 25 %, 50 %, และ 75 % ของทราฟฟิกเท่ากับ 1 ก็คือมีค่าเท่ากับ 1 นั่นเอง ส่วนตารางที่ 4.6 ก็จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่จะต้องปกป้องลดลงคือจากทราฟฟิกเท่ากับ 2 เมื่อปกป้องแบบ 25 % และ 50 % ก็จะเหลือการปกป้องเพียงแค่ทราฟฟิกละ 1 เท่านั้น ส่วนตารางที่ 4.7 จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % นั้นมีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงตามลำดับเนื่องจากจำนวน ทราฟฟิกที่ปกป้องมีจำนวนลดลงคือจากจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดเท่ากับ 3 จะเหลือการปกป้องเพียงทราฟฟิกละ 1 และ 2 ตามลำดับนั่นเอง และสำหรับตารางที่ 4.8 นั้นจะเห็นได้ว่าการปกป้องโครงข่ายจะเริ่มลดลงตั้งแต่ 75 % ลงไป เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดเป็น 4 จึงทำให้การปกป้องทราฟฟิกมีปริมาณลดลง คือปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3, 2, และ 1 ตามลำดับการปกป้องนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีช่องสัญญาณเหลือมากขึ้นเหมือนกันจึงทำให้การลดจำนวนทราฟฟิกก็เริ่มไม่ค่อยมีผลมากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 1)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	13	21	17	20	21	16	17	19	21	21	21
2	7	11	11	11	11	10	11	11	11	11	11
3	5	10	8	9	9	6	7	8	10	10	10
4	5	7	6	7	7	6	6	7	7	7	7
5	5	7	5	5	7	5	6	6	7	7	7
6	4	6	5	6	6	5	5	6	6	6	6
7	4	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6
8	4	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 1)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	13	21	17	20	21	16	17	19	21	21	21
2	7	11	10	11	11	10	11	11	11	11	11
3	5	10	8	9	9	6	7	8	10	10	10
4	5	7	6	6	7	5	7	7	7	7	7
5	5	7	6	6	7	6	6	6	7	7	7
6	4	6	5	6	5	5	5	5	6	6	6
7	4	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6
8	4	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 2)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	26	42	34	39	42	32	33	37	33	33	42
2	13	21	17	20	21	16	17	19	17	17	21
3	7	13	11	13	13	10	11	11	11	11	13
4	7	11	10	11	11	10	11	11	11	11	11
5	6	11	10	10	11	7	9	10	10	10	11
6	5	10	8	9	9	6	7	8	7	7	10
7	5	9	8	9	9	6	7	7	7	7	9
8	5	8	6	7	7	6	7	7	6	6	8

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 2)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	26	42	34	39	42	32	33	37	33	33	42
2	13	21	19	21	21	16	17	19	18	18	21
3	9	15	13	15	15	12	13	13	13	13	15
4	7	12	11	11	11	8	10	11	12	12	12
5	6	11	10	10	11	8	8	10	10	10	11
6	5	10	8	9	9	6	7	8	8	8	10
7	5	9	7	9	10	6	7	8	7	7	9
8	5	8	6	7	7	6	7	7	7	7	7

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 3)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	39	63	51	59	63	48	50	56	46	54	63
2	20	32	28	30	32	26	26	28	24	30	32
3	13	21	17	20	21	16	17	19	17	20	21
4	11	17	15	15	17	14	15	16	14	16	17
5	9	15	12	13	15	12	13	13	12	14	15
6	7	11	10	11	11	10	11	11	11	11	11
7	7	11	10	11	11	10	10	10	10	11	11
8	6	11	10	11	11	9	10	10	9	11	11

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 3)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	39	63	51	59	63	48	50	56	46	54	63
2	20	33	29	32	32	24	26	28	25	26	33
3	13	21	19	21	21	16	18	19	18	21	21
4	11	18	16	18	18	14	15	16	15	17	18
5	9	15	13	14	15	12	12	13	12	14	15
6	7	11	11	11	11	8	10	11	11	11	11
7	7	12	11	11	12	10	10	11	10	12	12
8	6	11	10	10	11	8	9	10	9	11	11

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	52	104	88	98	104	84	86	94	79	86	95
2	26	42	38	42	42	32	34	37	30	34	38
3	18	31	27	31	31	22	24	26	23	25	27
4	13	23	21	23	23	16	18	20	17	17	20
5	11	20	17	19	20	14	15	16	15	15	18
6	9	16	14	15	15	12	13	14	13	14	15
7	9	16	13	15	16	11	13	14	11	12	13
8	7	13	11	11	11	9	11	12	11	11	12

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	52	104	88	98	104	84	86	94	79	86	95
2	26	42	38	42	42	32	34	37	31	34	39
3	18	31	27	31	31	22	24	26	22	25	28
4	13	23	21	23	23	16	18	20	18	19	21
5	11	20	17	19	20	14	15	16	14	16	17
6	9	16	14	15	15	12	13	14	13	14	16
7	9	16	13	15	16	11	13	14	12	13	14
8	7	13	11	11	11	9	11	12	11	11	11

(ข)

จากตารางที่ 4.9 ถึง 4.12 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5N_7L ต้องการที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกป้องแบบ SLB ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมด และแบบที่โครงข่ายไม่มีการปกป้อง พบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมก็มีลักษณะของผลการปกป้องโดยรวมก็มีทิศทางการปกป้องคล้ายกับการปกป้องด้วยวิธี DJP ที่โครงข่าย 5N_7L แต่ก็มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลง เนื่องจากวิธีการปกป้องแบบ SLB นั้นจะไม่ได้กำหนดเส้นทางปกป้องคู่โนดว่าไม่ให้มีข่ายเชื่อมโยงที่ไม่เสียหายซ้ำกับเส้นทางทำงานปกติ ดังนั้นเส้นทางที่ได้ถูกเลือกเพื่อจะปกป้องจึงมีได้หลายเส้นทาง ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดจำนวนเส้นใยนำแสงให้

ลดลงได้ และเมื่อแบ่งการพิจารณาในแต่ละกรณีที่ได้นำเสนอไปก็จะได้ว่า กรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดนั้น จากตารางที่ 4.9 จะได้ว่าเมื่อมีการปกป้องโครงข่ายจำนวน 70 % แบบที่ I ทั้งประเภท VWP และ WP ในทุกๆความยาวคลื่นส่วนใหญ่จะไม่สามารถลดเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการได้เมื่อทำการปกป้องคู่โนดจำนวน 7 คู่โนด อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการปกป้องโครงข่ายจำนวน 70 % % แบบที่ II จะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมลงได้ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกลุ่มโนดที่ได้ทำการปกป้องในแบบที่ II นั้นมีเส้นทางเลือกที่จะใช้ทำการปกป้องเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าในกลุ่มคู่โนดในแบบที่ I บางเส้นทาง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่กลุ่มคู่โนดจะเลือกเส้นทางที่สั้นเพื่อที่จะทำการปกป้อง จึงทำให้บางเส้นทางที่เลือกสามารถใช้ช่องสัญญาณที่มีอยู่แล้วในโครงข่ายก็เพียงพอที่จะทำการปกป้องได้โดยไม่ต้องมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสง และเมื่อพิจารณาการปกป้องโครงข่ายจำนวน 30 % และ 50 % ทั้งแบบที่ I และแบบที่ II ก็จะมีการวางเส้นใยนำแสงลดลงเนื่องจากจำนวนคู่โนดที่ปกป้องนั้นมีจำนวนลดลงเป็น 3 และ 5 คู่โนดตามลำดับ แต่เมื่อความยาวคลื่นมากขึ้นจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมก็จะไม่สามารถลดลงได้อีกเพราะโครงข่ายนั้นมีจำนวนช่องสัญญาณเหลือมากเพียงพอที่จะใช้ในการปกป้องทุกคู่โนดในโครงข่ายได้ทั้งหมด ส่วนในตารางที่ 4.10, 4.11, และ 4.12 นั้นก็จะมีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับตารางที่ 4.9 เพียงแต่ละตารางได้เพิ่มจำนวนทราฟฟิกให้มากขึ้นเป็น 2, 3, และ 4 จึงต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ในกรณีการปกป้องแบบบางส่วน จากตารางที่ 4.9 จะได้ว่า การปกป้องโครงข่ายทุก % การปกป้องนั้นจะไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้เลยเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการปกป้องแบบทั้งหมดนั้นทุกคู่โนดมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นทุก % ที่ปกป้องจึงต้องปกป้องอย่างน้อยตาม % ที่ได้กำหนด คือ 25 %, 50 %, และ 75 % ของทราฟฟิกเท่ากับ 1 ก็คือมีค่าเท่ากับ 1 นั่นเอง ส่วนตารางที่ 4.10 ก็จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่จะต้องปกป้องลดลงคือจากทราฟฟิกเท่ากับ 2 เมื่อปกป้องแบบ 25 % และ 50 % ก็จะเหลือการปกป้องเพียงแค่ทราฟฟิกละ 1 เท่านั้น ส่วนตารางที่ 4.11 จะได้ว่าการปกป้องแบบ 25 % และ 50 % นั้นมีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงตามลำดับ เนื่องจากจำนวน ทราฟฟิกที่ปกป้องมีจำนวนลดลงคือจากจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดเท่ากับ 3 จะเหลือการปกป้องเพียงทราฟฟิกละ 1 และ 2 ตามลำดับนั่นเอง และสำหรับตารางที่ 4.12 นั้นจะเห็นได้ว่าการปกป้องโครงข่ายจะเริ่มลดลงตั้งแต่ 75 % ลงไป เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดเป็น 4 จึงทำให้การปกป้องทราฟฟิกมีปริมาณลดลง คือปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3, 2, และ 1 ตามลำดับการปกป้องนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีช่องสัญญาณเหลือมากขึ้นเหมือนกันจึงทำให้การลดจำนวนทราฟฟิกก็เริ่มไม่ค่อยมีผลมากนัก

ตารางที่ 4.13 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 1)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	29	40	36	38	39	36	37	38	40	40	40
2	15	22	20	21	22	20	20	21	22	22	22
3	11	17	15	16	16	14	15	16	17	17	17
4	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
5	8	12	11	11	12	11	11	11	12	12	12
6	7	10	9	10	10	9	10	10	10	10	10
7	7	10	9	9	10	9	9	9	10	10	10
8	7	10	9	9	9	9	9	10	10	10	10

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 1)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	29	40	36	38	39	36	37	38	40	40	40
2	15	22	20	20	21	20	21	21	21	21	21
3	11	17	15	17	17	14	16	16	17	17	17
4	9	14	14	14	14	12	13	13	14	14	14
5	8	12	11	11	11	10	11	11	12	12	12
6	7	11	11	11	11	10	11	11	11	11	11
7	7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
8	7	10	10	10	10	9	9	9	10	10	10

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 2)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	58	80	71	75	77	71	74	76	69	69	80
2	29	41	37	39	39	36	38	38	36	36	41
3	20	28	26	27	27	25	27	27	27	26	28
4	15	22	20	21	22	20	21	21	21	21	22
5	13	19	18	18	19	18	18	18	19	18	19
6	11	18	16	16	17	15	16	17	17	16	18
7	10	15	13	13	14	14	14	15	14	13	15
8	9	14	12	14	14	12	14	14	15	14	14

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 2)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	58	80	71	75	77	71	74	76	69	69	80
2	29	41	36	38	38	36	37	37	36	36	40
3	20	28	26	27	27	26	27	27	26	26	28
4	15	22	21	21	21	20	21	21	21	21	21
5	13	19	18	18	18	17	18	19	19	19	19
6	11	18	15	16	17	15	16	17	16	16	17
7	10	15	14	15	15	14	14	14	14	14	15
8	9	15	13	14	14	13	13	14	14	14	15

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 3)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	87	129	117	122	126	117	121	124	108	119	129
2	44	60	55	58	58	55	58	58	51	56	60
3	29	41	37	39	39	36	38	38	36	38	41
4	22	31	28	30	30	29	29	29	29	29	31
5	18	26	24	25	25	24	25	25	24	24	26
6	15	21	21	21	21	19	21	21	21	21	21
7	14	20	18	19	20	18	19	19	18	19	20
8	12	19	17	18	18	17	17	18	18	18	19

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 3)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	87	129	117	122	126	117	121	124	108	119	129
2	44	60	55	58	59	55	57	57	51	56	59
3	29	41	37	39	40	36	37	38	36	38	40
4	22	31	29	30	30	29	29	30	29	30	31
5	18	27	24	24	25	24	25	26	24	25	27
6	15	22	21	22	22	20	21	21	21	22	22
7	14	21	19	19	20	19	19	20	19	20	21
8	12	18	17	17	18	17	18	18	17	18	18

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	116	209	192	199	204	192	198	202	177	188	198
2	58	81	72	77	78	72	76	76	65	70	76
3	39	53	50	51	52	49	50	50	45	47	50
4	29	41	37	39	39	36	38	38	36	36	40
5	24	34	32	32	32	31	31	32	30	31	33
6	20	29	26	28	28	27	27	27	26	26	28
7	17	24	24	24	27	23	24	24	23	23	24
8	15	22	20	21	21	20	20	21	21	21	22

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	116	209	192	199	204	192	198	202	177	188	198
2	58	81	71	76	76	72	74	74	65	69	75
3	39	53	50	52	52	49	50	50	45	47	52
4	29	41	38	39	40	36	37	39	35	36	38
5	24	34	31	32	32	31	32	32	30	30	32
6	20	29	27	27	27	27	27	28	26	27	28
7	17	24	23	23	23	23	24	24	23	23	24
8	15	22	20	20	22	20	21	21	21	21	22

(ข)

จากตารางที่ 4.13 ถึง 4.16 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 7N_13L ต้องการที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกป้องแบบ SLB ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมด และแบบที่โครงข่ายไม่มีการปกป้อง พบว่าก็มีลักษณะของผลการปกป้องโดยรวมมีทิศทางที่คล้ายกันกับการปกป้องด้วยวิธี SLB ที่โครงข่าย 5N_7L ดังนั้นจึงขอนำเสนอเฉพาะประเด็นหลักคือการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนเพื่อเปรียบเทียบกับโครงข่าย 5N_7L

กรณีการปกป้องแบบบางคู่โนด จากตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าการปกป้องโครงข่ายจำนวน 30 %, 50%, และ 70% ในแบบที่ I และ II ของทั้งประเภท VWP และ WP เริ่มลดลงตั้งแต่การ

ปกป้องแบบ 70 % เนื่องจากมีจำนวนเส้นทางเลือกเพื่อที่จะปกป้องของกลุ่มคู่โนดมีจำนวนมากขึ้น ซึ่งทำให้มีโอกาสที่จะเลือกเส้นทางที่สั้นเพื่อใช้ในการปกป้องได้ และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือ ถ้านับเฉพาะทางจำนวนคู่โนดจะเห็นว่า จำนวนคู่โนดที่จะปกป้องแบบ 70 % ของโครงข่าย 7N_13L มีจำนวนคู่โนดที่จะปกป้อง 15 คู่โนดซึ่งลดลงถึง 6 คู่โนด ในขณะที่โครงข่าย 5N_7L มีจำนวนคู่โนดที่จะปกป้อง 7 คู่โนดซึ่งลดเพียง 3 คู่โนดนั่นเอง

ส่วนกรณีการปกป้องแบบบางส่วนของโครงข่าย 7N_13L จะมีผลการทดสอบซึ่งคล้ายกับโครงข่าย 5N_7L แต่จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมเพิ่มขึ้นเพราะโครงข่ายมีจำนวนคู่โนดมากขึ้นจึงมีผลทำให้จำนวนทราฟฟิกในโครงข่ายมากขึ้นนั่นเอง คือ จากตารางที่ 4.13 จะได้ว่า การปกป้องโครงข่ายทุก % การปกป้องนั้นจะไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้เลยเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการปกป้องแบบทั้งหมดนั้นทุกคู่โนดมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นทุก % ที่ปกป้องจึงต้องปกป้องอย่างน้อยตาม % ที่ได้กำหนด คือ 25 %, 50 %, และ 75 % ของทราฟฟิกเท่ากับ 1 ก็คือมีค่าเท่ากับ 1 นั่นเอง ส่วนตารางที่ 4.14 ก็จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงเนื่องจากจำนวนทราฟฟิกที่จะต้องปกป้องลดลงคือจากทราฟฟิกเท่ากับ 2 เมื่อปกป้องแบบ 25 % และ 50 % ก็จะเหลือการปกป้องเพียงแค่ทราฟฟิกละ 1 เท่านั้น ส่วนตารางที่ 4.15 จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % นั้นมีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงตามลำดับเนื่องจากจำนวน ทราฟฟิกที่ปกป้องมีจำนวนลดลงคือจากจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดเท่ากับ 3 จะเหลือการปกป้องเพียงทราฟฟิกละ 1 และ 2 ตามลำดับนั่นเอง และสำหรับตารางที่ 4.16 นั้นจะเห็นได้ว่าการปกป้องโครงข่ายจะเริ่มลดลงตั้งแต่ 75 % ลงไป เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดเป็น 4 จึงทำให้การปกป้องทราฟฟิกมีปริมาณลดลง คือปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3, 2, และ 1 ตามลำดับการปกป้องนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีช่องสัญญาณเหลือมากขึ้นเหมือนกันจึงทำให้การลดจำนวนทราฟฟิกก็เริ่มไม่ค่อยมีผลมากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.17 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 1)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	13	21	13	16	18	13	13	14	21	21	21
2	7	11	8	8	9	7	7	7	11	11	11
3	5	9	5	8	8	5	5	7	9	9	9
4	5	6	5	5	6	5	5	6	6	6	6
5	5	6	5	5	6	5	5	5	6	6	6
6	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 1)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	13	21	13	16	18	13	13	14	21	21	21
2	7	11	8	8	9	7	7	7	11	11	11
3	5	9	5	8	8	5	5	7	9	9	9
4	5	6	5	5	6	5	5	6	6	6	6
5	5	6	5	5	6	5	5	5	6	6	6
6	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.18 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 2)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	26	42	26	31	36	26	26	28	26	26	42
2	13	21	13	16	18	13	13	14	13	13	21
3	7	15	9	12	14	9	9	11	9	9	15
4	7	11	8	8	9	7	7	7	7	7	11
5	6	11	8	8	9	6	7	7	6	6	11
6	5	9	5	8	8	5	5	7	5	5	9
7	5	9	5	8	8	5	5	7	5	5	9
8	5	6	5	5	6	5	5	6	5	5	6

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 2)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	26	42	26	31	36	26	26	28	26	26	42
2	13	21	13	16	18	13	13	14	13	13	21
3	9	15	9	12	14	9	9	11	9	9	15
4	7	11	8	8	9	7	7	7	7	7	11
5	6	11	8	8	9	6	7	7	6	6	11
6	5	9	5	8	8	5	5	7	5	9	9
7	5	9	5	8	8	5	5	7	5	9	9
8	5	6	5	5	6	5	5	6	5	5	6

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.19 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 3)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	39	63	39	47	54	39	39	42	39	42	63
2	20	32	21	24	27	20	20	21	20	21	32
3	13	21	13	16	18	13	13	14	11	15	21
4	11	17	12	13	15	11	11	12	11	11	17
5	9	15	9	12	14	9	9	11	9	11	15
6	7	11	8	8	9	7	7	7	7	9	11
7	7	11	8	8	9	7	7	7	7	9	11
8	6	11	8	8	9	6	7	7	6	6	11

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 3)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	39	63	39	47	54	39	39	42	39	42	63
2	20	32	21	24	27	20	20	21	20	21	32
3	13	21	13	16	18	13	13	14	13	15	21
4	11	17	12	13	15	11	11	12	11	11	17
5	9	15	9	12	14	9	9	11	9	11	15
6	7	11	8	8	9	7	7	7	7	9	11
7	7	11	8	8	9	7	7	7	7	5	11
8	6	11	8	8	9	6	7	7	6	6	11

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	52	84	52	62	72	52	52	56	52	52	63
2	26	42	26	31	36	26	26	28	26	26	32
3	18	30	18	23	26	18	18	21	18	18	21
4	13	21	13	16	18	13	13	14	13	13	17
5	11	20	13	16	17	11	12	14	11	11	15
6	9	15	9	12	14	9	9	11	9	9	11
7	9	15	9	12	14	9	9	11	9	9	11
8	7	15	8	8	9	7	7	7	7	7	11

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	52	84	52	62	72	52	52	56	52	52	63
2	26	42	26	31	36	26	26	28	26	26	32
3	18	30	18	23	26	18	18	21	18	18	21
4	13	21	13	16	18	13	13	14	13	13	17
5	11	20	13	16	17	11	12	14	11	11	15
6	9	15	9	12	14	9	9	11	9	9	11
7	9	15	9	12	14	9	9	11	9	9	11
8	7	15	8	8	9	7	7	7	7	7	11

(ข)

จากตารางที่ 4.17 ถึง 4.20 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5N_7L ต้องการที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกป้องแบบ MC ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดและแบบที่โครงข่ายไม่มีการปกป้อง พบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมแบบปกป้องทั้งโครงข่ายจะมีค่าลดลงมากกว่าวิธี DJP และ SLB อย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีจำนวนทราฟฟิกมากขึ้น เนื่องจากวิธีการปกป้องแบบ MC นั้นจะหาเส้นทางสำรองไปพร้อมๆกับการหาเส้นทางทำงานปกติ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB ที่จะหาเส้นทางสำรองหลังจากหาเส้นทางทำงานปกติเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นจึงทำให้การวางเส้นใยนำแสงลงในโครงข่ายมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณา

ออกเป็นแต่ละกรณี จะได้ว่า กรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดนั้น จากตารางที่ 4.17 จะเห็นว่าเมื่อมีการปกป้องคู่โนดจำนวน 70 % ในแบบที่ I และ II ของทั้งประเภท VWP และ WP ก็จะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้มากแล้วซึ่งแตกต่างจากวิธี DJP และ SLB ที่ไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้มาก และจากตารางก็จะเห็นว่าในแบบที่ I เมื่อมีการปกป้องคู่โนดจำนวน 30 % แล้วจะมีจำนวนเส้นใยนำแสงเกือบทุกความยาวคลื่นจะเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่ไม่มีการปกป้องเลย เหตุผลก็คือเนื่องจากการวางเส้นใยนำแสงของเส้นทางทำงานปกติกับเส้นทางสำรองไปพร้อมๆกันจึงทำให้มีช่องสัญญาณเหลือเพียงพอให้ปกป้องโครงข่ายอีกจำนวน 30 % ด้วย ดังนั้นจึงทำให้ไม่เป็นการเปลืองทรัพยากรในโครงข่าย ในแนวทางเดียวกันนี้ แบบที่ II เมื่อมีการปกป้องคู่โนดจำนวน 50 % ก็สามารถมีจำนวนเส้นใยนำแสงเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่ไม่มีการปกป้องได้แล้ว ที่เป็นอย่างนี้ก็เนื่องจากกลุ่มคู่โนดที่ทำการปกป้องนั้นมีเส้นทางเลือกบางเส้นทางเป็นเส้นทางที่สั้นจึงมีโอกาสที่จะใช้เส้นทางนั้นเพื่อที่จะทำการปกป้อง ทำให้เส้นทางที่ได้เลือกมานั้นสามารถใช้ช่องสัญญาณที่มีเหลืออยู่ในโครงข่ายก็เพียงพอที่จะทำการปกป้องแล้วโดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสง ส่วนในตารางที่ 4.18, 4.19, และ 4.20 นั้นจะมีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับตารางที่ 4.17 เพียงแต่ละตารางได้เพิ่มจำนวนทราฟฟิกให้มากขึ้นเป็น 2, 3, และ 4 จึงต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ในกรณีการปกป้องแบบบางส่วน จะมีผลการทดสอบบางส่วนที่แตกต่างกันกับวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB ของโครงข่าย 5N_7L ดังนี้ จากตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบนี้ก็คล้ายกับวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB คือ ต้องมีการปกป้องทราฟฟิกเท่ากับ 1 เหมือนกันจึงทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่มีการปกป้องแบบบางส่วนมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่มีการปกป้องแบบทั้งหมด ส่วนตารางที่ 4.18 มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 2 จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงและส่วนใหญ่ทุกความยาวคลื่นลดลงจนเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายเลย ในตารางที่ 4.19 ซึ่งมีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3 ก็ได้ผลการทดสอบที่เหมือนกับ 2 เช่นกัน ส่วนตารางที่ 4.20 นั้นมีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 จะเห็นว่าสมารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้ตั้งแต่ 75 % แล้วและส่วนใหญ่ทุกความยาวคลื่นลดลงจนเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายเลย จากผลการทดสอบที่ได้ก็มีเหตุผล คือ จำนวนช่องสัญญาณมีมากเพียงพอที่จะให้การปกป้องแบบบางส่วนเมื่อปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ปกป้องนั้นลดลง จึงทำให้การจัดการใช้ช่องสัญญาณนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจนมีการใช้เส้นใยนำแสงในจำนวนที่เท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ไม่มีการปกป้องได้

ตารางที่ 4.21 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 1 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 1)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	29	38	29	29	30	29	29	29	38	38	38
2	15	19	15	15	16	15	15	15	19	19	19
3	11	15	11	11	12	11	11	11	15	15	15
4	9	11	9	9	10	9	9	9	11	11	11
5	8	11	8	9	9	8	8	8	11	11	11
6	7	9	7	7	9	7	8	8	9	9	9
7	7	9	7	7	8	7	8	8	9	9	9
8	7	9	7	7	8	7	8	8	9	9	9

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 1)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	29	38	29	29	30	29	29	30	38	38	38
2	15	19	15	15	18	15	15	19	19	19	19
3	11	15	11	11	12	11	11	13	15	15	15
4	9	11	9	9	10	9	9	9	11	11	11
5	8	11	8	9	10	8	8	9	11	11	11
6	7	9	7	7	9	7	8	8	9	9	9
7	7	9	7	7	8	7	8	8	9	9	9
8	7	9	7	7	8	7	8	8	9	9	9

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.22 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 2 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 2)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	58	74	58	58	59	58	58	58	58	58	74
2	29	37	29	29	30	29	29	29	29	29	37
3	20	28	20	21	21	20	20	20	20	20	28
4	15	19	15	15	16	15	15	15	15	15	19
5	13	17	14	14	15	13	13	13	13	13	17
6	11	15	11	11	12	11	11	11	11	11	15
7	10	13	10	10	10	10	10	10	10	10	13
8	9	11	9	9	10	9	9	9	9	9	11

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 2)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	58	74	58	58	59	58	58	58	58	58	74
2	29	37	29	29	30	29	29	29	29	29	37
3	20	28	20	21	21	20	21	22	20	20	28
4	15	19	15	15	16	15	15	17	15	15	19
5	13	17	14	14	15	13	13	15	14	14	17
6	11	15	11	11	12	11	12	11	11	11	15
7	10	13	10	10	12	10	10	10	11	11	13
8	9	11	9	9	10	9	9	9	9	9	11

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.23 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 3 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 3)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	87	110	87	87	89	87	87	87	87	87	110
2	44	55	44	44	45	44	44	44	44	44	55
3	29	37	29	29	30	29	29	29	29	29	37
4	22	30	23	23	24	22	22	22	22	22	30
5	18	24	19	19	20	18	18	18	18	19	24
6	15	19	15	15	16	15	15	15	15	15	19
7	14	19	15	15	16	14	14	14	14	15	17
8	12	17	13	14	14	12	12	12	12	12	17

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 3)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	87	110	87	87	89	87	87	88	87	87	110
2	44	55	44	44	45	44	44	44	44	44	55
3	29	37	29	29	30	29	29	31	29	29	37
4	22	30	23	24	24	22	22	22	22	22	30
5	18	24	19	20	22	19	19	18	18	19	24
6	15	20	15	15	16	15	15	15	15	17	19
7	14	19	15	15	16	14	14	14	14	15	17
8	12	17	13	14	14	12	12	12	12	12	17

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.24 จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L เทียบกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายโดยมีปริมาณทราฟฟิกทุกคู่โนดเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	116	148	116	116	118	116	116	116	116	116	116
2	58	74	58	58	59	58	58	58	58	58	58
3	39	51	39	40	40	39	39	39	39	39	39
4	29	37	29	29	30	29	29	29	29	29	30
5	24	31	24	24	28	24	24	24	24	24	24
6	20	26	20	20	20	20	20	20	20	20	20
7	17	22	18	18	18	17	17	17	17	17	17
8	15	19	15	15	16	15	15	15	15	15	17

(ก)

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	116	148	116	116	118	116	116	116	116	116	116
2	58	74	58	58	59	58	58	58	58	58	58
3	39	54	39	40	40	39	39	40	39	39	39
4	29	37	29	29	30	29	29	29	29	29	30
5	24	31	24	25	28	24	24	25	24	24	24
6	20	28	20	21	20	20	21	22	20	21	20
7	17	22	18	19	19	17	20	21	18	17	17
8	15	19	15	15	17	15	15	17	15	16	18

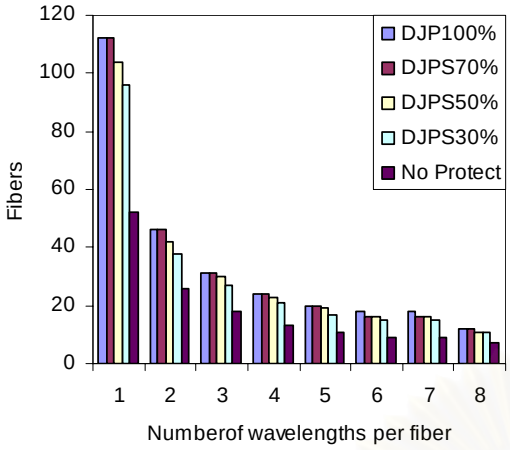
(ข)

จากตารางที่ 4.21 ถึง 4.24 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 7N_13L ต้องการที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกป้องแบบ MC ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดและแบบที่โครงข่ายไม่มีการปกป้อง พบว่าก็มีลักษณะของผลการปกป้องโดยรวมมีทิศทางที่คล้ายกันกับการปกป้องด้วยวิธี MC ที่โครงข่าย 5N_7L ดังนั้นจึงขอนำเสนอเฉพาะประเด็นหลักคือการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนเพื่อเปรียบเทียบกับโครงข่าย 5N_7L

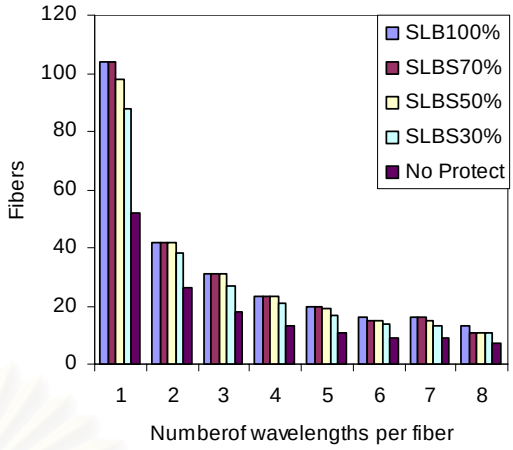
กรณีการปกป้องแบบบางคู่โนด จากตารางที่ 4.21 จะเห็นว่าเริ่มมีความแตกต่างของจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของประภท VWP และ WP คือ ในแบบที่ II ของการปกป้องคู่โนด

จำนวน 70 % ในประเภท WP จะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้บ้าง แต่ก็ไม่ลดลงเท่ากับประเภท VWP ที่สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้จนเกือบจะทุกความยาวคลื่นมีค่าใกล้เคียงกับจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่ไม่มีการปกป้อง ส่วนการปกป้องคู่โนดจำนวน 30 % และ 50 % ในแบบที่ I และ II ของทั้งประเภท VWP และ WP จะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงในทุกๆ ความยาวคลื่นจนเกือบจะเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่ไม่มีการการปกป้อง เหตุผลก็เหมือนกับการปกป้องแบบบางคู่โนดด้วยวิธี MC ของโครงข่าย 5N_7L คือมีจำนวนช่องสัญญาณเหลือมากพอที่จะแบ่งให้เพื่อการปกป้องบางคู่โนดในโครงข่ายไว้ใช้งานจึงทำให้ไม่ต้องมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสงได้ ส่วนในตารางที่ 4.22, 4.23, และ 4.24 นั้นจะมีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับตารางที่ 4.21 เพียงแต่ละตารางได้เพิ่มจำนวนทราฟฟิกให้มากขึ้นเป็น 2, 3, และ 4 จึงต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

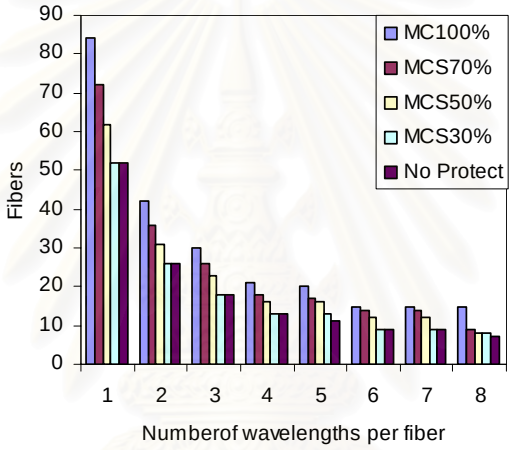
ส่วนกรณีการปกป้องแบบบางส่วนของโครงข่าย 7N_13L จะมีผลการทดสอบซึ่งคล้ายกับโครงข่าย 5N_7L แต่จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมเพิ่มขึ้นเพราะโครงข่ายมีจำนวนคู่โนดมากขึ้นจึงมีผลทำให้จำนวนทราฟฟิกในโครงข่ายมากขึ้นนั่นเอง คือ จากตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบนี้ก็คล้ายกับวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB คือ ต้องมีการปกป้องทราฟฟิกเท่ากับ 1 เหมือนกันจึงทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่มีการปกป้องแบบบางส่วนมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่มีการปกป้องแบบทั้งหมด ส่วนตารางที่ 4.22 มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 2 จะได้ว่า การปกป้องแบบ 25 % และ 50 % มีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงลดลงและส่วนใหญ่ทุกความยาวคลื่นลดลงจนเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายเลย ในตารางที่ 4.23 ซึ่งมีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3 ก็ได้ผลการทดสอบที่เหมือนกับ 2 เช่นกัน ส่วนตารางที่ 4.24 นั้นมีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 จะเห็นว่าสมารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้ตั้งแต่ 75 % แล้วและส่วนใหญ่ทุกความยาวคลื่นลดลงจนเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายเลย จากผลการทดสอบที่ได้ก็มีเหตุผลคือ จำนวนช่องสัญญาณมีมากเพียงพอที่จะให้การปกป้องแบบบางส่วนเมื่อปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ปกป้องนั้นลดลง จึงทำให้การจัดการใช้ช่องสัญญาณนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจนมีการใช้เส้นใยนำแสงในจำนวนที่เท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ไม่มีการปกป้องได้ และเพื่อให้เห็นตารางที่ชัดเจนมากขึ้น จึงได้นำเสนอข้อมูลบางส่วนได้แก่ข้อมูลของจำนวนทราฟฟิกเท่ากับ 4 ออกมาในรูปกราฟแท่งเพื่อให้เห็นถึงจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้อย่างชัดเจนเพราะบางความยาวคลื่นอาจมีการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงเท่ากันจึงมองรูปได้ยาก ซึ่งกราฟแท่งนี้จะประกอบไปด้วยแต่ละวิธีการปกป้องทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนด และกรณีการปกป้องแบบบางส่วน แสดงได้ดังนี้



(ก)



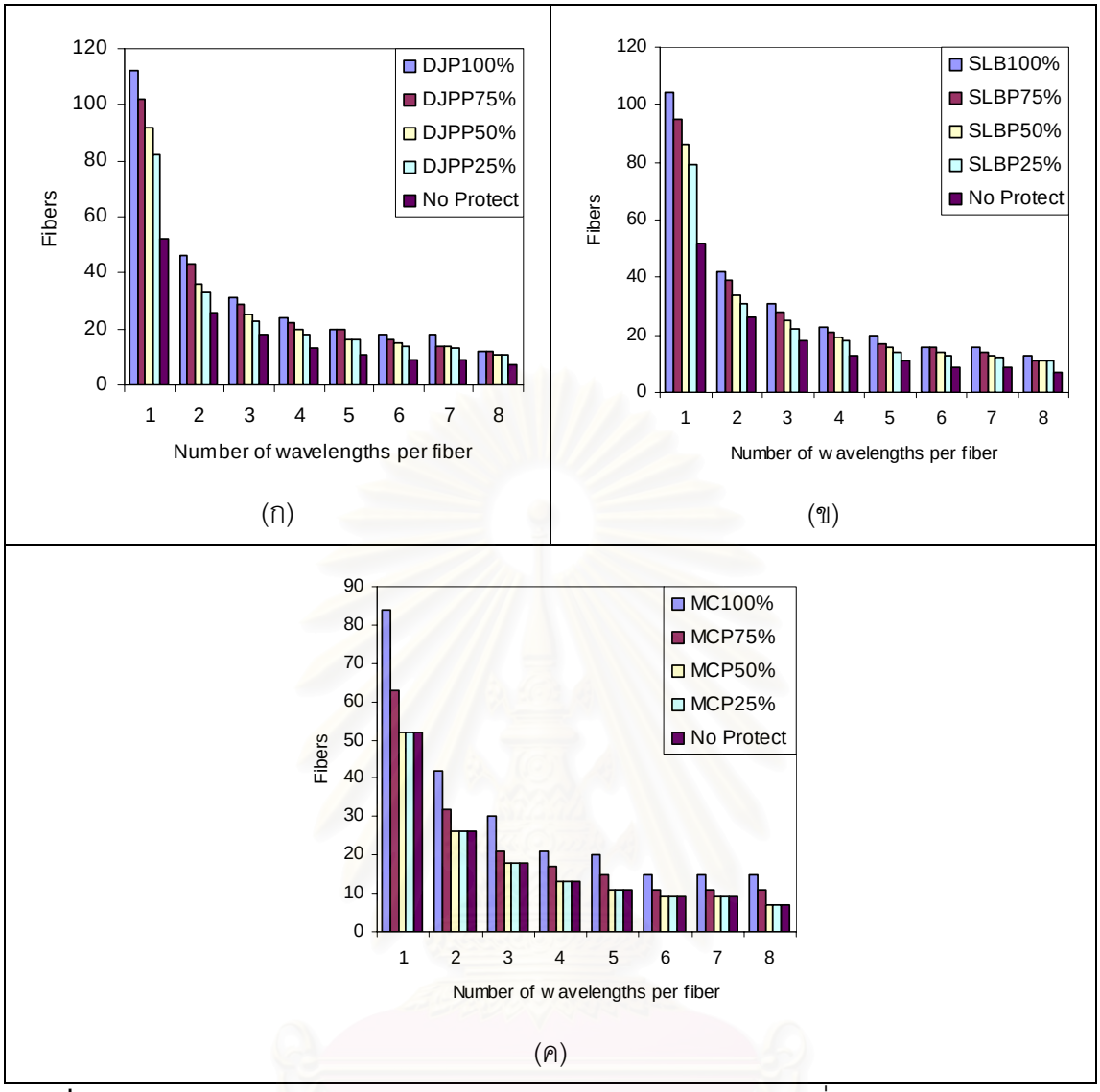
(ข)



(ค)

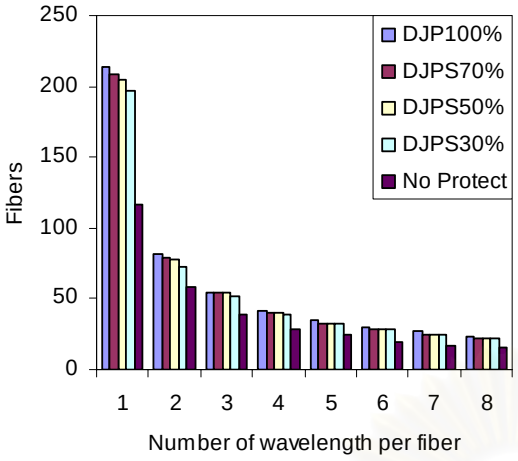
รูปที่ 4.2 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

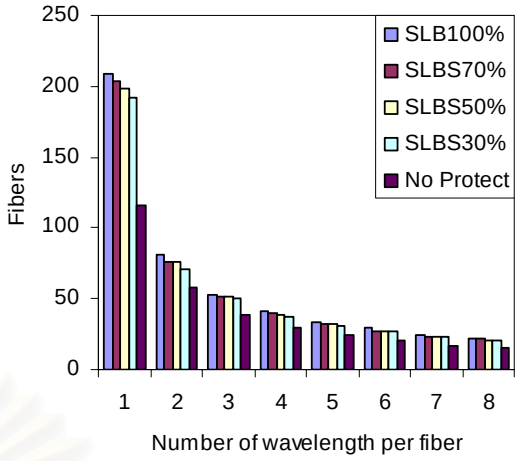


รูปที่ 4.3 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC

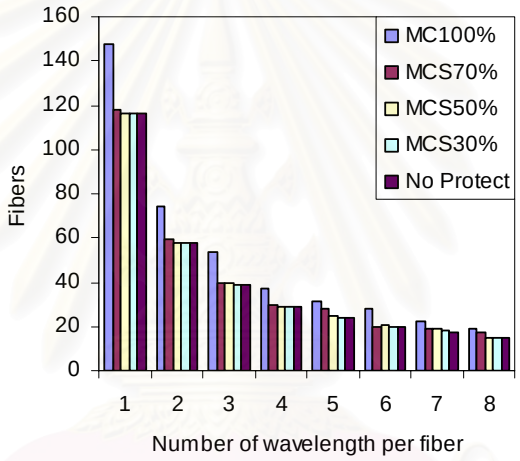
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



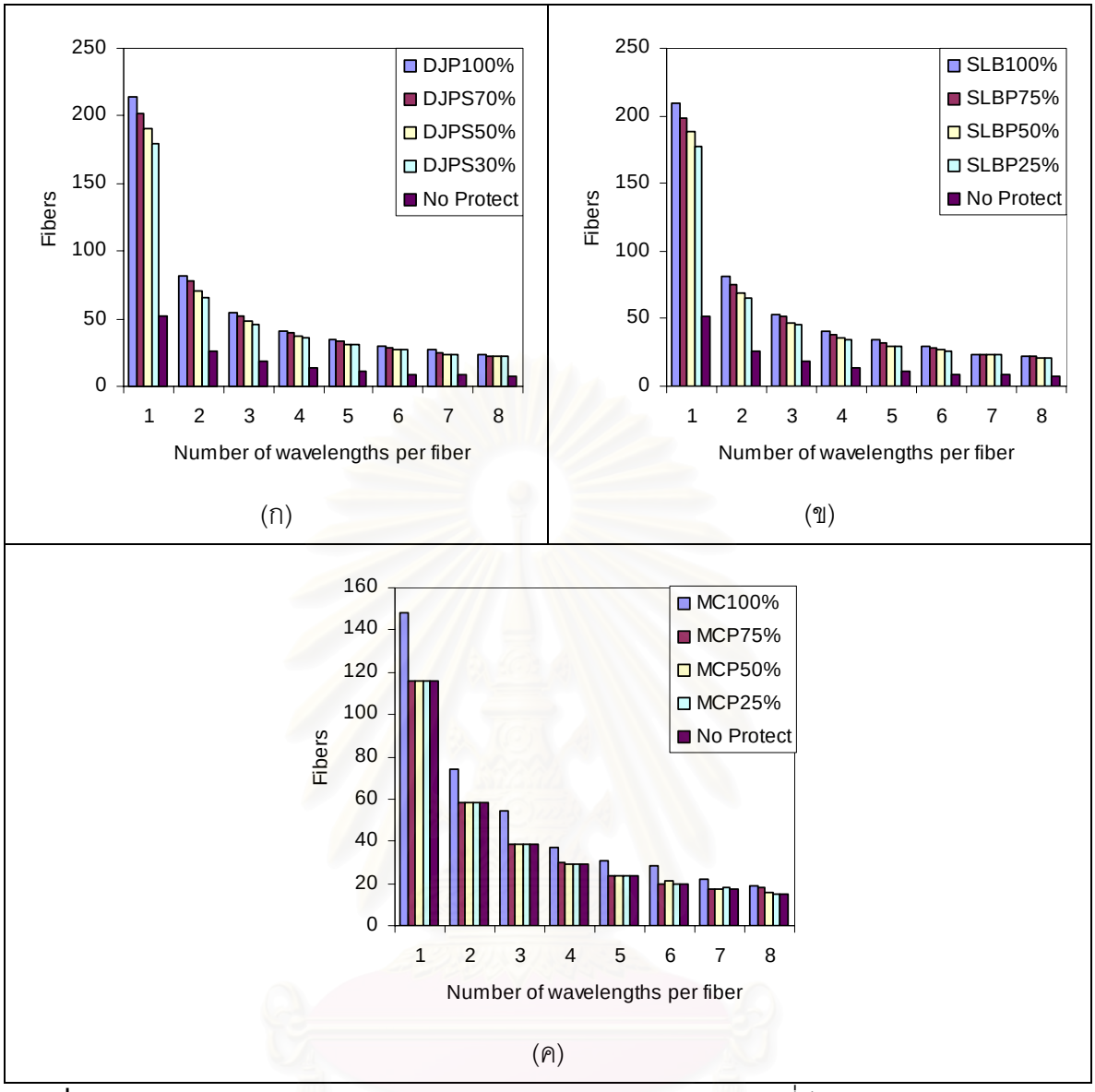
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ที่มีทราฟฟิกเท่ากับ 4 ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน (ก) วิธีการปกป้องแบบ DJP (ก) วิธีการปกป้องแบบ SLB (ก) วิธีการปกป้องแบบ MC

จากกราฟแท่งที่ได้แสดงทั้ง 2 กรณีการปกป้องจะเห็นได้ว่าในวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB จะเห็นได้ว่าโครงข่ายขนาด 5N_7L จะมีจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดลงอย่างมากตามเปอร์เซ็นต์การปกป้องแต่ก็ไม่ลดเป็นแบบเชิงเส้นคือการปกป้องแบบทั้งหมดไม่ได้ลดลงมาแบบได้สัดส่วนจนถึงแบบที่ไม่มีการปกป้อง อย่างไรก็ตามก็สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้มากกว่าโครงข่ายขนาด 7N_13L เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนแบบเดียวกัน ส่วนวิธีการปกป้องแบบ MC นั้น โครงข่ายขนาด 5N_7L จะลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้มากกว่าวิธีอื่นๆ โดยจะเห็นว่าในแบบบางคู่โนดนั้นสามารถลดจำนวนเส้นใยแสงได้ใกล้เคียงแบบเชิงเส้นอย่างมากและเมื่อพิจารณาดูที่

โครงข่าย 7N_13L ก็จะเห็นว่าจำนวนเส้นใยนำแสงลดลงจนเท่าๆกับแบบที่ไม่มีการปกป้องโครงข่ายเลยเกือบทุกความยาวคลื่น

จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าวิธี การปกป้องแบบ MC ให้ผลการทดสอบที่ต่ำกว่าวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB ในทุก ๆ ประเภทของโครงข่าย และทุก ๆ กรณีของการปกป้องทั้งแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในวิธีการปกป้องแบบ MC นั้น เส้นทางทำงานปกติและเส้นทางสำรองของโครงข่ายจะถูกจัดสรรพร้อมกันเพื่อให้ได้จำนวนเส้นใยนำแสงค่าต่ำสุด แต่ในวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB นั้น โครงข่ายจะจัดสรรเฉพาะเส้นทางสำรองโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางทำงานปกติบนโครงข่าย ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ได้จากวิธีทั้งสอง ไม่เป็นค่าที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีทั้งสองจะให้ค่าผลการทดสอบที่มากกว่าวิธีการปกป้องแบบ MC แต่การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้ก็มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติในบางกรณี นั่นคือสามารถนำไปใช้ออกแบบสำหรับโครงข่ายที่มีการวางและใช้งานจริงแล้ว แต่ยังไม่ได้มีการกำหนดวิธีการในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องทำการติดตั้งเพิ่มให้กับโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายที่ใช้งานแล้วสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้อย่างเหมาะสม สำหรับในส่วนการพิจารณาวิธีปกป้องแบบบางคู่โนดนั้นจะเป็นว่ามีการปกป้องอยู่ 2 รูปแบบโดยจะเห็นได้ชัดว่า ถ้ามีการปกป้องแก่กลุ่มคู่โนดไหนที่มีเส้นทางเลือกที่จะใช้ทำการปกป้องเป็นเส้นทางที่สั้น ดังนั้นจึงมีโอกาสที่กลุ่มคู่โนดนั้นจะเลือกเส้นทางที่สั้นเพื่อที่จะทำการปกป้อง จึงทำให้บางเส้นทางที่เลือกสามารถใช้ช่องสัญญาณที่มีอยู่แล้วในโครงข่ายก็เพียงพอที่จะทำการปกป้องได้โดยไม่ต้องมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ จากตารางที่ 4.1 การปกป้องบางคู่โนดแบบ 70% ของโครงข่าย 5N_7L ด้วยวิธี DJP ที่ความยาวคลื่นเป็น 1 จะเห็นว่าแบบที่ I นั้นต้องวางเส้นใยนำแสงถึง 23 เส้นแต่แบบที่ II จะวางเส้นใยนำแสงเพียง 19 เส้นเท่านั้น

4.2.2 การเปรียบเทียบในเชิงเวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลอง

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลการทดสอบของแบบจำลองในกรณีที่โครงข่ายไม่มีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ ในส่วนนี้ได้นำเสนอเฉพาะตารางของโครงข่ายที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 เท่านั้นส่วนปริมาณทราฟฟิกอื่นๆก็จะใช้เวลาน้อยลงไปตามลำดับแต่จะเป็นไปตามแนวทางเดียวกับทราฟฟิกเท่ากับ 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบ WP นั้นจะใช้เวลาในการคำนวณหาผลการทดสอบนานกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ VWP เนื่องจากโครงข่ายแบบ WP มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่าเนื่องจากต้องมีการกำหนดเส้นทางด้วยความยาวคลื่นมาเกี่ยวข้องด้วย

ตารางที่ 4.25 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0.02 sec	0	0	0.02 sec	0	0.02 sec	0.01 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec
3	0	0	0	0	0	0	0	0.02 sec	0	0	0
4	0	0.02 sec	0	0	0.02 sec	0	0.01 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.01 sec	0.02 sec
5	0.03 sec	0.02 sec	0	0.02 sec	0	0	0.02 sec	0.02 sec	0	0	0
6	0	0.01 sec	0	0	0	0.01 sec	0.01 sec	0.02 sec	0	0	0.02 sec
7	0.02 sec	0.02 sec	0	0.01 sec	0	0	0.02 sec	0.01 sec	0.01 sec	0.01 sec	0.01 sec
8	0	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.01 sec	0.02 sec	0.01 sec	0.02 sec	0.01 sec	0.01 sec	0.01 sec

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPS - III		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0.02 sec	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0.02 sec	0.02 sec	0	0.02 sec
3	0.02 sec	0.06 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.03 sec	0.02 sec	0.06 sec	0.11 sec	0.06 sec	0.05 sec	0.08 sec
4	0.06 sec	0.08 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.05 sec	0	0.11 sec	0.06 sec	0.07 sec	0.05 sec	0.13 sec
5	0.19 sec	0.25 sec	0.05 sec	0.05 sec	0.20 sec	0.02 sec	0.27 sec	0.25 sec	0.48 sec	0.33 sec	0.28 sec
6	0.05 sec	0.33 sec	0.11 sec	0.16 sec	0.42 sec	0.03 sec	0.36 sec	0.36 sec	0.56 sec	0.64 sec	0.41 sec
7	0.73 sec	0.97 sec	0.19 sec	0.31 sec	0.58 sec	0.28 sec	0.97 sec	1 sec	0.77 sec	0.89 sec	0.84 sec
8	0.02 sec	0.83 sec	0.11 sec	0.28 sec	0.63 sec	0.08 sec	0.81 sec	1.22 sec	1.17 sec	0.7 sec	1.38 sec

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.26 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0.02 sec	0	0	0	0.02 sec	0	0.02 sec	0	0
3	0	0	0	0	0	0.01 sec	0	0	0.02 sec	0	0
4	0	0	0	0.02 sec	0	0	0	0.02 sec	0.02 sec	0	0.02 sec
5	0.03 sec	0.02 sec	0	0	0	0	0	0	0.02 sec	0.02 sec	0
6	0	0	0	0	0.01 sec	0	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec
7	0.02 sec	0.02 sec	0.01 sec	0	0	0	0.01 sec	0.02 sec	0	0.02 sec	0.02 sec
8	0	0	0	0.02 sec	0.02 sec	0	0.02 sec	0.01 sec	0	0.02 sec	0.02 sec

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0.02 sec	0	0	0.02 sec	0	0	0	0	0	0
2	0	0.02 sec	0	0	0	0	0	0.02 sec	0.01 sec	0.02 sec	0.03 sec
3	0.02 sec	0.06 sec	0.02 sec	0	0.08 sec	0.01 sec	0.06 sec	0.13 sec	0.06 sec	0.06 sec	0.08 sec
4	0.06 sec	0.08 sec	0.05 sec	0.03 sec	0.03 sec	0.01 sec	0.11 sec	0.14 sec	0.22 sec	0.06 sec	0.14 sec
5	0.19 sec	0.3 sec	0.03 sec	0.09 sec	0.3 sec	0.02 sec	0.25 sec	0.28 sec	0.34 sec	0.27 sec	0.31 sec
6	0.05 sec	0.48 sec	0.06 sec	0.09 sec	0.2 sec	0.03 sec	0.42 sec	0.83 sec	0.41 sec	0.48 sec	0.95 sec
7	0.73 sec	0.56 sec	0.08 sec	0.16 sec	0.89 sec	0.20 sec	1.11 sec	1.28 sec	0.59 sec	0.88 sec	1 sec
8	0.02 sec	2.02 sec	0.19 sec	0.28 sec	0.75 sec	0.06 sec	0.64 sec	1.17 sec	1.08 sec	0.98 sec	2.3 sec

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.27 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 5N_7L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06 sec
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0.01 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.03 sec	0.03 sec	0.01 sec	0.05 sec	0.11 sec
4	0	0	0	0.02 sec	0	0	0	0	0	0.01 sec	0.03 sec
5	0.03 sec	0.06 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.05 sec	0.05 sec	0.05 sec	0.16 sec	0.01 sec
6	0	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.01 sec	0.02 sec	0.05 sec	0.01 sec	0.02 sec	0.03 sec
7	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.03 sec	0.06 sec	0.08 sec	0.09 sec	0.26 sec	0.03 sec	0.02 sec	0.16 sec
8	0	0.02 sec	0	0.01 sec	0.02 sec	0	0.02 sec	0	0.02 sec	0.02 sec	0.05 sec

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02 sec	0	0.06 sec
2	0	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0	0	0.03 sec	0.02 sec	0	0.11 sec
3	0.02 sec	0.11 sec	0.11 sec	0.3 sec	0.13 sec	0.14 sec	0.08 sec	0.23 sec	0.19 sec	0.67 sec	0.44 sec
4	0.06 sec	0.38 sec	0.06 sec	0.13 sec	0.28 sec	0.02 sec	0.08 sec	0.09 sec	0.14 sec	0.36 sec	1.05 sec
5	0.19 sec	2.06 sec	0.86 sec	1.08 sec	0.44 sec	0.15 sec	0.4 sec	0.8 sec	0.91 sec	7.61 sec	2.14 sec
6	0.05 sec	2.05 sec	0.16 sec	0.7 sec	0.59 sec	0.77 sec	1.88 sec	3.38 sec	0.64 sec	2.41 sec	2.34 sec
7	0.73 sec	5 sec	1.05 sec	42.03 sec	1.83 sec	30.31 sec	16.38 min	3.88 sec	1 min	8.95 sec	4.44 sec
8	0.02 sec	4.86 sec	1.25 sec	0.81 sec	1.14 sec	0.3 sec	0.7 sec	1.83 sec	0.48 sec	5.48 sec	7.94 sec

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในส่วนนี้จะพิจารณากรณีที่โครงข่าย 5N_ 7L ที่ได้จากตารางที่ 4.25, 4.26, และ4.27 โดยรวมที่ใช้วิธีการปกป้องแบบ DJP, SLB, และ MC ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาก็จะพบว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบจะนานกว่ากรณีที่โครงข่ายไม่สามารถปกป้องความเสียหายได้ และเมื่อทำการพิจารณาประเภทของโครงข่าย พบว่าแบบจำลองโครงข่ายแบบ VWP จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลการทดสอบเร็วกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ WP ข้อสรุปดังกล่าวนี้จะตรงกับข้อสรุปของโครงข่ายในกรณีที่ไม่มีการปกป้องความเสียหาย ยกตัวอย่างเช่น จากค่าในตารางที่ 4.25 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบในวิธีการปกป้องแบบ DJP ที่ M =7 ของโครงข่ายแบบ VWP ใช้เวลาแค่เพียง 0.02 วินาที ขณะที่โครงข่ายแบบ WP ใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 0.97 วินาที ทั้งนี้ในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดนั้นจะใช้เวลาในการหาผลการทดสอบเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับจำนวนคู่โนดที่ทำการปกป้องว่าถ้ามีจำนวนมากก็ต้องใช้เวลาในการหาผลการทดสอบนาน ส่วนในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นจะใช้เวลาในการหาผลการทดสอบเท่าๆกันเนื่องจากจำนวนสมการและตัวแปรเส้นทางในแต่ละคู่โนดมีจำนวนเท่าเดิมเพียงแต่มีปริมาณทราฟฟิกที่ลดลงเท่านั้นจึงใช้เวลาในการหาผลการทดสอบนานพอๆกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.28 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ DJP ของโครงข่าย 7N_13L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0.13 sec	0.02 sec	0.05 sec	0.03 sec	0.03 sec	0.05 sec	0.03 sec	0.84 sec	0.42 sec	0.45 sec
2	0	0.14 sec	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec	0	0.02 sec	0.01 sec	0.5 sec	0.17 sec	1.17 sec
3	0.16 sec	21.72 sec	0.16 sec	0.63 sec	0.84 sec	0.38 sec	0.34 sec	4.2 sec	1.25 sec	0.64 sec	1.69 sec
4	0	0.16 sec	0.03 sec	0.02 sec	0.14 sec	0.05 sec	0.05 sec	0.05 sec	1.27 sec	0.63 sec	1.23 sec
5	0.03 sec	2.48 sec	0.14 sec	0.7 sec	1.45 sec	0.11 sec	0.5 sec	0.66 sec	1.19 sec	0.45 sec	1.33 sec
6	0.06 sec	1.16 sec	0.2 sec	0.94 sec	0.97 sec	0.13 sec	0.34 sec	0.5 sec	1.91 sec	1.39 sec	1.14 sec
7	0.33 sec	1.38 sec	0.31 sec	0.61 sec	1.17 sec	0.56 sec	0.44 sec	0.53 sec	1.69 sec	0.98 sec	1.11 sec
8	0.03 sec	0.56 sec	0.28 sec	0.59 sec	0.59 sec	0.19 sec	0.59 sec	0.39 sec	1.42 sec	0.81 sec	2.09 sec

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	DJP 100%	DJPS - I			DJPS - II			DJPP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0.01 sec	0.13 sec	0.02 sec	0.05 sec	0.03 sec	0.03 sec	0.05 sec	0.03 sec	0.92 sec	0.47 sec	0.47 sec
2	0.02 sec	0.19 sec	0.02 sec	0.03 sec	0.3 sec	0.14 sec	0.03 sec	0.03 sec	4.69 sec	0.31 sec	3.19 sec
3	0.61 sec	2.18 min	4.44 sec	12.53 sec	22.8 sec	2.48 sec	25.27 sec	52.48 sec	12.77 sec	44.95 sec	3.62 min
4	0.33 sec	25.63 sec	19.48 sec	26.72 min	13.84 sec	2.41 sec	9.41 sec	6.66 sec	24.3 sec	22.34 sec	1 min
5	19.11 sec	3.5 min	15.36 sec	3.98 min	11.17 min	13.02 sec	22.42 sec	22.39 min	1 min	2.46 min	1.39 min
6	3.64 sec	7.99 min	26.84 sec	> 3hrs	1.5 min	12.27 sec	47.13 sec	59.2 sec	1.5 min	4.33 min	16.94 min
7	8.53 sec	20.92 min	11.44 sec	1 min	42.19 sec	56.03 sec	5.89 min	1.26 min	1.5 hrs	6.04 min	8.19 min
8	2.39 sec	29.89 sec	2.43 min	2.9 min	28.06 sec	9.28 sec	6.13 min	9.57 min	2.5 hrs	2 hrs	15.95 min

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.29 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ SLB ของโครงข่าย 7N_13L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	0.09 sec	0.02 sec	0.03 sec	0.05 sec	0	0	0.02 sec	0.22 sec	0.42 sec	0.16 sec
2	0	0.11 sec	0.02 sec	0.03 sec	0.06 sec	0	0.05 sec	0.03 sec	0.58 sec	0.19 sec	0.20 sec
3	0.16 sec	1.28 sec	0.3 sec	0.59 sec	0.59 sec	0.3 sec	0.3 sec	0.27	0.66 sec	0.91 sec	0.72 sec
4	0	0.14 sec	0.02 sec	0.05 sec	0.08 sec	0.03 sec	0.08 sec	0.03 sec	1.36 sec	0.50 sec	1.42 sec
5	0.03 sec	1.14 sec	0.3 sec	0.38 sec	0.97 sec	0.09 sec	0.33 sec	0.83 sec	1.41 sec	1.11 sec	3.95 sec
6	0.06 sec	1 sec	0.17 sec	0.67 sec	0.53 sec	0.13 sec	0.28 sec	0.48 sec	1.28 sec	1.28 sec	2.74 sec
7	0.33 sec	0.78 sec	0.41 sec	0.8 sec	0.02 sec	0.25 sec	0.53 sec	1.89 sec	1.74 sec	1.74 sec	2.24 sec
8	0.03 sec	0.19 sec	0.2 sec	0.28 sec	0.52 sec	0.22 sec	0.86 sec	0.41 sec	1.2 sec	0.49 sec	1.28 sec

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	SLB 100%	SLBS - I			SLBS - II			SLBP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0.01 sec	0.09 sec	0.05 sec	0.03 sec	0.05 sec	0.02 sec	0	0.02 sec	0.58 sec	0.47 sec	0.19 sec
2	0.02 sec	0.42 sec	0.02 sec	0.06 sec	0.03 sec	0.14 sec	0.16 sec	0.31 sec	4.36 sec	1.74 sec	2.59 sec
3	0.61 sec	8.25 sec	2.55 sec	13.64 sec	5.25 sec	4.52 sec	4.92 sec	2.06 sec	10.47 sec	9.64 sec	32.13 sec
4	0.33 sec	56.92 sec	3.08 sec	5.75 sec	15.27 sec	1.39 sec	5.94 sec	44.88 sec	24.24 sec	27.44 sec	20.84 sec
5	19.11 sec	48.39 sec	50.69 sec	2 min	20.91 sec	10.38 sec	47.50 sec	12.98 min	36.64 sec	34.86 sec	> 3 hrs
6	3.64 sec	2.93 min	8.89 sec	15.2 sec	34.16 sec	19.97 sec	9.76 sec	7.08 min	2 hrs	2 hrs	2.5 hrs
7	8.53 sec	3.48 min	8.92 sec	36.33 sec	30.03 sec	22.34 sec	3.97 min	41.95 min	3.54 min	1.97 min	3.57 min
8	2.39 sec	1.11 min	4.38 sec	7.08 sec	32.67 sec	25.52 sec	1.14 min	1.5 min	1 hr	2 hrs	26.47 min

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.30 เวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีการปกป้องแบบ MC ของโครงข่าย 7N_13L ที่มีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 (ก) กรณี VWP (ข) กรณี WP

M	Protection Schemes (VWP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0	39.39 sec	0.05 sec	0.22 sec	9 sec	0.03 sec	0.06 sec	0.19 sec	0.08 sec	0.06 sec	21.34 sec
2	0	1.84 sec	0.06 sec	0.59 sec	0.23 sec	0.02 sec	0.09 sec	0.47 sec	0.17 sec	0.06 sec	2.91 sec
3	0.16 sec	9.66 min	3.34 sec	29.56 sec	43.95 sec	1.02 sec	2.3 sec	6.16 sec	3.5 sec	13.28 sec	36.8 sec
4	0	2.28 sec	0.13 sec	0.45 sec	4.45 sec	0.03 sec	0.03 sec	0.58 sec	0.41 sec	0.78 sec	8.59 sec
5	0.03 sec	11.06 min	2.78 sec	19.41 sec	9.61 min	0.59 sec	3.81 sec	3.41 sec	1.52 sec	6.38 sec	2 min
6	0.06 sec	3.09 sec	0.36 sec	1.99 sec	7.13 sec	0.22 sec	0.33 sec	4 sec	0.59 sec	0.97 sec	9.38 sec
7	0.33 sec	29.84 sec	1.8 sec	14.64 sec	45 sec	1.36 sec	1.88 sec	1.25 sec	1.64 sec	13.89 sec	> 3 hrs
8	0.03 sec	4.2 sec	0.31 sec	0.61 sec	7.02 sec	0.05 sec	0.36 sec	1.19 sec	0.49 sec	0.42 sec	20.14 sec

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	Protection Schemes (WP with demand = 4)										
	No	MC 100%	MCS - I			MCS - II			MCP		
			30%	50%	70%	30%	50%	70%	25%	50%	75%
1	0.01 sec	39.58 sec	0.05 sec	0.22 sec	9.06 sec	0.11 sec	0.94 sec	1.31 sec	0.08 sec	0.06 sec	20.41 sec
2	0.02 sec	16.03 sec	0.20 sec	5.55 sec	24.92 sec	0.45 sec	4.47 sec	21.06 sec	0.34 sec	0.52 sec	1 min
3	0.61 sec	1.5 hrs	5.91 sec	1.44 min	7.85 min	1.91 min	1.91 min	34.33 min	13.41 sec	2 min	6 min
4	0.33 sec	2.59 min	28.72 sec	2.38 min	2.42 min	37.11 sec	2 min	30 sec	3.44 sec	3 min	3 min
5	19.11 sec	1 hrs	1.66 min	23.42 min	42.37 min	13.11 min	5.18 min	22.21 min	2.56 min	11.14 min	1 hrs
6	3.64 sec	2 hrs	6.11 min	29.95 min	11.99 min	3.69 min	26.59 min	1 hr	4 min	1.5 hrs	16.93 min
7	8.53 sec	> 3 hrs	1 hr	39.56 min	1.5 hrs	16.61 min	1.5 hrs	2.5 hrs	> 3 hrs	10.62 min	> 3 hrs
8	2.39 sec	26.55 min	3.32 min	14.89 min	2 hrs	7.71 min	8.91 min	1.5 hrs	2 min	1 hrs	2 hrs

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

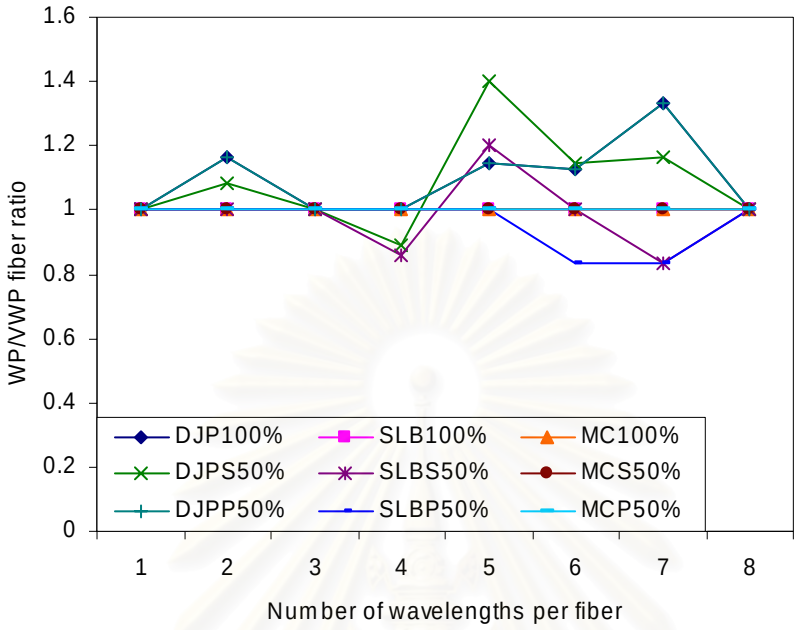
จากตารางที่ 4.25 ถึง 4.30 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแบบจำลองที่ใช้ และเนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองแปรผันตามขนาดของโครงข่ายที่ใช้พิจารณา การหาผลการทดสอบของโครงข่าย 7N_13L จึงใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลการทดสอบของโครงข่าย 5N_7L ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดเล็กกว่านั่นเอง ซึ่งจากตารางก็จะเห็นว่ามีบางความยาวคลื่นจะใช้เวลามากกว่า 3 ชั่วโมงเพราะโดยส่วนใหญ่จะเสร็จในเวลา 3 ชั่วโมงจึงใช้เป็นตัวกำหนดเวลาที่มากที่สุดในตารางเวลา

นอกจากการพิจารณาในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลย ยังพิจารณาถึงผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการรวมถึงต้นทุนของโครงข่ายด้วย

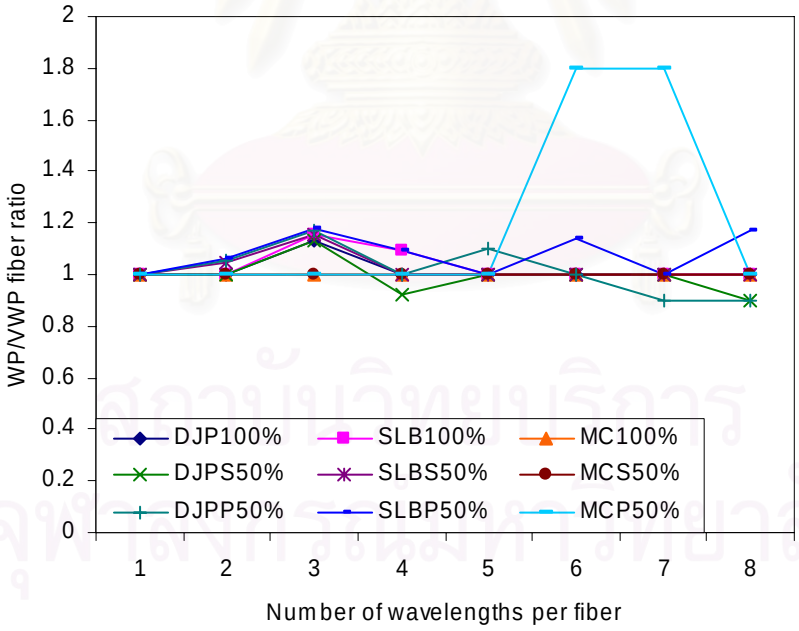
4.2.3 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะศึกษาเฉพาะระดับการปกป้องที่ 50 %ของทั้งการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมด พบว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายบ้างในบางความยาวคลื่น โดยอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายมีค่าลดลง โดยจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L ในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี DJP ที่ทราฟฟิกเท่ากับ 1 และวิธี MC ที่ทราฟฟิกเท่ากับ 2 จะมีบางค่าของความยาวคลื่นที่ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงแตกต่างกันมากเนื่องจากโครงข่ายมีขนาดเล็กการจัดเส้นทางบางเส้นทางจึงอาจลดจำนวนได้ซึ่งก็มากจนทำให้เกิดความแตกต่างของการใช้งานที่มากได้ สำหรับโครงข่าย 7N_13L ในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธีทั้ง 3 วิธีนั้น จำนวนเส้นใยนำแสงไม่ค่อยจะแตกต่างกันมากเพราะโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วทั้งหมดที่ต้องวางในโครงข่าย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเมื่อจำนวนทราฟฟิกมีมากขึ้นเรื่อยๆโดยเฉพาะที่จำนวนทราฟฟิกเท่ากับ 4 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างโครงข่ายแบบ WP และ VWP มีค่าต่างกันน้อยลงซึ่งสามารถดูได้จากสัดส่วนที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 (ง) และ4.7 (ง) ส่วนสาเหตุสำคัญที่จำนวนเส้นใยนำแสงมีค่าลดลงบางความยาวคลื่นนั้นเนื่องจาก ในกรณีของโครงข่ายแบบ WP จะกำหนดให้เส้นทางที่จัดสรรในโครงข่ายต้องมีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ทำให้ในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถหาค่าความยาวคลื่นที่ยังไม่มีการใช้งานมาจัดสรรให้กับเส้นทางดังกล่าวได้ โครงข่ายจะต้องทำเพิ่มช่องสัญญาณโดยการ

วางเส้นใยนำแสงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรองรับเส้นทางที่มีปัญหาดังกล่าวได้ การแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายแบบ WP มีค่ามากกว่าโครงข่ายแบบ VWP

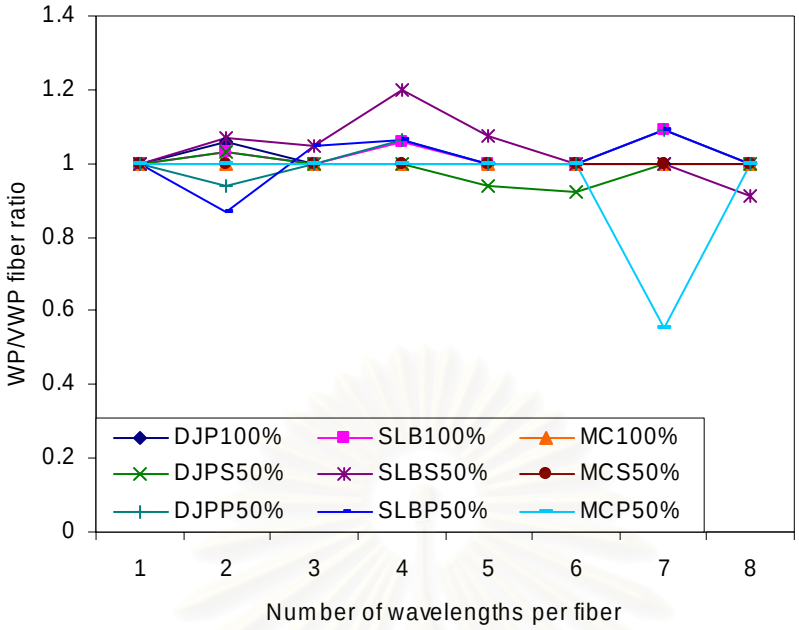


(ก)

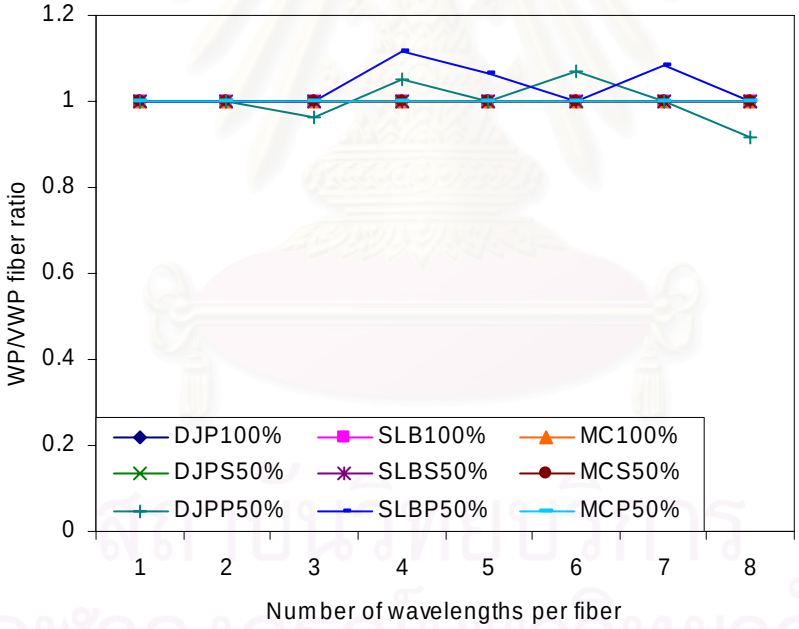


(ข)

รูปที่ 4.6 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ VWP (WP/VWP fiber ratio) (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

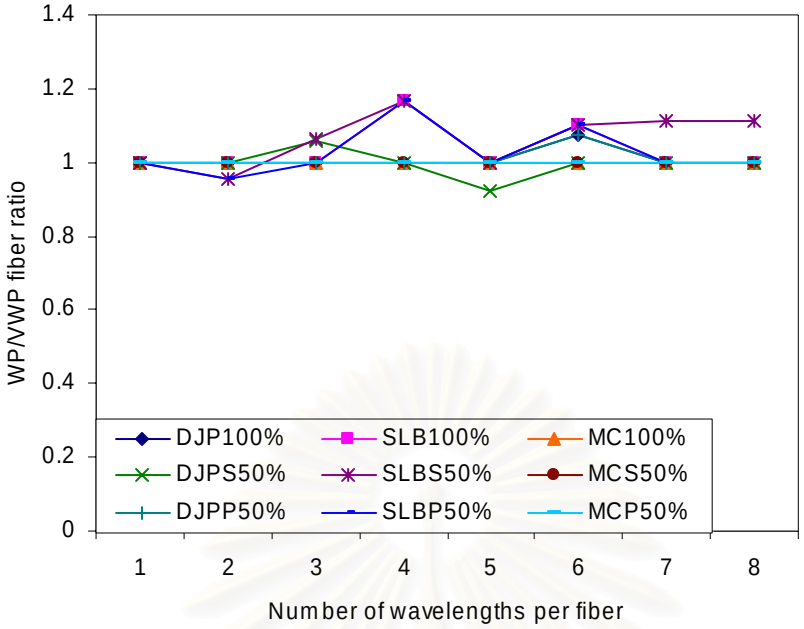


(ค)

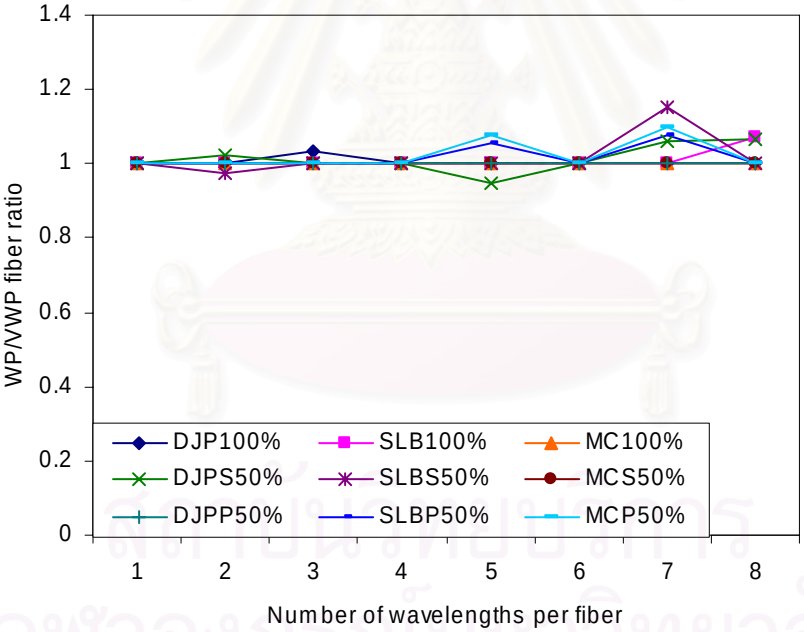


(ง)

รูปที่ 4.6**(ต่อ)** จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L แบบ WP ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ VWP (WP/VWP fiber ratio) (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

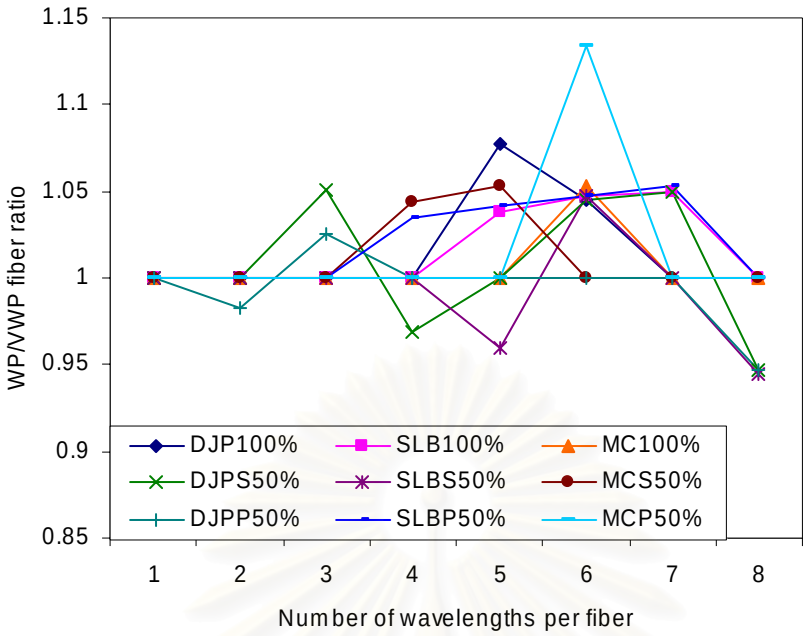


(ก)

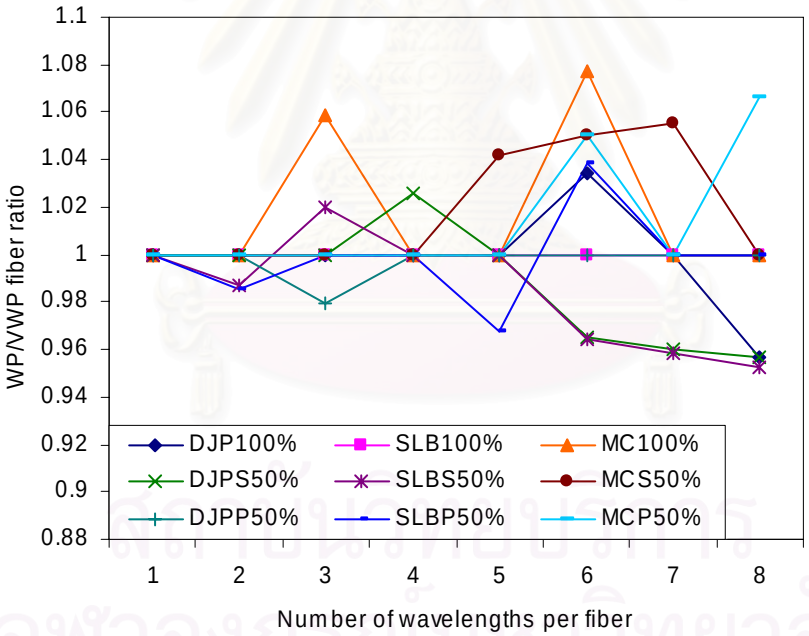


(ข)

รูปที่ 4.7 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ VWP (WP/VWP fiber ratio) (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4



(ค)



(ง)

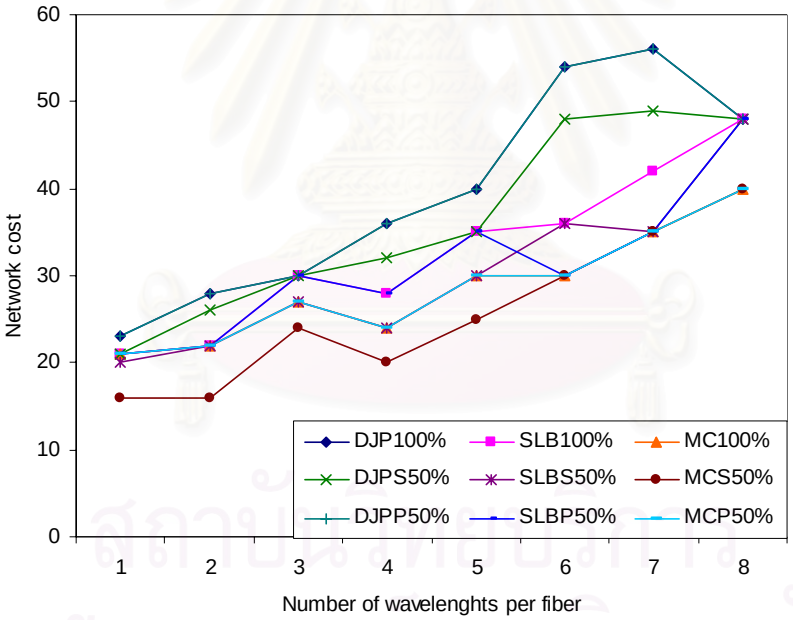
รูปที่ 4.7(ต่อ) จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 7N_13L แบบ WP ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ VWP (WP/VWP fiber ratio) (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

4.2.2 การเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนของโครงข่าย

เนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเชิงต้นทุนของโครงข่าย โดยจะนำเสนอกราฟเฉพาะประเภท WP เพราะทั้งประเภท VWP และ WP มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และกรณีแบบบางคู่โนดก็นำเสนอเพียงแต่แบบที่ I เนื่องจากทั้งสองแบบก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันต่างกันเพียงคู่โนดที่ปกป้อง โดยจะศึกษาเฉพาะระดับการปกป้องที่ 50 %ของทั้งการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดเพราะเป็นระดับที่วิธีการปกป้องโครงข่ายทุกๆวิธีเริ่มลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้ ซึ่งมีรายละเอียดของเนื้อหาดังนี้

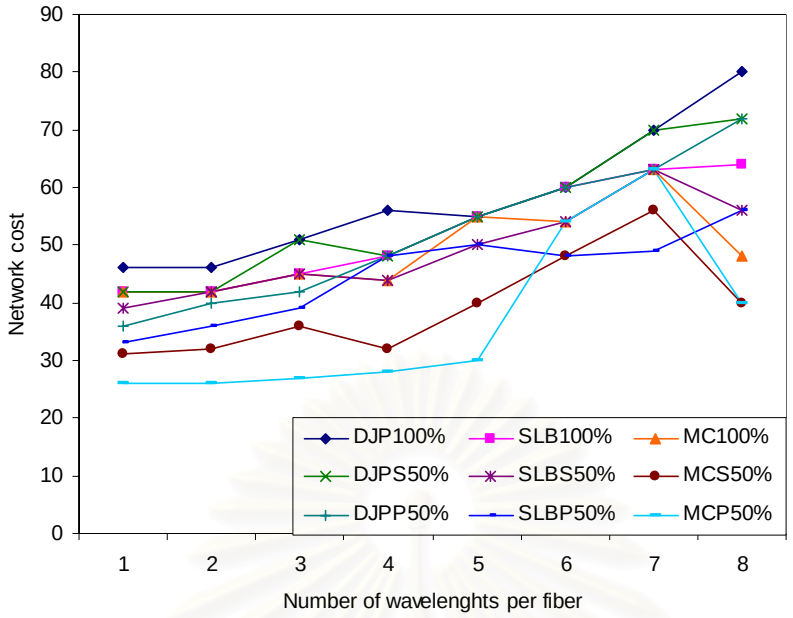
ต้นทุนของโครงข่าย (Network cost) [23] ที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะนิยามให้มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)

$$Network\ cost = Total\ number\ of\ fiber\ requirement \times M$$

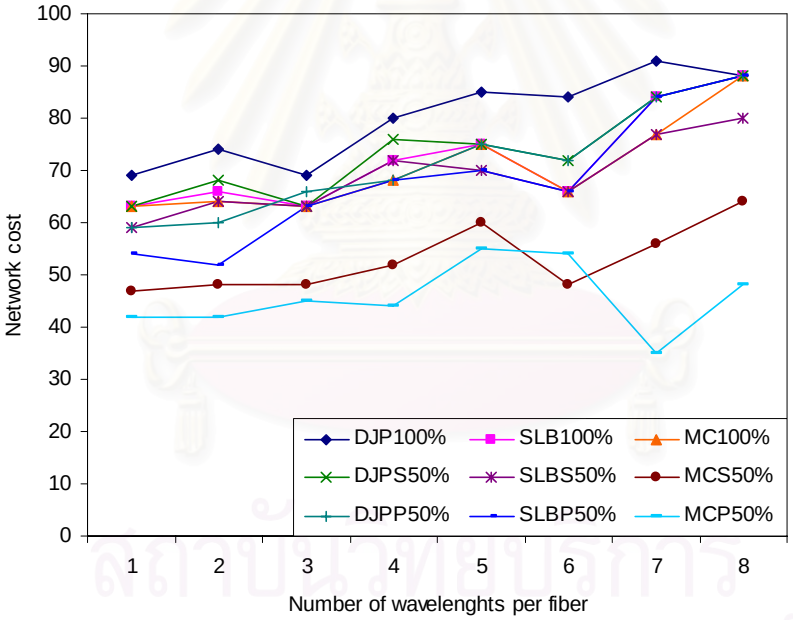


(ก)

รูปที่ 4.8 ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

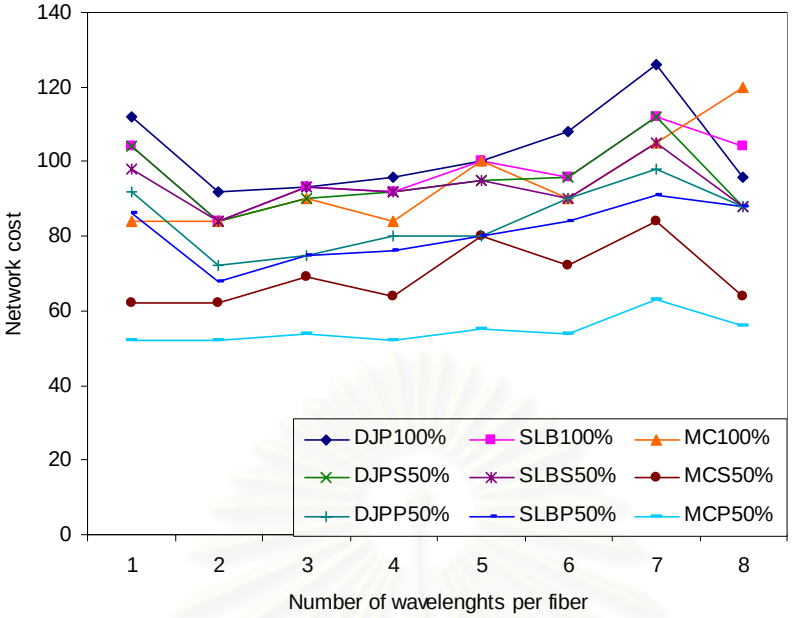


(ข)



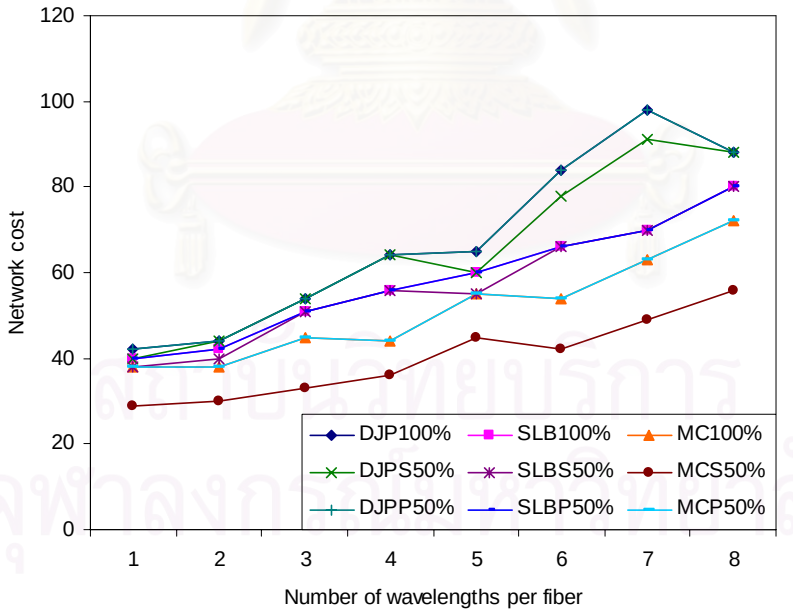
(ค)

รูปที่ 4.8(ต่อ) ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4



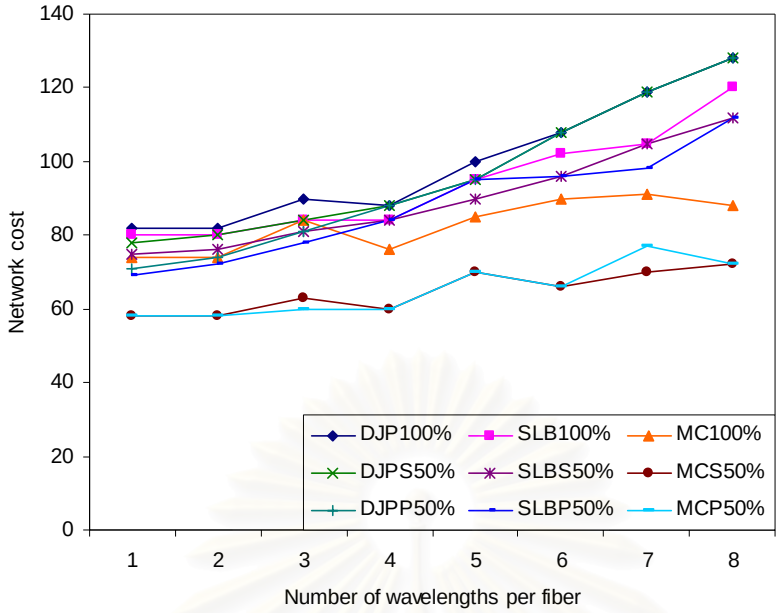
(ง)

รูปที่ 4.8**(ต่อ)** ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

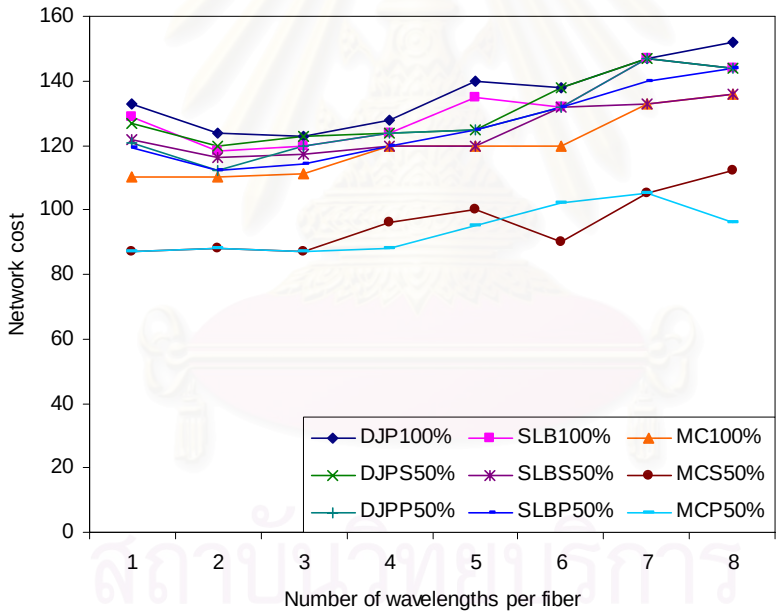


(ก)

รูปที่ 4.9 ต้นทุนของโครงข่าย 7N_13L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

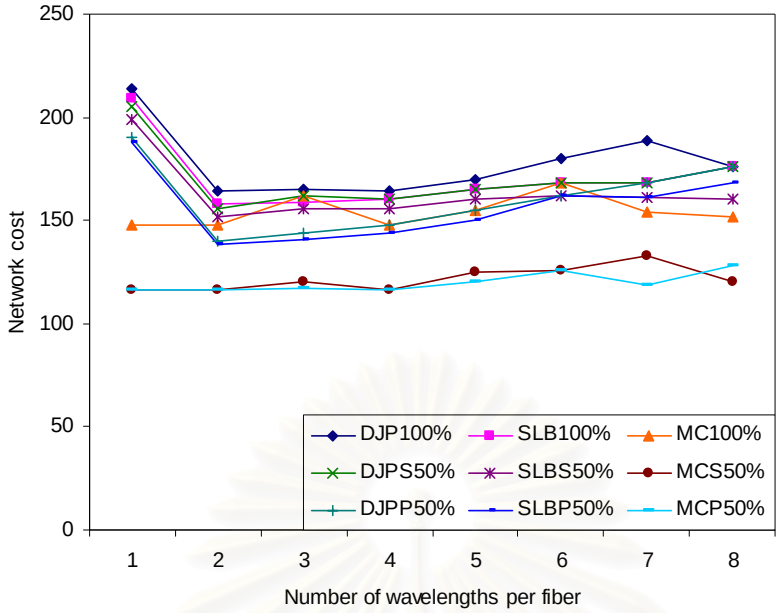


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9(ต่อ) ต้นทุนของโครงข่าย 7N_13L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4



(ง)

รูปที่ 4.9(ต่อ) ต้นทุนของโครงข่าย 7N_13L ในวิธีการปกป้องแบบต่างๆ (ก) ทราฟฟิกเท่ากับ 1 (ข) ทราฟฟิกเท่ากับ 2 (ค) ทราฟฟิกเท่ากับ 3 (ง) ทราฟฟิกเท่ากับ 4

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าต้นทุนของโครงข่ายจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M โดยวิธีการปกป้องแบบ DJP จะมีค่าต้นทุนของโครงข่ายสูงสุดและค่าต้นทุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามค่า M ส่วนวิธีแบบ SLB และ MC จะเป็นวิธีการปกป้องที่ต้องการค่าต้นทุนน้อยกว่าวิธี DJP ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าต้นทุนที่ได้ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าต้นทุนดังกล่าวจะมีค่าไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อโครงข่ายมีปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น กราฟที่ 4.8 (ง) และ 4.9 (ง) จะเห็นได้ว่า ตั้งแต่ $M = 2$ ขึ้นไป จะเห็นว่าต้นทุนของโครงข่ายไม่เพิ่มขึ้นมากเนื่องจากโครงข่ายมีช่องสัญญาณสำหรับรองรับทราฟฟิกเป็นจำนวนมาก ถ้าช่องสัญญาณดังกล่าวมีจำนวนมากขึ้นเกินกว่าความต้องการใช้งานจริงก็อาจทำให้เกิดช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเป็นจำนวนมากในโครงข่ายได้ จึงสรุปได้ว่าเมื่อทราฟฟิกมีจำนวนน้อยการใช้โครงข่ายในช่วงความยาวคลื่นน้อยๆจะใช้ประโยชน์ได้ดีในทางกลับกันเมื่อทราฟฟิกมากขึ้นนั้นการใช้โครงข่ายที่มีความยาวคลื่นมากๆจะใช้ได้ดีกว่าเพราะช่องสัญญาณจะถูกใช้งานมากขึ้นเพราะมีการใช้เส้นทางร่วมกันมากขึ้นจึงไม่ต้องมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนโครงข่ายแบบ 50% ทั้งกรณีการปกป้องแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องแบบบางส่วนเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดจะเห็นได้ว่าในวิธีการปกป้องแบบ MC เมื่อโครงข่ายมีดีกรีของโนดมากจะสามารถลดต้นทุนของโครงข่ายได้มากแต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นกับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดที่จะทำการปกป้องด้วยว่าจะทำให้

ทราฟฟิกของทั้งโครงข่ายลดลงได้มาเพียงใด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.9 (ข), (ค) และ (ง) ส่วนวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB นั้นจะเห็นได้ว่าการปกป้องแบบบางคู่โนดและการปกป้องแบบบางคู่โนดเมื่อเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมดในแต่ละวิธีจะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้แต่ก็เป็นจำนวนที่ไม่มากเนื่องจากทั้งสองวิธีที่ใช้ทำการปกป้องนี้จะต้องมีการวางเส้นทางทำงานปกติอยู่ก่อนแล้ว เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายขึ้นจึงเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสงในจำนวนที่ไม่มาก ซึ่งแตกต่างจาก MC ที่จะหาเส้นทางใหม่ทุกเส้นทางในโครงข่ายเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นจึงทำให้การจัดการใช้ทรัพยากรของโครงข่ายมีประสิทธิภาพอย่างมาก จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.8 และ 4.9 สามารถเรียงลำดับต้นทุนของโครงข่ายโดยรวมตามกรรมวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่จากมากไปน้อยได้ดังนี้ DJP > SLB > MC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาระดับของการปกป้องโครงข่าย WDM เพื่อแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ด้วยวิธีการปกป้องโครงข่ายที่สามารถนำมาใช้งานได้ 3 วิธีได้แก่ วิธีการปกป้องแบบไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Protection Strategy, DJP) วิธีการปกป้องแบบมีพื้นฐานการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว (Single Link Basis Protection Strategy, SLB) และวิธีการปกป้องแบบต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Protection Strategy, MC) โดยแบ่งเป็น 2 รูปแบบการปกป้องคือ กรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ทำการพิจารณาหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ตามระดับการปกป้องโครงข่ายด้วยแต่ละวิธีการปกป้องโครงข่ายที่ได้นำเสนอไป ทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้

การศึกษาระดับการปกป้องโครงข่ายในวิทยานิพนธ์จะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยใช้ Integer linear programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด กล่าวคือ จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายจะมีค่าต่ำสุด การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาผลเฉลยของปัญหาในวิทยานิพนธ์จะถูกพิจารณาตามกรรมวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะแบ่งออกเป็น 2 วิธี วิธีแรกคือ วิธี Optimized Spare Fiber Assignment ได้แก่วิธี DJP และ SLB ซึ่งเป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการในการหาผลเฉลยจะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นที่เป็นเส้นทางทำงานปกติของโครงข่ายมาให้ ส่วนวิธีที่สองคือ วิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment ได้แก่วิธี MC ซึ่งเป็นวิธีในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทำงานและเส้นใยนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการพร้อมกัน การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้ไม่ต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของเส้นทางทำงานปกติมาให้เหมือนกับวิธีแรก

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไป ในการทดสอบหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5 โนด 7 ข่ายเชื่อมโยง (5N_7L) และ โครงข่าย 7 โนด 13 ข่ายเชื่อมโยง (7N_13L)

ต้องการ สามารถสรุปผลการทดสอบโดยรวมได้คือ เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจากการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่า โครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้จะต้องการติดตั้งเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนมากกว่าโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีทั้งในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment และวิธี Optimized Spare Fiber Assignment จะได้ว่าวิธี MC เป็นวิธีที่ประหยัดจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมากสุด ตามมาด้วยวิธี SLB และ DJP ที่ต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนเพิ่มขึ้นจากวิธี MC ตามลำดับ จากผลที่ได้พบว่า การใช้งานช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงร่วมกันระหว่างเส้นทางทำงานปกติและเส้นทางสำรองจะช่วยลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยวิธี MC นั้นจะมีการวางเส้นใยนำแสงจำนวนน้อยสุดเนื่องจากเป็นวิธีที่คำนวณเส้นทางทำงานปกติและเส้นทางสำรองไปพร้อมๆกันซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเส้นทางทั้งหมดเมื่อโครงข่ายมีความเสียหายเกิดขึ้น ส่วนวิธี SLB นั้นแต่ละเส้นใยนำแสงในโครงข่ายจะยินยอมให้มีการใช้งานช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างเส้นทางทำงานปกติและเส้นทางสำรองของโครงข่าย ต่างจากวิธี DJP ที่ไม่ยินยอมให้มีการใช้งานช่องสัญญาณร่วมกันในเส้นทางทำงานปกติที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิธี MC จึงประหยัดจำนวนเส้นใยนำแสงในการติดตั้งให้กับโครงข่ายมากที่สุด ซึ่งเมื่อทำการทดสอบโครงข่ายแบบบางคู่โนดจะเห็นว่า จะมีวางจำนวนเส้นใยนำแสงลดลงตามจำนวนการปกป้องคู่โนดโดยวิธี DJP จะลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้น้อยสุดและ MC จะลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้มากสุด โดยจะมีข้อสังเกตอีกอย่างในวิธีการปกป้องแบบ DJP และ SLB ว่าจำนวนเส้นใยนำแสงจะลดลงได้มากเมื่อคู่โนดที่ทำการปกป้องมีเส้นทางที่ให้เลือกเพื่อที่จะปกป้องในแต่ละกลุ่มคู่โนดเป็นเส้นทางที่สั้นก็มีโอกาสที่จะเลือกเส้นทางนั้นเพื่อที่จะปกป้องได้ จึงทำให้มีการใช้บางช่องสัญญาณที่เหลืออยู่ในโครงข่ายแทนเส้นใยนำแสงที่จะต้องเพิ่มในโครงข่ายได้ ก็จึงสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมได้ ส่วนการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้น จำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายในทุกวิธีการปกป้องก็จะสามารถลดจำนวนลงได้ตามปริมาณทราฟฟิกที่จะทำการปกป้องในแต่ละระดับการปกป้อง

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองในกรณีที่โครงข่ายไม่มีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ จะเห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบ WP จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ VWP เนื่องจากโครงข่ายแบบ WP มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่าเนื่องจากต้องมีการกำหนด

เส้นทางด้วยความยาวคลื่นมาเกี่ยวข้องด้วย นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 2 วิธี พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จะใช้สมการและตัวแปรในการสร้างแบบจำลองมากกว่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment กล่าวคือ ใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจาณาด้านจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ วิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จะประหยัดจำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment ซึ่งถ้าแยกเป็นแต่ละกรณีของระดับการปกป้องจะได้ว่าการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดนั้นจะเห็นว่าทุกวิธีการปกป้องจะใช้เวลามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนคู่โนดที่จะทำการปกป้องคือ ถ้าจำนวนคู่โนดมีมากก็จะใช้เวลาในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงมาก และถ้าจำนวนคู่โนดมีน้อยก็จะใช้เวลาในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยตามไปด้วย ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้น จะใช้เวลาในแต่ละความยาวคลื่นพอๆกัน เนื่องจากจำนวนสมการและตัวแปรเส้นทางในแต่ละคู่โนดมีจำนวนเท่าเดิมเพียงแต่มีปริมาณทราฟฟิกที่ลดลงเท่านั้นจึงใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานพอๆกัน

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ที่ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ เพื่อทำการสรุปหาข้อดีข้อเสียของการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้ทั้งในกรณีของโครงข่ายแบบ VWP และ WP สามารถสรุปได้ว่า จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสงจะช่วยลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้ โดยโครงข่ายจะต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจาก การที่ M มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น จำนวนช่องสัญญาณในการรองรับทราฟฟิกของโครงข่ายก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ค่าที่เพิ่มมากขึ้นนี้ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการวางเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้จำนวนช่องสัญญาณที่เพียงพอกับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่าย ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนช่องสัญญาณของโครงข่ายมีจำนวนมากเกินกว่าการใช้งานจริงของทราฟฟิกภายในโครงข่าย ทำให้การวางเส้นใยนำแสงในกรณีนี้ไม่เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด นั่นคือ บางช่องสัญญาณของเส้นใยนำแสงไม่ถูกใช้งาน

จากการพิจารณาผลของการแปลงผันความยาวคลื่น เมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนเส้นใยนำแสงสามารถสรุปได้ว่า การแปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายบ้างในบางความยาวคลื่น โดยการแปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายมีค่าลดลงได้แต่เมื่อปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้นอุปกรณ์แปลงผันความ

ยาวก็มีผลกับจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยลง ซึ่งจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดได้จะขึ้นอยู่กับค่า M และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ โดยการแปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้โครงข่ายต้องการเส้นใยนำแสงในปริมาณที่ต่างกันบ้าง แต่จะมีผลน้อยลงและเริ่มคงที่เมื่อ M มีค่ามากจนถึงค่าหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันบังคับที่ค่อนข้างมีความซับซ้อน เพื่อเป็นการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยประมาณ งานวิจัยในขั้นต่อไปจึงเป็นหาค่าขอบเขตล่างของจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ทั้งกรณีที่โครงข่ายมีการใช้งานในภาวะปกติ และกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายได้

2. เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาถึงระดับการปกป้องโครงข่ายที่คำนึงถึงทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ เพื่อต้องการลดต้นทุนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายให้มากขึ้นจึงน่าจะศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพการปกป้องโครงข่ายที่คำนึงทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์แต่ควรเลือกทำเพียงกรณีใดกรณีหนึ่ง และควรจำกัดจำนวนเส้นทางเพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ทั้งหมด ถ้าต้องการพัฒนาให้ดีมากยิ่งขึ้นควรใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมมาร่วมด้วยก็จะทำให้สามารถทดสอบกับโครงข่ายขนาดใหญ่ได้

3. เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยเรื่องการปกป้องโครงข่ายให้กับทราฟฟิกแบบต่างๆนั้น ผู้วิจัยเห็นว่านอกจากการหาเส้นใยนำแสงในการปกป้องให้มีค่าต่ำสุดแล้วนั้นก็ควรหาค่าต่ำสุดของตัวขยายสัญญาณที่ต้องการวางลงต่อไปด้วย เพื่อเปรียบเทียบการวางตัวขยายสัญญาณในแต่ละวิธีปกป้องว่าต้องการใช้จำนวนเท่าใด เนื่องจากในปัจจุบันนี้ตัวขยายสัญญาณยังมีราคาแพงอยู่มาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. R. E. Wagner et al. MONET: Multi-Wavelength Optical Networking. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 14 (June 1996): 1349-1355.
2. I. P. Kaminow et al. A Wideband All-Optical WDM Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 14 (1996): 780-799.
3. K. Sato and S. Okamaoto. Photonic transport technologies to crete robust backbone networks. IEEE Communications Magazine (Aug. 1999):78-87.
4. C. Brakett. Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and Applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 8 (Aug. 1990): 373-380.
5. D. C. Dowden, R. D. Gitlin, and R. L. Martion. Next-Generation networks. Bell Labs Technical Journal (Oct.-Dec. 1998): 3-14.
6. R. Ramaswami. Optical fiber communication: From transmission to networking. IEEE Communications Magazine (May 2002): 138-147.
7. J. D. Ash and S. P. Ferguson. The evolution of the telecommunications transport architecture: from megabit/s to terabit/s. Electronics and Communication Engineering Journal (Feb. 2001): 33-42.
8. A. McGuire. Management of optical transport networks. Electronics and communication Engineering Journal (June 1999):155-163.
9. S. Baroni, P. Bayvel, and R. J. Gibbens. On the Number of Wavlengths in Arbitrarily-Connected Wavelength-Routed Optical Networks. OSA Trends in Optics and photonics Series (TOPS): Optical Network and Their Applications 20 (July 1998): 195-204.
10. S. Baroni, P. Bayvel, R. J. Gibbens and S. K. Korotky. Analysis and design of resilient multifiber wavelength-routed optical transport networks. Journal of Lightwave Technology 17 (May 1999): 743-753
11. S. Ramamurthy, L. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee. Survivable WDM Mesh Networks. Journal of Lightwave Technology 21 (April 2003): 870-883

12. C. Ou, J. Zhang, H. Zang, L. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee. New and Improved Approaches for Shared-Path Protection in WDM Mesh Networks. Journal of Lightwave Technology 22 (May 2004): 1223-1232

13. A. Sen, B. Hao, and B. H. Shen. Survivable Routing in WDM Networks. Proceedings of the Seventh International Symposium on Computers and Communications (ISCC'02) (July 2002): 726-731

14. L. Sahasrabuddhe, S. Remamurthy, and B. Mukherjee. Fault Management in IP-Over-WDM Networks: WDM Protection Versus IP Restoration. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 20 (Jan. 2002): 21-33

15. P. Veitch, I. Hawker, and G. Smith. Administration of restorable virtual path mesh networks. IEEE Communication Magazine (Dec. 1996): 96-101

16. O. Gerstel, and G. Sasaki. Quality of Protection (QoP): A Quantitative Unifying Paradigm to Protection Service Grades. Proc. OptiComm2001 (Aug. 2001).

17. N. Bolmie, T.D. Ndousse, and D.H. Su. A differentiated optical services model for WDM networks. IEEE Communications Magazine (Feb. 2000): 68-73

18. A. Jaekel, and Z. Hu. Shared Path Protection Based on Quality of Service in WDM Networks. Proc. ICT2003 (March 2003): 159-165

19. M. H. MacGregor and W. D. Grover. Partial expree routing of broadband transport networks demands. Proc. CCBR '97 (April 1997): 149-159.

20. G. Xue, L. Chen and K. Thulasiraman. Quality-of-service and quality-of-protection issues in preplanned recovery schemes using redundant trees. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 21(Oct. 2003):1332-1345.

21. A. Jourdan et al. Fully Reconfigurable WDM Optical Crossconnect: Feasibility Validation and Preparation of Prototype Crossconnect for ACTS "OPEN" Field Trials. Proc. ECOC'97 (1997): 55-58.

22. L. Wuttisittikulkij and M.J. O'Mahony. Use of Spare Wavelength for Traffic Restoration in Multi-Wavelength Transport Network. IEEE Communication 3 (1996): 1778-1782.

23. C. Bowonorntummarat and L. Wuttisitikulkij. On the comparison of optical WDM mesh network protection strategies. Proc. IEEE MILCOM'2000 2 (Oct. 2000): 886-891.

24. ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม CPLEX สามารถหาได้จาก WWW.CPLEX.COM

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจาก ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 2005 (EECON) ครั้งที่ 28 ที่จังหวัดภูเก็ต ในวันที่ 20-21 ตุลาคม พ.ศ. 2548 ในชื่อบทความทางวิชาการเรื่อง การวิเคราะห์ระดับการปกป้องโครงข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ดังนั้น จึงขอนำบทความที่ได้รับการตีพิมพ์มาเสนออีกครั้งหนึ่ง ในภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ระดับการปกป้องโครงข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

An Analysis of Protection Service Grades in WDM Networks with Single Link Failure Path Restoration

กอปเทพ ไชยเสน, อนุชิต มั่นจิรังกูร และลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพ 10330

โทร. 0-2218-6915 E-mail: Kobtep.C@student.chula.ac.th, Anuchit.Mu@student.chula.ac.th and wlunchak@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับระดับการปกป้องเพื่อจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่ให้แก่โครงข่าย WDM เมื่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายได้รับความเสียหาย ด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ 3 วิธี โดยแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี ได้แก่ การปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดและการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน การเปรียบเทียบจะกระทำในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายที่ลดลงไปในแต่ละวิธี นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์อิทธิพลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดว่าส่งผลอย่างไรต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คือ Integer Linear Programming (ILP) ซึ่งเป็นเทคนิคในการหาเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแต่ละวิธี

คำสำคัญ : WDM, เส้นใยนำแสง, อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น, การปกป้องโครงข่าย, QoP

Abstract

This paper studies about protection service grades for three optical path restoration approaches against all single link failures for wavelength division multiplexed (WDM) mesh network. Two types of protection service grades are considered, namely, the protection of some nodes in network and the protection of some part in network. Numerical results show that total number of fiber required for both types of protection service grades decrease. Moreover, in this paper, the influence of wavelength conversion and the number of wavelengths in total number of fiber required on the system designs are also analyzed. The mathemathical model based on integer linear programming (ILP) are used as a solution technique for obtaining total number of fiber required of every approach.

Keywords: WDM, fibers, wavelength converters, protection, QoP

1. คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยี Wavelength Division Multiplexing (WDM) [1] ได้รับความสนใจอย่างมากในแง่ของการนำไปประยุกต์ใช้สร้างโครงข่ายความเร็วสูง (high speed network) ที่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้หลายประเภทพร้อม ๆ กัน โดยผ่านช่องสัญญาณในเส้นใยแสงที่ทำการมัลติเพลกซ์รวมกันที่มีความยาวคลื่นต่างกันจึงทำให้สามารถส่งข้อมูลได้สูงถึงระดับ Tb/s ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้แก่โครงข่าย ได้แก่

1. Wavelength Path (WP) หมายถึง ตลอดเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างโนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่ายจะกำหนดค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดั้งนั้น โครงข่ายประเภทนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs (Optical Cross Connects)

2. Virtual Wavelength Path (VWP) หมายถึง เส้นทางที่เชื่อมต่อโนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่ายสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้เมื่อเส้นทางวิ่งผ่านโนดในโครงข่ายดังนั้นโครงข่ายประเภทนี้จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs เพื่อใช้เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางในโครงข่าย

ปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นกับโครงข่าย WDM คือการเกิดความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย จึงทำให้ข้อมูลที่ส่งผ่านโครงข่ายเกิดการสูญหาย (loss) และส่งผลกับผู้ใช้บริการโครงข่ายเป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการจัดสรรเส้นทางสำรองแทนเส้นทางปกติ ส่งผลให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงกว่าโครงข่ายที่ไม่มีการจัดสรรเส้นทางสำรอง ในความเป็นจริงแล้วการปกป้องนั้นจะมีการใช้งานเพียงชั่วคราวเมื่อแก้ไขข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายแล้วก็จะไม่มีการใช้งานอีก ดังนั้นบทความนี้จึงมีแนวคิดในการปกป้องโครงข่ายแบบมีระดับเพื่อใช้งานชั่วคราว ซึ่งระดับการปกป้องนั้นจะถูกเรียกว่า คุณภาพของการปกป้อง (Quality of Protection, QoP) [2]

บทความนี้ศึกษาถึงวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายแบบมีระดับการปกป้อง 2 กรณี คือ กรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดซึ่งเหมาะสำหรับโครงข่ายที่มีการคิดค่าบริการใช้

โครงข่ายเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น เช่น ผู้ที่จ่ายค่าใช้บริการพิเศษโครงข่ายย่อมได้รับการปกป้องข้อมูลที่ส่งผ่านในโครงข่ายเมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหาย ส่วนอีกกรณีคือการปกป้องแบบบางส่วน ซึ่งเหมาะสำหรับการส่งข้อมูลที่มีคุณภาพของสัญญาณที่แตกต่างกัน เช่น ในเวลาปกติการรับชมโทรทัศน์ผ่านทางอินเทอร์เน็ตจะให้ความเร็ว 256 Kb/s แต่เมื่อเกิดความเสียหายจะเปลี่ยนไปใช้ความเร็วเพียง 56 Kb/s จึงทำให้ต้นทุนหรือจำนวนเส้นใยนำแสงในการวางระบบลดลง

2. การจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

2.1 วิธีการไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Approach, DJP)

หลักเกณฑ์ของวิธีนี้ [3] คือ เมื่อเกิดความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย เส้นทางสำรองที่เตรียมไว้ให้ทราฟฟิกจะต้องไม่ซ้อนทับเส้นทางเดิม (disjoint path) ดังนั้นเส้นทางสำรองนี้ย่อมสามารถแก้ปัญหาข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายได้ทุกกรณีไม่ว่าข่ายเชื่อมโยงจะเสียหายที่ตำแหน่งใดของเส้นทางใช้งานปกติ

2.2 วิธีบนพื้นฐานข่ายเชื่อมโยงเดียว (Single Link Basis Approach, SLB)

วิธีนี้ [3] มีความคล้ายคลึงกับวิธี DJP คือ เมื่อเกิดความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย โครงข่ายจะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย เพียงแต่สามารถใช้ข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับความเสียหายจากเส้นทางเดิมร่วมกันกับการจัดสรรเส้นทางใหม่ได้

2.3 วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC)

วิธีนี้ [4] จะแตกต่างจาก 2 วิธีแรก คือ โครงข่ายจะปรับเส้นทางทั้งเส้นทางของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายและจะมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางของช่องทราฟฟิกอื่น ๆ ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายด้วย จึงทำให้วิธีนี้มีต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธี DJP และ SLB เสมอ

เมื่อนำทั้ง 3 วิธีมาประยุกต์ใช้กับการปกป้องแบบบางคู่โนดจะได้ว่า ต้องมีการเลือกเฉพาะบางคู่โนดที่จะปกป้องเท่านั้นที่จะนำมาหาต้นทุนของโครงข่ายทั้ง 3 วิธี ส่วนการปกป้องแบบบางส่วนนั้น วิธี DJP และ SLB จะมีการเลือกเส้นทางที่สั้นจากเส้นทางในทราฟฟิกปกติให้เท่ากับจำนวนทราฟฟิกที่จะปกป้องตามระดับการปกป้อง สำหรับวิธี MC นั้นจะไม่ต้องเลือกเส้นทางแต่ต้องหาปริมาณทราฟฟิกที่ต้องปกป้อง โดยทุกวิธีนี้จะพิจารณาทั้งกรณีโครงข่าย WDM ประเภท VWP และ WP โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาต้นทุนโครงข่าย

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กำหนดให้โครงข่าย WDM ที่ต้องการหาจำนวนเส้นใยนำแสงต่ำสุดสำหรับรองรับทราฟฟิกจะถูกแทนด้วยกราฟแบบไม่มีทิศทาง (undirected graph) G(N,L) ซึ่ง N เป็นเซตของโนดภายในโครงข่าย และ L เป็นข่ายเชื่อมโยงแบบไม่มีทิศทางเมื่อ $L \subset N \times N$, $j \in L$ โดยแต่ละข่ายเชื่อมโยง ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ส่งผ่านข้อมูลระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทาง ซึ่งจำนวนเส้นทางแต่ละคู่โนดนั้นจะเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่แต่ละคู่โนดต้องการ โดยปริมาณทราฟฟิกที่กำหนดให้นี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา (static traffic) และกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์มีจำนวนจำกัด (M)

ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองมีดังนี้

f_j	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับข่ายเชื่อมโยงที่ j
w_j	จำนวน เส้นใยนำแสงปกติของข่ายเชื่อมโยงที่ j
s_j	จำนวน เส้นใยนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่ j
$a_{sd,i}$	เส้นทางที่ i ของคู่โนดที่ sd (ใช้ในกรณี VWP)
$a_{sd,i,\lambda}$	เส้นทางที่ i ของคู่โนดที่ sd และที่ความยาวคลื่น λ (ใช้ในกรณี WP)
$\delta_{sd,i,j}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ i ของคู่โนด sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง j ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
p_{sd}	จำนวนเส้นทางของคู่โนดที่ sd
$\gamma_{sd,n}^{j'}$	เส้นทางสำรองที่ n ของคู่โนดที่ sd เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาด (ใช้ในกรณี VWP)
$\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}$	เส้นทางสำรองที่ n ของคู่โนดที่ sd และที่ความยาวคลื่น λ เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาด (ใช้ในกรณี WP)
r_{sd}	จำนวนเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ sd เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ขาด
$\beta_{sd,n,j}^{j'}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ i ของคู่โนด sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง j ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 โดยที่ข่ายเชื่อมโยง j' ขาด
$\mu_{sd,i}$, $\mu_{sd,i,\lambda}$	มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ใช้ในการกำหนดเส้นทางที่จะเลือกเพื่อให้เท่ากับทราฟฟิกที่ต้องการในกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วน
Q	คุณภาพของการปกป้องสำหรับการใช้หาปริมาณทราฟฟิกในกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนเป็นหลัก
d_{sd}	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ sd
d_f	ปริมาณทราฟฟิกตามระดับการปกป้องของคู่โนดที่ sd
m	จำนวนคู่โนดทั้งหมดในโครงข่ายที่ปริมาณทราฟฟิกไม่เป็น 0
t, k	คู่โนดในโครงข่ายที่ถูกเลือกที่จะปกป้องในกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนด
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ ลงบนเส้นใยนำแสงได้

$w_j, s_j, a_{sd,i}, a_{sd,i,\lambda}, \gamma_{sd,n}^{j'}$ และ $\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลองส่วน $d_{sd}, d_f, \delta_{sd,i,j}, \beta_{sd,n,j}^{j'}, p_{sd}, r_{sd}, t, k, m, Q, \mu_{sd,i}, \mu_{sd,i,\lambda}$ และ M เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้หรือหาไว้ก่อนสร้างแบบจำลอง

3.1 การหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงเฉพาะที่เป็นส่วนสำรองเท่านั้น และจะศึกษาเฉพาะวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP และ SLB จากที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และเส้นใยนำแสงที่ใช้ในสภาพปกติมาให้ด้วย ซึ่งหมายความว่าต้องกำหนดค่า $w_j, a_{sd,i}$ สำหรับกรณี VWP หรือ $w_j, a_{sd,i,\lambda}$ สำหรับกรณี WP โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ของแบบจำลองคือ

$$\min\left(\sum_{j=1}^{L} s_j\right) \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยง j' ขาดไม่สามารถใช้งานได้

3.1.1 ระบบ VWP

1) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น ที่คู่โนด sd ใดๆที่จะทำการปกป้องจำนวนของเส้นทางสำรองใช้งานในสภาวะที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง j' ของคู่โนดนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นทางในสภาพปกติ

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} = \sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i,j'} \qquad \exists sd = t,...,k \quad (2)$$

ส่วนกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นที่คู่โนด sd ใดๆ จำนวนของเส้นทางสำรองใช้งานในสภาวะที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยง j' ของคู่โนดนั้น จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นทางบางเส้นทางตามคุณภาพของการปกป้องในสภาพปกติ

$$d_f \geq Q \times d \qquad d_f \in I^+ \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{p_{sd}} \mu_{sd,i} a_{sd,i} = d_f \quad 0 \leq \mu_{sd,i} \leq 1 \text{;เลือก short path ที่ } a_{sd,i} > 0 \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} = \sum_{i=1}^{p_{sd}} ((\mu_{sd,i} a_{sd,i})\delta_{sd,i,j'}) \qquad \forall sd = 1,2,...,m \quad (5)$$

2) จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยง j จะต้องเพียงพอรองรับเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j

- กรณี DJP ที่ปกป้องเฉพาะบางคู่โนด

$$M \times s_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} \beta_{sd,n,j}^{j'} + (M \times w_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i,j}) \geq 0 \quad (6)$$
$$\forall j = 1,2,...,L;\ j \neq j'$$

- กรณี SLB ที่ปกป้องเฉพาะบางคู่โนด

$$M \times s_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} \beta_{sd,n,j}^{j'} + (M \times w_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i,j}) \quad (7)$$
$$+ \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} (a_{sd,i}\delta_{sd,i,j})\delta_{sd,i,j'} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L;\ j \neq j'$$

ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนทั้งแบบกรณี DJP และ SLB นั้นจะเปลี่ยนรูปแบบสมการเฉพาะส่วนเส้นทางสำรองของคู่โนด t ถึง k เป็นคู่โนดทั้งหมดคือ 1 ถึง m

3) ทั้งสองกรณีนั้น s_j และ $\gamma_{sd,n}^{j'}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ (nonnegative integer)

$$s_j, \gamma_{sd,n}^{j'} \in I^+$$
$$\forall j = 1,2,...,L; \forall n = 1,2,...,r_{sd}; \forall sd = 1,2,...,m \quad (8)$$

3.1.2 ระบบ WP

ในกรณีนี้แต่ละเส้นทางที่จัดสรรให้กับโครงข่ายจะต้องมีการกำหนดค่าความยาวคลื่นที่คงที่ตลอดเส้นทาง ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องมีการเพิ่มมิติ (dimension) ในการกำหนดความยาวคลื่นให้กับเส้นทางด้วย ซึ่งนำไปใช้ทั้งในกรณีปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน สรุปได้ดังนี้

จากสมการที่ (2), (4), (5), (6), (7) และ (8) ระบบ WP นั้นจะเปลี่ยนตัวแปร $\gamma_{sd,n}^{j'}, a_{sd,i}, \mu_{sd,i}$ เป็น $\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}, a_{sd,i,\lambda}, \mu_{sd,i,\lambda}$ ตามลำดับและเพิ่มส่วนของ $\sum_{\lambda=1}^{M}$ เข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ (2) กับ (5) และด้านที่มี $\mu_{sd,i}$ ของสมการที่ (4) ส่วน (6) กับ (7) ต้องตัดตัวคูณ M ทิ้งทั้งที่ตำแหน่ง s_j และ w_j

3.2 การหาจำนวนเส้นใยนำแสงใช้งานปกติและสำรองพร้อมกัน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต่ำที่สุดในวิธีแบบ MC โดยจะพิจารณาจัดสรรเส้นใยนำแสงที่ใช้งานปกติ และส่วนสำรองพร้อมกัน โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ของแบบจำลองคือ

$$\min\left(\sum_{j=1}^{L} f_j\right) \quad (9)$$

3.2.1 ระบบ VWP

1) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น ที่คู่โนด sd ใด ๆ สำหรับเส้นทางที่ใช้งานปกติ และบางคู่โนด sd ที่ทำการปกป้องสำหรับเส้นทางสำรองที่ใช้เมื่อข่ายเชื่อมโยง j' เท่ากับปริมาณทราฟฟิกระบบ

$$\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i} = d_{sd} \qquad \forall sd = 1,2,...,m \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} = d_{sd} \qquad \exists sd = t,...,k \quad (11)$$

ส่วนกรณีปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้น คู่โนด sd ใด ๆ เส้นทางปกติจะเท่ากับปริมาณทราฟฟิกของระบบ ส่วนเส้นทางสำรองจะเท่ากับปริมาณ ทราฟฟิกที่จะปกป้องตามคุณภาพของการปกป้อง ดังนั้นจาก (11) จึงต้องคูณ Q เข้าไปกับ d_{sd} และเปลี่ยนเงื่อนไขเป็น $\forall sd$ แทน $\exists sd$ ด้วย

2) สำหรับกรณีปกป้องเฉพาะบางคู่โนดนั้น จำนวนเส้นใยนำแสงที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j ต้องเพียงพอสำหรับรองรับเส้นทางที่ใช้งานปกติ และเส้นทางสำรองที่ใช้ปกป้องบางคู่โนด sd ที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j

$$M \times f_j - \sum_{sd=1}^{m}\sum_{i=1}^{p_{sd}} a_{sd,i}\delta_{sd,i.j} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L \quad (12)$$

$$M \times f_j - \sum_{sd=t}^{k}\sum_{n=1}^{r_{sd}} \gamma_{sd,n}^{j'} \beta_{sd,n.j}^{j'} \geq 0 \qquad \forall j = 1,2,...,L;\ j \neq j' \quad (13)$$

ส่วนกรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางส่วนนั้นจะเปลี่ยนรูปแบบสมการที่ (13) เฉพาะส่วนเส้นทางสำรองของคู่โนด t ถึง k เป็นคู่โนดทั้งหมด คือ 1 ถึง m

3) $f_j, a_{sd,i}$ และ $\gamma_{sd,n}^{j'}$ ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ (nonnegative integer)

$$f_j, a_{sd,i}, \gamma_{sd,n}^{j'} \in I^+$$
$$\forall j = 1,2,...,L; \forall sd = 1,2,...,m; \quad (14)$$
$$\forall i = 1,2,...., p_{sd}; \forall n = 1,2,....r_{sd}$$

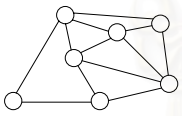
3.2.2 ระบบ WP

คล้ายกับวิธี DJP และ SLB คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องมีการเพิ่มมิติ (dimension) ในการกำหนดความยาวคลื่นให้กับเส้นทางด้วย ซึ่งนำไปใช้ทั้งในกรณีปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วน สรุปได้ดังนี้

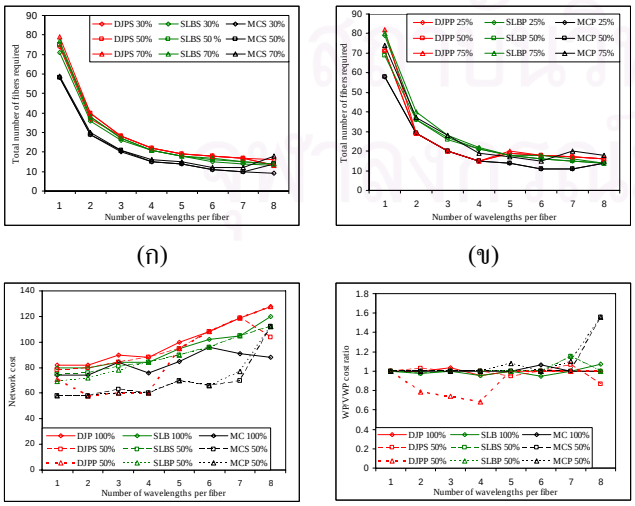
จากสมการที่ (10), (11), (12), (13) และ (14) ระบบ WP นั้นจะเปลี่ยนตัวแปร $\gamma_{sd,n}^{j'}, a_{sd,i}$ เป็น $\gamma_{sd,n,\lambda}^{j'}, a_{sd,i,\lambda}$ ตามลำดับและเพิ่มส่วนของ $\sum_{\lambda=1}^{M}$ เข้าไปในสมการที่ (10) กับ (12) ของด้านที่มี $a_{sd,i}$ และในสมการที่ (11) กับ (13) ของด้านที่มี $\gamma_{sd,n}^{j'}$ ส่วนสมการที่ (12) กับ (13) ต้องตัดตัวคูณ M ที่หน้าตำแหน่ง f_j

นอกจากนี้ ยังพิจารณาถึงข้อจำกัดของจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงโดยต้นทุนของโครงข่าย (network cost) คือ ผลคูณของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในโครงข่ายต้องการคูณด้วยความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้

4. ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย



รูปที่ 1 โครงข่ายขนาด 7 โนด 13 ข่ายเชื่อมโยง



รูปที่ 2 ผลเฉลยของโครงข่ายทดสอบ

ในส่วนนี้จะแสดงถึงผลเฉลยที่ได้จากสูตร ILP โดยใช้โครงข่ายขนาด 7 โนด 13 ข่ายเชื่อมโยงดังรูปที่ 1 ซึ่งสมมุติให้ ทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดมีค่าเท่ากัน โดยกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดมีค่าเท่ากับ 2 โดยในบทความนี้จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อ CPLEX 6.6.0 [5] ในการหาผลเฉลยจากสมการ ILP ที่นำเสนอข้างต้น พิจารณารูปที่ 2 จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบวิธีการปกป้องแบบบางคู่โนดและแบบบางส่วนรวมทั้งต้นทุนที่ลดลงเมื่อเทียบกับการปกป้องแบบ 100 % และอัตราส่วนต้นทุนของประเภท WP/VWP โดยกำหนดให้ชุดข้อมูลของแต่ละวิธีที่ลงท้ายด้วย S จะหมายถึง วิธีการปกป้องแบบบางคู่โนดและ P หมายถึงวิธีการปกป้องแบบบางส่วน ส่วน % ด้านหลังหมายถึงจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่จะต้องปกป้องโครงข่าย โดยจากรูปที่ 2 (ก) และ (ข) จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าต้นทุนจะเรียงลำดับคือ DJP > SLB > MC โดยทุกวิธีนั้นจากการทดลองเมื่อใช้ระดับการปกป้องที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 % จะสามารถลดต้นทุนลงไปพอสมควรจึงนำมาเปรียบเทียบเป็นรูปที่ 2 (ค) ก็จะเห็นว่าต้นทุนไม่ได้ลดมากถึง 50 % แต่ก็ลดต้นทุนได้ระดับหนึ่ง โดยวิธี MC 50% ทั้งแบบ S และ P จะเห็นว่าสามารถลดต้นทุนโครงข่ายได้มากถึงประมาณ 25-30 % เมื่อเทียบกับวิธี MC 100% ในขณะที่วิธี DJP และ SLB จะสามารถลดต้นทุนได้ไม่มากนัก เนื่องจากวิธี MC นั้นจะทำการวางเส้นใยนำแสงปกติและสำรองไปพร้อม ๆ กันในการวางระบบ จึงสามารถลดต้นทุนได้มากกว่าวิธี DJP และ SLB ที่ต้องวางเส้นใยนำแสงสำรองในภายหลัง รูปที่ 2 (ง) แสดงถึงต้นทุนการปกป้องของระบบ WP และ VWP พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในการคำนวณหาต้นทุนรวมของโครงข่าย

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอสูตร ILP สำหรับการแก้ปัญหาของการวางเส้นใยนำแสงให้น้อยที่สุดแบบมีระดับการปกป้อง จะเห็นว่ากรณีการปกป้องโครงข่ายแบบบางคู่โนดนั้นสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงได้ใกล้เคียงกับแบบการปกป้องแบบบางส่วนเมื่อเทียบแบบ 50 % ทั้งการปกป้อง 3 วิธี แต่ก็ไม่สามารถจะลดระดับต้นทุนลงไปได้มากถึง 50 % เมื่อเทียบกับการปกป้องแบบทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

[1] I.P. Kaminow et al., “ A wideband All-Optical WDM Network,” IEEE Journal on Selected Areas in Comunication, vol.14, pp. 780-799, 1996.

[2] O. Gerstel, G. Sasaki, “Quality of Protection (QoP): A Quantitative Unifying Paradigm to Protection Service Grades,” OticalComm 2001, Aug. 2001.

[3] L. Wuttisittikulkij and M.J. O’Mahony, “Use of Spare Wavelength for Traffic Restoration in Multi-Wavelength Transport Network,” in Proc. IEEE ICC’96, pp. 1778-1782, 1996.

[4] C. Bowonorntummarat and L. Wuttisitikulkij, “On the comparison of optical WDM mesh network protection strategies,” in Proc. IEEE MILCOM’2000, vol.2, pp. 886-891, Oct. 2000.

[5] ILOG CPLEX User’s manual. Avaliable:http://www.cplex.com

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย กอปเทพ ไชยเสน เกิดเมื่อวันที่ 8 มิถุนายน พ.ศ.2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย